

539 7213

๖๕๕๗๐

๗.๖

การศึกษาการกระจายของฟลักซ์นิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน
อเมริกัน-เบอร์ลีย์ขนาด 5 คูรี ในน้ำและพาราฟิน

ปริกฤษณิพนธ์

ของ

วิชุดา สุบรรณ

4-ก.ย. 2538

เสนอต่อมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิชาเอกฟิสิกส์

มีนาคม 2538

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

194465

การศึกษาการกระจายของฟลักซ์นิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน
อเมริกัน-เบอร์กลีเยม ขนาด 5 คูรี ในน้ำและพาราฟิน

บทคัดย่อ
ของ
วิชุดา สุบรรณ

เสนอต่อมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิชาเอกฟิสิกส์
มีนาคม 2538

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาการกระจายของฟลักซ์นิวตรอนเร็ว และฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัล รอบต้นกำเนิดนิวตรอนอเมรีเซียม-เบอริลเลียม ขนาด 5 คูรี ในตัวกลางน้ำและพาราฟิน ด้วยการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม และการทดลองด้วยวิธีนิวตรอนแอกติเวชัน โดยการอาบแผ่นอลูมิเนียม เพื่อวัดฟลักซ์นิวตรอนเร็ว และอาบแผ่นอินเดียม แผ่นดีสโพรเซียม เพื่อวัดฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัล ทั้งสองวิธีหาฟลักซ์นิวตรอนที่ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของต้นกำเนิดนิวตรอน 3.3 , 5 , 7 , 9 , 11 , 15 และ 21 เซนติเมตร สำหรับการทดลองที่ระยะดังกล่าว วัดฟลักซ์นิวตรอนในทิศทางมุม 0 , 45 , 90 , 180 , 225 และ 270 องศา กับแนวแกนของต้นกำเนิดนิวตรอน

จากการวิจัยพบว่า ค่าฟลักซ์นิวตรอนเร็วที่วัดได้จากการทดลองและทฤษฎีในตัวกลางน้ำที่ระยะ 3.3-9 เซนติเมตร มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง $(237.79 - 10.64) \times 10^3$ นิวตรอน/ตารางเซนติเมตร-วินาที และ $(124.52-0.65) \times 10^3$ นิวตรอน/ตารางเซนติเมตร-วินาที ตามลำดับ ในตัวกลางพาราฟินที่ระยะ 3.5 - 9 เซนติเมตร มีค่าเฉลี่ยจากการทดลองและทฤษฎีอยู่ในช่วง $(233.14 - 8.21) \times 10^3$ นิวตรอน/ตารางเซนติเมตร-วินาที และ $(87.33 - 0.64) \times 10^3$ นิวตรอน/ตารางเซนติเมตร-วินาที ตามลำดับ สำหรับค่าฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลที่ได้จากการทดลองและทฤษฎี ในตัวกลางน้ำที่ระยะ 3.3-21 เซนติเมตร มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง $(33.48-1.02) \times 10^3$ นิวตรอน/ตารางเซนติเมตร-วินาที และ $(139.98-1.69) \times 10^3$ นิวตรอน/ตารางเซนติเมตร-วินาที ตามลำดับ ในตัวกลางพาราฟินที่ระยะ 3.5-21 เซนติเมตร มีค่าเฉลี่ยจากการทดลองและทฤษฎีอยู่ในช่วง $(40.75-1.09) \times 10^3$ นิวตรอน/ตารางเซนติเมตร-วินาที และ $(891.72-0.16) \times 10^3$ นิวตรอน/ตารางเซนติเมตร-วินาที ตามลำดับ

สรุปได้ว่า ในตัวกลางน้ำและพาราฟิน ค่าฟลักซ์นิวตรอนเร็วที่วัดได้จากการทดลองสูงกว่าค่าที่คำนวณจากทฤษฎี สำหรับค่าฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในตัวกลางน้ำ ค่าจากการทดลองใกล้เคียงกับทฤษฎีเมื่อวัดที่ระยะห่างจากต้นกำเนิด 9 เซนติเมตรเป็นต้นไป ในตัวกลางพาราฟิน ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎีเฉพาะที่ระยะห่างจากต้นกำเนิด 9 - 15 เซนติเมตรเท่านั้น ที่ระยะห่างจากต้นกำเนิดเท่า ๆ กันพบว่า ความหนาแน่นของฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลทางด้านบน และด้านล่างของต้นกำเนิดนิวตรอนมีค่าน้อยกว่าด้านล่างอื่น ๆ

A STUDY ON NEUTRON FLUX DISTRIBUTION FROM A 5 CI AM-BE
NEUTRON SOURCE IN WATER AND PARAFFIN

AN ABSTRACT

BY

WICHUDA SURABAN

Presented in partial fulfillment of the requirements for the
Master of Science degree in Physics
at Srinakharinwirot University

March 1995

The purpose of this research is to study the distributions of fast neutron fluxes and thermal neutron fluxes surrounding 5 Ci Am-Be cylindrical neutron source in water and paraffin by using two-group diffusion theory and neutron activation analysis. Al foils are used for the determination of fast neutron fluxes while In foils and Dy foils are used for thermal neutron fluxes. Both fluxes are measured at 3.3 , 5 , 7 , 9 , 11 , 15 , 21 cm. from the center of the source at the angles of 0 , 45 , 90 , 180 , 225 , 270 degrees for each distances.

The results show that fast neutron fluxes in water at distances between 3.3-9 cm. , determined by experiment and theory are $(237.79-10.64) \times 10^3 \text{ n/cm}^2\text{s}$ and $(124.52-0.65) \times 10^3 \text{ n/cm}^2\text{s}$ and in paraffin are $(233.14-8.21) \times 10^3 \text{ n/cm}^2\text{s}$ and $(87.33-0.64) \times 10^3 \text{ n/cm}^2\text{s}$, respectively. Thermal neutron fluxes in water at distances between 3.3-21 cm., determined by experiment and theory are $(33.48-1.02) \times 10^3 \text{ n/cm}^2\text{s}$ and $(139.96-1.69) \times 10^3 \text{ n/cm}^2\text{s}$ and in paraffin are $(40.75-1.09) \times 10^3 \text{ n/cm}^2\text{s}$ and $(891.72-0.16) \times 10^3 \text{ n/cm}^2\text{s}$, respectively.

In summary, fast neutron fluxes in water and paraffin obtained from experiment are higher than those calculated from theory. In water , thermal neutron fluxes from experiment are approximately the same as those calculated from theory at distances larger than 9 cm., but in paraffin , thermal neutron fluxes from experiment are approximately the same as those from theory at distances between 9-15 cm. only. Thermal neutron flux densities above the top and below the neutron source are less than the corresponding values elsewhere at the same distances.

คณะกรรมการควบคุมและคณะกรรมการสอบ ได้พิจารณาปฏิญานินพนธ์ฉบับนี้แล้ว
เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตวิชา
เอกนิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒได้

คณะกรรมการควบคุม

.....ประธาน
(ผศ.สุรีย์ แขวงโสภา)
.....กรรมการ
(ผศ.จิตปราณี วีระพงษ์)
.....กรรมการ
(อ.บัญชา ศิลป์สกุลสุข)

คณะกรรมการสอบ

.....ประธาน
(ผศ.สุรีย์ แขวงโสภา)
.....กรรมการ
(ผศ.จิตปราณี วีระพงษ์)
.....กรรมการ
(อ.บัญชา ศิลป์สกุลสุข)
.....กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม
(ผศ.ปราโมทย์ จุลกัลป์)

บัณฑิตวิทยาลัยอนุมัติให้รับปฏิญานินพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิชาเอกนิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ดร.ศิรียา พูลสุวรรณ)

วันที่ 10 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2538

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยการได้รับความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรีย์
แขวงโสภา ประธานที่ปรึกษา ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา และตรวจแก้ไข ตลอดระยะ
ทำการวิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จิตปราวณี วีระพงษ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์
ปราโมทย์ จุลกัลป์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และแก้ไขปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์โสภา ศิลป์สกุลสุข ที่กรุณาให้คำแนะนำในการออกแบบอุปกรณ์
และเจ้าหน้าที่ของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติที่ได้อนุญาตและอำนวยความสะดวกในการวัดและเคลื่อนย้ายต้นกำเนิดรังสี
และช่วยเหลือทางด้านเอกสาร

ขอขอบคุณ คุณโกวิท บุญกาญจน์ และคุณวีระศักดิ์ ชุมภูวิเศษ ที่ช่วยเหลือในการ
สร้างอุปกรณ์ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ประสานมิตร ที่ให้ยืมอุปกรณ์ต่าง ๆ รวมทั้งเพื่อน ๆ ที่เป็นกำลังใจให้ตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่ และพี่ ๆ ที่เป็นผู้ส่งเสริมและเป็นกำลังใจในการ
ศึกษาของผู้วิจัย

วิชุดา สूरบรรณ

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
จุดมุ่งหมายของงานวิจัย	5
ขอบเขตของงานวิจัย	6
ความสำคัญของงานวิจัย	6
2 ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
ทฤษฎีการลดพลังงานของนิวตรอน	7
ทฤษฎีที่ใช้วัดผลกัมมันตภาพรังสี	12
3 อุปกรณ์และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	38
อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	38
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	41
4 การวิเคราะห์ข้อมูลและผลการทดลอง	52
5 สรุป อภิปราย และข้อเสนอแนะ	104
สรุปและอภิปรายผลการวิจัย	104
ข้อเสนอแนะ	107
บรรณานุกรม	109
ประวัติย่อผู้วิจัย	111

บัญชีตาราง

ตาราง		หน้า
1	การแบ่งนิวตรอนออกเป็นชนิดต่าง ๆ ตามช่วงพลังงาน	3
2	สมบัติด้านการกระเจิงของนิวคลีไอบางชนิด	10
3	กำลังทำให้ช้าและอัตราส่วนการหน่วงของสารบางชนิด	12
4	คุณสมบัติด้านการฟุ้งของนิวตรอนเทอร์มัลในตัวกลางที่ใช้ลดพลังงานนิวตรอน	18
5	คุณสมบัติของธาตุบางชนิดที่ใช้หาฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัล	22
6	แสดงคุณสมบัติของต้นกำเนิดนิวตรอน Am-Be ขนาด 5 คูรี	38
7	ต้นกำเนิดรังสีแกมมาผลิตเมื่อวันที่ 1 สิงหาคม พ.ศ. 2518	47
8	ค่าคงที่ต่าง ๆ ของธาตุอลูมิเนียม ธาตุอินเดียม และธาตุดีสโพรเซียม	48
9	กัมมันตภาพรังสีแกมมา ณ เวลาที่ทำการวัด (2 กรกฎาคม 2537)	52
10	อัตรากาหรณ์ของรังสีแกมมาที่ระยะติดหัววัด	53
11	ประสิทธิภาพของหัววัดรังสีแกมมาที่ระดับพลังงานต่าง ๆ	54
12	ฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในน้ำ ที่มุม 0° ที่พลังงานต่าง ๆ	64
13	ฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในพาราฟิน ที่มุม 0° ที่พลังงานต่าง ๆ	65
14	ฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในน้ำที่มุม 45° ที่พลังงานต่าง ๆ	66
15	ฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในพาราฟิน ที่มุม 45° ที่พลังงานต่าง ๆ	67
16	ฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในน้ำที่มุม 90° ที่พลังงานต่าง ๆ	68
17	ฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในพาราฟิน ที่มุม 90° ที่พลังงานต่าง ๆ	69
18	ฟลักซ์นิวตรอนอีพิเทอร์มัลในน้ำจากการวัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 1097.1 keV ที่มุมต่าง ๆ	70
19	ฟลักซ์นิวตรอนอีพิเทอร์มัลในน้ำจากการวัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 1293.4 keV ที่มุมต่าง ๆ	71
20	ฟลักซ์นิวตรอนอีพิเทอร์มัลในพาราฟิน จากการวัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 1097.1 keV ที่มุมต่าง ๆ	72

21	ฟลักซ์นิวตรอนอีพิเทอร์มัลในพาราฟิน จากการวัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 1293.4 keV ที่มุมต่าง ๆ	73
22	ฟลักซ์นิวตรอนเร็วในน้ำที่ระยะต่าง ๆ ที่มุม 0°	76
23	ฟลักซ์นิวตรอนเร็วในพาราฟินที่ระยะต่าง ๆ ที่มุม 0°	77
24	ฟลักซ์นิวตรอนเร็วในน้ำที่ระยะต่าง ๆ ที่มุม 45°	78
25	ฟลักซ์นิวตรอนเร็วในพาราฟินที่ระยะต่าง ๆ ที่มุม 45°	79
26	ฟลักซ์นิวตรอนเร็วในน้ำที่ระยะต่าง ๆ ที่มุม 90°	80
27	ฟลักซ์นิวตรอนเร็วในพาราฟินที่ระยะต่าง ๆ ที่มุม 90°	81
28	ฟลักซ์นิวตรอนเร็วในน้ำที่ระยะต่าง ๆ โดยทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม	83
29	ฟลักซ์นิวตรอนเร็วในพาราฟินที่ระยะต่าง ๆ โดยทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม ..	86
30	ฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในน้ำที่ระยะต่าง ๆ โดยทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม ..	87
31	ฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในพาราฟินที่ระยะต่าง ๆ โดยทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม	88

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง α กับ $N\sigma_{ab}(kT)d$	19
2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาคตัดขวางในการดูดกลืนนิวตรอนของธาตุอินเดียม และธาตุแคดเมียมกับพลังงานของนิวตรอน	20
3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f_{cd} กับน้ำหนักต่อพื้นที่ ของแผ่นอินเดียม	21
4 แสดงส่วนประกอบของระบบการวัดสเปกตรัมของรังสีแกมมา	26
5 แผนภาพการทำงานของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง	28
6 ผลิต์นิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอนปฏิกิริยา D+T และ D+D	35
7 การกระจายของผลิต์นิวตรอนเทอร์มัลจากต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนีย-252	36
8 การกระจายของผลิต์นิวตรอนเร็วจากต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนีย-252	37
9 รายละเอียดของต้นกำเนิดนิวตรอน Am-Be ขนาด 5 คูรี	39
10 สเปกตรัมของต้นกำเนิดนิวตรอน Am-Be	39
11 อุปกรณ์ของระบบการวัดสเปกตรัมของรังสีแกมมา	40
12 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้แขวนธาตุ และแขวนต้นกำเนิดนิวตรอน	42
13 อุปกรณ์ที่ใช้แขวนธาตุ และแขวนต้นกำเนิดนิวตรอนเมื่อสร้างเสร็จแล้ว	43
14 อุปกรณ์ในการอาบนิวตรอนในน้ำ	43
15 ที่แขวนธาตุที่จะอาบนิวตรอนในน้ำ	44
16 ที่วางต้นกำเนิดนิวตรอนในพาราฟิน	45
17 ที่วางธาตุที่อาบนิวตรอนในพาราฟิน	45
18 ชุดการอาบนิวตรอนในพาราฟิน	46
19 ตำแหน่งที่วัดผลิต์นิวตรอนเมื่อหมุนต้นกำเนิดนิวตรอนเป็นมุมต่าง ๆ	49
20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของหัววัด กับพลังงานของรังสีแกมมา ...	55
21 การกระจายของผลิต์นิวตรอนเร็วในน้ำ ที่มุม 0° โดยนิวตรอนเอกติเวชันและ ทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม	89

22 การกระจายของฟลักซ์นิวตรอนเร็วในพาราฟิน ที่มุม 0° โดยวิธีนิวตรอนเอกติเวชันและ ทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม	90
23 การกระจายของฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในน้ำ ที่มุม 0° โดยวิธีนิวตรอนเอกติเวชันและ ทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม	91
24 การกระจายของฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในพาราฟิน ที่มุม 0° โดยวิธีนิวตรอนเอกติเวชัน และทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม	92
25 การกระจายของฟลักซ์นิวตรอนเร็วในน้ำและพาราฟิน ที่มุม 0° โดยการอ่านแผ่น อลูมิเนียม วัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 844 keV	93
26 การกระจายของฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในน้ำและพาราฟิน ที่มุม 0° โดยการอ่านแผ่น อินเดียม วัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 1293.4 keV	94
27 ฟลักซ์นิวตรอนเร็วในน้ำที่มุมต่าง ๆ จากปฏิกิริยา (n,p)	96
28 ฟลักซ์นิวตรอนเร็วในพาราฟินที่มุมต่าง ๆ จากปฏิกิริยา (n,p)	97
29 ฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในน้ำที่มุมต่าง ๆ จากการอ่านแผ่นอินเดียม วัดรังสีแกมมา ที่พลังงาน 1293.4 keV	98
30 ฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในพาราฟินที่มุมต่าง ๆ จากการอ่านแผ่นอินเดียม วัดรังสีแกมมา ที่พลังงาน 1293.4 keV	99
31 การกระจายของฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในน้ำ ที่มุม $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ จากแผ่น In วัดรังสี แกมมาที่พลังงาน 1293.4 keV และแผ่น Dy วัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 361.7 keV	100
32 การกระจายของฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในพาราฟินที่มุม $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ จากแผ่น In วัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 1293.4 keV และแผ่น Dy วัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 361.7 keV	101
33 การกระจายของฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลรอบต้นกำเนิดในน้ำ ที่ระยะ 3.3 , 5 และ 15 เซนติเมตร จากแผ่น In วัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 1293.4 keV	102
34 การกระจายของฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลรอบต้นกำเนิดในพาราฟิน ที่ระยะ 3.5 , 5 และ 15 เซนติเมตร จากแผ่น In วัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 1293.4 keV	103

บทที่ 1

บทนำ

โบเช (Bothe) และ เบคเกอร์ (Becker) ยิงอนุภาคแอลฟา (Alpha) ไปกระทบธาตุเบา ๆ บางธาตุ แล้วเกิดรังสีที่มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูง ซึ่งเขาคิดว่าเป็นรังสีแกมมา (Gamma Ray)

ต่อมาในปี ค.ศ.1932 เจมส์ แชดวิก (James Chadwick) ได้อาศัยข้อมูลจากการทดลองของโบเชและเบคเกอร์ ประกอบกับข้อมูลใหม่ที่ได้จากการทดลองของเขาเอง ได้แสดงให้เห็นว่ารังสีที่โบเช และ เบคเกอร์พบเป็นอนุภาคนิวตรอน ซึ่งได้จากการยิงธาตุเบอริลเลียม (Beryllium) ด้วยอนุภาคแอลฟา ปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังสมการ



อนุภาคนิวตรอนมีประจุเป็นกลาง มีความเร็วสูง ไม่แสดงอำนาจทางไฟฟ้า มีอำนาจทะลุทะลวงสูงกว่ารังสีแกมมา มีมวลนิ่ง (rest mass) ใกล้เคียงกับโปรตอนคือ 1.008664904 หน่วยมวลอะตอม (Wong. 1990 : unpagged)

ต้นกำเนิดนิวตรอน (Neutron Source) (Knoll. 1962 : 26-37)

ต้นกำเนิดนิวตรอนคือแหล่งที่ผลิตนิวตรอน จากปฏิกิริยาต่าง ๆ เหล่านี้

1. จากปฏิกิริยา (α, n) เกิดจากการยิงอนุภาคแอลฟาจากการสลายตัวของไอโซโทปของธาตุหนัก เช่น Po-210 , Ra-226 , Pu-239 หรือ Am-241 เข้าชนนิวเคลียสของธาตุเบา เช่น B-10 , C-12 หรือ Be-9 ดังตัวอย่างสมการการพบนิวตรอนของแชดวิก

พลังงานจากอนุภาคแอลฟาที่ทำให้นิวตรอนหลุดจากนิวเคลียสของธาตุเบา อยู่ในช่วง 4.8 MeV ถึง 7.7 MeV พลังงานของนิวตรอนที่เกิดขึ้นมีค่าระหว่าง 1-13 MeV ตัวอย่างของต้นกำเนิดชนิดนี้คือ Am-Be , Pu-Be , Ra-Be , Po-Be

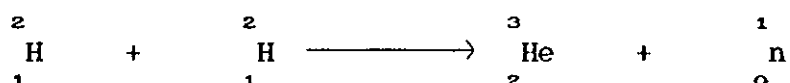
2. จากปฏิกิริยา (γ, n) เป็นแหล่งกำเนิดของโฟโตนิวตรอน (photoneutron) เกิดจากรังสีแกมมาชนนิวเคลียสของดิวเทอเรียม (Deuterium) นิวตรอนที่ได้มีพลังงานเดียว (monoenergetic neutron) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นไปตามสมการ



3. จากปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยตัวเอง (spontaneous fission) เป็นต้นกำเนิดที่ให้นิวตรอนออกมาโดยการแตกตัวด้วยตัวเองของธาตุบางชนิด เช่น Cf-252 เป็นต้นกำเนิดขนาดเล็ก มีครึ่งชีวิต 2.65 ปี มีอัตราการให้นิวตรอนสูง โดยปริมาณของ Cf-252 1 กรัมจะแตกตัวให้นิวตรอน 3×10^{12} นิวตรอน/วินาที

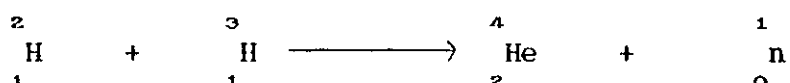
4. จากเครื่องกำเนิดนิวตรอน (neutron generator) เกิดจากการเร่งอนุภาคโปรตอน (Proton) หรืออนุภาคดิวเทอรอน เข้าที่นิวเคลียสของธาตุเบา ที่นิยมใช้กันมากคือ

4.1 ใช้ปฏิกิริยา D-D ดังสมการ



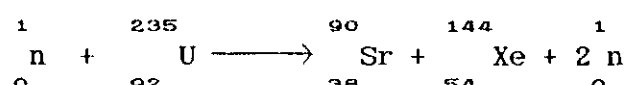
นิวตรอนจากปฏิกิริยานี้มีพลังงานประมาณ 3 MeV

4.2 ใช้ปฏิกิริยา D-T ดังสมการ



นิวตรอนที่ได้มีพลังงานประมาณ 14 MeV

5. จากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (nuclear reactor) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ได้จากการแบ่งแยกตัว (fission) ของนิวเคลียสของไอโซโทปของธาตุบางชนิด โดยให้นิวตรอนเข้าชนไอโซโทปเหล่านั้น แล้วได้นิวเคลียสของธาตุใหม่และนิวตรอนออกมา ซึ่งนิวตรอนที่เกิดขึ้นใหม่นี้สามารถไปทำให้นิวเคลียสของไอโซโทปเกิดการแบ่งแยกตัวได้อีก เกิดเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction) ต้นกำเนิดชนิดนี้ให้นิวตรอนที่มีฟลักซ์สูงประมาณ $10^{10} - 10^{13}$ นิวตรอน/ตารางเซนติเมตร-วินาที ตัวอย่างของปฏิกิริยาคือ



ชนิดของนิวตรอน

นิวตรอนแบ่งออกเป็นชนิดต่าง ๆ ตามพลังงานของนิวตรอนดังแสดงในตาราง 1

ตาราง 1 การแบ่งนิวตรอนออกเป็นชนิดต่าง ๆ ตามช่วงพลังงาน

ชนิดของนิวตรอน	พลังงาน (E)
นิวตรอนช้า (Slow Neutron)	$0 \leq E < 1 \text{ keV}$
- นิวตรอนเย็น (Cold Neutron)	$0.001 \text{ eV} \leq E < 0.025 \text{ eV}$
- นิวตรอนเทอร์มัล (Thermal Neutron)	0.025 eV
- นิวตรอนอีพิเทอร์มัล (Epithermal Neutron)	$1 \text{ eV} \leq E < 1 \text{ keV}$
นิวตรอนพลังงานปานกลาง (Intermediate Neutron)	$1 \text{ keV} \leq E < 0.5 \text{ MeV}$
นิวตรอนเร็ว (Fast Neutron)	$0.5 \text{ MeV} \leq E < 10 \text{ MeV}$
นิวตรอนพลังงานสูง (High-Energy Neutron)	$E \geq 10 \text{ MeV}$

(Anderson. 1984 : 166)

นิวตรอนจากต้นกำเนิดส่วนมากเป็นนิวตรอนเร็ว จะลดพลังงานให้กลายเป็นนิวตรอนช้าได้ โดยการให้นิวตรอนทำปฏิกิริยากับนิวเคลียสของสาร

ปฏิกิริยาระหว่างนิวตรอนกับสสาร (Reaction of Neutron With Matter)

เนื่องจากนิวตรอนมีประจุเป็นกลาง จึงไม่ทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนในอะตอมของสาร ไม่ต้องการข้ามผ่านความต่างศักย์ขวางกั้นคูลอมบ์ (coulomb barrier voltage) ดังนั้น นิวตรอนจึงเข้าทำปฏิกิริยากับนิวเคลียสได้ง่าย ปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่นิวตรอนกระทำกับนิวเคลียสของ

สสารมีดังนี้

1. การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (elastic scattering) เป็นปฏิกิริยาที่นิวตรอนเข้าชนนิวเคลียสของสสาร โดยหลังจากการชนแล้วนิวเคลียสยังอยู่ในสถานะพื้น (ground state) ส่วนนิวตรอนที่วิ่งเข้าชนจะกระเจิง (scatter) ออกมาโดยเปลี่ยนทิศทางและความเร็ว ลักษณะการชนมี 2 แบบคือ

1.1 นิวตรอนชนกับนิวเคลียสแล้วนิวตรอนถูกจับไว้ในนิวเคลียสนั้นเกิดเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ (compound nucleus) แล้วปล่อยนิวตรอนอีกตัวหนึ่งออกมาภายหลัง โดยที่พลังงานและโมเมนตัมก่อนชนและหลังชนของระบบคงที่

1.2 นิวตรอนชนกับนิวเคลียสแล้วนิวตรอนมีการกระเจิง โดยที่พลังงานและโมเมนตัมก่อนชนและหลังชนของระบบคงที่

2. การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering) เป็นปฏิกิริยาที่นิวตรอนชนกับนิวเคลียสแล้วรวมกันเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ จากนั้นนิวตรอนตัวหนึ่งถูกปล่อยออกมาโดยนิวเคลียสอยู่ในสถานะกระตุ้น (excited state) เมื่อนิวเคลียสดังกล่าวลดพลังงานลงที่สถานะพื้นฐาน จะปล่อยรังสีแกมมาออกมา พลังงานจลน์รวมก่อนชนและหลังชนของระบบมีค่าไม่เท่ากัน เพราะพลังงานจลน์หลังการชนส่วนหนึ่งเปลี่ยนไปในรูปของการปลดปล่อยรังสีแกมมา

3. ปฏิกิริยาการจับนิวตรอน (neutron capture reaction) เกิดจากการที่นิวตรอนวิ่งเข้าชนนิวเคลียสแล้วถูกนิวเคลียสจับไว้ เกิดเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบมีระดับพลังงานสูงกว่าสถานะพื้นฐาน จึงปล่อยรังสีออกมาในรูปของรังสีแกมมา ตัวอย่างปฏิกิริยาเช่น $^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$, $^{27}\text{Al}(n, \gamma)^{28}\text{Al}$

4. ปฏิกิริยาการแบ่งแยกตัว (fission reaction) เป็นปฏิกิริยาที่นิวตรอนถูกจับโดยนิวเคลียสของธาตุหนักบางชนิด แล้วแบ่งแยกตัวออกเป็น 2 ส่วน พร้อมกับให้นิวตรอนออกมา 2 - 3 ตัว ไอโซโทปที่เกิดปฏิกิริยาการแบ่งแยกตัวกับนิวตรอนเทอร์มัลได้แก่ U-235 , Pu-239 , U-233 และ ไอโซโทปที่เกิดปฏิกิริยาการแบ่งแยกตัวกับนิวตรอนเร็วได้แก่ U-238 , Th-232

5. ปฏิกิริยาการปล่อยอนุภาคที่มีประจุ (charged particle emission reaction) เป็นปฏิกิริยาที่นิวตรอนชนกับนิวเคลียสของธาตุบางชนิดเกิดเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ จากนั้นจึงปล่อยอนุภาคที่มีประจุออกมาเช่น อนุภาคแอลฟา หรือ โปรตอน ซึ่งจะเกิดอนุภาคที่มีประจุได้ก็ต่อเมื่อในการชนกับนิวตรอนมีพลังงานเพียงพอที่จะเอาชนะแรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) และศักย์ของ쿨อมบ์ ปฏิกิริยาประเภทนี้มักเกิดกับนิวตรอนที่มีพลังงานสูงประมาณ 1 MeV หรือ

มากกว่า ตัวอย่างปฏิกิริยาเช่น $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$, $^7\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$

6. ปฏิกิริยาการผลิตนิวตรอน (neutron producing reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากนิวตรอนพลังงานสูงเข้าชนกับนิวเคลียสแล้วดิงนิวตรอนออกมา เช่นปฏิกิริยา $(n,2n)$, $(n,3n)$, (n,np)

นับตั้งแต่มีการค้นพบนิวตรอนเป็นต้นมา ได้มีการนำความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติของนิวตรอนมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยด้านต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง ซึ่งในการนำนิวตรอนมาใช้ในการวิจัยนั้นจำเป็นต้องทราบค่าฟลักซ์นิวตรอนที่ระยะต่าง ๆ รอบต้นกำเนิด เพื่อเป็นข้อมูลที่จะใช้ในการวิจัยและการป้องกันอันตรายจากนิวตรอน ดังนั้นงานวิจัยนี้จะเป็นการออกแบบและสร้างชุดการทดลองเพื่อศึกษาการกระจายของฟลักซ์นิวตรอนเร็ว (fast neutron flux) และฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัล (thermal neutron flux) รอบต้นกำเนิดนิวตรอนชนิด อเมอริเซียม-เบอริลเลียม (Am-Be) ขนาด 5 คูรี ซึ่งมีอยู่ที่ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร เพื่อเป็นประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านอื่นต่อไป

จุดมุ่งหมายของงานวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างชุดการทดลองวัดฟลักซ์นิวตรอนรอบต้นกำเนิดนิวตรอนที่ระยะต่าง ๆ ในตัวกลางน้ำและพาราฟิน
2. เพื่อหาฟลักซ์นิวตรอนเร็วและนิวตรอนเทอร์มัลรอบต้นกำเนิดในแนวตั้ง (vertical) ในแนวนอน (horizontal) และในแนวมุม 45 องศา โดยวิธีนิวตรอนเอกติเวชันและคำนวณจากทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่มที่ระยะต่าง ๆ จากต้นกำเนิดนิวตรอนโดยใช้น้ำและพาราฟินเป็นตัวลดพลังงานนิวตรอน
3. หาฟลักซ์นิวตรอนอีพิเทอร์มัลที่ระยะต่าง ๆ
4. ศึกษาและเปรียบเทียบค่าฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัล และฟลักซ์นิวตรอนเร็ว ที่ได้จากวิธีนิวตรอนเอกติเวชันและทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม
5. ศึกษาและเปรียบเทียบการกระจายของฟลักซ์นิวตรอนเร็ว ฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัล ในน้ำและพาราฟิน

ขอบเขตของงานวิจัย

1. งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างชุดการทดลองเพื่อใช้ศึกษาการกระจายของฟลักซ์นิวตรอนเร็ว และฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลที่ระยะต่าง ๆ ในแนวตั้ง ในแนวนอน และในแนวมุม 45 องศา ของต้นกำเนิดโดยวิธีนิวตรอนเอกติเวชัน
2. หาฟลักซ์นิวตรอนเร็วและฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลจากการแก้สมการการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม
3. ต้นกำเนิดนิวตรอนที่ใช้คือ อเมริเซียม-เบอริลเลียม ขนาด 5 คูรี ให้นิวตรอนออกมา 1.1×10^7 นิวตรอน/วินาที พลังงานนิวตรอนโดยเฉลี่ย 4.46 MeV
4. วัสดุที่ใช้ลดพลังงานนิวตรอนคือ น้ำและพาราฟิน
5. ระยะที่ทำการวัดฟลักซ์นิวตรอนคือ ระยะ 3.3 , 5 , 7, 9 , 11 , 15 และ 21 เซนติเมตร จากจุดศูนย์กลางของต้นกำเนิด ทั้งในแนวตั้ง ในแนวนอน และแนวมุม 45 องศา
6. ใช้แผ่นอลูมิเนียมหาฟลักซ์นิวตรอนเร็ว และใช้แผ่นอินเดียม แผ่นดีสโพรเซียม แผ่นแคดเมียม หาฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัล
7. หัววัดรังสีแกมมาที่ใช้คือหัววัดสารกึ่งตัวนำชนิด HPGe

ความสำคัญของการวิจัย

1. ทำให้ทราบการกระจายของฟลักซ์นิวตรอนเร็วและฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในตัวกลางน้ำและพาราฟิน จากต้นกำเนิด อเมริเซียม-เบอริลเลียม ขนาด 5 คูรี จากอุปกรณ์ที่ออกแบบและสร้างขึ้น
2. สามารถเปรียบเทียบการกระจายของนิวตรอนเร็วและนิวตรอนเทอร์มัล ที่ได้จากการทดลองและทฤษฎีได้
3. สามารถนำอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นและข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ หรือเป็นข้อมูลในการนำต้นกำเนิดนิวตรอน อเมริเซียม-เบอริลเลียม ไปใช้ในงานวิจัยด้านอื่น ๆ อีกต่อไป
4. นำเทคนิคและวิธีการต่าง ๆ จากงานวิจัยครั้งนี้ไปใช้ในการศึกษาในระดับอุดมศึกษาในสาขาที่เกี่ยวข้องกับนิวเคลียร์ได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎี

ทฤษฎีที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ

1. ทฤษฎีการลดพลังงานนิวตรอน
2. ทฤษฎีที่ใช้วัดฟลักซ์นิวตรอน

ทฤษฎีการลดพลังงานนิวตรอน (Kaplan. 1979 : 565-573)

นิวตรอนจากต้นกำเนิดเป็นนิวตรอนเร็ว เมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางจะสูญเสียพลังงานให้กับอะตอมของตัวกลางโดยการชนแต่ละครั้ง จำนวนพลังงานที่นิวตรอนสูญเสียต่อการชน 1 ครั้งหาได้จากการคำนวณในกลศาสตร์ดั้งเดิม ซึ่งอาศัยกฎการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัมเป็นหลัก

พิจารณากระบวนการการกระเจิงแบบยืดหยุ่นระหว่างนิวตรอน และนิวเคลียสของอะตอมจะได้ว่า

$$\frac{E}{E_0} = \frac{A^2 + 1 + 2A \cos \theta}{(A+1)^2} \quad (1)$$

โดยที่ E_0 คือ พลังงานนิวตรอนก่อนชน

E คือ พลังงานนิวตรอนหลังชน

A คือ เลขมวล (mass number) ของตัวกลางที่นิวตรอนวิ่งเข้าชน

θ คือ มุมกระเจิงของนิวตรอนในระบบศูนย์กลางมวล (center of mass)

จากสมการ (1) จะเห็นว่านิวตรอนสูญเสียพลังงานมากที่สุดเมื่อชนอย่างจัง (head on collision) คือมุม $\theta = 180$ องศา ดังนั้น

$$\frac{E_{min}}{E_0} = \left(\frac{A-1}{A+1} \right)^2 \quad (2)$$

ในกรณีที่นิวตรอนชนกับกราไฟต์ (Graphite) ซึ่งมีเลขมวลเท่ากับ 12 จะได้ $E_{min}/E_0 = 0.72$ หรือกล่าวได้ว่านิวตรอนสูญเสียพลังงานไปมากที่สุดต่อการชน 1 ครั้งเป็น 28 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานเดิม กรณีของไฮโดรเจนมีเลขมวลเท่ากับ 1 ถ้าชนอย่างจังนิวตรอนจะหยุดทันที กรณีของยูเรเนียมมีเลขมวลเท่ากับ 238 ถ้าชนอย่างจัง นิวตรอนจะลดพลังงานลงได้เพียง 2 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าเมื่อนิวตรอนชนนิวเคลียสหนักพลังงานหลังการชนแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ถ้านิวตรอนชนนิวเคลียสเบา ในการชนแต่ละครั้งพลังงานจะลดลงจนกระทั่งมีพลังงานเฉลี่ยเท่ากับพลังงานจลน์เฉลี่ยของตัวกลาง

ในการที่นิวตรอนชนกับนิวเคลียสของตัวกลางแต่ละครั้งอาจไม่ใช่เป็นการชนอย่างจังเสมอ บางครั้งจะทำมุมต่าง ๆ กัน พลังงานที่สูญเสียไปในการชนแต่ละครั้งไม่เท่ากัน ดังนั้นจะพิจารณาพลังงานเฉลี่ยที่สูญเสียไปในการชน 1 ครั้ง

ให้ ξ คือค่าเฉลี่ยของพลังงานของนิวตรอน ที่สูญเสียไปในการชน 1 ครั้งในรูปลอการิทึมธรรมชาติ (natural logarithm) นั่นคือ

$$\begin{aligned}\xi &= \overline{\ln E_0 - \ln E} \\ &= \overline{\ln \frac{E_0}{E}}\end{aligned}\quad (3)$$

เนื่องจาก $\frac{E_0}{E}$ อยู่ในรูปของ θ และความน่าจะเป็นทุกค่าของ $\cos\theta$ มีค่าตั้งแต่ -1 ถึง 1 (Glasstone. 1963 : 132) ดังนั้นจะได้

$$\xi = \frac{\int_{-1}^1 \ln\left(\frac{E_0}{E}\right) d(\cos\theta)}{\int_{-1}^1 d(\cos\theta)}\quad (4)$$

$$= 1 - \frac{(A-1)^2}{2A} \ln\left(\frac{A+1}{A-1}\right)\quad (5)$$

ในกรณีที่ $A > 10$ จะได้

$$\xi \simeq \frac{2}{A + (2/3)} \quad (6)$$

ถ้าทราบค่า ξ สามารถคำนวณหาจำนวนครั้งของการชนโดยเฉลี่ยเพื่อลดพลังงานนิวตรอนลงเท่าที่ต้องการได้จากสมการ

$$\begin{array}{c} \text{จำนวนครั้งของการชน} \\ E_1 \longrightarrow E_2 \end{array} = \frac{\ln(E_1/E_2)}{\xi} \quad (7)$$

โดยที่ E_1 คือ พลังงานของนิวตรอนก่อนชน
 E_2 คือ พลังงานของนิวตรอนหลังชน

ในกรณีที่ตัวกลางเป็นสารประกอบ ค่า ξ จะเป็นค่าเฉลี่ยหาได้จาก (Glasstone. 1963:134)

$$\xi = \frac{\sigma_{s1}\xi_1 + \sigma_{s2}\xi_2 + \dots + \sigma_{sn}\xi_n}{\sigma_{s1} + \sigma_{s2} + \dots + \sigma_{sn}} \quad (8)$$

โดยที่ n คือ จำนวนธาตุที่อยู่ในสารประกอบ
 σ_{sn} คือ ภาคตัดขวางจุลภาคในการกระเจิง (microscopic scattering cross section) ของนิวตรอนในการชนธาตุที่ n

ตาราง 2 สมบัติด้านการกระเจิงของนิวคลีไอบางชนิด

ธาตุ	เลขมวล	ξ	จำนวนการชน
ไฮโดรเจน	1	1.00	18
ดิวเทอเรียม	2	0.725	25
ฮีเลียม	4	0.425	43
ลิเทียม	7	0.268	67
เบอริลเลียม	9	0.208	87
คาร์บอน	12	0.158	114
ออกซิเจน	16	0.120	150
ยูเรเนียม	238	0.0084	2150

(Kaplan. 1962 : 572)

จำนวนการชนในตาราง 2 เป็นจำนวนครั้งที่นิวตรอนชนกับธาตุแล้วพลังงานลดลงจาก 2 MeV เหลือ 0.025 eV

แม้ว่าค่า ξ เป็นปริมาณที่ใช้วัดความสามารถในการลดพลังงานของนิวตรอนของตัวกลางได้ก็ตาม แต่ไฮโดรเจนมิใช่สารลดพลังงานที่ดีที่สุดเพราะไฮโดรเจนมีความหนาแน่นต่ำทำให้การชนระหว่างนิวตรอนกับไฮโดรเจนเกิดได้น้อยครั้ง ดังนั้นการพิจารณาการลดพลังงานนิวตรอนเนื่องจากการชนกับสารต่าง ๆ ต้องพิจารณาจำนวนอะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรของสารที่ใช้ลดพลังงานด้วย นอกจากนี้ในการพิจารณาคุณสมบัติของสารลดพลังงานต้องพิจารณาความน่าจะเป็นในการกระเจิงและการดูดกลืนนิวตรอนของสารนั้น ซึ่งพิจารณาได้จากปริมาณ 2 อย่าง คือ

1. กำลังทำให้ช้าลง (Slowing - Down Power) คือค่าที่แสดงความสามารถของสารในการลดพลังงานของนิวตรอน เมื่อนิวตรอนเคลื่อนที่ผ่านสารได้ระยะทาง 1 เซนติเมตร มีหน่วยเป็น เซนติเมตร⁻¹ โดยที่

$$\begin{aligned}
 \text{กำลังทำให้ช้า} &= \xi \Sigma_s = \xi N \sigma_s \\
 &= \frac{N_0 \rho \xi \sigma_s}{A} \quad (9)
 \end{aligned}$$

- เมื่อ N คือจำนวนอะตอม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ของธาตุในสารประกอบ
 ρ คือความหนาแน่นของสาร มีหน่วยเป็น กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
 N_0 คือเลขอะโวกาโดร มีค่าเท่ากับ 6.02×10^{23}
 Σ_s คือภาคตัดขวางมหภาคในการกระเจิง (macroscopic scattering cross section)
 σ_s คือภาคตัดขวางจุลภาคในการกระเจิง
 A คือน้ำหนักอะตอม (atomic weight) ของธาตุในสารประกอบ

2. อัตราส่วนการหน่วง (Moderating Ratio) เป็นค่าแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังทำให้ช้ากับค่าภาคตัดขวางมหภาคในการดูดกลืน หรือเป็นอัตราส่วนที่แสดงความสามารถในการกระเจิงกับการการดูดกลืนนิวตรอนของสารนั่นเอง สารลดพลังงานที่ดีต้องมีค่าภาคตัดขวางในการดูดกลืนน้อย ไม่เช่นนั้นแล้วนิวตรอนจะถูกดูดกลืนทำให้ฟลักซ์นิวตรอนลดน้อยลง อัตราส่วนการหน่วงหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned}
 \text{อัตราส่วนการหน่วง} &= \frac{\xi \Sigma_s}{\Sigma_a} \\
 &= \frac{\xi \sigma_s}{\sigma_a} \quad (10)
 \end{aligned}$$

- โดยที่ Σ_a คือค่าภาคตัดขวางมหภาคในการดูดกลืน (macroscopic absorption cross section)
 σ_a คือค่าภาคตัดขวางจุลภาคในการดูดกลืน (microscopic absorption cross section)

ตาราง 3 กำลังทำให้ร้อนและอัตราส่วนการท่วงของสารบางชนิด

สาร	กำลังทำให้ร้อน(cm^{-1})	อัตราส่วนการท่วง
น้ำ	1.53	72
ดีวเทอเรียม	0.370	12,000
เบอริลเลียม	0.176	159
กราไฟต์	0.064	170

(Kaplan. 1962 : 573)

จากตารางที่ 3 ในบรรดาสารลดพลังงานทั้ง 4 ชนิด ดีวเทอเรียมเป็นสารลดพลังงานที่ต่ำสุดและมีราคาแพงและหายาก ส่วนน้ำเป็นสารลดพลังงานที่ต่ำที่สุดแต่ราคาถูกหาง่าย

สารอีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจใช้เป็นสารลดพลังงานของนิวตรอนคือพาราฟิน (Paraffin) ซึ่งเป็นสารประกอบที่เกิดจากธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจน โดยมีสูตรทั่วไปเป็น $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ พาราฟินเป็นสารลดพลังงานของนิวตรอนที่ดีกว่าน้ำ

สำหรับในงานวิจัยนี้จะใช้น้ำและพาราฟิน ($\text{C}_{22}\text{H}_{46}$) เป็นสารลดพลังงานของนิวตรอน

ทฤษฎีที่ใช้วัดฟลักซ์นิวตรอน

ฟลักซ์นิวตรอนคือจำนวนนิวตรอนที่เคลื่อนที่ตกกระทบพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตรในเวลา 1 วินาที การหาฟลักซ์นิวตรอนทำได้หลายวิธี สำหรับในที่นี้เป็น การหาฟลักซ์นิวตรอนที่กระจายรอบ ๆ ต้นกำเนิดโดยการทดลองและการคำนวณทางทฤษฎี ดังนี้

1. การทดลองโดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน (Neutron Activation)
2. การคำนวณจากทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม (Two Group Diffusion

Theory)

การหาฟลักซ์นิวตรอนโดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน (Knoll. 1979 : 765-771)

กระทำโดยนำธาตุที่มีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ (foil) วางไว้ที่ตำแหน่งที่ต้องการหาฟลักซ์นิวตรอน แล้วอบด้วยนิวตรอนในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งนิวเคลียสของธาตุจะถูกเหนี่ยวนำด้วยนิวตรอนกลายเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี (radioisotope) ซึ่งจะสลายให้รังสีแกมมาออกมา จากนั้นจึงนำธาตุที่อบนิวตรอนมาวัดหาความกัมมันตภาพ (activity) ที่เกิดขึ้น

ถ้ากำหนดให้	ϕ	คือฟลักซ์นิวตรอนที่ทุกพลังงาน
	$\phi(E)$	คือฟลักซ์นิวตรอนที่พลังงาน E
	$\sigma_u(E)$	คือภาคตัดขวางจุลภาคของการดูดกลืนที่พลังงาน E
	σ_u	คือค่าเฉลี่ยของภาคตัดขวางจุลภาคของการดูดกลืน
	N	คือจำนวนอะตอมของธาตุที่อบนิวตรอน

เมื่อนำธาตุไปอบนิวตรอนจะเกิดปฏิกิริยาการดูดกลืน โดยที่

$$\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยาดูดกลืนทุกพลังงาน} = N \int \phi(E) \sigma_u(E) dE \quad (11)$$

$$\text{เนื่องจาก} \quad \phi = \int \phi(E) dE \quad (12)$$

$$\text{และ} \quad \sigma_u = \frac{\int \phi(E) \sigma_u(E) dE}{\int \phi(E) dE} \quad (13)$$

$$\text{หรือ} \quad \phi \sigma_u = \int \phi(E) \sigma_u(E) dE \quad (14)$$

ดังนั้นสมการ (11) จะได้ว่า

$$\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยาดูดกลืนทุกพลังงาน} = N \sigma_u \phi \quad (15)$$

เมื่ออบนิวตรอนเกิดไอโซโทปกัมมันตรังสี สลายให้รังสีแกมมา โดย

$$\text{อัตราการสลาย} = \lambda N^* \quad (16)$$

โดยที่ λ คือค่าคงที่ของการสลายตัว (decay constant) มีหน่วยเป็น วินาที⁻¹

N^* คือจำนวนอะตอมของไอโซโทปกัมมันตรังสี

ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของไอโซโทปกัมมันตรังสีเมื่ออาบนิวตรอนเป็นเวลา T เท่ากับ

$$\frac{dN^*}{dT} = N\sigma_{\alpha}\phi - \lambda N^* \quad (17)$$

อินทิเกรตสมการ (17) โดยกำหนดว่าที่เวลาเริ่มต้นอาบนิวตรอน $T = 0$ จำนวนอะตอมของไอโซโทปกัมมันตรังสี $N^* = 0$ จะได้กัมมันตภาพที่เวลา T เกิดขึ้นเท่ากับ

$$A_0(T) = \lambda N^* = N\sigma_{\alpha}\phi(1-e^{-\lambda T}) \quad (18)$$

เมื่ออาบรังสีเป็นเวลา T แล้วหยุดอาบ หลังจากนั้นปล่อยให้สลายตัวเป็นเวลา t กัมมันตภาพมีค่าลดลงดังสมการ

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad (19)$$

ถ้า t_1 เป็นช่วงเวลาดังแต่หยุดอาบนิวตรอนจนถึงเวลาเริ่มวัดรังสี

t_2 เป็นช่วงเวลาดังแต่หยุดอาบนิวตรอนจนถึงเวลาสิ้นสุดการวัดรังสี

ดังนั้นกัมมันตภาพของรังสีแกมมาในช่วงเวลา t_1 ถึง t_2 มีค่าเท่ากับ $A(t_1, t_2)$ โดยที่

$$\begin{aligned} A(t_1, t_2) &= \int_{t_1}^{t_2} A(t) dt \\ &= \frac{A_0}{\lambda} (e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}) \\ &= \frac{N\sigma_{\alpha}\phi}{\lambda} (1 - e^{-\lambda T}) (e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}) \end{aligned} \quad (20)$$

หรือ

$$\phi = \frac{\lambda A(t_1, t_2)}{N\sigma_a(1 - e^{-\lambda T})(e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2})} \quad (21)$$

เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้วัดรังสีไม่สามารถวัดรังสีได้ทุกตัวที่ออกมาจากไอโซโทปกัมมันตรังสี จะวัดได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพ (Efficiency) ของหัววัด ถ้ากำหนดให้ E_{ff} คือ ประสิทธิภาพของหัววัด โดยที่

$$E_{ff}(\%) = \frac{c(t_1, t_2) \times 100}{\gamma \times A(t_1, t_2)} \quad (22)$$

เมื่อ $c(t_1, t_2)$ คือจำนวนนับในช่วงเวลา t_1 ถึง t_2

$A(t_1, t_2)$ คือกัมมันตภาพในช่วงเวลา t_1 ถึง t_2

γ คือความเข้ม (intensity) ของรังสีแกมมา ณ พลังงานที่ทำการวัด
ดังนั้นจะได้สมการ (21) เป็น

$$\phi = \frac{c(t_1, t_2) \cdot \lambda \cdot 100}{E_{ff} \cdot \gamma \cdot N \cdot \sigma_a(1 - e^{-\lambda T})(e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2})} \quad (23)$$

สมการ (23) เป็นค่าผลลัพธ์ของนิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาการดูดกลืน

การหาหลักขั้วนิวตรอนเทอร์มัล (Instruction Manual. 1960 : 15-18)

นิวตรอนจากต้นกำเนิดเป็นนิวตรอนเร็วจะวิ่งเข้าไปในตัวกลางที่ทำหน้าที่เป็นตัวลดพลังงานนิวตรอน โดยนิวตรอนเร็วเกิดการชนแบบยืดหยุ่นกับอะตอมของตัวกลางและจะค่อย ๆ สูญเสียพลังงานไปที่ละน้อยจนกระทั่งนิวตรอนมีอุณหภูมิจนเฉลี่ยเท่ากับอุณหภูมิของตัวกลาง เรียกว่านิวตรอนเทอร์มัล

ณ ที่เวลาใด ๆ นิวตรอนทั้งหมดมีพลังงานไม่เท่ากัน ถ้าในสภาวะอิสระมีจำนวนนิวตรอนเทอร์มัล n อนุภาค/ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้ว จะได้ว่าจำนวนนิวตรอนเทอร์มัลที่มีพลังงานอยู่ในช่วง E ถึง $E + dE$ คือ $n(E)dE$

นิวตรอนเทอร์มัลมีการกระจายพลังงานเป็นไปตามกฎการกระจายของแมกซ์เวลล์-โบลต์สแมนน์ (Maxwell-Boltzmann distribution law) คือ (Glasstone. 1963 : 63)

$$\frac{n(E)dE}{n} = \frac{2\pi}{(\pi kT)^{3/2}} \cdot E^{1/2} e^{-E/kT} dE \quad (24)$$

โดยที่ k คือค่าคงที่ของโบลต์สแมนน์ (Boltzmann's constant) มีค่าเท่ากับ $8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/}^{\circ}\text{K}$

T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ (absolute temperature) ของตัวกลางที่ทำหน้าที่เป็นตัวลดพลังงานของนิวตรอนในหน่วยของศาเคลวิน

ถ้าให้ฟังก์ชันนิวตรอนเทอร์มัลที่มีพลังงาน E เท่ากับ $\phi(E)$ ซึ่ง

$$\phi(E) = V n(E) = \sqrt{2E/m} n(E) \quad (25)$$

โดยที่ V คือความเร็วของนิวตรอนที่มีมวล m มีพลังงานจลน์ E

อัตราการเกิดปฏิกิริยาดูดกลืนนิวตรอนเทอร์มัลที่มีพลังงาน E มีค่าเท่ากับ

$$R(E) = \phi(E) \sigma_u(E) N \quad (26)$$

$\sigma_u(E)$ คือค่าภาคตัดขวางจุลภาคในการดูดกลืนนิวตรอนเทอร์มัลพลังงาน E ของธาตุที่อาบนิวตรอน ดังนั้นจะได้อัตราการเกิดปฏิกิริยาดูดกลืนนิวตรอนเทอร์มัลทุกพลังงานมีค่าเท่ากับ R โดยที่

$$R = N \int_{E_1}^{E_2} \phi(E) \sigma_u(E) dE \quad (27)$$

โดยที่ E_1 และ E_2 เป็นระดับพลังงานต่ำสุดและสูงสุดของกลุ่มนิวตรอนเทอร์มัลตามลำดับ

จากสมการ (24) , (25) และ (27) จะได้

$$R = \frac{\sqrt{\pi}}{2} N \sigma_{\alpha} (kT) \phi \quad (28)$$

$\sigma_{\alpha} (kT)$ คือภาคตัดขวางจุลภาคในการดูดกลืนนิวตรอนเทอร์มัลที่อุณหภูมิสัมบูรณ์ของธาตุ

สมการ (28) เป็นสมการแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาดูดกลืนนิวตรอนเทอร์มัลทั้งหมดของธาตุ เมื่อพิจารณาในทำนองเดียวกับสมการ (16) ถึง (19) จะได้กัมมันตภาพของรังสีแกมมาที่เกิดจากปฏิกิริยาดูดกลืนระหว่างธาตุกับนิวตรอนเทอร์มัลในช่วงเวลา t_1 ถึง t_2 เป็น

$$A(t_1, t_2) = \frac{\sqrt{\pi} N \sigma_{\alpha} (kT) \phi}{2\lambda} (1 - e^{-\lambda T}) (e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}) \quad (29)$$

ฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในสมการ (29) มีค่าไม่เท่ากับฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลที่มีอยู่จริงเมื่อตอนที่ไม่มีธาตุไปอาบ เพราะธาตุที่นำไปอาบนิวตรอนจะเกิดการรบกวน (perturb) ในสนามนิวตรอน เนื่องจากไม่มีคุณสมบัติในการสะท้อนเหมือนกับตัวกลาง คือ เมื่อไม่มีธาตุที่ไปอาบนิวตรอนเทอร์มัลเดี่ยว ๆ อาจแพร่ย้อนกลับไปได้หลายครั้ง ก่อนที่จะแพร่ออกไปจากบริเวณนั้น ถ้ามีธาตุที่มีคุณสมบัติดูดกลืนรังสีสูงกว่าตัวกลางวางอยู่ นิวตรอนเทอร์มัลอาจจะถูกดูดกลืนไว้ และไม่สามารถแพร่กลับออกมาได้อีก ดังนั้นฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลที่ได้จากสมการ (29) จะน้อยกว่าฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลที่เกิดขึ้นเมื่อไม่มีธาตุวางอยู่

Bothe , C.W.Tittle , De Troyer และ Tavernier ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลที่ได้จากการนำธาตุไปอาบนิวตรอน (ϕ) กับฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลเมื่อไม่มีธาตุวางอยู่ (ϕ_{th}) โดย Tavernier ได้ศึกษาถึงความหนาของธาตุที่มีผลทำให้ค่าฟลักซ์นิวตรอนลดลงขณะที่แพร่เข้าไปในธาตุที่อาบนิวตรอน ในขณะที่ C.W Tittle ได้แก้ไขทฤษฎีของ Bothe โดยการดัดแปลงตัวแปร (parameters) ต่าง ๆ ที่ Bothe ได้ทำไว้ และได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ϕ และ ϕ_{th} ไว้ดังนี้

$$\phi_{th} = f_{th} \phi \quad (30)$$

โดยที่ $f_{th} = 1 + \frac{0.34 \alpha R}{\lambda_{tr}}$ เมื่อ $R \ll \lambda_{tr}$

$= 1 + \frac{\alpha}{2} \left[\frac{3RL}{2 \lambda_{tr}(R + L)} - 1 \right]$ เมื่อ $R \gg \lambda_{tr}$ (31)

$$\alpha = 1 - e^{-N \sigma_{ab}(KT)d} [1 - N \sigma_{ab}(KT)d] + [N \sigma_{ab}(KT)d]^2 \int_{-\infty}^{-N \sigma_{ab}(KT)d} \frac{e^y}{y} dy$$

R คือ รัศมีของธาตุที่ใช้เป็นนิวตรอน

d คือ ความหนาของธาตุ

L คือ ความยาวการฟุ้งของนิวตรอนเทอร์มัล (diffusion length of thermal neutron)

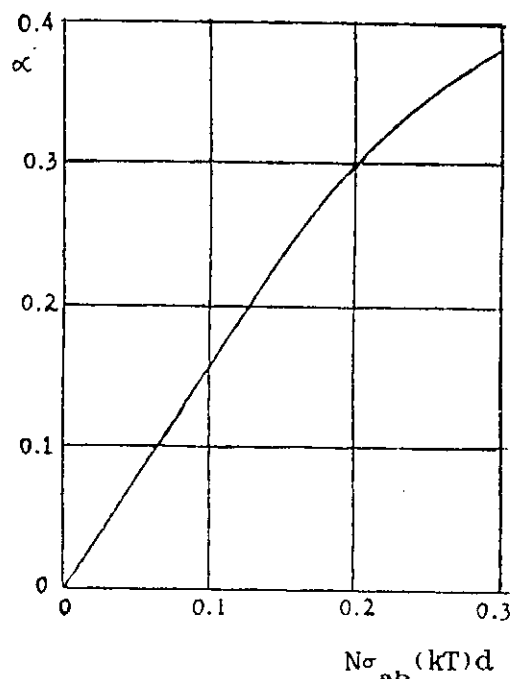
λ_{tr} คือ ทางเดินอิสระเฉลี่ยแบบทรานสปอร์ต (transport mean free path)

$\sigma_{ab}(KT)$ คือ ภาคตัดขวางจุลภาคในการดูดกลืนนิวตรอนเทอร์มัลทั้งหมด

ความสัมพันธ์ระหว่าง α และ $N \sigma_{ab}(KT)d$ แสดงไว้ในกราฟในภาพประกอบ 1

ตาราง 4 คุณสมบัติด้านการฟุ้งของนิวตรอนเทอร์มัลในตัวกลางที่ใช้ลดพลังงานนิวตรอน

ตัวกลางที่ใช้ลดพลังงานนิวตรอน	ความหนาแน่นของตัวกลาง (กรัม/เซนติเมตร ³)	ความยาวการฟุ้ง (เซนติเมตร)	ทางเดินอิสระเฉลี่ยแบบทรานสปอร์ต (เซนติเมตร)
น้ำ	1.0	2.76	0.425
พาราฟิน	0.9	2.42	0.395
ดีวเทอเรียม	1.1	171	2.4
เบอริลเลียม	1.8	31	2.6
กราไฟต์	1.62	50	2.7



ภาพประกอบ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง α กับ $N\sigma_{ab}(kT)d$

(Instruction Manual. 1960 : 17)

จากความสัมพันธ์ในสมการ (30) ทำให้ได้สมการ (29) เป็น

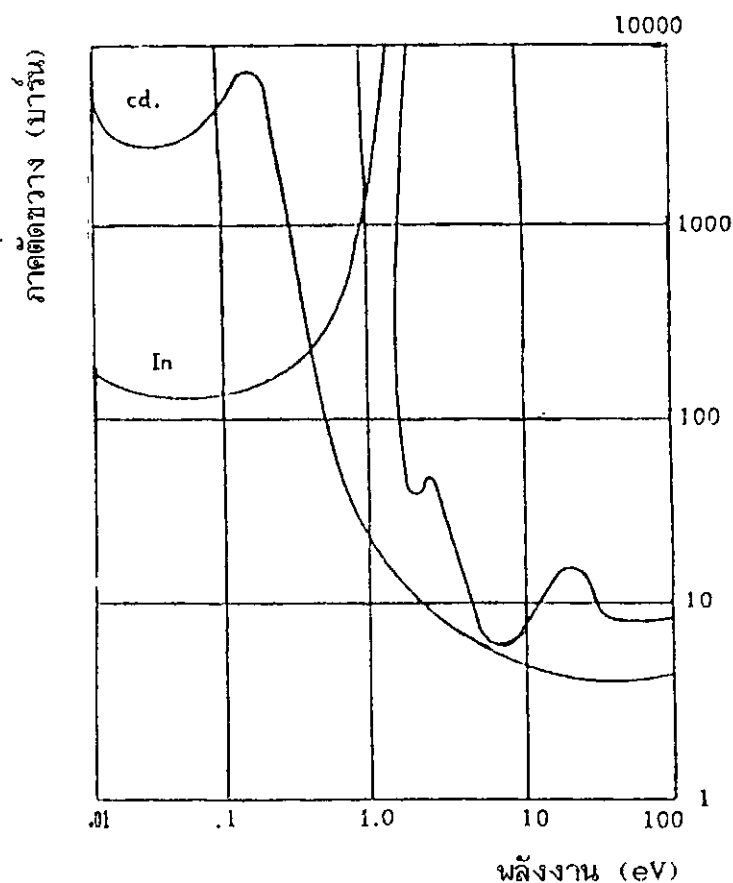
$$A(t_1, t_2) = \frac{\sqrt{\pi} N \sigma_a (kT) \phi_{th}}{2 \lambda f_{th}} (1 - e^{-\lambda T}) (e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}) \quad (32)$$

ในการหาฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลธาตุที่อาบนิวตรอนจะทำปฏิกิริยาดูดกลืนกับนิวตรอนเทอร์มัลและนิวตรอนอีพitherมัล ซึ่งมีขนาดพลังงานรังสีที่เกิดจากปฏิกิริยาดูดกลืนจึงเป็นกัมมันตภาพรังสีที่เกิดจากนิวตรอนเทอร์มัลและนิวตรอนอีพitherมัล ทำให้ค่าฟลักซ์นิวตรอนที่ได้จากสมการ (32) ไม่ใช่ฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลอย่างเดียว ดังนั้นจึงแก้ไขโดยการหุ้มธาตุที่อาบนิวตรอนด้วยแผ่นแคดเมียม (Cadmium foil) ทั้งนี้เพราะแคดเมียมมีค่าภาคตัดขวางสูงในการดูดกลืนนิวตรอนพลังงานต่ำกว่า 0.4 eV และค่าภาคตัดขวางในการดูดกลืนนิวตรอนลดลงเมื่อนิวตรอนพลังงานสูงขึ้น (Knoll. 1979:770) ดังแสดงในภาพประกอบ 2 ดังนั้นแคดเมียมสามารถดูดกลืนนิวตรอนเทอร์มัลไว้ เหลือเฉพาะนิวตรอนอีพitherมัลที่จะไปทำปฏิกิริยากับธาตุ ดังนั้นในการหาฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลกระทำ

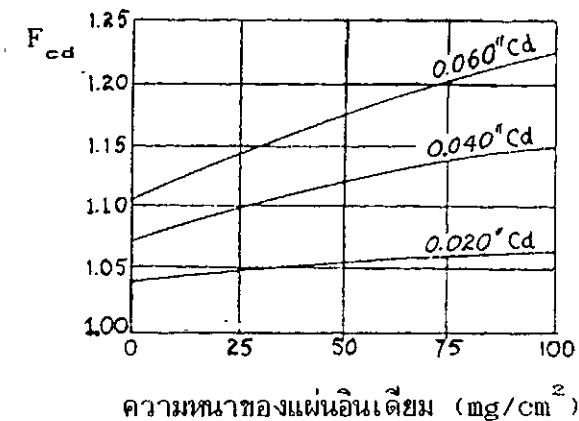
โดยการนำธาตุไปอบนิวตรอน 2 ครั้ง ครั้งแรกนำไปอบนิวตรอนโดยไม่มีแผ่นแคดเมียมหุ้มได้
กัมมันตภาพ A_{bare} ครั้งหลังนำธาตุไปอบนิวตรอนโดยหุ้มด้วยแผ่นแคดเมียมได้กัมมันตภาพ A_{cd}
จะได้

$$\text{กัมมันตภาพที่เกิดจากนิวตรอนเทอร์มัล} = A_{\text{bare}} - f_{\text{cd}} A_{\text{cd}} \quad (33)$$

โดยที่ f_{cd} คือค่ากีดกันเนื่องจากความหนาของแผ่นแคดเมียมที่มีผลต่อการดูดกลืนนิวตรอนของธาตุ



ภาพประกอบ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาคตัดขวางในการดูดกลืนนิวตรอนของธาตุ
อินเดียม และ ธาตุแคดเมียม กับพลังงานของนิวตรอน (Eichholz. 1979 : 302)



ภาพประกอบ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f_{cd} กับน้ำหนักต่อพื้นที่ของแผ่นอินเดียม
(Price. 1964 : 340)

อัตราส่วนระหว่าง A_{bare} กับ A_{cd} เรียกว่าแคดเมียมเรโซ (Cadmium ratio) เป็นค่าที่บอกได้ว่า ณ ตำแหน่งที่วัดฟลักซ์นิวตรอน มีปริมาณนิวตรอนเทอร์มัลและนิวตรอนอีพิเทอร์มัลอยู่เป็นสัดส่วนเท่าใด

จากการแทนค่ากัมมันตภาพจากสมการ (33) และค่าประสิทธิภาพของหัววัดลงในสมการ (32) จะได้ค่าฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลดังสมการ

$$\phi_{th} = \frac{2[c(t_1, t_2)_{bare} - c(t_1, t_2)_{cd} f_{cd}] \cdot \lambda \cdot f_h \cdot 100}{\sqrt{\pi} \cdot E_{eff} \cdot V \cdot N \cdot \sigma_a(kT) (1 - e^{-\lambda T}) (e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2})} \quad (34)$$

โดยที่ $c(t_1, t_2)_{bare}$ คือ จำนวนนับในช่วงเวลา t_1 ถึง t_2 เมื่อไม่มีแคดเมียมหุ้ม
 $c(t_1, t_2)_{cd}$ คือ จำนวนนับในช่วงเวลา t_1 ถึง t_2 เมื่อมีแคดเมียมหุ้ม

สมการ (34) เป็นสมการที่ใช้หาฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลโดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน

ในการนำธาตุมาอาบนิวตรอนต้องพิจารณาว่า ธาตุที่จะอาบนิวตรอน ต้องมีค่าภาคตัดขวาง ในการดูดกลืนนิวตรอนมากเพียงพอสำหรับการเกิดไอโซโทปกัมมันตรังสี และให้รังสีแกมมาที่มีความเข้มมาก ช่วงชีวิตของไอโซโทปกัมมันตรังสีไม่สั้นจนไม่สามารถวัดได้ หรือไม่ยาวจนเกินไปและ ธาตุที่นำมาอาบรังสีต้องมีลักษณะบาง เพื่อแก้ปัญหาการเกิดปรากฏการณ์การกำบังในตัวในขณะอาบนิวตรอน

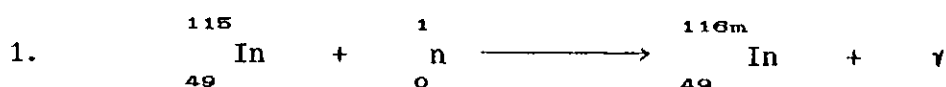
สำหรับงานวิจัยนี้ใช้แผ่นอินเดียม (Indium foil) และแผ่นดิสโพรเซียม (Dysprosium foil) สำหรับหาฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัล

ตาราง-5 คุณสมบัติของธาตุบางชนิดที่ใช้หาฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัล

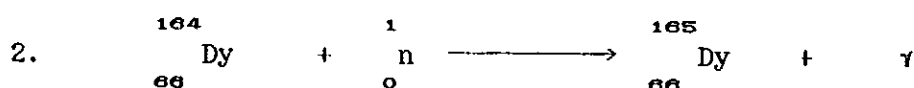
ธาตุ	ไอโซโทป(ความอุดม)	ภาคตัดขวาง(บาร์น)	ไอโซโทปกัมมันตรังสี	ครึ่งชีวิต
มังกานีส	Mn-55(100)	13.2 ± 0.1	Mn-56	2.58 h
โคบอล	Co-60(100)	16.9 ± 1.5	Co-60m	10.4 min
		20.2 ± 1.9	Co-60	5.28 y
ทองแดง	Cu-63(69.1)	4.14 ± 0.20	Cu-64	12.87h
	Cu-65(30.9)	1.8 ± 0.4	Cu-66	5.14 min
เงิน	Ag-107(51.35)	45 ± 4	Ag-108	2.3 min
	Ag-109(48.98)	3.2 ± 0.4	Ag-110m	253 d
อินเดียม	In-113(4.23)	56 ± 12	In-114m	49 d
	In-115(95.77)	160 ± 2	In-116m	54.12min
		42 ± 1	In-116	14.1 s
ดิสโพรเซียม	Dy-164(28.18)	2000 ± 200	Dy-165m	1.3 min
		800 ± 100	Dy-165	140 min
ทอง	Au-197(100)	98.5 ± 0.4	Au-198	2.695 d

ปฏิกิริยาที่ใช้หาฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัล

เมื่อนิวตรอนเทอร์มัลทำปฏิกิริยากับธาตุอินเดียม และ ธาตุดีสโพรเซียมเกิดปฏิกิริยาดัง
สมการ



อินเดียม-115 ทำปฏิกิริยากับนิวตรอนเทอร์มัลได้ อินเดียม-116m มีครึ่งชีวิต 54.12 นาที
 $\sigma_{\text{n},\gamma} = 160$ บาร์น สลายให้รังสีแกมมาหลายพลังงาน ที่พลังงาน 1097.1 keV มีความเข้ม
53% และที่พลังงาน 1293.4 keV มีความเข้มของรังสี 80%



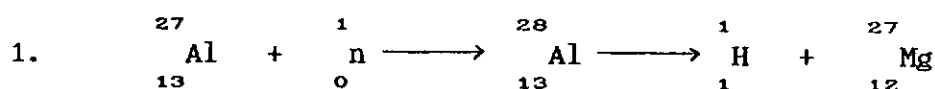
ดีสโพรเซียม-164 ทำปฏิกิริยากับนิวตรอนเทอร์มัลได้ ดีสโพรเซียม-165 มีครึ่งชีวิต 139
นาที $\sigma_{\text{n},\gamma} = 2600$ บาร์น สลายให้รังสีแกมมาที่พลังงาน 94.6 keV มีความเข้มรังสี 4%
และที่พลังงาน 361.7 keV มีความเข้มรังสี 1.1%

การหาฟลักซ์นิวตรอนเร็ว

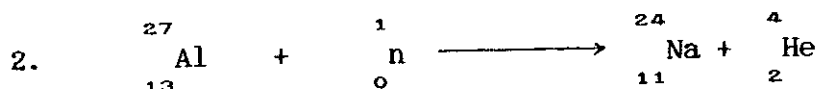
นิวตรอนเร็วคือนิวตรอนที่มีพลังงาน 0.5 MeV ขึ้นไป สำหรับการหาฟลักซ์นิวตรอนเร็ว
โดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันจะใช้แผ่นอลูมิเนียม (Aluminium foil) แล้วคำนวณค่าฟลักซ์จาก
สมการ (23)

ปฏิกิริยาที่ใช้หาฟลักซ์นิวตรอนเร็ว

นิวตรอนเร็วทำปฏิกิริยากับอลูมิเนียม เกิดปฏิกิริยาดังสมการ



แมกนีเซียม-27 มีครึ่งชีวิต 9.5 นาที สลายให้อนุภาคเบตา และรังสีแกมมาที่พลังงาน 1014 keV มีความเข้ม 30% และที่พลังงาน 844 keV มีความเข้ม 70% $\sigma(n,p) = 11$ มิลลิบาร์น



โซเดียม-24 มีครึ่งชีวิต 15 ชั่วโมง สลายให้รังสีแกมมาที่พลังงาน 1368.4 keV มีความเข้ม 100% และที่พลังงาน 2753.6 keV มีความเข้ม 100% $\sigma(n,\alpha) = 0.725$ มิลลิบาร์น

การวัดรังสีแกมมา

เมื่อนำธาตุไปอบนิวตรอนอะตอมของธาตุจะเปลี่ยนไปเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี พร้อมกับปล่อยรังสีแกมมาออกมา รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงมากเท่ากับความเร็วแสง ในการตรวจวัดรังสีแกมมากระทำโดยให้รังสีแกมมาทำอันตรกิริยา (interaction) กับอะตอมของสารที่ใช้ทำหัววัด อันตรกิริยาที่สำคัญมี 3 แบบ คือ

1. ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก (Photoelectric Effect)

เป็นอันตรกิริยาที่รังสีแกมมาชนกับอะตอมของตัวกลาง โดยอะตอมของตัวกลางจะดูดกลืนรังสีแกมมาแล้วปล่อยอิเล็กตรอนออกมา พลังงานของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเท่ากับพลังงานทั้งหมดของรังสีแกมมาลบด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในอะตอม และอิเล็กตรอนนี้เป็นตัวทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล (electron-hole pair) ขึ้นในหัววัด เป็นผลให้เกิดสัญญาณขาออก (out-put pulse) ที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของรังสีแกมมาที่เข้าทำปฏิกิริยากับอะตอมของสารที่หัววัดรังสี ผลของปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกทำให้เกิดเป็นโฟโตพีค (photo peak) ขึ้นในสเปกตรัมที่ได้จากรังสีแกมมานั้น

2. การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton Scattering)

เป็นอันตรกิริยาที่รังสีแกมมาชนกับอะตอมของตัวกลาง แล้วถ่ายเทพลังงานบางส่วนให้กับอิเล็กตรอนในตัวกลาง ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาด้วยความเร็วสูง ส่วนรังสีแกมมาที่เข้าชนจะกระเจิงออก การกระเจิงแบบคอมป์ตันจะเกิดขึ้นกับรังสีแกมมาที่มีพลังงานในช่วง 800 keV ถึง 3 MeV โดยไม่ขึ้นกับเลขอะตอม (Z) ของสารตัวกลางมากนัก เพราะอิเล็กตรอนที่เกิดอันตรกิริยากับรังสีแกมมาในกระบวนการนี้ จะเป็นอิเล็กตรอนที่อยู่ห่างจากนิวเคลียสคืออิเล็กตรอนวงนอกสุด

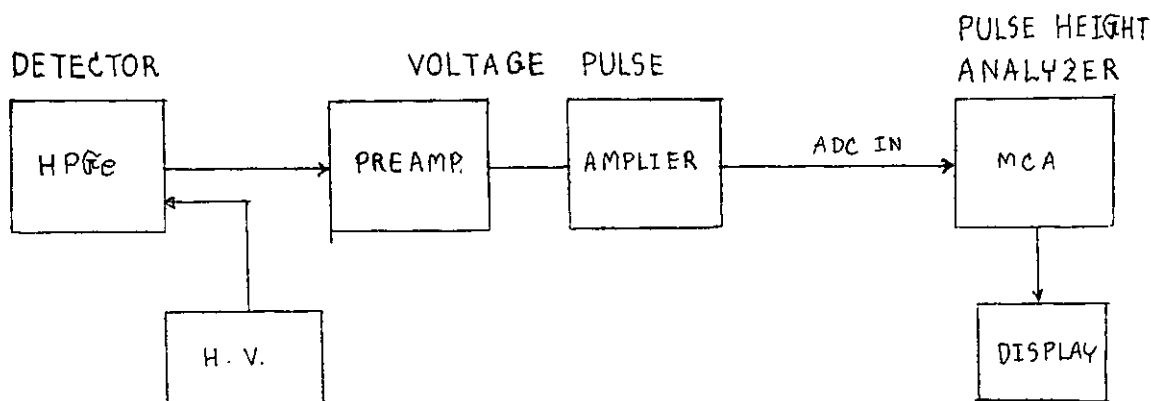
3. กระบวนการเกิดแบบคู่ (Pair Production)

กระบวนการนี้จะเกิดได้กับรังสีแกมมาที่มีพลังงานอย่างน้อยที่สุด 1.022 Mev เมื่อรังสีแกมมามีพลังงานสูงและเข้าใกล้นิวเคลียสของสารมาก ๆ รังสีแกมมาจะกระทำกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เข้มมากซึ่งอยู่ใกล้นิวเคลียส พลังงานของรังสีแกมมาจะเข้าไปในการผลิตคู่อิเล็กตรอน (e^-) และโพสิตรอน (e^+) พร้อมกับพลังงานจลน์ของอนุภาคทั้งคู่ ซึ่งเป็นไปตามสูตร $E = mc^2$

ในกระบวนการนี้อิเล็กตรอนและโพสิตรอนจะเป็นตัวทำให้เกิดสัญญาณ ขนาดของสัญญาณเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของอิเล็กตรอน สัญญาณทั้งสองจะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน ดังนั้นสัญญาณที่ออกมาจากหัววัดเป็นผลรวมของสัญญาณทั้งสองนี้ เมื่อโพสิตรอนเกิดแอนนิฮิเลชัน (annihilation) ในหัววัดก็จะเกิดรังสีแกมมา 2 ตัว โดยแต่ละตัวมีพลังงานเป็น 0.511 Mev รังสีแกมมาทั้งสองนี้เมื่อเกิดขึ้นแล้วตัวใดตัวหนึ่งอาจมีโอกาสที่จะเกิดอันตรกิริยาแบบปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกในหัววัดก่อนที่จะหลุดหนีออกไป

ระบบการวัดสเปกตรัมของรังสีแกมมา (Gamma-ray Spectroscopy)

รังสีแกมมาที่ได้จากสารกัมมันตรังสีมีหลายพลังงาน ดังนั้นต้องมีระบบการวัดรังสีที่สามารถแยกระดับพลังงานต่าง ๆ ของรังสีแกมมาออกมาได้ ซึ่งเรียกว่า ระบบการวัดสเปกตรัมของรังสีแกมมา ประกอบด้วยส่วนหลักอยู่ 6 ส่วน ดังภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 แสดงส่วนประกอบของระบบการวัดสเปกตรัมของรังสีแกมมา

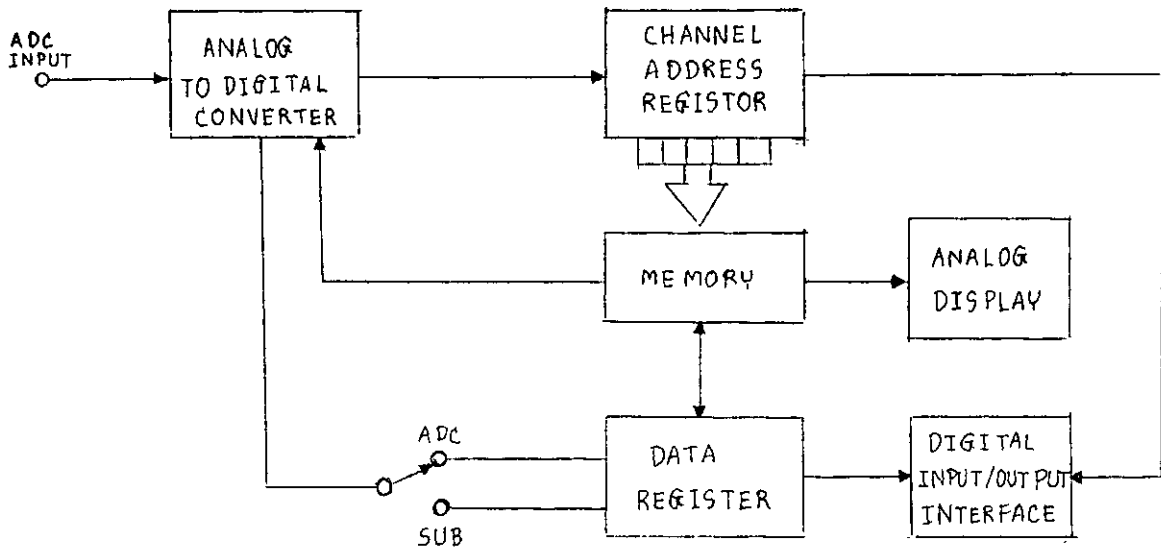
1. หัววัดรังสีแกมมา (Detector) สำหรับในการวิจัยนี้เป็นหัววัดสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Detector) ทำจากผลึกเจอร์มาเนียม (Germanium) ที่มีความบริสุทธิ์สูงเรียกว่า Hyper Pure Germanium (HPGe) เมื่อเวลาใช้งานต้องแช่อยู่ที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว (-176°C) เพื่อลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความร้อน (thermal noise) การที่หัววัดต้องทำงานที่อุณหภูมิต่ำขนาดนี้ หัววัด HPGe จึงถูกบรรจุไว้ในระบบสุญญากาศที่ เรียกว่า Cryostat ซึ่งจะแช่ไว้ในถังที่บรรจุไนโตรเจนเหลว

รังสีแกมมาจากสารกัมมันตรังสีจะวิ่งเข้าชนหัววัดและเกิดอันตรกิริยากันแบบใดแบบหนึ่งใน 3 แบบ หรืออาจเกิดได้ทั้ง 3 แบบ พร้อมกันในหัววัด ทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าที่ขาออก ของภาคขยาย ส่วนหน้าต่อไป

2. แหล่งจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage Power Supply) ทำหน้าที่ให้ศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงแก่หัววัด เพื่อสร้างไบอัส (bias) แก่ขั้วไฟฟ้าเพื่อให้เกิดสัญญาณไฟฟ้า และเป็นตัวรักษาศักดาไฟฟ้าทางขาออก ให้คงที่ ณ จุดที่ตั้งไว้โดยไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิแวดล้อม หรือการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดในสาย 220 โวลต์ สำหรับหัววัดรังสีแบบสารกึ่งตัวนำ แหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้ามีค่า 4500 โวลต์

3. ภาคขยายส่วนหน้า (Pre-amplifier) ทำหน้าที่รวบรวมประจุไฟฟ้าที่เกิดจากหัววัดรังสีแล้ว เปลี่ยนให้เป็นสัญญาณพัลส์ ซึ่งมีขนาดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนประจุ

4. ภาคขยายหลัก (Amplifier) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณจากหัววัดรังสี หรือจากภาคขยายสัญญาณส่วนหน้า ให้สูงขึ้นประมาณ 1,000 เท่า หรือมากกว่านั้น ทำให้สัญญาณมีขนาดในช่วง 0-10 โวลต์ และตกแต่งรูปสัญญาณเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการนับสัญญาณที่เกิดจากหัววัดรังสี
5. เครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณ (Pulse Height Analyzer) ในที่นี้เป็นเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง (Multi Channel Analyzer : MCA) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเก็บข้อมูลจำนวนรังสีแต่ละระดับพลังงานที่วิ่งเข้ามากระทบหัววัดได้อย่างอัตโนมัติ เมื่อมีสัญญาณจากภาคขยายเข้ามาที่ขาเข้า (input) ของ Analog to Digital Converter (ADC) ความสูงของสัญญาณที่ถูกจับด้วยวงจรภายในจะถูกเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณดิจิทัล และสัญญาณนี้จะถูกส่งไปยัง channel address register เพื่อเลือกกระบอกตำแหน่งช่อง (channel address) ในหน่วยความจำที่ตรงกับรหัสดิจิทัลที่ได้รับมา เพื่อให้ภาคบันทึกข้อมูล (data register) บวกจำนวนครั้งของสัญญาณที่มีรหัสตรงตำแหน่งที่ใด ๆ ครั้งละ 1 หน่วยนับ ถ้าภาคบันทึกข้อมูลถูกเลือกให้ทำงานแบบ SUB การทำงานจะเปลี่ยนไปเป็นการลบเอาจำนวนนับที่มีอยู่เดิมในตำแหน่งที่ตรงกับรหัสของสัญญาณออก 1 ครั้ง ข้อมูลที่มีอยู่ในหน่วยความจำจะถูกส่งไปแสดงผลบนจอภาพตลอดเวลาที่เครื่องทำงานอยู่ เมื่อเครื่องหยุดทำงาน ข้อมูลจะถูกส่งออกไปแสดงผลบนเครื่องพิมพ์ หรืออุปกรณ์อื่นผ่านทางจุดต่อ I/O ในช่วงเวลาที่เครื่องทำงานตั้งแต่รับสัญญาณ เปลี่ยนความสูงให้เป็นสัญญาณดิจิทัล จนกระทั่งเก็บข้อมูล ถ้ามีสัญญาณใหม่เข้ามาที่ขาเข้า ในช่วงเวลานี้ เครื่องจะไม่รับสัญญาณนั้น เครื่องจะยอมรับสัญญาณใหม่ก็ต่อเมื่อการบันทึกของสัญญาณก่อนหน้านี้เสร็จเรียบร้อยแล้ว ข้อมูลที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่องจะถูกนำออกมาแสดงผลบนจอภาพ โดยที่แกนนอนจะแสดงตำแหน่งของหน่วยความจำที่ใช้เก็บข้อมูลและมีชื่อเรียกว่า หมายเลขช่อง (channel number) ส่วนแนวตั้งจะแทนข้อมูลที่อยู่ในตำแหน่งความจำนั้น ๆ และมีชื่อเรียกว่า อัตรานับ (count rate) แผนภาพการทำงานของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง แสดงไว้ในภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 แผนภาพการทำงานของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง

6. ส่วนแสดงผล (Display Unit) ทำหน้าที่แสดงข้อมูลจำนวนนับแต่ละช่อง หรือสเปกตรัมของรังสี ออกทางเครื่องพิมพ์ (Printer)

ประสิทธิภาพของหัววัด (Detector Efficiency)

ประสิทธิภาพของหัววัดคือความสามารถของหัววัดที่จะตรวจวัดจำนวนรังสีแกมมาได้เท่าไรเมื่อเทียบกับจำนวนรังสีที่ปล่อยออกมาจากต้นกำเนิด โดยประสิทธิภาพของหัววัดหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned}
 E_{\text{eff}} (\%) &= \frac{\text{จำนวนสัญญาณที่นับได้}}{\text{จำนวนรังสีที่ปล่อยออกมาจากต้นกำเนิด}} \times 100 \\
 &= \frac{\text{cps} \times 100}{Y \times A}
 \end{aligned}$$

(35)

โดยที่	E_{ff}	คือ ประสิทธิภาพของหัววัด
	cps	คือ จำนวนนับต่อหน่วยเวลา
	γ	คือ ความเข้มของรังสีแกมมา ณ พลังงานที่ทำการวัด
	A	คือ กัมมันตภาพขณะทำการวัด ในหน่วย dps

ซึ่ง

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (36)$$

A_0 คือ กัมมันตภาพในวันที่ผลิตต้นกำเนิดรังสี

t คือ เวลาที่ผ่านมาตั้งแต่เริ่มผลิตต้นกำเนิดรังสีถึงวันที่ทำการทดลอง

λ คือ ค่าคงที่ของการสลายตัว (decay constant) = 0.693/ครึ่งชีวิต

ประสิทธิภาพของหัววัดจะขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีแกมมา ระยะทางระหว่างต้นกำเนิดรังสีกับหัววัด ขนาดของหัววัด ชนิดของหัววัด และรูปร่างของต้นกำเนิดรังสี

ทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม (Murray. 1975 : 110-111)

เป็นทฤษฎีที่ใช้อธิบายการกระจายของนิวตรอนที่แผ่ออกจากต้นกำเนิดนิวตรอนที่วางอยู่ในตัวกลาง โดยคิดว่านิวตรอนที่วิ่งออกจากต้นกำเนิดนิวตรอนแล้วฟุ้งอยู่ในตัวกลางมีอยู่ 2 กลุ่มเท่านั้น คือนิวตรอนเร็วและนิวตรอนเทอร์มัล นิวตรอนที่ออกจากต้นกำเนิดเป็นนิวตรอนเร็วเมื่อวิ่งผ่านไปตำแหน่งต่าง ๆ ของตัวกลางจะกลายเป็นนิวตรอนเทอร์มัล ดังนั้นนิวตรอนเทอร์มัลจะปรากฏอยู่ทุกแห่งในตัวกลาง นิวตรอนเร็วมีต้นกำเนิดเพียงแห่งเดียว คือที่ต้นกำเนิดนิวตรอน ซึ่งถือว่าเป็นจุด

ทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่มนี้ เป็นทฤษฎีที่อาศัยสมการการฟุ้ง (Diffusion equation) คำนวณผลลัพธ์ของนิวตรอนเร็ว จากผลลัพธ์ของนิวตรอนเร็วตามจุดต่าง ๆ ที่คำนวณได้นำมาคำนวณหาค่าผลลัพธ์นิวตรอนเทอร์มัลโดยอาศัยสมการการฟุ้งเช่นเดียวกัน

สมการการฟุ้งของระบบหาได้จากสมการ

$$\frac{\partial n}{\partial t} = S - \Sigma_a \phi - \text{div } J \quad (37)$$

- โดยที่ n คือจำนวนนิวตรอน/ลูกบาศก์เซนติเมตร
- $\frac{\partial n}{\partial t}$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลงนิวตรอนในตัวกลาง 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที มีหน่วยเป็น นิวตรอน/ลูกบาศก์เซนติเมตร.วินาที
- S คืออัตราการเกิดนิวตรอนในตัวกลาง 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที มีหน่วยเป็น นิวตรอน/ลูกบาศก์เซนติเมตร.วินาที
- Σ_a คือภาคตัดขวางมหภาคในการดูดกลืนนิวตรอนของตัวกลาง มีหน่วยเป็น เซนติเมตร⁻¹
- ϕ คือฟลักซ์นิวตรอน มีหน่วยเป็น นิวตรอน/ตารางเซนติเมตร.วินาที
- J คือความหนาแน่นกระแสนิวตรอน (neutron current density) มีหน่วยเป็น นิวตรอน/ตารางเซนติเมตร.วินาที

ซึ่ง จากกฎของฟิค (Fick 's Law)

$$J = -D \text{ grad } \phi$$

- D คือสัมประสิทธิ์การฟุ้งของนิวตรอน (diffusion coefficient) มีหน่วยเป็น เซนติเมตร

ถ้าระบบอยู่ในสถานะคงตัว (steady state) $\frac{\partial n}{\partial t} = 0$ จะได้สมการ (37) เป็น

$$D \nabla^2 \phi - \Sigma_a \phi + S = 0 \quad (38)$$

สำหรับระบบที่ศึกษาอยู่ถือว่ามีความหนาแน่นนิวตรอนขนาดจุด อยู่ในตัวกลางเอกพันธ์ที่มีขอบเขตอนันต์ (infinite homogeneous medium) เพื่อความสะดวกในการแก้สมการให้ต้นกำเนิดนิวตรอนอยู่ในตำแหน่งเดียวกับจุดกำเนิดของระบบฟิช ดังนั้น การกระจายของนิวตรอนจากต้นกำเนิดจึงสมมาตรเชิงทรงกลม (spherical symmetry) กับจุดกำเนิด ฟลักซ์มีค่าไม่ขึ้นกับมุม ดังนั้น

$$\nabla^2 = \frac{d^2}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d}{dr} \quad (39)$$

กรณีของนิวตรอนเร็ว

ต้นกำเนิดของนิวตรอนเร็วอยู่ที่ตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอนแห่งเดียวเทอม S ในสมการ (38) เป็นศูนย์ ดังนั้นสมการการฟุ้งของนิวตรอนเร็วคือ

$$\nabla^2 \phi_f - K_f^2 \phi_f = 0 \quad (40)$$

โดยให้ $K_f^2 = \frac{1}{L_f^2} = \frac{\Sigma_f}{D_f}$

เมื่อ L_f คือความยาวการฟุ้งของนิวตรอนเร็ว (diffusion length of fast neutron)

Σ_f คือภาคตัดขวางมหภาคที่ทำให้นิวตรอนวิ่งช้าลง (macroscopic slowing down cross sections)

D_f คือสัมประสิทธิ์การฟุ้งของนิวตรอนเร็ว (diffusion coefficient of fast neutron)

เงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) ในการหาฟังก์ชันนิวตรอนในสมการ (40) คือ

1. ฟังก์ชันจะต้องมีค่าไม่เป็นอนันต์ที่จุดใด ๆ และมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อ $r \rightarrow \infty$

2. กระแสนิวตรอนทั้งหมดที่ผ่านพื้นผิวของทรงกลมซึ่งมีรัศมีเท่ากับ r มีหน่วยเป็นนิวตรอน/วินาที จะมีค่าเท่ากับจำนวนนิวตรอนที่แผ่ออกมาจากตัวกำเนิดนิวตรอนใน 1 วินาที เมื่อรัศมี r ของทรงกลมมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ นั่นคือ

$$\lim_{r \rightarrow 0} 4\pi r^2 j = a$$

เมื่อ a คือจำนวนนิวตรอนทั้งหมดที่แผ่ออกมาจากต้นกำเนิดใน 1 วินาที มีหน่วยเป็นนิวตรอน/วินาที

นำค่า ∇^2 ในสมการ (39) แทนลงในสมการ (40) แล้วใช้เงื่อนไขทั้ง 2 ข้อ จะได้คำตอบของสมการ (40) ดังนี้

$$\phi_f(r) = \frac{a}{4\pi D_f} \cdot \frac{e^{-K_f r}}{r} \quad (41)$$

สมการ (41) เป็นสมการหาฟังก์ชันนิวตรอนเร็วรอบ ๆ ต้นกำเนิดนิวตรอนที่มีระยะห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอนเป็นระยะทาง r ในตัวกลางที่มีขนาดอนันต์ ฟังก์ชันของนิวตรอนเร็วที่หามาได้นี้ จะใช้เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนเทอร์มัลต่อไป

ในกรณีของนิวตรอนเทอร์มัล

เทอม S ในสมการ (38) สำหรับนิวตรอนเทอร์มัลมีค่าเท่ากับ $\Sigma_f \phi_f$ จะได้สมการการฟุ้งของนิวตรอนเทอร์มัลเป็น

$$\nabla^2 \phi - K^2 \phi + \frac{\Sigma_f}{D} \cdot \phi_f = 0 \quad (42)$$

โดยให้ $K^2 = \frac{1}{L^2} = \frac{\Sigma_a}{D}$

เมื่อ L คือ ความยาวการฟุ้งของนิวตรอนเทอร์มัล

D คือ สัมประสิทธิ์การฟุ้งของนิวตรอนเทอร์มัล (diffusion coefficient of thermal neutron)

เงื่อนไขขอบเขตสำหรับหาค่าฟังก์ชันนิวตรอนในสมการ (42) คือ

1. ฟังก์ชันมีค่าไม่เป็นอนันต์ที่จุดใด ๆ และมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อ $r \rightarrow \infty$

2. จำนวนนิวตรอนที่แผ่ออกจากต้นกำเนิดนิวตรอนซึ่งวางอยู่ในตัวกลางที่มีขอบเขตอนันต์

มีค่าเท่ากับจำนวนนิวตรอนที่ถูกดูดกลืนอยู่ในตัวกลาง นั่นคือ

$$\int_0^\infty (\Sigma_a \phi) 4\pi r^2 dr = a$$

เมื่อ $\Sigma_a \phi$ คือจำนวนนิวตรอนเทอร์มัลที่ถูกดูดกลืนอยู่ในตัวกลาง 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร/วินาที มีหน่วยเป็น นิวตรอน/ลูกบาศก์เซนติเมตร.วินาที

นำค่า ∇^2 จากสมการ (39) และ ϕ_f จากสมการ (41) แทนลงในสมการ (42) แล้วใช้เงื่อนไขขอบเขตทั้ง 2 ข้อ หาคำตอบของสมการ (42) ได้ดังนี้

$$\phi(r) = \frac{a \cdot K_f^2}{4\pi D(K^2 - K_f^2)} \cdot \frac{(e^{-K_f r} - e^{-Kr})}{r} \quad (43)$$

สมการ (43) เป็นสมการหาฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลที่ระยะห่างจากต้นกำเนิดเท่ากับ r

เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปรีชา เกียนสมประสงค์ (2517) ได้คำนวณค่าฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลที่ระยะต่าง ๆ ในน้ำจากต้นกำเนิดนิวตรอน อเมอริเซียม-เบอริลเลียม ให้นิวตรอน 1.3×10^6 นิวตรอน/วินาที โดยใช้ทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม ทฤษฎีการกระเจิงครั้งแรก และทฤษฎีเฟอร์มิเอจ ปรากฏว่าทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม ใช้อธิบายการกระจายของนิวตรอนในน้ำได้ดี

จิตปรางค์ เกียรติกุล (2520) ได้ศึกษาความเหมาะสม หรือความไวของสารในการอาบนิวตรอนจากต้นกำเนิดพลูโตเนียม-เบอริลเลียม ขนาด 5 คูรี ที่ให้นิวตรอน 1.1×10^7 นิวตรอน/วินาที ได้หาฟลักซ์นิวตรอนเร็วและฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัล โดยวิธีนิวตรอนแอกติเวชัน และทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม ปรากฏว่าทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม ใช้อธิบายการกระจายนิวตรอนในน้ำได้ดีที่ระยะห่างจากต้นกำเนิดตั้งแต่ 10-24 เซนติเมตร และใช้ข้อบ่งชี้ได้ดีที่สุดที่ระยะประมาณ 14 เซนติเมตร ซึ่งที่ระยะนี้ค่าฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลที่คำนวณได้จากทฤษฎี แตกต่างจากการทดลอง 3 เปอร์เซ็นต์

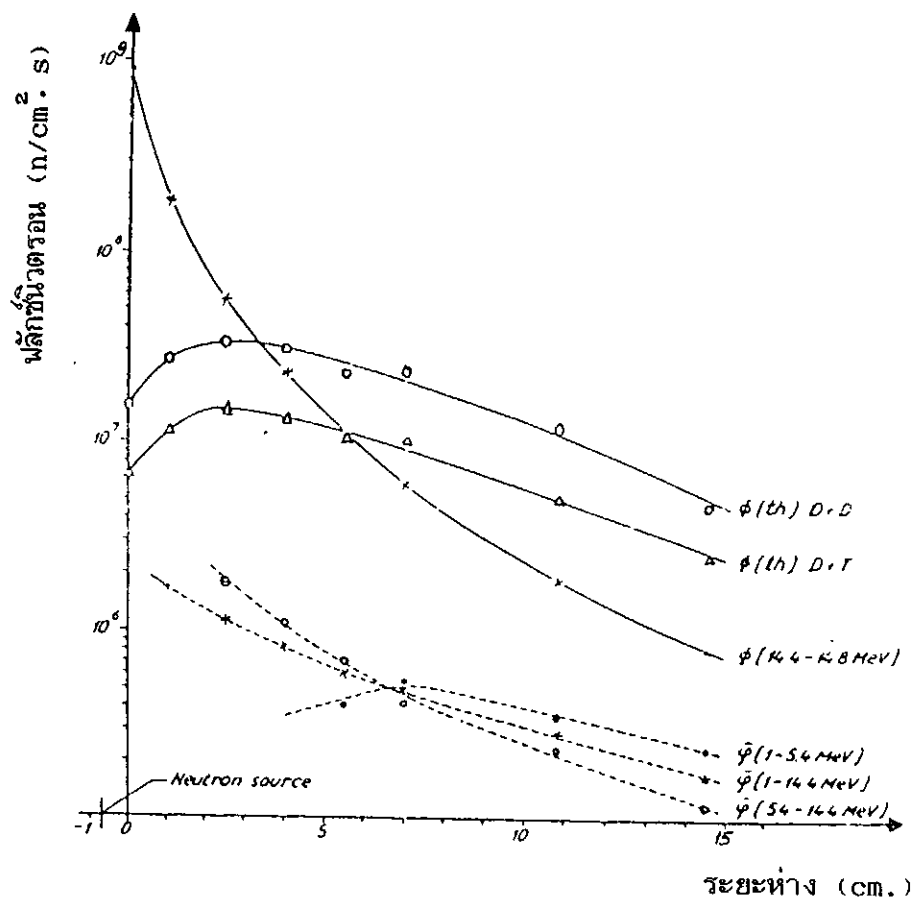
อุไรวรรณ จุณาท (2521) ได้คำนวณฟลักซ์นิวตรอนช้าโดยใช้ทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม การฟุ้งของนิวตรอน 3 กลุ่ม และทฤษฎีเฟอร์มิเอจ โดยกำหนดให้มีต้นกำเนิดนิวตรอนเร็วอยู่ในตัวกลางซึ่งเป็นของผสมระหว่างซิลิกอนไดออกไซด์กับน้ำ โดยมีปริมาณน้ำต่าง ๆ กัน และความหนาแน่นต่างกันผลปรากฏว่าทั้ง 3 ทฤษฎีให้ค่าแตกต่างกันมากที่ตำแหน่งที่ต้นกำเนิดนิวตรอนตั้งอยู่ แต่ให้ผลใกล้เคียงกันเมื่อห่างจากต้นกำเนิดออกมาประมาณ 30 เซนติเมตร

ทอง อัครธีรานนท์ (2521) ได้ศึกษาวัสดุหลายชนิดเพื่อใช้ในการป้องกันอันตรายจากนิวตรอนจากต้นกำเนิดอเมอริเซียม-เบอริลเลียมขนาด 1 คูรี ให้นิวตรอน 2.2×10^6 นิวตรอน/วินาที ปรากฏว่าเมื่อนำเป็นตัวกั้นนิวตรอน สามารถป้องกันอันตรายจากนิวตรอนได้อย่างปลอดภัยที่ระยะห่างจากต้นกำเนิด 46.53 เซนติเมตร มีค่านิวตรอนโดสเรท (Neutron Dose Rate) 119.14 มิลลิแรม/สัปดาห์โดยนิวตรอนโดสเรทมีค่าน้อยกว่า 300 มิลลิแรมต่อสัปดาห์ ถือว่าไม่เกิดอันตราย

ถ้าใช้พาราฟินหนา 30.48 เซนติเมตร จะได้นิวตรอนโคสเรท 296.38 มิลลิแรม/สัปดาห์ ถือว่าไม่เป็นอันตราย ถ้าใช้วัสดุผสมระหว่างพาราฟินกับกรดบอริกในอัตราส่วน 2 : 6 โดยปริมาตร มีความหนา 11.63 เซนติเมตร มีนิวตรอนโคสเรทไม่ถึง 5.14×10^{-11} มิลลิแรม/สัปดาห์

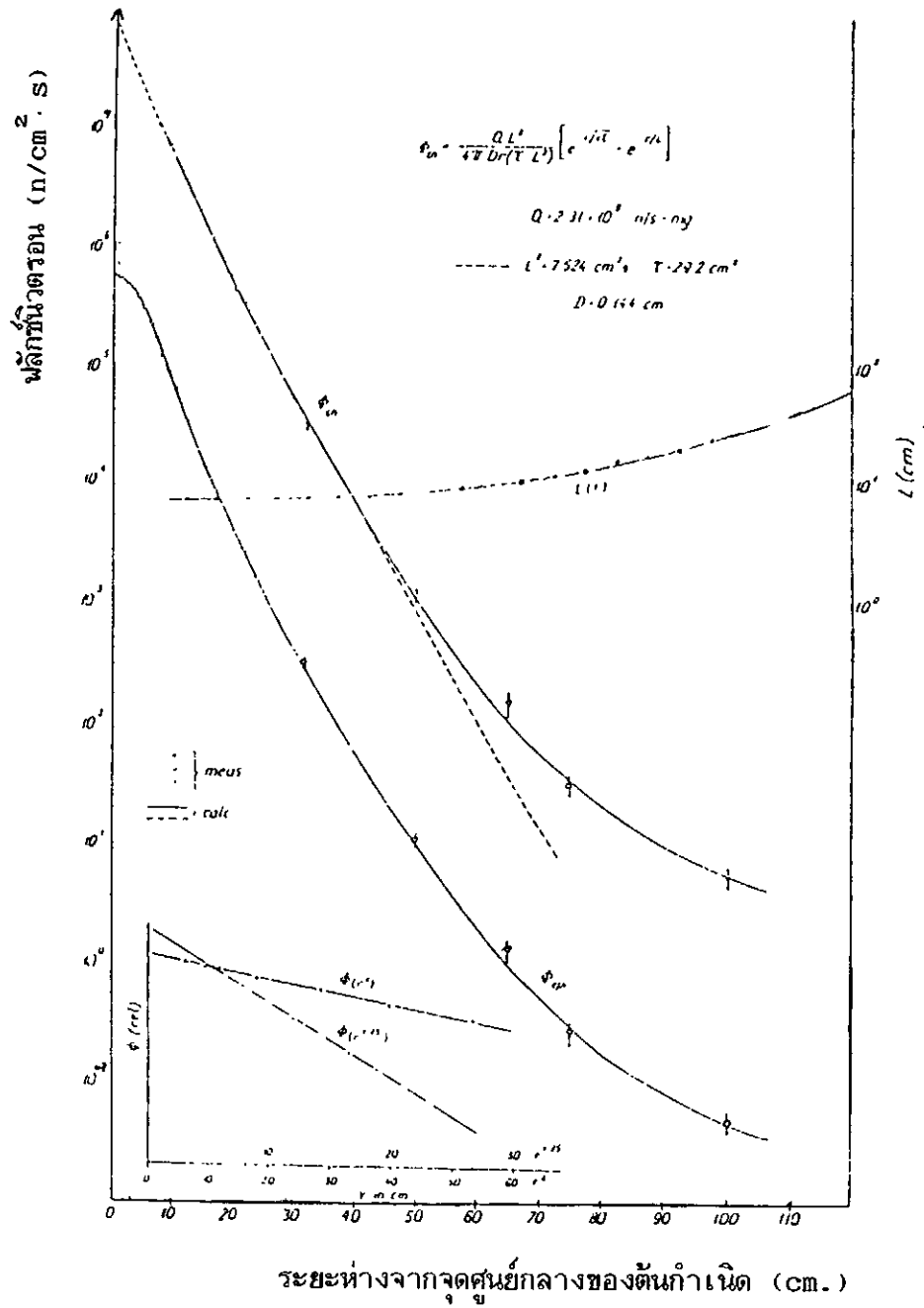
พงษ์วุฒิ ดวงศรี (2530) ได้ออกแบบและสร้างถังน้ำสำหรับเก็บต้นกำเนิดนิวตรอน อเมอริเซียม-เบอริลเลียม ขนาด 5 คูรี ให้นิวตรอน 1.1×10^7 นิวตรอน/วินาที โดยเป็นถังทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 112 เซนติเมตร สูง 123 เซนติเมตร ทำด้วยแผ่นเหล็กหนา 0.6 เซนติเมตร และได้ทำการวัดฟลักซ์นิวตรอนภายในถัง ปรากฏว่าฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลที่ระยะ 3.2 เซนติเมตร มีค่า $(3.23 \pm 0.12) \times 10^4$ นิวตรอน/ตารางเซนติเมตร.วินาที ฟลักซ์นิวตรอนเร็วภายในท่อใส่ต้นกำเนิด ห่างจากต้นกำเนิด 1.5 เซนติเมตรมีค่า $(3.04 \pm 0.25) \times 10^5$ นิวตรอน/ตารางเซนติเมตร.วินาที และทำการวิเคราะห์หึ่งกานิสในสารตัวอย่างมังกานีสซัลเฟตโดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน ได้ส่วนผสมมังกานีส 33.42 ± 1.35 เปอร์เซ็นต์

นาจี , ชิโค และ แองจิลี (Nagy, Csikai and Angeli.1971:345-347) ได้ศึกษาฟลักซ์นิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน ปฏิริยา D+T และ ปฏิริยา D+D ในตัวกลางพาราฟินโดยวิธี Threshold Detector ได้ผลการดังภาพประกอบ 6

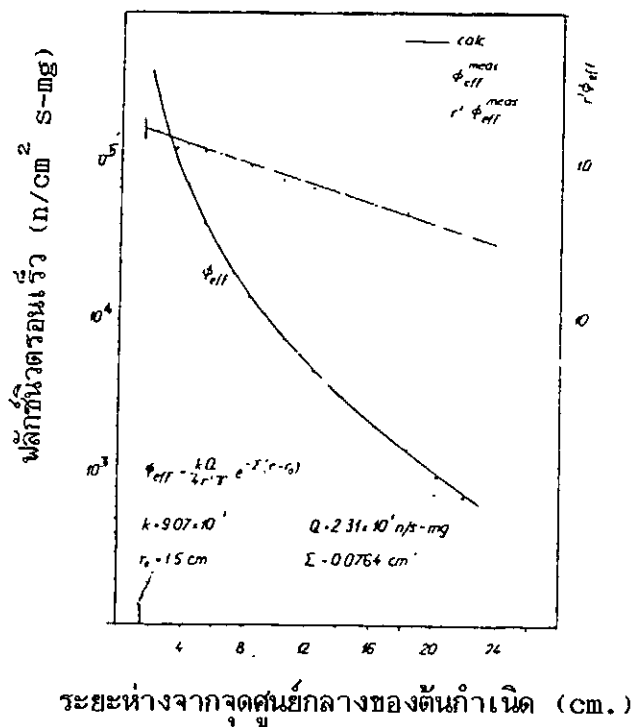


ภาพประกอบ 6 ฟลักซ์นิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอนปฏิกิริยา D+T และ D+D
(Nagy , Csikai and Angeli. 1971 : 347)

บัคซ์โคและคนอื่น ๆ (Buczko and others.1981:101-105) ได้ศึกษาการกระจายของฟลักซ์นิวตรอนเร็ว และฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลจากต้นกำเนิดนิวตรอน แคลิฟอร์เนียม-252 ในน้ำ โดยวิธีนิวตรอนแอกติเวชันและเปรียบเทียบกับทฤษฎี ได้ผลการทดลองดังภาพประกอบ 7 และ 8



ภาพประกอบ 7 การกระจายของฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลจากต้นกำเนิดแคลิฟอร์เนียม-252
 (Buczko and others. 1981 : 103)



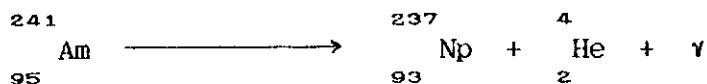
ภาพประกอบ 8 การกระจายของฟลักซ์นิวตรอนเร็วจากต้นกำเนิดแคลิฟอร์เนียม-252
(Buczko and others.1981:104)

บทที่ 3

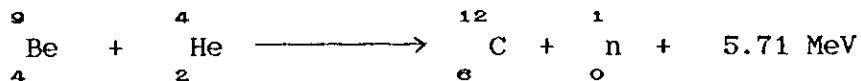
อุปกรณ์และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1.1 ต้นกำเนิดนิวตรอน (Neutron Source) ต้นกำเนิดนิวตรอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ Am-Be มีความแรง 5 คูรี เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปกัมมันตรังสี มีลักษณะเป็นทรงกระบอกภายในเป็นสารประกอบ AmO_2 คลุกเคล้ากับโลหะเบอริลเลียม แล้วห่อหุ้มด้วยเหล็กกล้าหนา 2.4 มิลลิเมตร Am-241 เป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี สลายตัวตามสมการ



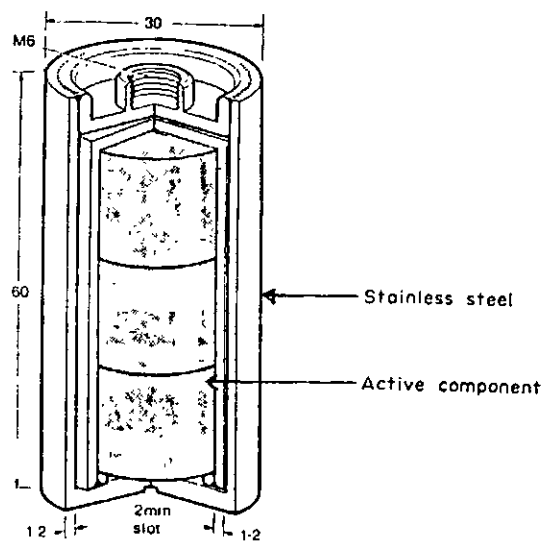
อนุภาคแอลฟาที่ได้จากการสลายของ Am-241 มีหลายระดับพลังงาน ที่สำคัญคือระดับพลังงาน 5.48 MeV (85%) และพลังงาน 5.44 MeV (13%) ส่วนรังสีแกมมาที่ปล่อยออกมา มีพลังงาน 59.6 keV อนุภาคแอลฟาที่ปล่อยออกมาจาก Am-241 ทำปฏิกิริยากับ Be-9 ให้นิวตรอนพลังงานต่าง ๆ ออกมา พร้อมกับธาตุ C-12 ดังสมการ



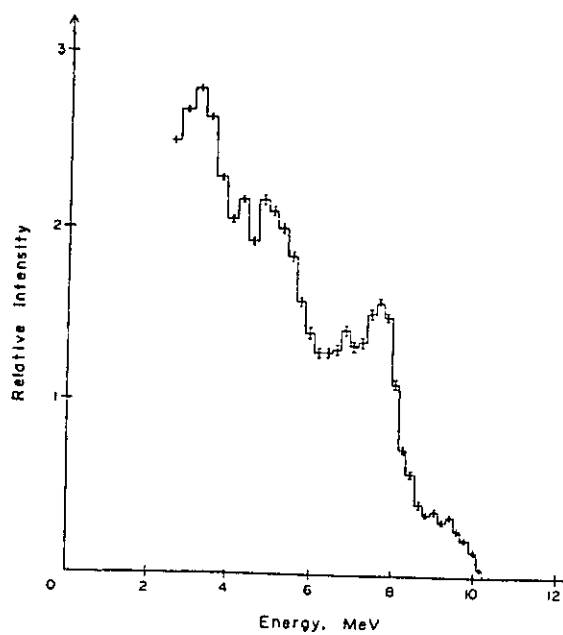
ต้นกำเนิดนิวตรอน Am-Be มีครึ่งชีวิต 432 ปี คุณสมบัติที่สำคัญแสดงไว้ในตาราง 6

ตาราง 6 แสดงคุณสมบัติของต้นกำเนิดนิวตรอน Am-Be ขนาด 5 คูรี

α -emitter	AmO_2 1.75 กรัม (Am-241 1.55 กรัม)
Be-9	30 กรัม
Neutron emission rate	1.1×10^7 n/sec 6×10^7 n/sec ต่อ
γ -exposure rate	12.5 mR/h ที่ 1 เมตร
Neutron dose rate	11 mRem/h ที่ 1 เมตร



ภาพประกอบ 9 รายละเอียดของต้นกำเนิดนิวตรอน Am-Be ขนาด 5 คูบิก
(Lorch. 1973 : 586)



ภาพประกอบ 10 สเปกตรัมของต้นกำเนิดนิวตรอน Am-Be
(Lorch. 1973 : 588)

1.2 อุปกรณ์การวัดสเปกตรัมของรังสีแกมมาประกอบด้วย

1.2.1 หัววัดรังสีแกมมาชนิด HPGe (Canberra GC1520) แบบ Closed ended coaxial ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 46.5 มิลลิเมตร ยาว 52 มิลลิเมตร ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ 15%

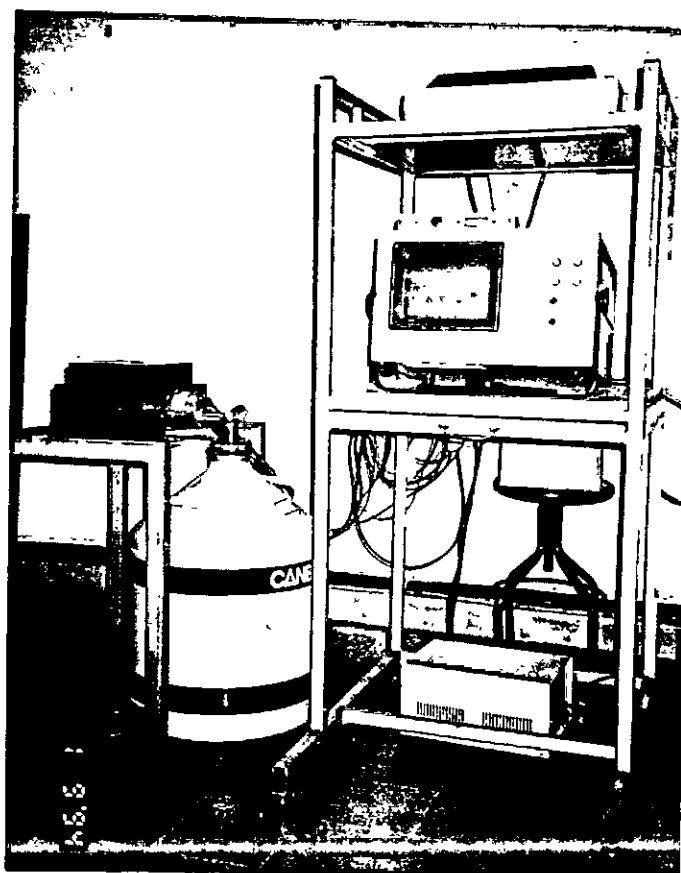
1.2.2 แหล่งจ่ายตักย์ไฟฟ้าแรงสูง (Canberra 4261A)

1.2.3 เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (Canberra Series 35 PLUS) ขนาด 4096 ช่อง

1.2.4 ภาควิทยาส่งสัญญาณ (Canberra J110)

1.2.5 ภาควิทยารับสัญญาณ (Canberra J225)

1.2.6 เครื่องพิมพ์ (Epson Lx)



ภาพประกอบ 11 อุปกรณ์ของระบบการวัดสเปกตรัมของรังสีแกมมา

1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปลั๊กนิวตรอนในน้ำ

1.3.1 ถังน้ำขนาดความจุ 200 ลิตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 56 เซนติเมตร สูง 90 เซนติเมตร

1.3.2 ก้านอะคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร และแผ่นอะคริลิกหนา 6 มิลลิเมตร สำหรับใช้เป็นตัวยึดและแขวนธาตุที่จะอาบนิวตรอน

1.3.3 ก้านอะคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร และแผ่นอะคริลิกหนา 1 มิลลิเมตร สำหรับใช้แขวนต้นกำเนิดนิวตรอนเพื่อให้หมุนเป็นมุมต่าง ๆ ได้

1.3.4 น็อตสำหรับใช้ยึดอุปกรณ์กับตัวถังน้ำ

1.3.5 ไม้โปรแทกเตอร์แบบครึ่งวงกลมเพื่อใช้ในการวัดมุม

1.3.7 แท่งคอนกรีต ตะกั่ว พาราฟิน และผงบอแรกซ์ เพื่อเป็นตัวกันรังสีแกมมาและนิวตรอน

1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปลั๊กนิวตรอนในพาราฟิน

1.4.1 แท่งพาราฟิน ใช้เป็นตัวลดพลังงานและเป็นตัวป้องกันอันตรายจากนิวตรอน

1.4.2 คอนกรีต ตะกั่ว และผงบอแรกซ์ สำหรับเป็นตัวกันรังสีแกมมาและนิวตรอน

1.4.3 แผ่นพลาสติกใส และสก็อตเทปขนาดกว้าง สำหรับติดและยึดแท่งพาราฟิน

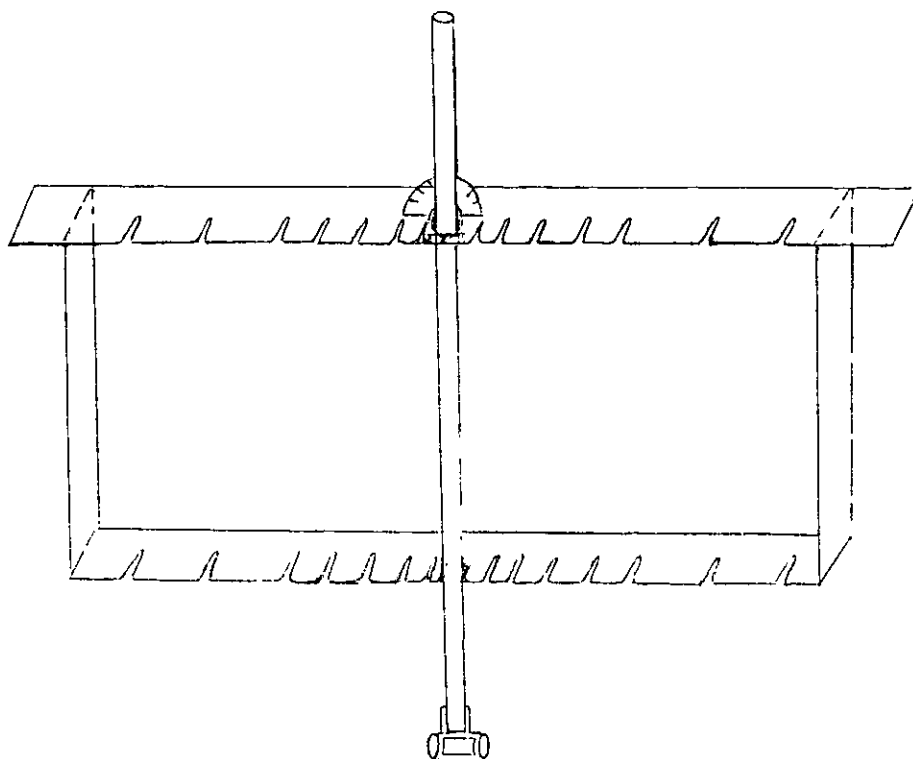
2. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

2.1 ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์การทดลองเพื่อหาปลั๊กนิวตรอนในน้ำ นำถังน้ำมาทาสีกันสนิมทั้งไว้จนแห้ง แล้วสร้างอุปกรณ์ที่วางต้นกำเนิดนิวตรอนและที่วางธาตุที่จะอาบนิวตรอน ดังนี้

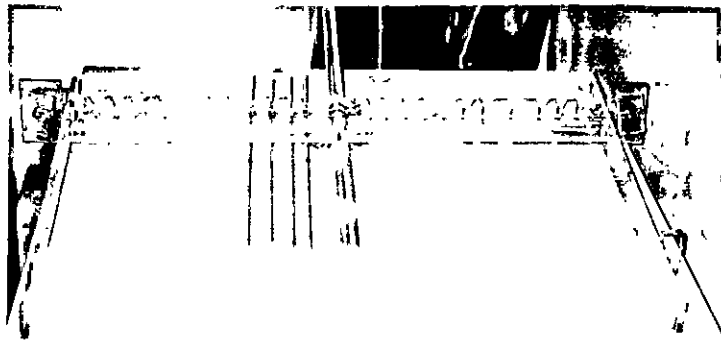
2.1.1 ใช้ก้านอะคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร เป็นก้านสำหรับยึดต้นกำเนิดนิวตรอน โดยต้นกำเนิดนิวตรอนวางอยู่ในท่อทรงกระบอกที่ทำขึ้นจากแผ่นอะคริลิกหนา 1 มิลลิเมตร มีลักษณะและขนาดเท่ากับต้นกำเนิดนิวตรอน โดยให้ต้นกำเนิดนิวตรอนวางอยู่ในแนวนอน และสามารถหมุนต้นกำเนิดนิวตรอนในแนวราบเป็นมุมตามที่ต้องการจากการหมุนก้านอะคริลิก

2.1.2 นำแผ่นอะคริลิกหนา 6 มิลลิเมตร ตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า 2 แผ่น ขนาดกว้างเท่ากัน แผ่นแรกมีความยาว 70 เซนติเมตร เพื่อเป็นตัวยึดก้านอะคริลิกที่ใช้ตัวแขวนธาตุที่จะอาบ

นิวตรอน และก้านอะคริลิกที่แขวนต้นกำเนิดนิวตรอน ส่วนแผ่นที่สองมีความยาวพอดีที่จะใส่ลงไปในตัวถัง เพื่อเป็นตัวบังคับให้ก้านอะคริลิกที่แขวนธาตุอยู่ในแนวตั้งเป็นเส้นตรง ที่บริเวณตรงกลางของแผ่นอะคริลิกทั้งสองเจาะไว้ด้านข้าง ให้ก้านอะคริลิกที่แขวนต้นกำเนิดนิวตรอนสอดเข้าไปได้ ทำตัวล็อกเพื่อให้ต้นกำเนิดนิวตรอนติดอยู่กับแผ่นอะคริลิก ติดไม้โป๊รแทกเตอร์เพื่อเป็นตัวบอกมุมเจาะด้านข้างของแผ่นอะคริลิกทั้งสองเป็นระยะ 3.3 , 5 , 7 , 9 , 11 , 15 และ 21 เซนติเมตร ทั้งสองข้าง โดยวัดจากตำแหน่งตรงกลางของแผ่นออกไป ซึ่งระยะต่าง ๆ นี้ เป็นระยะที่ต้องการหาฟลักซ์นิวตรอน จากนั้นนำแผ่นอะคริลิกทั้งสองมาประกอบเข้าด้วยกัน โดยใช้แผ่นอะคริลิกอีกสองแผ่นเป็นตัวยึด ให้รอยเจาะที่ระยะต่าง ๆ ของแผ่นทั้งสองตรงกัน ดังภาพประกอบ 12 และ 13



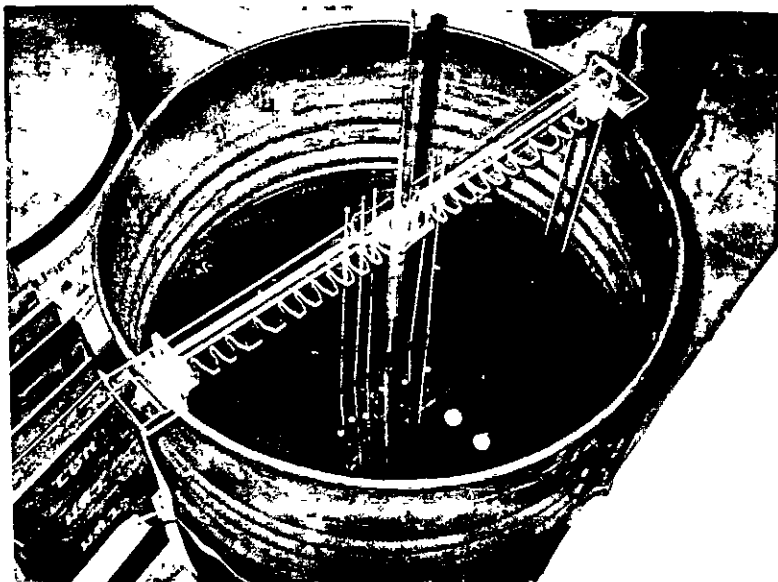
ภาพประกอบ 12 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้แขวนธาตุและแขวนต้นกำเนิดนิวตรอน



ภาพประกอบ 13 อุปกรณ์ที่ใช้แขวนธาตุและแขวนต้นกำเนิดนิวตรอนเมื่อสร้างเสร็จแล้ว

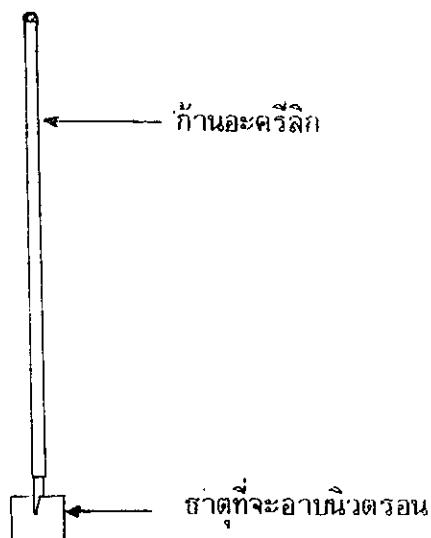
2.1.3 นำชุดการทดลองที่สร้างเสร็จแล้วไปประกอบในถังน้ำที่เตรียมไว้ ดังภาพประกอบ

14



ภาพประกอบ 14 อุปกรณ์ในการอาบนิวตรอนในน้ำ

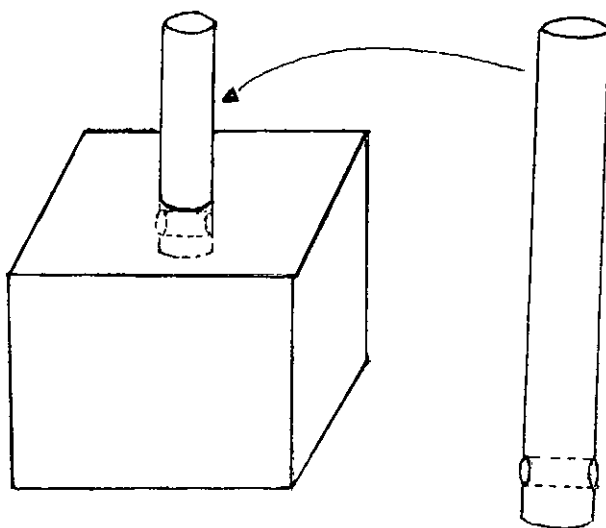
2.1.4 ที่แขวนธาตุสำหรับอาบนิวตรอนใช้ก้านอะคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ตัดเป็นเส้นยาว 50 เซนติเมตร ที่ตรงปลายก้านอะคริลิกติดที่หนีบธาตุที่จะนำไปอาบนิวตรอนโดยทำจากอะคริลิกแผ่นหนา 1 มิลลิเมตร ดังภาพประกอบ 15



ภาพประกอบ 15 ที่แขวนธาตุที่จะอาบนิวตรอนในน้ำ

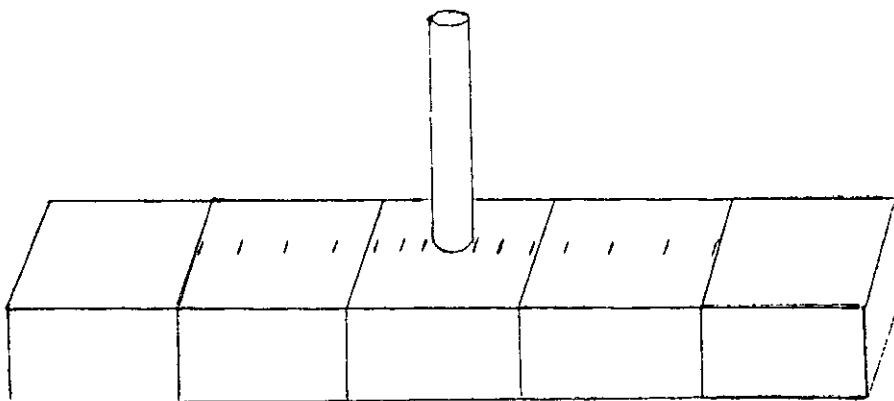
2.2 ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์การทดลองเพื่อหาฟลักซ์นิวตรอนในพาราฟิน นำก้อนพาราฟินขนาด 10 x 15 x 15 เซนติเมตร มาประกอบเป็นชุดการทดลองการอาบนิวตรอนในพาราฟิน โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 บริเวณที่วางต้นกำเนิดนิวตรอน หลอมพาราฟินเป็นแท่งขนาด 10 x 15 x 15 เซนติเมตร โดยบริเวณตรงกลางเจาะเป็นท่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.2 เซนติเมตร ลึก 5 เซนติเมตร เพื่อวางพาราฟินรูปทรงกระบอกซึ่งเป็นที่วางต้นกำเนิดนิวตรอน โดยทรงกระบอกมีความสูง 35 เซนติเมตร ที่ระยะ 2 เซนติเมตรจากปลายด้านล่างของทรงกระบอก เจาะเป็นช่องตามแนวนอน เพื่อวางต้นกำเนิดนิวตรอน ดังภาพประกอบ 16



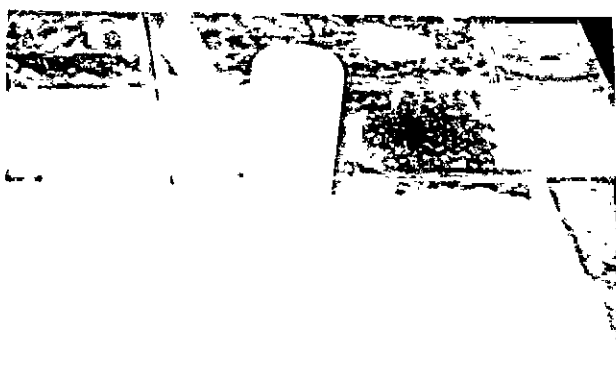
ภาพประกอบ 16 ที่วางต้นกำเนิดนิวตรอนในพาราฟิน

2.2.2 บริเวณที่วางธาตุสำหรับอาบนิวตรอน นำแท่งพาราฟินขนาด 10 x 15 x 15 เซนติเมตร มาเรียงต่อจากแท่งพาราฟินที่เป็นตัววางต้นกำเนิดนิวตรอนทั้งสองด้าน แล้วเจาะช่องขนาด 1 x 1.5 x 0.3 เซนติเมตรที่ระยะ 3.5, 5, 7, 9, 11, 15 และ 21 เซนติเมตร ทั้งสองด้าน โดยเริ่มจากจุดศูนย์กลางของต้นกำเนิดนิวตรอน เพื่อเป็นตำแหน่งที่วางธาตุที่จะอาบนิวตรอน ดังภาพประกอบ 17



ภาพประกอบ 17 ที่วางธาตุที่อาบนิวตรอนในพาราฟิน

2.2.3 นำแท่งพาราฟินขนาด 10 x 15 x 15 เซนติเมตร มาประกอบเป็นชุดการอาบนิวตรอน โดยวางล้อมรอบที่วางธาตุและที่วางต้นกำเนิดนิวตรอน ซึ่งแท่งพาราฟินที่วางเหนือที่วางธาตุที่อาบนิวตรอนสามารถเลื่อนเข้าออกได้ เพื่อนำธาตุที่อาบนิวตรอนไปวัดรังสี โดยใช้สก็อตเทปใสยึดพาราฟินเข้าด้วยกัน และใช้เป็นตัวตั้งแท่งพาราฟินออก ดังภาพประกอบ 18



ภาพประกอบ 18 ชุดการอาบนิวตรอนในพาราฟิน

2.3 ขั้นตอนการหาประสิทธิภาพของหัววัดรังสีแกมมา

การหาประสิทธิภาพของรังสีแกมมาแบ่งออกเป็นขั้นตอนดังนี้

2.3.1 เลือกต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน (standard source) ที่ทราบค่าพลังงานกัมมันตภาพครึ่งชีวิต ความเข้มของรังสีแกมมา ณ พลังงานต่าง ๆ พร้อมทั้ง วัน เดือน ปี ที่ผลิตต้นกำเนิดรังสีอย่างละเอียด ดังตาราง 7

ตาราง 7 ต้นกำเนิดรังสีแกมมาผลิตเมื่อวันที่ 1 สิงหาคม พ.ศ. 2518

ต้นกำเนิดรังสี มาตรฐาน	ครึ่งชีวิต (ปี)	กัมมันตภาพ (Ci)	พลังงานของรังสีแกมมา (keV)	ความเข้มของรังสีแกมมา (%)
Am-241	432.877	11.28	59.537	36.00
Ba-133	10.542	11.21	53.155	2.20
			80.997	34.00
			276.397	7.10
			302.851	18.33
			356.005	62.30
Cs-137	30.162	10.30	661.645	84.6
Co-60	5.275	10.47	1173.238	99.87
			1332.501	99.98

2.3.2 วัดรังสีแกมมาโดยวางต้นกำเนิดรังสีติดกับหัววัด HpGe บันทึกอัตราการนับ (cps)

ได้ผลการทดลองดังตาราง 10 ในบทที่ 4

2.3.3 คำนวณหาค่ากัมมันตภาพของต้นกำเนิดรังสีแกมมามาตรฐานขณะทำการวัด (A)

โดยใช้สมการ

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

ซึ่งได้ผลการทดลองดังตาราง 9 ในบทที่ 4

นำค่ากัมมันตภาพ และอัตราการนับที่ได้จากข้อ 2.3.2 มาคำนวณหาประสิทธิภาพของเครื่องวัดที่พลังงานต่าง ๆ ที่ต้นกำเนิดรังสีปล่อยออกมาโดยใช้สมการ (35) ได้ผลดังตาราง 11 ในบทที่ 4

2.3.4 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของหัววัดกับระดับพลังงานของรังสีแกมมาโดยให้ประสิทธิภาพของหัววัดเป็นแกนตั้ง ระดับพลังงานเป็นแกนนอน ดังแสดงในภาพประกอบ 20 ในบทที่ 4

2.4 ขั้นตอนการหาฟลักซ์นิวตรอนโดยวิธีนิวตรอนเอกติเวชัน

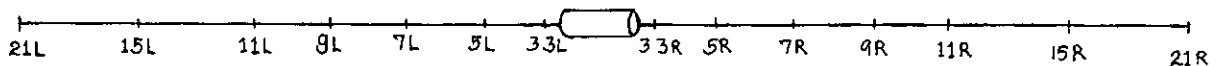
การหาฟลักซ์นิวตรอนโดยวิธีนิวตรอนเอกติเวชัน เป็นการหาฟลักซ์นิวตรอนเร็ว และฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลโดยการนำธาตุไปอาบนิวตรอน เพื่อให้เกิดกัมมันตภาพรังสี แล้ววัดกัมมันตภาพที่เกิดขึ้น จากกัมมันตภาพที่ได้นำไปคำนวณหาฟลักซ์นิวตรอนอีกทีหนึ่ง ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้แผ่นอลูมิเนียมขนาด 1 ตารางเซนติเมตร หนา 0.34 เซนติเมตร หนักประมาณ 0.3 กรัม ไปอาบนิวตรอนเพื่อหาฟลักซ์นิวตรอนเร็ว ส่วนฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลใช้แผ่นอินเดียมขนาด 1 ตารางเซนติเมตร หนา 0.26 มิลลิเมตร หนักประมาณ 0.19 กรัม และแผ่นดีสโพรเซียมขนาด 1 ตารางเซนติเมตร หนา 0.12 เซนติเมตร หนักประมาณ 0.08 กรัม ไปอาบนิวตรอน ซึ่งมีวิธีการหาฟลักซ์นิวตรอนดังนี้

2.4.1 ชั่งน้ำหนักหามาวล และวัดความหนาของแผ่นอินเดียม แผ่นดีสโพรเซียม และแผ่นอลูมิเนียม หาค่าภาคตัดขวาง ค่าความอุดม ค่าครึ่งชีวิตของไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างนิวตรอนกับธาตุทั้งสามไว้ ซึ่งค่าต่าง ๆ ดังกล่าวแสดงดังตาราง 8

ตาราง 8 ค่าคงที่ต่าง ๆ ของธาตุอลูมิเนียม ธาตุอินเดียม และธาตุดีสโพรเซียม

ธาตุ	น้ำหนักอะตอม	ไอโซโทป (ความอุดม)	ไอโซโทปกัมมันตรังสี (ครึ่งชีวิต)	ภาคตัดขวาง (บาร์น)
อลูมิเนียม	26.98	Al-27(100)	Mg-27 (9.5 min) Na-24 (15 hr)	11×10^{-3} 0.725×10^{-3}
อินเดียม	114.82	In-115(95.77)	In-116m (54.12 min) In-116 (14.1 s)	160 ± 2 42 ± 1
ดีสโพรเซียม	162.50	Dy-164(28.18)	Dy-164m (1.26 min) Dy-165 (139 min)	2100 ± 400 2600 ± 200

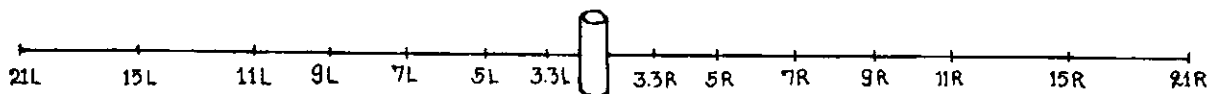
2.4.2 นำแผ่นอินเดียม แผ่นดีสโพรเซียม และ แผ่นอลูมิเนียม ไปอาบนิวตรอนที่ระยะต่าง ๆ โดยการอาบแต่ละครั้งจะอาบเป็นชุด ๆ ชุดแรกเป็นการอาบแผ่นอินเดียม ชุดที่สองเป็นการอาบแผ่นดีสโพรเซียม ชุดที่สามอาบแผ่นอลูมิเนียม แต่ละชุดจะอาบนิวตรอนเมื่อแนวแกนทรงกระบอกของต้นกำเนิดนิวตรอนทำมุม 0° , 45° และ 90° องศา กับแนวที่วางธาตุ โดยแต่ละมุมจะหาฟลักซ์นิวตรอนที่ตำแหน่งห่างจากจุดศูนย์กลางของต้นกำเนิดนิวตรอน เป็นระยะ 3.3, 5, 7, 9, 11, 15 และ 21 เซนติเมตร ทั้งทางด้านขวาและด้านซ้ายของต้นกำเนิดนิวตรอน ดังนั้นเพื่อความสะดวกจะเรียกระยะที่ห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอนทางด้านขวาเป็นระยะ 3.3R, 5R, 7R, 9R, 11R, 15R และ 21R และเรียกระยะที่ห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอนทางด้านซ้ายเป็นระยะ 3.3L, 5L, 7L, 9L, 11L, 15L และ 21L ดังภาพประกอบ 19 สำหรับการวัดฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลโดยใช้แผ่นอินเดียม แต่ละระยะจะมีการอาบนิวตรอน 2 ครั้ง โดยครั้งแรกอาบนิวตรอนโดยไม่มีแผ่นแคดเมียมหุ้ม ครั้งหลังอาบนิวตรอนโดยนำธาตุไปหุ้มแผ่นแคดเมียมก่อนอาบ ส่วนธาตุดีสโพรเซียมไม่ใช้แผ่นแคดเมียมหุ้ม เพราะธาตุดีสโพรเซียมจะทำปฏิกิริยา (n, γ) กับนิวตรอนเทอร์มัลได้ดี และทำปฏิกิริยากับนิวตรอนอีพิเทอร์มัลน้อยมาก



ก. แสดงระยะต่าง ๆ เมื่อต้นกำเนิดนิวตรอนทำมุม 0° กับแนวที่วางธาตุที่อาบนิวตรอน



ข. แสดงระยะต่าง ๆ เมื่อต้นกำเนิดนิวตรอนทำมุม 45° กับแนวที่วางธาตุที่อาบนิวตรอน



ค. แสดงระยะต่าง ๆ เมื่อต้นกำเนิดนิวตรอนทำมุม 90° กับแนวที่วางธาตุที่อาบนิวตรอน

ภาพประกอบ 19 ตำแหน่งที่วัดฟลักซ์นิวตรอนเมื่อหมุนต้นกำเนิดนิวตรอนเป็นมุมต่าง ๆ

2.4.3 นำแผ่นอินเดียม แผ่นดีสโปรเซียม และแผ่นอลูมิเนียม ที่อาบนิวตรอนจนอิ่มตัวแล้ว ไปทำการวัดรังสีแกมมาที่แผ่ออกมาด้วยหัววัดรังสีที่ทำการปรับเทียบพลังงานมาแล้ว โดยวัดที่ระยะติดกับหัววัด บันทึกจำนวนนับ เวลาที่ใช้ในการวัด เวลาตั้งแต่หยุดอาบนิวตรอนจนเริ่มวัดรังสี (t_1) เวลาตั้งแต่หยุดอาบนิวตรอนจนถึงสิ้นสุดการวัดรังสี (t_2) ไว้

2.4.4 นำค่าต่าง ๆ ที่ได้มาคำนวณหาฟลักซ์นิวตรอน โดยคำนวณฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัล จากสมการ (34) และคำนวณฟลักซ์นิวตรอนเร็วจากสมการ (23) ซึ่งได้ค่าฟลักซ์นิวตรอนดังแสดงในบทที่ 4

2.5 ขั้นตอนการหาฟลักซ์นิวตรอนโดยทฤษฎีการฟุ้ง

ในการหาฟลักซ์นิวตรอนโดยใช้ทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม เป็นการหาฟลักซ์นิวตรอน โดยการแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (41) เพื่อหาฟลักซ์นิวตรอนเร็ว และสมการ (43) เพื่อหาฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัล

2.5.1 ฟลักซ์นิวตรอนเร็ว

ในการหาค่าฟลักซ์นิวตรอนเร็วจากสมการ (41) จะต้องหาค่าสัมประสิทธิ์การฟุ้งของนิวตรอนเร็ว (D_f) และค่าความยาวการฟุ้งของนิวตรอนเร็ว (L_f) โดยที่

$$K_f^2 = \frac{1}{L_f^2} = \frac{\Sigma_f}{D_f} \quad (44)$$

ทั้งค่าสัมประสิทธิ์การฟุ้งและค่าความยาวการฟุ้งของนิวตรอนเร็ว จะขึ้นอยู่กับตัวกลางที่ใช้ลดพลังงานนิวตรอน ค่าความยาวการฟุ้งของนิวตรอนเร็วหาได้จากสมการ (อุไรวรรณ จุลภาต. 2527 : 112-114)

$$L_f^2 = \frac{2N_{fast}\lambda_g}{6(1-\bar{\mu})} \quad (45)$$

โดยที่ N_{fast} = จำนวนครั้งของการชนของนิวตรอนเร็วจนกลายเป็นนิวตรอนเทอร์มัล ซึ่งหาได้จากสมการ (7)

λ_g = ระยะทางเฉลี่ยที่นิวตรอนกระเจิงในแต่ละครั้ง หาได้จาก

$$\lambda_s = \frac{1}{\sum a} \quad (46)$$

$\bar{\mu}$ = ค่าเฉลี่ยของโคไซน์ของมุมที่นิวตรอนชนแล้วกระจายไปในตัวกลาง หาได้จาก

$$\bar{\mu} = \frac{2}{3} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{N_i \sigma_s^i}{A_i} \bigg/ \sum_{i=1}^N N_i \sigma_s^i \quad (47)$$

โดยที่ N_i = จำนวนอะตอมของธาตุ i ในสารประกอบ

A = เลขมวลของธาตุ

2.5.2 นิวตรอนเทอร์มัล

หาพหุคูณนิวตรอนเทอร์มัลจากสมการ (43) โดยหาค่าสัมประสิทธิ์การฟุ้งของนิวตรอนเทอร์มัล (D) และค่าความยาวการฟุ้งของนิวตรอนเทอร์มัล (L) จาก

$$K^2 = \frac{1}{L^2} = \frac{\sum a}{D} \quad (48)$$

ค่าความยาวการฟุ้งของนิวตรอนเทอร์มัล หาได้จากสมการ

$$L^2 = \frac{\lambda_s \lambda_a}{3(1-\bar{\mu})} \quad (49)$$

โดยที่ λ_a = ระยะทางที่นิวตรอนเคลื่อนที่ได้จริงก่อนที่จะถูกดูดกลืน ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\lambda_a = \frac{1}{\sum a} \quad (50)$$

บทที่ 4

การวิเคราะห์ข้อมูลและผลการทดลอง

1. ผลการคำนวณหาประสิทธิภาพของหัววัดรังสีแกมมา

1.1 เมื่อทำการวัดต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน และคำนวณค่ากัมมันตภาพรังสีแกมมา ณ เวลาทำการวัด จากสมการ (44) จะได้ผลดังตาราง 9

ตาราง 9 กัมมันตภาพรังสีแกมมา ณ เวลาทำการวัด (2 กรกฎาคม 2537)

ต้นกำเนิดรังสี มาตรฐาน	ครึ่งชีวิต $T_{1/2}$ (ปี)	กัมมันตภาพรังสีแกมมา ตอนเริ่มต้น A_0 (dps)	กัมมันตภาพรังสีแกมมา ขณะทำการวัด A (dps)
Am-241	432.277	41.736×10^4	40.488×10^4
Ba-133	10.542	41.477×10^4	11.969×10^4
Cs-137	30.162	38.300×10^4	24.682×10^4
Co-60	5.275	38.739×10^4	3.230×10^4

1.2 อัตราการนับรังสีแกมมาที่หัววัดสามารถวัดได้ โดยวางต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานติดกับหัววัด ได้ผลดังตาราง 10

ตาราง 10 อัตราการนับของรังสีแกมมาที่ระยะติดหัววัด

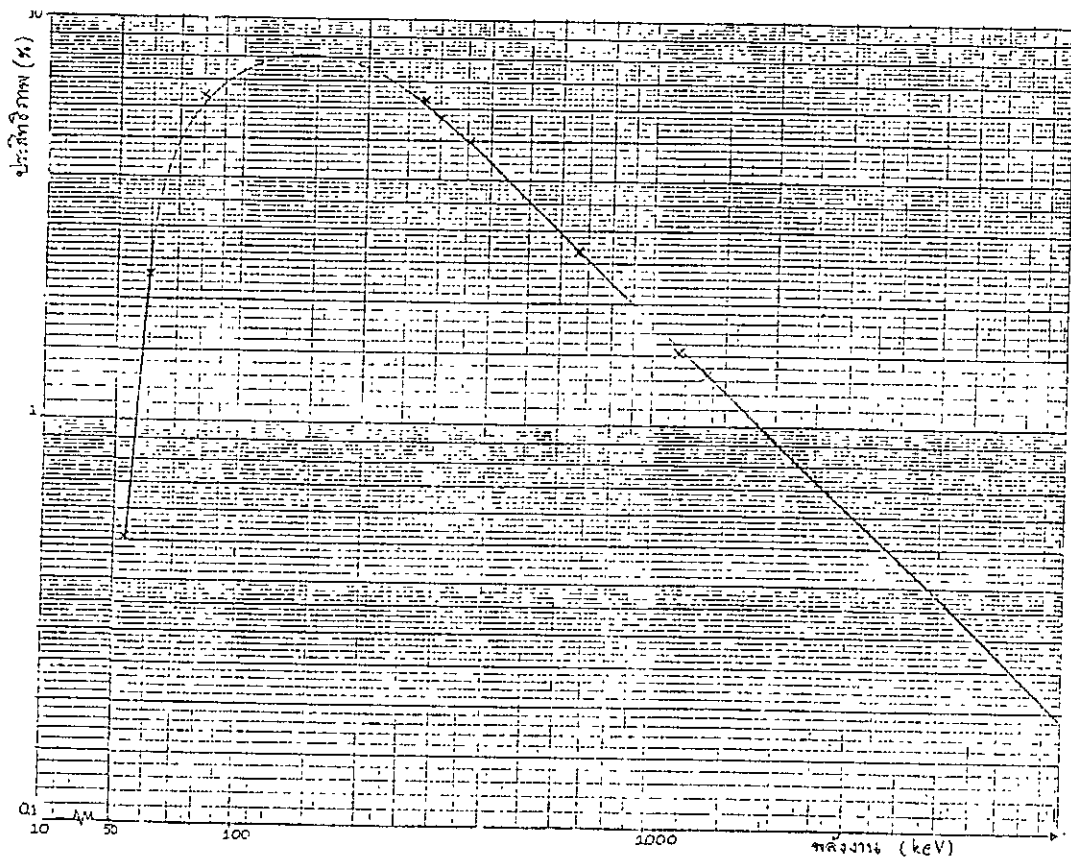
ต้นกำเนิดรังสี มาตรฐาน	ระดับพลังงาน E_γ (keV)	ความเข้มของรังสีแกมมา γ (%)	อัตราการนับ C (cps)
Am-241	59.537	36.00	3344.00
Ba-133	53.155	2.20	14.75
	80.997	34.00	2604.36
	276.397	7.10	534.67
	302.851	18.33	1265.60
	356.005	62.30	3684.85
Cs-137	661.645	84.60	5582.95
Co-60	1173.238	99.87	492.48
	1332.501	99.98	436.76

1.3 เมื่อนำค่ากัมมันตภาพรังสีแกมมาขณะทำการวัด (A) ความเข้มของรังสีแกมมา (γ) และอัตราการนับ (C) จากตาราง 9 และ 10 มาหาประสิทธิภาพของหัววัดรังสีแกมมา (E_{eff}) จากสมการ (45) จะได้ประสิทธิภาพของหัววัดรังสีแกมมาที่ระยะติดกับหัววัดดังตาราง 11

ตาราง 11 ประสิทธิภาพของหัววัดรังสีแกมมาที่ระดับพลังงานต่าง ๆ

ต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน	ระดับพลังงาน E_γ (keV)	ประสิทธิภาพของหัววัดรังสีแกมมา E_{eff} (%)
Am-241	59.537	2.294
Ba-133	53.155	0.560
	80.997	6.400
	276.397	6.292
	302.851	5.769
	356.005	4.942
Cs-137	661.645	2.674
Co-60	1173.238	1.527
	1332.501	1.353

1.4 เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของหัววัดรังสีแกมมากับพลังงานได้
กราฟดังกล่าวประกอบ 20



ภาพประกอบ 20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของหัววัดกับพลังงานของรังสีแกมมา

1.5 จากกราฟที่ได้ในข้อ 1.4 เขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของหัววัด และพลังงานของรังสีแกมมา เพื่อนำไปใช้หาประสิทธิภาพของหัววัด ณ พลังงานที่ต้องการ โดย

1.5.1 ที่พลังงานน้อยกว่า 200 keV ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของหัววัดกับ พลังงานของรังสีแกมมาเป็นแบบเส้นโค้งโพลิโนเมียล ซึ่งมีรูปแบบการทั่วไปดังนี้ (Daroczy, 1982 : 17)

$$\begin{aligned}
 E_{ff} &= \sum_{j=0}^1 b_j E_v^j \\
 &= b_0 + b_1 E_v + b_2 E_v^2 + \dots
 \end{aligned} \tag{51}$$

โดยที่ E_v = พลังงานของรังสีแกมมา
 E_{ff} = ประสิทธิภาพของหัววัด
 $b_0, b_1, b_2, \dots$ = ค่าคงที่

จากการทดลอง ที่พลังงานน้อยกว่า 200 keV วัดประสิทธิภาพของหัววัดได้ 3 ค่า คือที่พลังงาน 59.537 keV, 53.155 keV และ 80.997 keV นำมาแก้สมการโพลิโนเมียล อันดับสองเพื่อหาค่า b_0, b_1 และ b_2 และได้สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของหัววัดและพลังงานของรังสีแกมมาที่พลังงานน้อยกว่า 200 keV คือ

$$E_{ff} = -23.085 + 0.599E_v + 0.0029E_v^2 \tag{52}$$

ในการทดลองหาประสิทธิภาพนิวตรอนเทอร์มัลโดยใช้ธาตุ Dy-164 จะวัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 94.6 keV ซึ่งจากสมการ (52) ได้ประสิทธิภาพของหัววัดรังสีแกมมา ณ พลังงาน 94.6 keV มีค่าเท่ากับ 7.627%

1.5.2 ที่พลังงานมากกว่า 200 keV ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของหัววัด และ พลังงานของรังสีแกมมาแสดงได้จากสมการ (54) คือ (Daroczy, 1982 : 17)

$$E_{ff} = \exp(A + B \ln E_v + C \ln^2 E_v) \tag{53}$$

โดยที่ A, B, C = ค่าคงที่

เมื่อนำค่าประสิทธิภาพของหัววัดที่พลังงาน 302.851 keV, 661.645 keV และ

1332.501 keV ที่ได้จากการทดลองมาแทนในสมการ (53) เพื่อหาค่าคงที่ A , B และ C จะได้สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของหัววัดและพลังงานของรังสีแกมมาเป็น

$$E_{ff} = \exp(7.547 - 1.043 \ln E_v + 0.005 \ln^2 E_v) \quad (54)$$

ประสิทธิภาพของหัววัดรังสีที่นำไปใช้ในการวัดรังสีแกมมาซึ่งหาได้จากสมการ (54) มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

ที่ $E_v = 361.7$ keV	จะได้	$E_{ff} = 4.840\%$
$E_v = 844$ keV	จะได้	$E_{ff} = 2.109\%$
$E_v = 1097.1$ keV	จะได้	$E_{ff} = 1.634\%$
$E_v = 1293.4$ keV	จะได้	$E_{ff} = 1.392\%$
$E_v = 1368.4$ keV	จะได้	$E_{ff} = 1.319\%$

2. ผลการคำนวณหาฟลักซ์นิวตรอนโดยวิธีนิวตรอนแอกติเวชัน

จากการทดลองหาฟลักซ์นิวตรอนโดยวิธีนิวตรอนแอกติเวชันในตัวกลางน้ำและนารานิน จะหาค่าของฟลักซ์นิวตรอนเมื่อหมุนต้นกำเนิดนิวตรอนเป็นมุม 0° , 45° และ 90° เพื่อศึกษาการกระจายของฟลักซ์นิวตรอนในมุมต่าง ๆ โดยแต่ละมุมจะหาค่าฟลักซ์นิวตรอนที่ห่างจากจุดศูนย์กลางของต้นกำเนิดนิวตรอนทางด้านขวาคือระยะ 3.3R , 5R , 7R , 9R , 11R , 15R และ 21R ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของต้นกำเนิดนิวตรอนทางด้านซ้ายคือระยะ 3.3L , 5L , 7L , 9L , 11L , 15L และ 21L ซึ่งแต่ละระยะและแต่ละมุมจะทำการวัดฟลักซ์นิวตรอน 3 ครั้ง แล้วหาค่าฟลักซ์นิวตรอนเฉลี่ย ยกเว้นตอนหาฟลักซ์นิวตรอนเร็วจากปฏิกิริยา (n,α) เนื่องจากครึ่งชีวิตของ Na-24 มีค่ายาวนาน (15 ชั่วโมง) ในการอาบนิวตรอนให้อิ่มตัวจึงต้องใช้เวลาาน ดังนั้นจึงทำการวัดฟลักซ์นิวตรอนเร็วที่มุมและระยะต่าง ๆ เพียงครั้งเดียว

2.1 ผลการคำนวณหาฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัล

ในการวัดฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในงานวิจัยนี้ใช้แผ่นอินเดียม และแผ่นดีสโพรเซียม ไปอาบนิวตรอนที่ระยะต่าง ๆ โดยแต่ละระยะทำการวัด 3 ครั้ง แต่เมื่อนำแผ่นเคดเมียมมาหุ้มแผ่นอินเดียมก่อนอาบนิวตรอน ทำการวัดเพียงครั้งเดียว

ตัวอย่างการคำนวณผลกึ่งนิวตรอนเทอร์มัลโดยใช้แผ่นอินเดียม

เมื่อนำแผ่นอินเดียม หนัก 0.1723 กรัม ไปอบนิวตรอนในน้ำที่ระยะ 3.3L มม 45° จนอิ่มตัวนิวตรอนเทอร์มัลทำปฏิกิริยากับ In-115 ได้ In-116m มีครึ่งชีวิต 54.12 นาที สลายให้รังสีแกมมาหลายระดับพลังงาน ในงานวิจัยนี้วัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 1097.1 keV และ 1293.4 keV โดยมีข้อมูลดังนี้

$$\text{มวลของธาตุ In (W)} = 0.1723 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักอะตอมของ In (M)} = 114.82$$

$$\text{เลขอะโวคาโดร (N}_a\text{)} = 6.02 \times 10^{23}$$

$$\text{ความอุดมของ In-115 (K)} = 95.77\%$$

$$\text{ความหนาแน่นของ In (\rho)} = 7.28 \text{ กรัม/ซม.}^3$$

$$\text{ความหนาของแผ่น In (d)} = 0.26 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$\text{รัศมีของแผ่น In (R)} = 0.564 \text{ เซนติเมตร}$$

$$\text{ครึ่งชีวิต (T}_{1/2}\text{) ของ In-116m} = 54.12 \text{ นาที}$$

$$\text{พื้นที่ภาคตัดขวางในการดูดกลืนนิวตรอน (\sigma_{ab})} = 202 \times 10^{-24} \text{ ซม.}^2 \text{ (ที่ } 20^{\circ}\text{C)}$$

$$\text{พื้นที่ภาคตัดขวางในการดูดกลืนนิวตรอนจากปฏิกิริยา (n, \gamma) (\sigma_{\gamma})} = 160 \times 10^{-24} \text{ ซม.}^2 \text{ (ที่ } 20^{\circ}\text{C)}$$

$$\text{คำนวณค่า } \sigma_{ab}(kT) \text{ และ } \sigma_{\gamma}(kT) \text{ ที่อุณหภูมิห้อง (30}^{\circ}\text{C) โดยที่}$$

$$\sigma(kT) = \sigma_0 \sqrt{\frac{E_0}{E_t}} \quad (55)$$

$$\text{โดยที่ } E_0 = \text{พลังงานจลน์ของนิวตรอนเทอร์มัลที่อุณหภูมิ } 20^{\circ}\text{C}$$

$$E_t = \text{พลังงานจลน์ของนิวตรอนเทอร์มัลที่อุณหภูมิ T มีค่า} = kT$$

$$k = \text{ค่าคงที่ของโบลส์แมน เท่ากับ } 8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/}^{\circ}\text{K}$$

$$T = \text{อุณหภูมิ } ^{\circ}\text{K (273 + 30)}$$

ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned} \sigma_{ab}(kT) &= 202 \times 10^{-24} \sqrt{0.025/8.617 \times 10^{-5} \times 303} \\ &= 197.661 \times 10^{-24} \text{ ซม.}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_a(kT) &= 160 \times 10^{-24} \sqrt{0.025/8.617 \times 10^{-5} \times 303} \\ &= 156.564 \times 10^{-24} \text{ ซม.}^2\end{aligned}$$

หาค่า α

$$\begin{aligned}\text{จาก } \Sigma_{ab}d &= N\sigma_{ab}(kT)d = \frac{\rho N_a}{M} \sigma_{ab}(kT)d \\ &= \frac{7.28 \times 6.02 \times 10^{23} \times 197.661 \times 10^{-24} \times 0.26 \times 10^{-1}}{114.82} \\ &= 0.196\end{aligned}$$

จากกราฟในภาพประกอบ 1 เมื่อ $N\sigma_{ab}(kT)d = 0.196$ จะได้ค่า $\alpha = 0.292$

หาค่า f_{th}

จากสมการ (31)

$$f_{th} = 1 + \frac{\alpha}{2} \cdot \left[\frac{3RL}{2\lambda_{tr}(R+L)} - 1 \right]$$

$$L = 2.76 \text{ เซนติเมตร}$$

$$\lambda_{tr} = 0.425 \text{ เซนติเมตร}$$

$$R = 0.564 \text{ เซนติเมตร}$$

$$\alpha = 0.292$$

จะได้

$$\begin{aligned}f_{th} &= 1 + \frac{0.292}{2} \cdot \left[\frac{3 \times 0.564 \times 2.76}{2 \times 0.425 \times (0.564 + 2.76)} - 1 \right] \\ &= 1.095\end{aligned}$$

เนื่องจากแผ่น Cd ที่ใช้หุ้มธาตุ In มีความหนา 0.32 มิลลิเมตร ประมาณ 0.0126 นิ้ว และความหนาของแผ่น In ที่ใช้มีค่าประมาณ 190 มิลลิกรัม/ซม.² จากกราฟในภาพประกอบ (5) ถือว่าค่าความหนาของแผ่น Cd มีผลต่อค่าฟลักซ์นิวตรอนน้อยมาก จึงให้ค่า $f_{cd} = 1$

คำนวณหาฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลจากสมการ (34) คือ

$$\phi_{th} = \frac{2[c(t_1, t_2)_{bare} - c(t_1, t_2)_{cd} f_{cd}] \cdot \lambda \cdot f_{th} \cdot 100}{\sqrt{\pi} \cdot E_{eff} \cdot V \cdot N \cdot \sigma_a(kT) (1 - e^{-\lambda T}) (e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2})}$$

ที่รังสีแกมมาพลังงาน 1097.1 keV

$$\text{จำนวนนับ } c(t_1, t_2)_{bare} = 39070$$

$$\text{จำนวนนับ } c(t_1, t_2)_{cd} = 4591$$

$$\text{เวลา } t_1 = 100 \text{ วินาที}$$

$$\text{เวลา } t_2 = 1100 \text{ วินาที}$$

ที่รังสีแกมมาพลังงาน 1293.7 keV

$$\text{จำนวนนับ } c(t_1, t_2)_{bare} = 47055$$

$$\text{จำนวนนับ } c(t_1, t_2)_{cd} = 5558$$

$$\text{เวลา } t_1 = 100 \text{ วินาที}$$

$$\text{เวลา } t_2 = 1100 \text{ วินาที}$$

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (34) จะได้ฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลที่ระยะ 3.3L มุม 45° โดยการวัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 1097.1 keV มีค่าเท่ากับ

$$\phi_{th} = 3.86 \times 10^4 \text{ นิวตรอน/ซม.}^2 \cdot \text{วินาที}$$

ในทำนองเดียวกัน จะได้ฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลที่ระยะ 3.3L มุม 45° โดยการวัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 1293.4 keV มีค่าเท่ากับ

$$\phi_{th} = 3.40 \times 10^4 \text{ นิวตรอน/ซม.}^2 \cdot \text{วินาที}$$

ตัวอย่างการคำนวณผลกัมมันตภาพรังสีนิวตรอนเทอร์มัลโดยใช้แผ่นดีสโพรเซียม

เมื่อนำแผ่นดีสโพรเซียม หนัก 0.0869 กรัม ไปอบนิวตรอนในน้ำที่ระยะ 3.3L มุม 45° จนอิ่มตัว นิวตรอนเทอร์มัลทำปฏิกิริยากับ Dy-164 ได้ Dy-165 มีครึ่งชีวิต 139 นาที สลายให้รังสีแกมมาหลายระดับพลังงาน ในงานวิจัยนี้วัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 94.6 keV และ 361.7 keV โดยมีข้อมูลดังนี้

$$\text{มวลของธาตุ Dy (W)} = 0.0869 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักอะตอมของ Dy (M)} = 162.50$$

$$\text{เลขอะโวกาโดร (N}_a\text{)} = 6.02 \times 10^{23}$$

$$\text{ความอุดมของ Dy-164 (K)} = 28.18\%$$

$$\text{ความหนาแน่นของ Dy (\rho)} = 8.56 \text{ กรัม/ซม.}^3$$

$$\text{ความหนาของแผ่น Dy (d)} = 0.12 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$\text{รัศมีของแผ่น Dy (R)} = 0.564 \text{ เซนติเมตร}$$

$$\text{ครึ่งชีวิต (T}_1\text{)} \text{ ของ Dy-164} = 139 \text{ นาที}$$

$$\text{พื้นที่ภาคตัดขวางในการดูดกลืนนิวตรอน (\sigma_{ab})} = 4700 \times 10^{-24} \text{ ซม.}^2 \text{ (ที่ } 20^\circ\text{C)}$$

$$\text{พื้นที่ภาคตัดขวางในการดูดกลืนนิวตรอนจากปฏิกิริยา (n, \gamma) (\sigma_u)} = 2600 \times 10^{-24} \text{ ซม.}^2 \text{ (ที่ } 20^\circ\text{C)}$$

คำนวณหาค่า $\sigma_{ab}(kT)$ และ $\sigma_u(kT)$ ที่อุณหภูมิห้อง (30°C) จากสมการ (55) จะได้

$$\begin{aligned}\sigma_{ab}(kT) &= 4700 \times 10^{-24} \sqrt{0.025/8.617 \times 10^{-5} \times 303} \\ &= 4599.054 \times 10^{-24} \text{ ซม.}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_u(kT) &= 2600 \times 10^{-24} \sqrt{0.025/8.617 \times 10^{-5} \times 303} \\ &= 2544.818 \times 10^{-24} \text{ ซม.}^2\end{aligned}$$

หาค่า α

$$\begin{aligned}\text{จาก } \Sigma_{ab}d &= N\sigma_{ab}(kT)d = \frac{\rho N_a}{M} \sigma_{ab}(kT)d \\ &= \frac{8.56 \times 6.02 \times 10^{23} \times 4599.054 \times 10^{-24} \times 0.12 \times 10^{-1}}{162.50} \\ &= 1.7501\end{aligned}$$

เมื่อ $N\sigma_{ab}(kT)d = 1.7501$ หาค่า α ได้จากสมการในหน้า 18 คือ

$$\alpha = 1 - e^{-N\sigma_{ab}(kT)d} [1 - N\sigma_{ab}(kT)d] + [N\sigma_{ab}(kT)d]^2 \int_{-\infty}^{-N\sigma_{ab}(kT)d} \frac{e^y}{y} dy$$

$$= 0.826$$

หาค่า f_{th}

จากสมการ (31)

$$f_{th} = 1 + \frac{\alpha}{2} \cdot \left[\frac{3RL}{2\lambda_{tr}(R+L)} - 1 \right]$$

$$L = 2.76 \text{ เซนติเมตร}$$

$$\lambda_{tr} = 0.425 \text{ เซนติเมตร}$$

$$R = 0.564 \text{ เซนติเมตร}$$

$$\alpha = 0.826$$

จะได้

$$f_{th} = 1 + \frac{0.826}{2} \cdot \left[\frac{3 \times 0.564 \times 2.76}{2 \times 0.425 \times (0.564 + 2.76)} - 1 \right]$$

$$= 1.270$$

ที่รังสีแกมมาพลังงาน 94.6 keV

$$\text{จำนวนนับ } c(t_1, t_2) = 79552$$

$$\text{เวลา } t_1 = 100 \text{ วินาที}$$

$$\text{เวลา } t_2 = 5100 \text{ วินาที}$$

ที่รังสีแกมมาพลังงาน 361.7 keV

$$\text{จำนวนนับ } c(t_1, t_2) = 10100$$

$$\text{เวลา } t_1 = 100 \text{ วินาที}$$

$$\text{เวลา } t_2 = 5100 \text{ วินาที}$$

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (34) จะได้ค่าฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลที่ระยะ 3.3L มม 45° โดย รัศมีแกมมา ที่พลังงาน 94.6 keV มีค่าเท่ากับ

$$\phi_{th} = 3.98 \times 10^{-4} \text{ นิวตรอน/ซม.}^2 \cdot \text{วินาที}$$

และค่าฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลที่ระยะและมุมเดียวกัน โดยการวัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 361.7 keV มีค่าเท่ากับ

$$\phi_{th} = 2.90 \times 10^{-4} \text{ นิวตรอน/ซม.}^2 \cdot \text{วินาที}$$

ในการวัดฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในพาราฟินมีวิธีการคำนวณเช่นเดียวกับตอนวัดในน้ำ โดยในพาราฟินมีค่า F_{th} ของแผ่นอินเดียมเท่ากับ 1.108 และ ของแผ่นดีสโพรเซียมเท่ากับ 1.305

ผลการหาฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลโดยการอบแผ่นอินเดียมและแผ่นดีสโพรเซียม ที่มุมและระยะต่าง ๆ ในตัวกลางน้ำและพาราฟินแสดงไว้ในตารางต่อไปนี้

ตาราง 12 ผลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในน้ำ ที่มุม 0° ที่พลังงานต่าง ๆ

ระยะจากจุดศูนย์กลาง ของต้นกำเนิดนิวตรอน (ซม.)	ผลักซ์นิวตรอนเทอร์มัล (นิวตรอน/ซม. ² .วินาที) $\times 10^3$			
	Dy		In	
	$E_v = 94.6 \text{ keV}$	$E_v = 361.7 \text{ keV}$	$E_v = 1097.1 \text{ keV}$	$E_v = 1293.4 \text{ keV}$
3.3R	37.86 $\pm$ 0.45	28.17 $\pm$ 0.60	34.29 $\pm$ 0.52	30.44 $\pm$ 0.60
5R	37.48 $\pm$ 0.95	27.56 $\pm$ 0.82	34.55 $\pm$ 1.09	31.15 $\pm$ 0.72
7R	29.94 $\pm$ 0.89	22.15 $\pm$ 2.05	23.71 $\pm$ 0.64	20.98 $\pm$ 0.61
9R	22.55 $\pm$ 0.86	16.01 $\pm$ 0.64	16.49 $\pm$ 2.18	14.64 $\pm$ 1.83
11R	13.80 $\pm$ 1.71	10.70 $\pm$ 0.46	12.12 $\pm$ 0.40	10.93 $\pm$ 0.43
15R	7.31 $\pm$ 0.47	4.72 $\pm$ 0.18	5.68 $\pm$ 0.39	5.20 $\pm$ 0.17
21R	2.15 $\pm$ 0.21	0.76 $\pm$ 0.21	1.18 $\pm$ 0.14	0.90 $\pm$ 0.02
3.3L	36.14 $\pm$ 0.63	24.57 $\pm$ 1.19	32.06 $\pm$ 2.70	28.79 $\pm$ 2.55
5L	40.50 $\pm$ 0.31	29.03 $\pm$ 0.66	36.70 $\pm$ 0.02	30.06 $\pm$ 3.24
7L	32.33 $\pm$ 4.81	23.73 $\pm$ 1.32	25.99 $\pm$ 0.35	21.99 $\pm$ 1.22
9L	24.69 $\pm$ 0.34	18.26 $\pm$ 0.68	18.83 $\pm$ 2.77	17.79 $\pm$ 0.33
11L	17.90 $\pm$ 0.64	12.28 $\pm$ 0.86	14.84 $\pm$ 0.39	12.99 $\pm$ 0.44
15L	7.98 $\pm$ 0.08	6.54 $\pm$ 0.84	6.44 $\pm$ 0.04	5.63 $\pm$ 0.15
21L	2.19 $\pm$ 0.03	1.69 $\pm$ 0.19	1.51 $\pm$ 0.05	1.31 $\pm$ 0.05

ตาราง 13 ฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในพาราฟิน ที่มุม 0° ที่พลังงานต่าง ๆ

ระยะจากจุดศูนย์กลาง ของต้นกำเนิดนิวตรอน (ซม.)	ฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัล (นิวตรอน/ซม. ² .วินาที) $\times 10^3$			
	Dy		In	
	$E_v = 94.6 \text{ keV}$	$E_v = 361.7 \text{ keV}$	$E_v = 1097.1 \text{ keV}$	$E_v = 1293.4 \text{ keV}$
3.5R	45.76 $\pm$ 2.48	34.16 $\pm$ 0.98	40.91 $\pm$ 1.64	35.09 $\pm$ 0.05
5R	45.40 $\pm$ 2.22	32.12 $\pm$ 1.97	39.11 $\pm$ 6.78	34.58 $\pm$ 6.08
7R	35.40 $\pm$ 2.04	25.81 $\pm$ 1.38	24.99 $\pm$ 0.41	22.65 $\pm$ 0.26
9R	26.73 $\pm$ 3.12	17.16 $\pm$ 0.63	19.39 $\pm$ 0.44	16.97 $\pm$ 0.08
11R	22.42 $\pm$ 1.99	11.51 $\pm$ 1.35	13.14 $\pm$ 0.20	11.37 $\pm$ 0.20
15R	6.31 $\pm$ 0.30	4.18 $\pm$ 0.77	5.85 $\pm$ 0.22	5.01 $\pm$ 0.18
21R	1.83 $\pm$ 0.14	0.29 $\pm$ 0.04	1.37 $\pm$ 0.09	1.14 $\pm$ 0.03
3.5L	44.66 $\pm$ 1.76	32.74 $\pm$ 0.75	42.43 $\pm$ 0.93	34.91 $\pm$ 0.98
5L	47.48 $\pm$ 1.12	33.89 $\pm$ 3.20	36.12 $\pm$ 0.43	30.69 $\pm$ 1.17
7L	35.93 $\pm$ 0.54	26.70 $\pm$ 0.72	27.54 $\pm$ 0.74	25.92 $\pm$ 3.29
9L	26.84 $\pm$ 0.95	19.71 $\pm$ 1.36	18.11 $\pm$ 0.57	15.94 $\pm$ 0.29
11L	17.46 $\pm$ 0.84	13.18 $\pm$ 0.64	14.08 $\pm$ 0.30	12.43 $\pm$ 0.25
15L	7.08 $\pm$ 0.20	4.61 $\pm$ 0.57	5.77 $\pm$ 0.28	5.24 $\pm$ 0.25
21L	1.78 $\pm$ 0.46	0.33 $\pm$ 0.06	1.41 $\pm$ 0.08	1.24 $\pm$ 0.03

ตาราง 14 พลิกซ์นิวตรอนเทอร์มัลในน้ำที่มุม 45° ที่พลังงานต่าง ๆ

ระยะจากจุดศูนย์กลาง ของตัวกำเนิดนิวตรอน (ซม.)	พลิกซ์นิวตรอนเทอร์มัล (นิวตรอน/ซม. ² .วินาที) $\times 10^3$			
	Dy		In	
	$E_v = 94.6 \text{ keV}$	$E_v = 361.7 \text{ keV}$	$E_v = 1097.1 \text{ keV}$	$E_v = 1293.4 \text{ keV}$
3.3R	38.62 $\pm$ 0.16	29.93 $\pm$ 2.69	38.16 $\pm$ 3.47	33.78 $\pm$ 3.55
5R	37.32 $\pm$ 0.89	27.56 $\pm$ 1.23	35.59 $\pm$ 3.83	31.59 $\pm$ 3.24
7R	31.06 $\pm$ 0.98	21.64 $\pm$ 0.41	22.46 $\pm$ 0.68	19.86 $\pm$ 0.66
9R	20.72 $\pm$ 1.20	14.71 $\pm$ 0.78	16.81 $\pm$ 0.03	14.89 $\pm$ 0.22
11R	14.34 $\pm$ 0.84	10.60 $\pm$ 0.93	12.78 $\pm$ 0.42	11.26 $\pm$ 0.32
15R	7.13 $\pm$ 0.42	4.22 $\pm$ 0.28	5.54 $\pm$ 0.21	4.79 $\pm$ 0.22
21R	1.71 $\pm$ 0.07	1.58 $\pm$ 0.20	1.36 $\pm$ 0.02	1.17 $\pm$ 0.11
3.3L	40.30 $\pm$ 1.24	29.30 $\pm$ 0.74	39.10 $\pm$ 0.99	34.46 $\pm$ 0.71
5L	40.37 $\pm$ 0.54	29.68 $\pm$ 0.48	36.02 $\pm$ 4.28	31.84 $\pm$ 3.86
7L	31.46 $\pm$ 2.01	24.31 $\pm$ 2.46	22.88 $\pm$ 5.35	21.45 $\pm$ 1.66
9L	24.46 $\pm$ 1.15	17.07 $\pm$ 0.29	18.38 $\pm$ 0.04	16.39 $\pm$ 0.12
11L	17.49 $\pm$ 1.81	11.82 $\pm$ 1.11	13.09 $\pm$ 0.52	11.58 $\pm$ 0.15
15L	7.05 $\pm$ 0.73	5.13 $\pm$ 1.06	5.87 $\pm$ 0.05	5.19 $\pm$ 0.17
21L	2.03 $\pm$ 0.15	2.74 $\pm$ 0.79	1.48 $\pm$ 0.03	1.36 $\pm$ 0.07

ตาราง 15 พลิกซ์นิวตรอนเทอร์มัลในวราหิน ที่มุม 45° ที่พลังงานต่าง ๆ

ระยะจากจุดศูนย์กลาง ของต้นกำเนิดนิวตรอน (ซม.)	พลิกซ์นิวตรอนเทอร์มัล (นิวตรอน/ซม. ² .วินาที) $\times 10^3$			
	Dy		In	
	$E_v = 94.6 \text{ keV}$	$E_v = 361.7 \text{ keV}$	$E_v = 1097.1 \text{ keV}$	$E_v = 1293.4 \text{ keV}$
3.5R	47.09 $\pm$ 0.50	37.02 $\pm$ 0.95	44.03 $\pm$ 0.92	40.12 $\pm$ 1.05
5R	48.69 $\pm$ 1.14	36.59 $\pm$ 1.83	48.14 $\pm$ 0.78	42.13 $\pm$ 0.78
7R	35.60 $\pm$ 0.53	27.24 $\pm$ 0.32	27.81 $\pm$ 0.21	26.05 $\pm$ 1.50
9R	25.01 $\pm$ 0.37	18.35 $\pm$ 0.28	25.44 $\pm$ 0.79	21.21 $\pm$ 0.49
11R	15.73 $\pm$ 0.46	11.84 $\pm$ 0.61	10.60 $\pm$ 0.28	9.22 $\pm$ 0.06
15R	6.67 $\pm$ 0.14	4.41 $\pm$ 0.39	6.04 $\pm$ 0.19	3.72 $\pm$ 0.07
21R	2.20 $\pm$ 0.12	1.54 $\pm$ 0.10	1.10 $\pm$ 0.03	1.01 $\pm$ 0.02
3.5L	50.84 $\pm$ 0.83	38.51 $\pm$ 0.53	54.49 $\pm$ 3.31	40.37 $\pm$ 0.66
5L	50.76 $\pm$ 0.71	39.30 $\pm$ 0.27	49.35 $\pm$ 1.64	43.58 $\pm$ 0.31
7L	37.01 $\pm$ 0.43	30.64 $\pm$ 2.34	30.40 $\pm$ 0.70	26.27 $\pm$ 1.39
9L	24.56 $\pm$ 0.28	19.22 $\pm$ 0.10	21.98 $\pm$ 0.18	19.54 $\pm$ 0.23
11L	15.94 $\pm$ 0.47	13.26 $\pm$ 0.17	10.41 $\pm$ 0.49	10.10 $\pm$ 0.06
15L	6.29 $\pm$ 0.17	5.22 $\pm$ 0.18	4.85 $\pm$ 0.19	4.12 $\pm$ 0.14
21L	1.91 $\pm$ 0.06	1.57 $\pm$ 0.19	1.12 $\pm$ 0.10	0.94 $\pm$ 0.04

ตาราง 16 ฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในน้ำที่มุม 90° ที่พลังงานต่าง ๆ

ระยะจากจุดศูนย์กลาง ของต้นกำเนิดนิวตรอน (ซม.)	ฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัล (นิวตรอน/ซม. ² .วินาที) $\times 10^3$			
	Dy		In	
	$E_v = 94.6 \text{ keV}$	$E_v = 361.7 \text{ keV}$	$E_v = 1097.1 \text{ keV}$	$E_v = 1293.4 \text{ keV}$
3.3R	43.06 $\pm$ 0.44	30.18 $\pm$ 0.98	40.52 $\pm$ 1.23	35.74 $\pm$ 1.20
5R	40.17 $\pm$ 0.72	28.96 $\pm$ 0.82	34.82 $\pm$ 4.63	30.86 $\pm$ 4.19
7R	28.95 $\pm$ 0.94	21.38 $\pm$ 0.52	23.33 $\pm$ 1.33	20.57 $\pm$ 1.29
9R	22.00 $\pm$ 0.57	16.01 $\pm$ 0.61	20.14 $\pm$ 0.10	17.85 $\pm$ 0.29
11R	16.69 $\pm$ 0.05	11.33 $\pm$ 0.51	13.19 $\pm$ 0.59	12.03 $\pm$ 0.27
15R	6.78 $\pm$ 0.29	4.05 $\pm$ 0.48	5.38 $\pm$ 0.89	4.83 $\pm$ 0.85
21R	1.60 $\pm$ 0.04	0.33 $\pm$ 0.01	1.36 $\pm$ 0.12	1.18 $\pm$ 0.08
3.3L	42.64 $\pm$ 1.45	32.47 $\pm$ 2.40	42.06 $\pm$ 3.06	37.64 $\pm$ 2.69
5L	40.58 $\pm$ 1.82	30.75 $\pm$ 2.20	36.36 $\pm$ 4.32	32.99 $\pm$ 4.96
7L	31.97 $\pm$ 1.09	23.20 $\pm$ 0.41	25.46 $\pm$ 1.29	26.62 $\pm$ 7.08
9L	29.41 $\pm$ 6.48	17.70 $\pm$ 2.27	16.46 $\pm$ 0.24	14.62 $\pm$ 0.15
11L	20.37 $\pm$ 4.70	14.43 $\pm$ 3.99	15.96 $\pm$ 3.92	12.35 $\pm$ 0.22
15L	6.59 $\pm$ 0.81	4.61 $\pm$ 1.07	5.53 $\pm$ 0.66	4.77 $\pm$ 0.49
21L	1.74 $\pm$ 0.13	0.91 $\pm$ 0.08	1.24 $\pm$ 0.07	0.93 $\pm$ 0.25

ตาราง 17 ผลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในพาราฟิน ที่มุม 90° ที่พลังงานต่าง ๆ

ระยะจากจุดศูนย์กลาง ของต้นกำเนิดนิวตรอน (ซม.)	ผลักซ์นิวตรอนเทอร์มัล (นิวตรอน/ซม. ² .วินาที) $\times 10^3$			
	Dy		In	
	$E_v = 94.6 \text{ keV}$	$E_v = 361.7 \text{ keV}$	$E_v = 1097.1 \text{ keV}$	$E_v = 1293.4 \text{ keV}$
3.5R	52.70 $\pm$ 0.92	41.57 $\pm$ 0.50	50.85 $\pm$ 0.59	45.70 $\pm$ 0.93
5R	57.04 $\pm$ 5.68	39.10 $\pm$ 2.98	41.50 $\pm$ 7.19	36.42 $\pm$ 6.95
7R	37.54 $\pm$ 0.65	27.65 $\pm$ 0.53	30.26 $\pm$ 1.56	25.75 $\pm$ 1.38
9R	26.01 $\pm$ 0.45	19.17 $\pm$ 0.40	17.83 $\pm$ 0.36	16.00 $\pm$ 0.12
11R	16.81 $\pm$ 0.48	13.01 $\pm$ 0.25	11.15 $\pm$ 0.26	10.06 $\pm$ 0.18
15R	7.18 $\pm$ 0.35	5.41 $\pm$ 0.21	4.94 $\pm$ 0.07	4.17 $\pm$ 0.08
21R	1.73 $\pm$ 0.08	1.45 $\pm$ 0.08	1.21 $\pm$ 0.03	1.10 $\pm$ 0.01
3.5L	56.45 $\pm$ 0.68	41.07 $\pm$ 0.44	56.83 $\pm$ 1.65	48.30 $\pm$ 0.66
5L	48.96 $\pm$ 0.61	37.72 $\pm$ 1.82	41.82 $\pm$ 7.36	37.46 $\pm$ 5.81
7L	39.13 $\pm$ 0.65	28.40 $\pm$ 0.13	29.48 $\pm$ 0.33	28.15 $\pm$ 4.37
9L	23.62 $\pm$ 0.27	17.71 $\pm$ 0.50	21.76 $\pm$ 0.31	19.56 $\pm$ 0.35
11L	17.31 $\pm$ 0.44	13.37 $\pm$ 0.22	10.50 $\pm$ 0.14	9.15 $\pm$ 0.16
15L	6.99 $\pm$ 0.09	4.87 $\pm$ 0.24	4.63 $\pm$ 0.14	4.21 $\pm$ 0.15
21L	1.76 $\pm$ 0.08	1.35 $\pm$ 0.09	1.21 $\pm$ 0.01	1.13 $\pm$ 0.07

จากการหาฟลักซ์นิวตรอนโดยการอ่านแผ่นอินเดียมซึ่งมีการอ่านนิวตรอน 2 ครั้ง คือเมื่อตอนหุ้ม และไม่หุ้มแผ่นแคดเมียม เมื่อนำแผ่นอินเดียมที่หุ้มแคดเมียมขณะอ่านนิวตรอนไปวัดรังสีแกมมา จำนวนนับที่ได้เกิดจากนิวตรอนอินทิเกรตแล้วไปทำปฏิกิริยากับแผ่นอินเดียม ดังนั้นถ้าแทนจำนวนนับจากปฏิกิริยาดังกล่าวลงในสมการ (34) ฟลักซ์นิวตรอนที่ได้จะเป็นฟลักซ์นิวตรอนอินทิเกรตเท่านั้น และจากงานวิจัยนี้ได้หาฟลักซ์นิวตรอนอินทิเกรตที่ระยะและมุมต่าง ๆ ดังแสดงในตารางต่อไปนี้

ตาราง 18 ฟลักซ์นิวตรอนอินทิเกรตในน้ำจากการวัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 1097.1 keV ที่มุมต่าง ๆ

ระยะจากจุดศูนย์กลาง ของต้นกำเนิดนิวตรอน (ซม.)	ฟลักซ์นิวตรอนอินทิเกรต (นิวตรอน/ซม. ² .วินาที)		
	0 องศา	45 องศา	90 องศา
3.3R	5529 ± 74	4487 ± 67	5197 ± 72
5R	4029 ± 63	3776 ± 61	3531 ± 59
7R	2208 ± 50	2330 ± 48	2089 ± 46
9R	1470 ± 38	1178 ± 34	1773 ± 42
11R	1221 ± 35	822 ± 29	805 ± 28
15R	418 ± 20	326 ± 18	287 ± 17
21R	108 ± 10	90 ± 9	68 ± 8
3.3L	5473 ± 74	5077 ± 44	6793 ± 82
5L	4074 ± 64	4389 ± 66	3896 ± 62
7L	3097 ± 56	3075 ± 55	2363 ± 49
9L	1794 ± 42	1619 ± 40	2209 ± 47
11L	1019 ± 33	1063 ± 33	1033 ± 32
15L	506 ± 23	401 ± 20	269 ± 16
21L	102 ± 10	96 ± 10	93 ± 10

ตาราง 19 พลิกชีวนิวตรอนอินิเทอร์มีลในน้ำจากการวัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 1293.4 keV ที่มุมต่าง ๆ

ระยะจากจุดศูนย์กลาง ของต้นกำเนิดนิวตรอน (ซม.)	พลิกชีวนิวตรอนอินิเทอร์มีล (นิวตรอน/ซม. ² .วินาที)		
	0 องศา	45 องศา	90 องศา
3.3R	4811 ± 69	4047 ± 64	4682 ± 68
5R	3513 ± 59	3442 ± 59	3132 ± 56
7R	1984 ± 45	2069 ± 45	1853 ± 43
9R	1262 ± 36	980 ± 31	1510 ± 10
11R	1043 ± 32	737 ± 27	723 ± 27
15R	351 ± 19	310 ± 18	256 ± 16
21R	99 ± 10	73 ± 9	59 ± 8
3.3L	4966 ± 70	4555 ± 67	6032 ± 78
5L	4217 ± 65	3866 ± 62	3481 ± 59
7L	2765 ± 52	2739 ± 52	2023 ± 45
9L	1580 ± 40	1421 ± 37	1925 ± 44
11L	960 ± 31	902 ± 30	927 ± 30
15L	462 ± 21	360 ± 11	246 ± 15
21L	88 ± 9	76 ± 9	76 ± 9

ตาราง 20 ฟลักซ์นิวตรอนอีพิเทอร์มัลในพาราฟิน จากการวัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 1097.1 keV ที่มุมต่าง ๆ

ระยะจากจุดศูนย์กลาง ของต้นกำเนิดนิวตรอน (ซม.)	ฟลักซ์นิวตรอนอีพิเทอร์มัล (นิวตรอน/ซม. ² .วินาที)		
	0 องศา	45 องศา	90 องศา
3.5R	5342 ± 73	6178 ± 79	6186 ± 79
5R	4123 ± 64	4603 ± 68	3730 ± 61
7R	2484 ± 50	2283 ± 48	2284 ± 48
9R	1188 ± 34	903 ± 30	1143 ± 34
11R	778 ± 28	802 ± 28	809 ± 28
15R	376 ± 19	275 ± 17	240 ± 15
21R	81 ± 9	80 ± 8	79 ± 9
3.5L	3829 ± 62	3669 ± 61	3837 ± 62
5L	2331 ± 48	4686 ± 68	4749 ± 69
7L	2420 ± 49	2839 ± 53	2572 ± 50
9L	1613 ± 40	998 ± 32	1509 ± 39
11L	713 ± 27	813 ± 29	860 ± 29
15L	421 ± 20	237 ± 15	246 ± 15
21L	61 ± 8	56 ± 7	63 ± 8

ตาราง 21 ฟลักซ์นิวตรอนอีพิเทอร์มัลในพาราฟิน จากการวัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 1293.4 keV ที่มุมต่าง ๆ

ระยะจากจุดศูนย์กลาง ของต้นกำเนิดนิวตรอน (ซม.)	ฟลักซ์นิวตรอนอีพิเทอร์มัล (นิวตรอน/ซม. ² วินาที)		
	0 องศา	45 องศา	90 องศา
3.5R	4851 ± 69	5437 ± 73	5484 ± 73
5R	3659 ± 60	3968 ± 62	3261 ± 57
7R	2244 ± 47	2035 ± 45	2055 ± 45
9R	1047 ± 32	1064 ± 32	984 ± 31
11R	676 ± 26	722 ± 26	676 ± 26
15R	349 ± 18	241 ± 15	222 ± 15
21R	72 ± 8	73 ± 8	63 ± 8
3.5L	5308 ± 73	5366 ± 73	5477 ± 74
5L	3280 ± 57	4161 ± 64	4153 ± 64
7L	2477 ± 50	2547 ± 50	2363 ± 49
9L	1428 ± 38	1111 ± 33	1325 ± 36
11L	669 ± 26	754 ± 27	757 ± 28
15L	381 ± 20	212 ± 15	205 ± 14
21L	21 ± 5	54 ± 7	56 ± 7

2. ผลการคำนวณหาฟลักซ์นิวตรอนเร็ว

สำหรับการหาฟลักซ์นิวตรอนเร็วโดยใช้แผ่นอลูมิเนียมไปอาบนิวตรอน นิวตรอนเร็วจะทำปฏิกิริยา (n,p) และปฏิกิริยา (n, α) กับ Al-27 ได้สารกัมมันตรังสีซึ่งจะสลายให้รังสีแกมมาออกมา แล้วไปคำนวณหาฟลักซ์นิวตรอนเร็วโดยใช้สมการ (23)

ตัวอย่างการคำนวณหาฟลักซ์นิวตรอนเร็วจากปฏิกิริยา (n,p)

เมื่อนำแผ่นอลูมิเนียม หนัก 0.3299 กรัม ไปอาบนิวตรอนที่ระยะ 3.3R ที่มุม 45° ในตัวกลางน้ำจืดนิวตรอนเร็วจะทำปฏิกิริยา (n,p) กับ Al-27 ได้ $Mg-27$ ซึ่งเป็นสารกัมมันตรังสีมีครึ่งชีวิต 9.5 นาที สลายให้รังสีแกมมาที่พลังงาน 844 keV โดยมีข้อมูลดังนี้

$$\text{มวลของ Al (W)} = 0.3299 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักอะตอมของ Al (M)} = 26.98$$

$$\text{เลขอะโวคาโดร (N}_A\text{)} = 6.02 \times 10^{23}$$

$$\text{ความอุดมของ Al-27 (K)} = 100\%$$

$$\text{ครึ่งชีวิตของ Mg-27 (T}_1\text{)} = 9.5 \text{ นาที}$$

$$\text{ภาคตัดขวางของปฏิกิริยา (n,p) (\sigma)} = 11 \times 10^{-3} \times 10^{-24} \text{ ซม.}^2$$

$$\text{ประสิทธิภาพของหัววัดที่พลังงาน 844 keV (E}_{ff}\text{)} = 2.109\%$$

$$\text{ความเข้มของรังสีแกมมาที่พลังงาน 844 keV (\gamma)} = 70\%$$

$$\text{จำนวนนับที่พลังงาน 844 keV c(t}_1\text{,t}_2\text{)} = 175$$

$$t_1 = 100 \text{ วินาที}$$

$$t_2 = 1600 \text{ วินาที}$$

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (23) ได้ค่าฟลักซ์นิวตรอนเร็ว มีค่าเท่ากับ

$$\phi = 2.40 \times 10^5 \text{ นิวตรอน/ซม.}^2 \text{ วินาที}$$

ตัวอย่างการคำนวณหาฟลักซ์นิวตรอนเร็วจากปฏิกิริยา (n,α)

เมื่อนำแผ่นอลูมิเนียม หนา 0.3107 กรัม ไปอบนิวตรอนที่ระยะ 3.3R ที่มุม 45° ในตัวกลางน้ำจืดนิวตรอนเร็วจะทำปฏิกิริยา (n,α) กับ Al-27 ได้ Na-24 ซึ่งเป็นสารกัมมันตรังสีมีครึ่งชีวิต 15 ชั่วโมง สลายให้รังสีแกมมาที่พลังงาน 1368.4 keV โดยมีข้อมูลดังนี้

$$\text{มวลของ Al (W)} = 0.3107 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักอะตอมของ Al (M)} = 26.98$$

$$\text{เลขอะโวกาโดร (N_u)} = 6.02 \times 10^{23}$$

$$\text{ความอุดมของ Al-27 (K)} = 100\%$$

$$\text{ครึ่งชีวิตของ Na-24 (T}_{\frac{1}{2}}\text{)} = 15 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{ภาคตัดขวางของปฏิกิริยา (n,α) (σ)} = 0.725 \times 10^{-3} \times 10^{-24} \text{ ซม.}^2$$

$$\text{ประสิทธิภาพของหัววัดที่พลังงาน 1368.4 keV (E_{eff})} = 1.319\%$$

$$\text{ความเข้มของรังสีแกมมาที่พลังงาน 1368.4 keV (γ)} = 100\%$$

$$\text{พื้นที่ใต้กราฟที่พลังงาน 1368.4 keV c(t_1, t_2)} = 541$$

$$t_1 = 100 \text{ วินาที}$$

$$t_2 = 10100 \text{ วินาที}$$

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (23) ได้ค่าฟลักซ์นิวตรอนเร็ว มีค่าเท่ากับ

$$\phi = 8.71 \times 10^5 \text{ นิวตรอน/ซม.}^2 \text{ วินาที}$$

จากการทดลองหาฟลักซ์นิวตรอนเร็วโดยวิธีนิวตรอนเอกติเวชัน โดยการนำแผ่นอลูมิเนียมไปอบนิวตรอนที่มุมและระยะต่าง ๆ ในน้ำและนารานิน ปรากฏว่าสามารถวัดฟลักซ์นิวตรอนเร็วได้ระยะไกลสุดที่ตำแหน่งห่างจากจุดศูนย์กลางของต้นกำเนิดนิวตรอน 9 เซนติเมตร ที่ระยะห่างมากกว่านี้ไม่สามารถวัดฟลักซ์นิวตรอนเร็วได้ (จำนวนนับรังสีมีค่าน้อยมาก) ผลจากการหาฟลักซ์นิวตรอนเร็วแสดงในตารางดังต่อไปนี้

ตาราง 22 ฟลักซ์นิวตรอนเร็วในน้ำที่ระยะต่าง ๆ ที่มุม 0°

ระยะจากจุดศูนย์กลาง ของต้นกำเนิดนิวตรอน (ซม.)	ฟลักซ์นิวตรอนเร็ว (นิวตรอน/ซม. ² วินาที) $\times 10^3$	
	$E_v = 844 \text{ keV}$	$E_v = 1368.4 \text{ keV}$
3.3R	208.05 ± 3.80	991.06 ± 0.99
5R	100.95 ± 7.65	426.87 ± 0.65
7R	41.96 ± 18.18	217.42 ± 0.47
9R	16.36 ± 8.31	43.80 ± 0.21
3.3L	288.23 ± 29.39	748.13 ± 0.86
5L	101.38 ± 31.97	482.92 ± 0.69
7L	33.32 ± 7.19	226.49 ± 0.48
9L	10.40 ± 2.74	93.23 ± 0.31

ตาราง 23 ฟลักซ์นิวตรอนเร็วในพาราฟินที่ระยะต่าง ๆ ที่มุม 0°

ระยะจากจุดศูนย์กลาง ของต้นกำเนิดนิวตรอน (ซม.)	ฟลักซ์นิวตรอนเร็ว (นิวตรอน/ซม. ² วินาที) $\times 10^3$	
	$E_v = 844 \text{ keV}$	$E_v = 1368.4 \text{ keV}$
3.5R	244.00 ± 7.39	1152.43 ± 1.07
5R	90.82 ± 3.59	493.84 ± 0.70
7R	24.21 ± 5.49	160.55 ± 0.40
9R	8.00 ± 3.33	73.02 ± 0.27
3.5L	227.38 ± 5.72	1595.23 ± 1.26
5L	135.06 ± 2.25	426.69 ± 0.65
7L	28.68 ± 3.94	132.07 ± 0.36
9L	7.00 ± 1.19	95.94 ± 0.31

ตาราง 24 ฟลักซ์นิวตรอนเร็วในน้ำที่ระยะต่าง ๆ ที่มุม 45°

ระยะจากจุดศูนย์กลาง ของต้นกำเนิดนิวตรอน (ซม.)	ฟลักซ์นิวตรอนเร็ว (นิวตรอน/ซม. ² วินาที) $\times 10^3$	
	$E_v = 844 \text{ keV}$	$E_v = 1368.4 \text{ keV}$
3.3R	242.96 ± 3.97	871.01 ± 0.93
5R	104.69 ± 5.43	396.44 ± 0.93
7R	28.87 ± 5.02	226.69 ± 0.48
9R	13.64 ± 2.93	73.05 ± 0.27
3.3L	258.16 ± 2.88	967.91 ± 0.98
5L	100.79 ± 7.62	400.13 ± 0.63
7L	38.39 ± 7.62	172.22 ± 0.41
9L	10.83 ± 4.39	44.85 ± 0.21

ตาราง 25 ฟลักซ์นิวตรอนเร็วในพารานิวทรีระยะต่าง ๆ ที่มุม 45°

ระยะจากจุดศูนย์กลาง ของต้นกำเนิดนิวตรอน (ซม.)	ฟลักซ์นิวตรอนเร็ว (นิวตรอน/ซม. ² วินาที) $\times 10^3$	
	$E_v = 844 \text{ keV}$	$E_v = 1368.4 \text{ keV}$
3.5R	246.76 ± 8.65	848.85 ± 0.92
5R	94.92 ± 9.73	419.48 ± 0.65
7R	28.62 ± 4.25	184.07 ± 0.43
9R	11.64 ± 4.54	59.24 ± 0.24
3.5L	217.29 ± 4.95	859.75 ± 0.93
5L	129.15 ± 3.72	428.21 ± 0.65
7L	25.14 ± 7.16	162.93 ± 0.40
9L	7.81 ± 0.43	76.29 ± 0.27

ตาราง 26 ฟลักซ์นิวตรอนเร็วในน้ำที่ระยะต่าง ๆ ที่มุม 90°

ระยะจากจุดศูนย์กลาง ของต้นกำเนิดนิวตรอน (ซม.)	ฟลักซ์นิวตรอนเร็ว (นิวตรอน/ซม. ² วินาที) $\times 10^3$	
	$E_v = 0.844 \text{ keV}$	$E_v = 1368.4 \text{ keV}$
3.3R	192.31 ± 12.74	855.66 ± 0.93
5R	76.30 ± 12.30	323.28 ± 0.57
7R	21.58 ± 2.06	266.92 ± 0.52
9R	12.62 ± 3.34	68.23 ± 0.26
3.3L	237.01 ± 8.62	855.54 ± 0.92
5L	90.18 ± 10.81	340.59 ± 0.58
7L	24.42 ± 1.93	111.97 ± 0.33
9L	11.36 ± 1.26	53.12 ± 0.23

ตาราง 27 ฟลักซ์นิวตรอนเร็วในพาราฟินที่ระยะต่าง ๆ ที่มุม 90°

ระยะจากจุดศูนย์กลาง ของต้นกำเนิดนิวตรอน (ซม.)	ฟลักซ์นิวตรอนเร็ว (นิวตรอน/ซม. ² วินาที) $\times 10^3$	
	$E_v = 844 \text{ keV}$	$E_v = 1368.4 \text{ keV}$
3.5R	241.54 ± 5.97	730.67 ± 0.85
5R	90.82 ± 8.23	316.20 ± 0.56
7R	24.65 ± 6.51	128.22 ± 0.36
9R	7.64 ± 2.18	61.23 ± 0.25
3.5L	221.87 ± 4.42	703.59 ± 0.84
5L	136.05 ± 4.44	285.07 ± 0.53
7L	24.64 ± 7.18	191.52 ± 0.44
9L	7.14 ± 2.38	36.12 ± 0.19

3. ผลการคำนวณหาฟลักซ์นิวตรอนโดยทฤษฎีการนิ่งของนิวตรอน 2 กลุ่ม

3.1 การคำนวณหาฟลักซ์นิวตรอนเร็ว

หาฟลักซ์นิวตรอนเร็วจากสมการ (41) คือ

$$\phi_f(r) = \frac{a}{4\pi D_f} \cdot \frac{e^{-K_f r}}{r}$$

โดยที่ a = อัตราการปล่อยนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน Am-Be
 $= 1.1 \times 10^7$ นิวตรอน/วินาที

คำนวณค่า D_f และ K_f จากสมการ (44) คือ

$$K_f^2 = \frac{1}{L_f^2} = \frac{\Sigma_f}{D_f}$$

ค่า K_f , D_f ในตัวกลางน้ำ

การหาค่า K_f จากความยาวการนิ่งของนิวตรอนเร็วในสมการ (45) เป็นค่าที่คำนวณจากทฤษฎี ซึ่งมีความคลาดเคลื่อน เนื่องจาก L_f มีค่าไม่คงที่ จะเปลี่ยนไปตามระยะทาง โดยที่ระยะไกล ๆ L_f มีค่าน้อยลง ดังนั้นจึงหาค่า K_f จากค่าเอจของนิวตรอน (neutron age : τ) โดยที่

$$\tau = \frac{D_f}{\Sigma_f} = \frac{1}{K_f^2}$$

สำหรับในตัวกลางน้ำ ค่าคงที่ต่าง ๆ มีดังนี้ (Lamarsh. 1975 : 181)

$$\tau = 27 \text{ ซม.}^2$$

$$D_f = 1.13 \text{ ซม.}$$

$$\Sigma_f = 0.0419 \text{ ซม.}^{-1}$$

ดังนั้นจะได้

$$K_f^2 = \frac{1}{27}$$

$$K_f = 0.192 \text{ ซม.}^{-1}$$

เมื่อแทนค่า K_f , D_f และค่า a ลงในสมการ (41) จะได้ค่าฟลักซ์นิวตรอนเร็วในน้ำที่ระยะต่าง ๆ ดังตาราง 28

ตาราง 28 ฟลักซ์นิวตรอนเร็วในน้ำที่ระยะต่าง ๆ โดยทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม

ระยะห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอน (ซม.)	ฟลักซ์นิวตรอนเร็ว (นิวตรอน/ซม. ² .วินาที) $\times 10^3$
3.3	124.52
5	59.30
7	28.85
9	15.28
11	8.52
15	2.90
21	0.65

การคำนวณค่า K_f , D_f ในตัวกลางพาราฟิน

เนื่องจากในตัวกลางพาราฟินไม่ทราบค่าเองของนิวตรอน จึงคำนวณค่า K_f จากความยาวการฟุ้งของนิวตรอนเร็วในสมการ (45) คือ

$$L_f^2 = \frac{N_{fast} \lambda_o}{3(1-\mu)}$$

โดยที่
$$N_{fast} = \frac{\ln(E_1/E_2)}{\xi}$$

หาค่า ξ ในพาราฟินจากสมการ

$$\begin{aligned}\xi_{(C_{22}H_{46})} &= \frac{22\sigma_{s(C)}\xi_{(C)} + 46\sigma_{s(H)}\xi_{(H)}}{22\sigma_{s(C)} + 46\sigma_{s(H)}} \\ &= 0.952\end{aligned}$$

โดยที่ $\sigma_{s(H)} = 38$ บาร์น , $\sigma_{s(C)} = 4.8$ บาร์น , $\xi_{(H)} = 1$ และ $\xi_{(C)} = 0.158$

เมื่อแทนค่า $E_1 = 4.3$ MeV , $E_2 = 0.025$ eV และ $\xi_{(C,H)} = 0.952$ ลงในสมการ (45) จะได้

$$\begin{aligned}N_{fast} &= \frac{\ln(4.3 \times 10^9 \text{ eV} / 0.025 \text{ eV})}{0.952} \\ &= 20 \text{ ครั้ง}\end{aligned}$$

หาค่า λ_s จาก

$$\lambda_s = \frac{1}{\Sigma_s}$$

โดยที่

$$\Sigma_{s(C_{22}H_{46})} = \frac{\rho N_A}{M} [22\sigma_{s(C)} + 46\sigma_{s(H)}]$$

ρ = ความหนาแน่นของพาราฟิน = 0.9 กรัม/ซม.³

M = น้ำหนักโมเลกุลของพาราฟิน = 310

N_A = เลขอะโวกาโดร = 6.02×10^{23}

ดังนั้น

$$\Sigma_{s(C_{22}H_{46})} = 3.240 \text{ ซม.}^{-1}$$

หรือ

$$\lambda_s = 0.309 \text{ ซม.}$$

หาค่า $\bar{\mu}$ จากสมการ (47) คือ

$$\begin{aligned}\bar{\mu}_{(C_{22}H_{46})} &= \frac{\frac{2}{3} \left(\frac{22N_{(C)}\sigma_{s(C)}}{A_{(C)}} + \frac{46N_{(H)}\sigma_{s(H)}}{A_{(H)}} \right)}{22N_{(C)}\sigma_{s(C)} + 46N_{(H)}\sigma_{s(H)}}\end{aligned}$$

แทนค่า $N_{(H)} = 5.3 \times 10^5 \times 10^{24}$ อะตอม/ซม.³

$N_{(C)} = 0.0803 \times 10^{24}$ อะตอม/ซม.³

$A_{(H)} = 1$, $A_{(C)} = 12$

$\sigma_{a(H)} = 38 \times 10^{-24}$ ซม.²

$\sigma_{a(C)} = 4.8 \times 10^{-24}$ ซม.²

ดังนั้นจะได้

$$\bar{\mu}_{(C_{22}H_{46})} = 0.667$$

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (45) จะได้

$$L_f^2 = 1.912 \text{ ซม.}^2$$

หรือ

$$K_f^2 = 0.523 \text{ ซม.}^{-2}$$

$$K_f = 0.723 \text{ ซม.}^{-1}$$

หาค่า D_f จากสมการ

$$D_f = L_f \Sigma_f$$

โดยที่

$$\Sigma_{f(C_{22}H_{46})} = \rho [w_{(C)} \Sigma_{r(C)} + w_{(H)} \Sigma_{r(H)}]$$

แทนค่า $\Sigma_{r(C)} = 0.050 \text{ ซม.}^2/\text{กรัม}$, $w_{(C)} = 264/310$

$\Sigma_{r(H)} = 0.602 \text{ ซม.}^2/\text{กรัม}$, $w_{(H)} = 46/310$

ดังนั้นจะได้

$$\Sigma_{f(C_{22}H_{46})} = 0.119 \text{ ซม.}^{-1}$$

และ

$$D_f = 0.228 \text{ ซม.}$$

เมื่อแทนค่า D_f , K_f และ a ลงในสมการ (41) จะได้ค่าฟลักซ์นิวตรอนเร็วในพารานินจากทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม ที่ระยะต่าง ๆ ดังตาราง 29

ตาราง 29 ฟลักซ์นิวตรอนเร็วในพารานินที่ระยะต่าง ๆ โดยทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม

ระยะห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอน (ซม.)	ฟลักซ์นิวตรอนเร็ว (นิวตรอน/ซม. ² .วินาที) $\times 10^3$
3.5	87.33
5	20.67
7	3.48
9	0.64
11	0.12
15	0.004
21	0.00005

3.2 การคำนวณหาฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัล

หาฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลจากสมการ (43) คือ

$$\phi(r) = \frac{aK_f^2}{4\pi D(K^2 - K_f^2)} \cdot \frac{(e^{-K_f r} - e^{-Kr})}{r}$$

ผลการคำนวณหาฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในน้ำ

ค่าคงที่ต่าง ๆ สำหรับนิวตรอนเทอร์มัลในตัวกลางน้ำมีดังนี้ (Glasstone.1963:810)

$$D = 0.17 \text{ ซม.}$$

$$L = 2.76 \text{ ซม.}$$

$$K = 0.362 \text{ ซม.}^{-1}$$

$$K_f = 0.192 \text{ ซม.}^{-1}$$

เมื่อแทนค่าคงที่ต่าง ๆ ลงในสมการ (43) จะได้ค่าฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในน้ำจากทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม ที่ระยะต่าง ๆ แสดงดังตาราง 30

ตาราง 30 ฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในน้ำที่ระยะต่าง ๆ โดยทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม

ระยะห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอน (ซม.)	ฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัล (นิวตรอน/ซม. ² .วินาที) $\times 10^3$
3.3	139.98
5	88.74
7	52.68
9	31.52
11	18.79
15	7.02
21	1.69

การคำนวณหาฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในพาราฟิน

หาฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในพาราฟินจากสมการ (43) โดยหาค่าคงที่ต่าง ๆ ดังนี้

$$K_F = 0.723 \text{ ซม.}^{-1}$$

หาค่า K จากสมการ

$$K^2 = \frac{1}{L^2} = \frac{\Sigma_a}{D}$$

แทนค่า $L = 2.42$ ซม. (Price. 1964 : 338) ดังนั้นจะได้

$$K = 0.413 \text{ ซม.}^{-1}$$

หาค่า D จาก

$$D = \Sigma_{\alpha} L^2$$

$$= 0.065 \text{ ซม.}$$

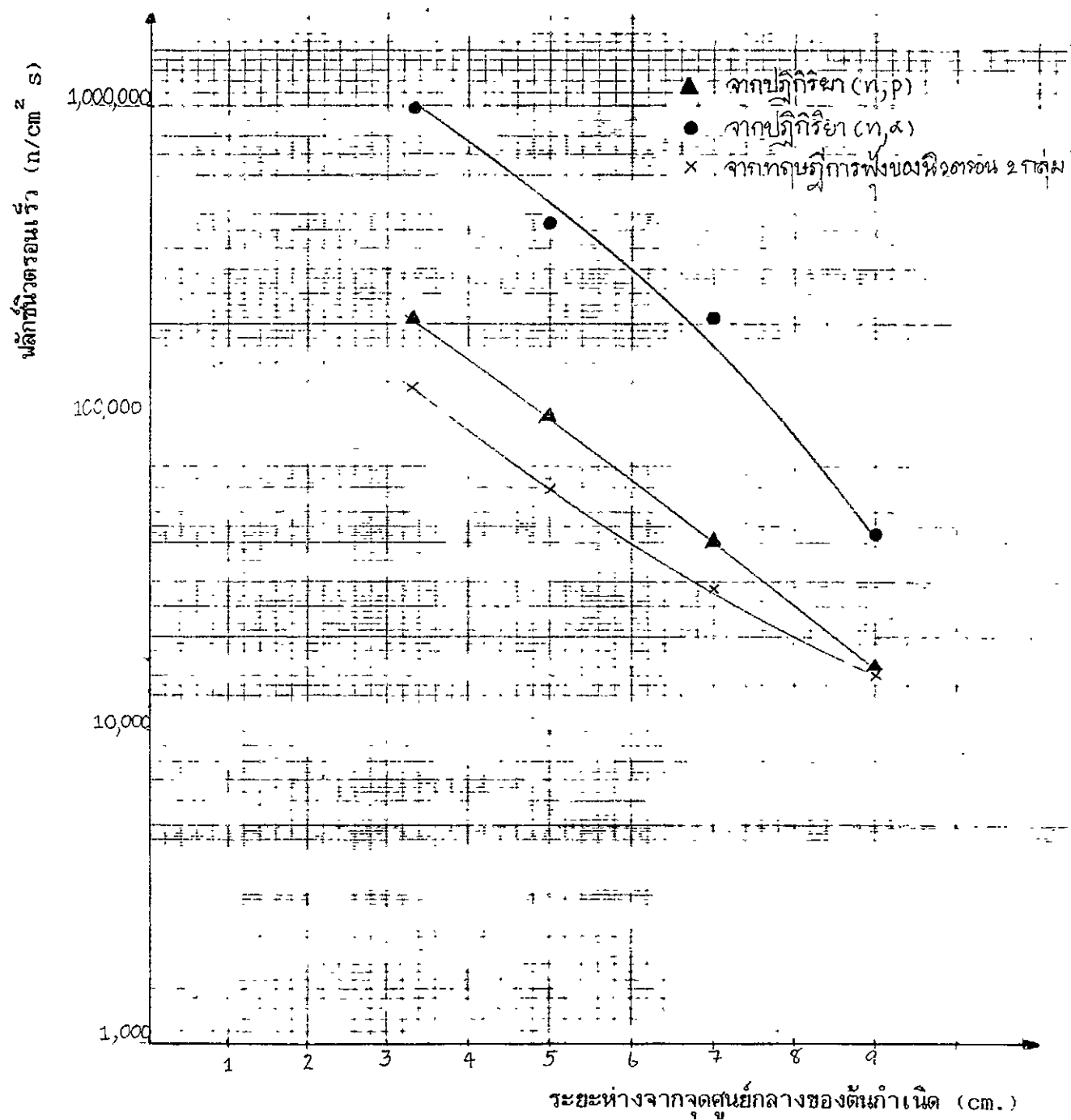
โดยที่ $\Sigma_{\alpha} = 0.027 \text{ ซม.}^{-1}$, $L = 2.42 \text{ ซม.}$

เมื่อแทนค่า K , K_f และ D ลงในสมการ (43) จะได้ค่าฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในพารานิน โดยทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม ที่ระยะต่าง ๆ ดังแสดงในตาราง 31

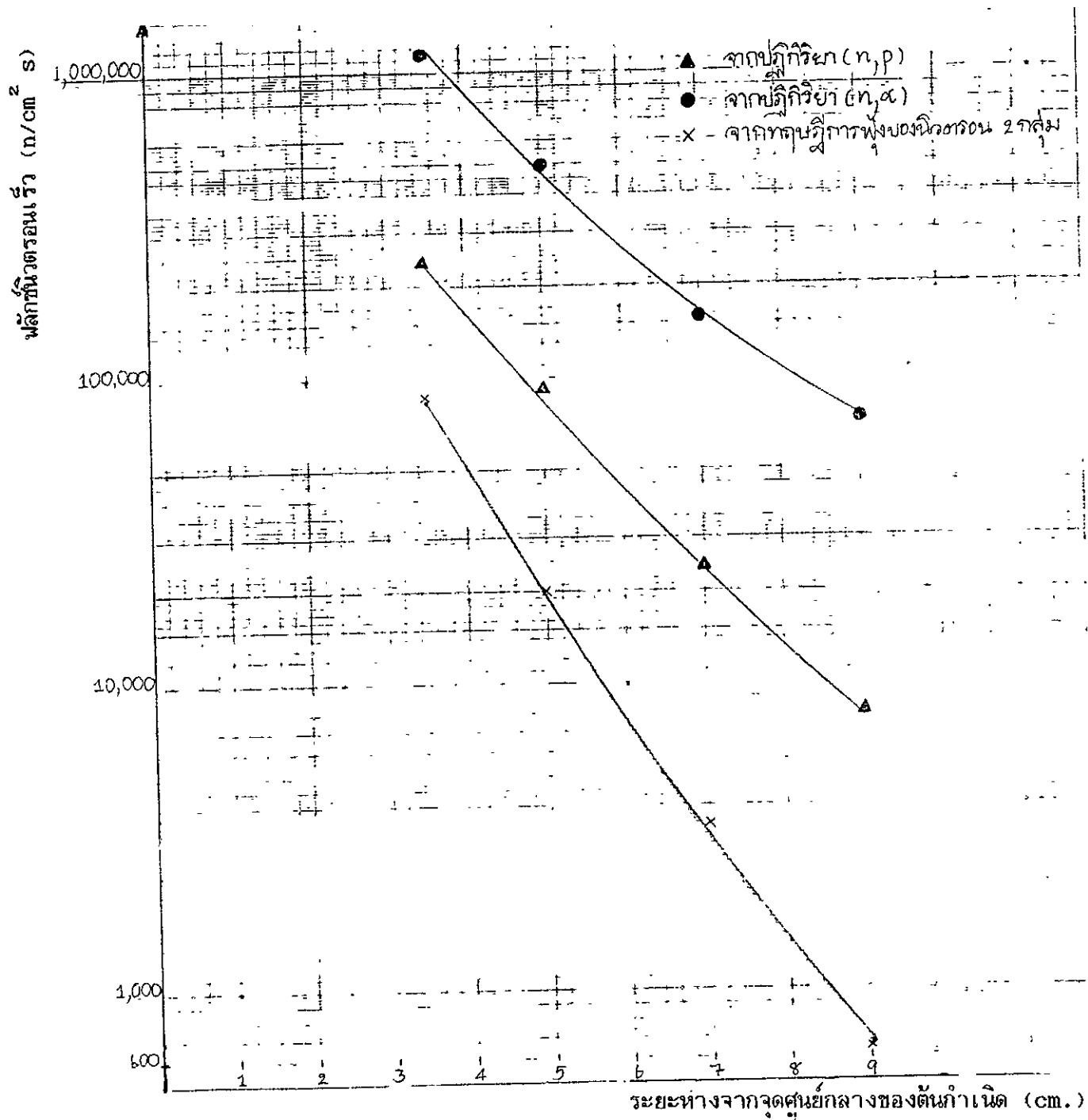
ตาราง 31 ฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในพารานินที่ระยะต่าง ๆ โดยทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม

ระยะห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอน (ซม.)	ฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัล (นิวตรอน/ซม. ² .วินาที) $\times 10^3$
3.5	891.72
5	399.73
7	140.62
9	50.68
11	18.55
15	2.69
21	0.16

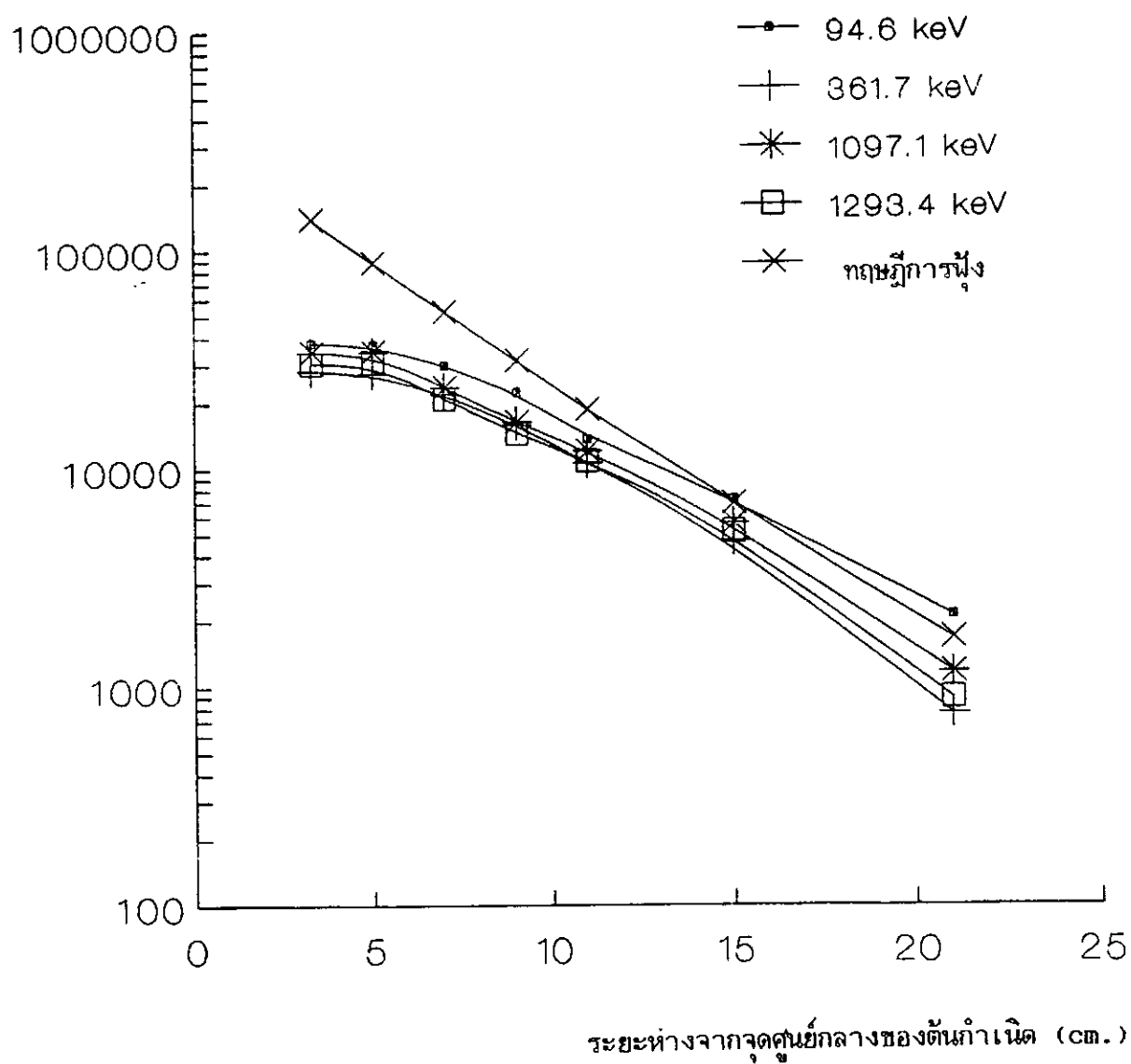
เมื่อนำค่าฟลักซ์นิวตรอนเร็วและฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลที่ได้จากวิธีนิวตรอนแอกติเวชัน และจากทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์นิวตรอนกับระยะห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอน จะได้กราฟดังแสดงในภาพประกอบต่อไปนี้



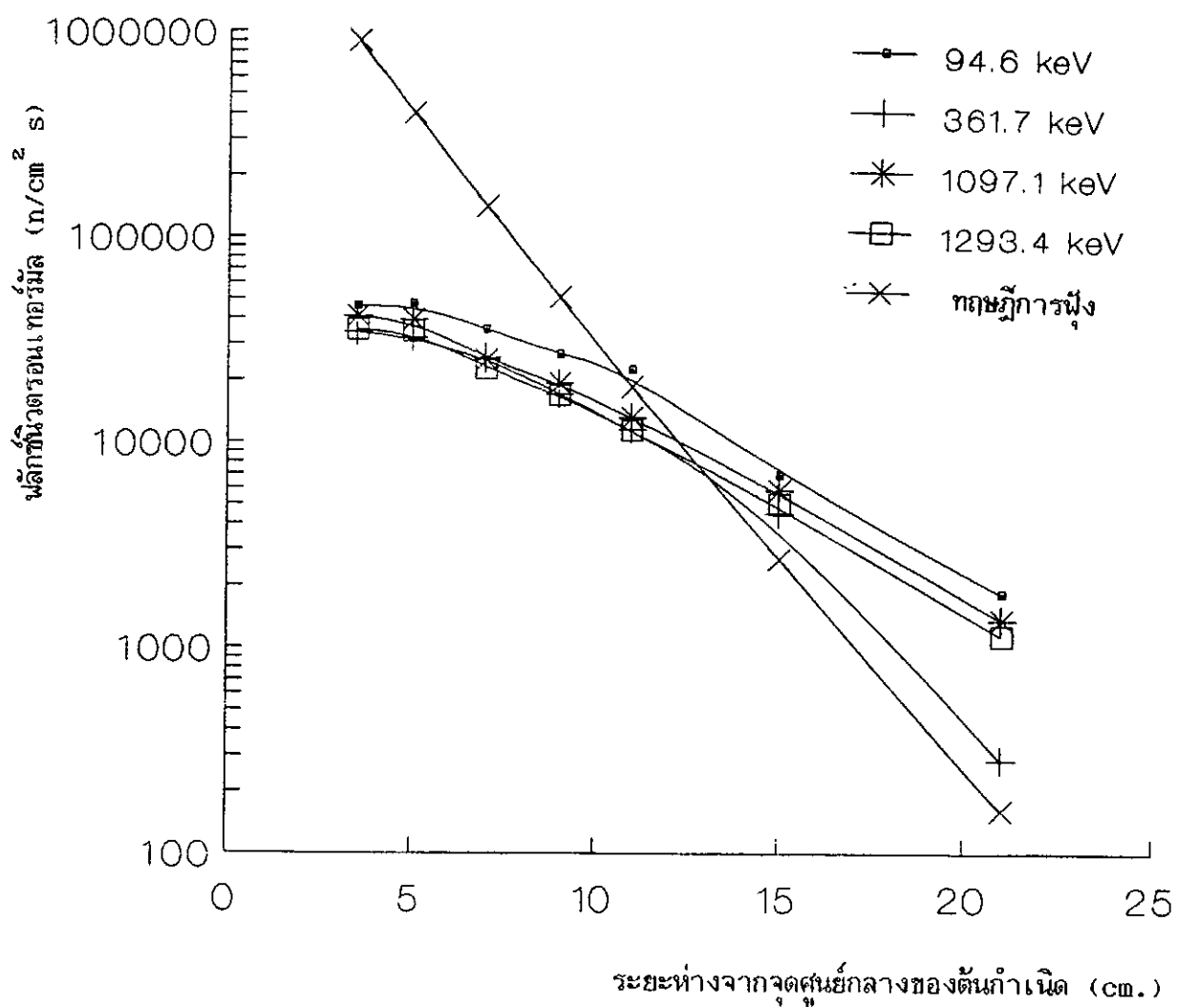
ภาพประกอบ 21 การกระจายของฟลักซ์นิวตรอนเร็วในน้ำ ที่มุม 0° โดยนิวตรอนแอคติเวชัน และทฤษฎีการฟissionของนิวตรอน 2 กลุ่ม



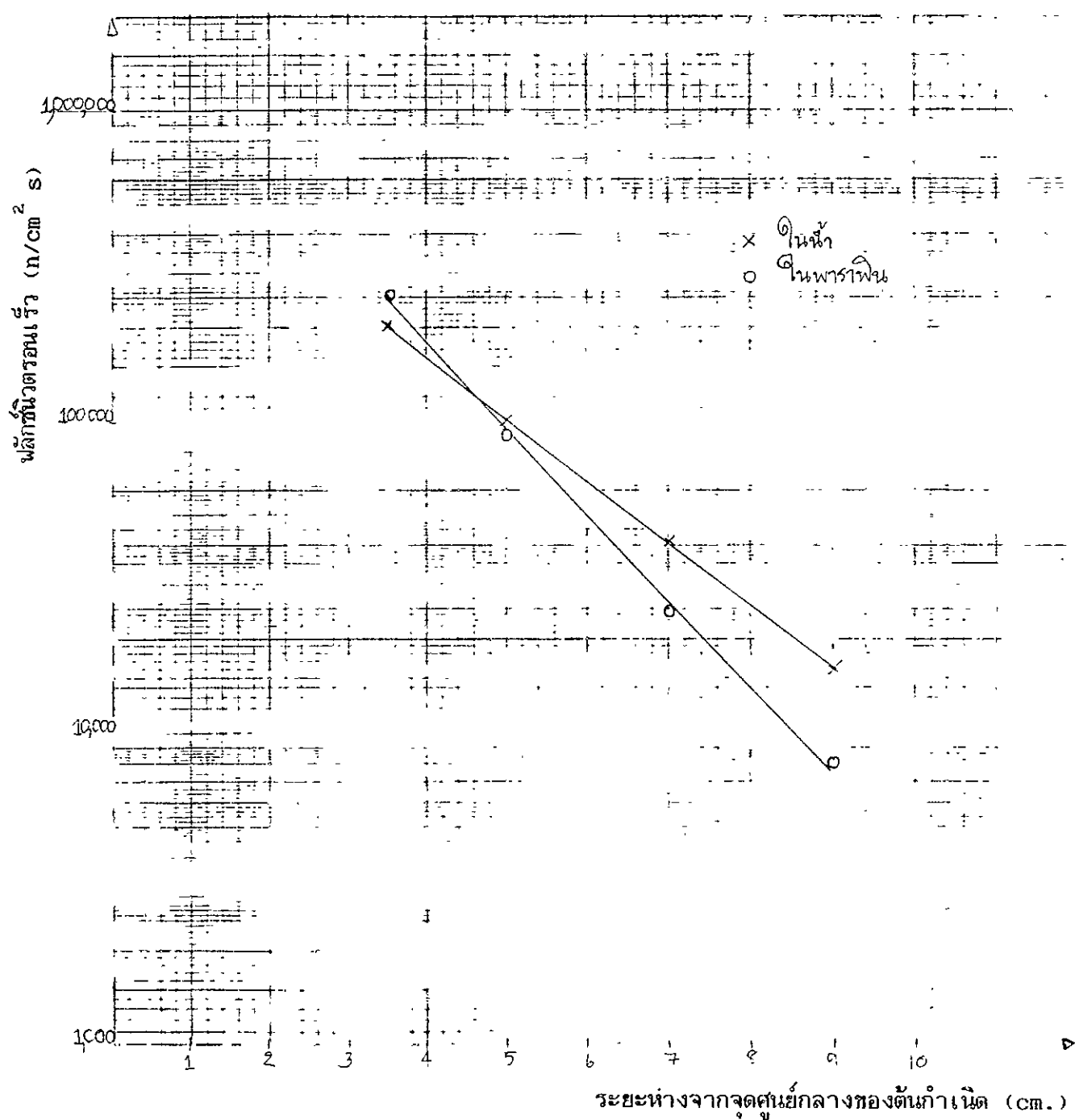
ภาพประกอบ 22 การกระจายของฟลักซ์นิวตรอนเร็วในฉากรานิน ที่มุม 0° โดยนิวตรอน
 แยกตัวและทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม



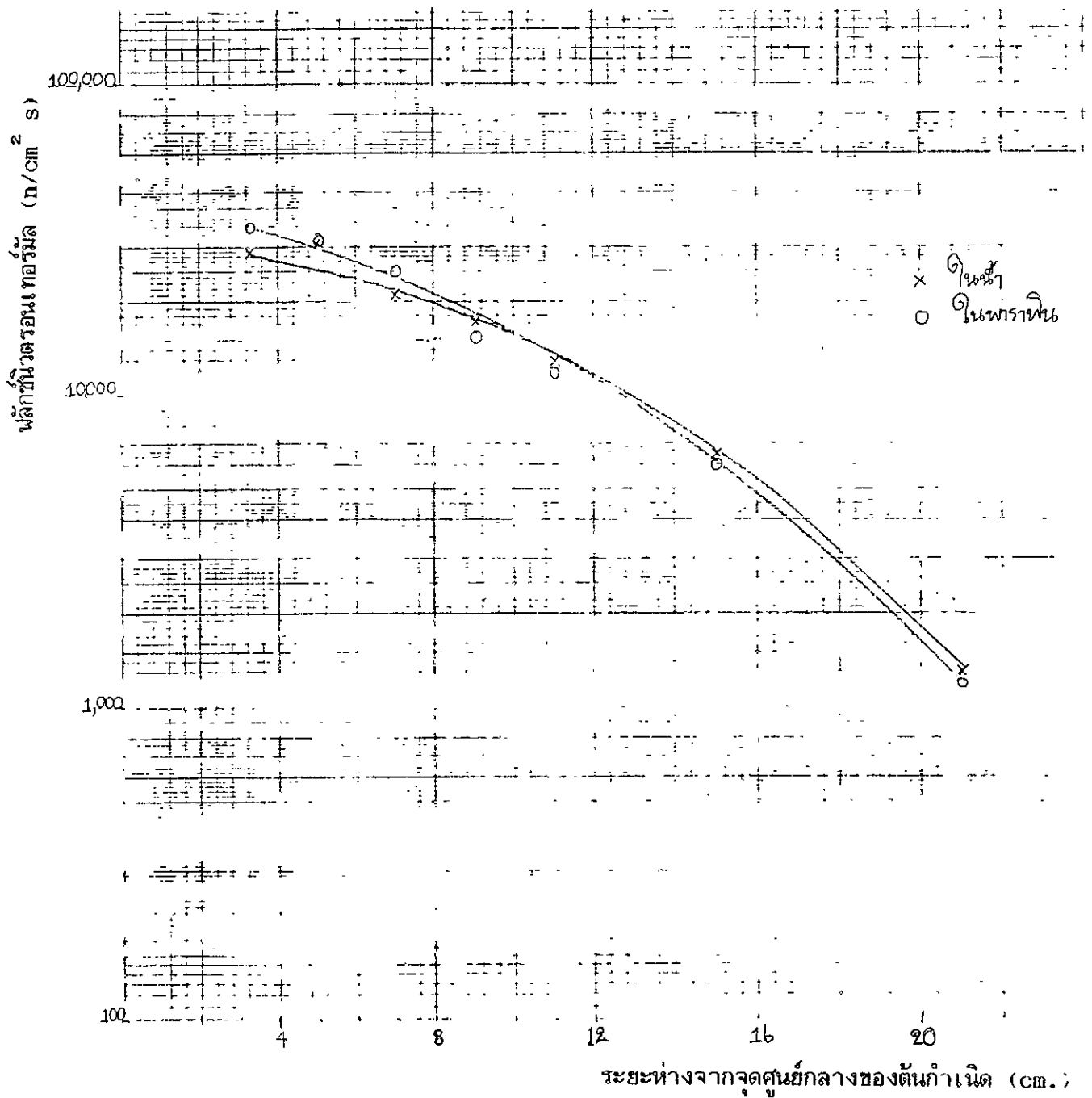
ภาพประกอบ 23 การกระจายของฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในน้ำที่มุม 0° โดยนิวตรอนเอกติเวชัน และทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม



ภาพประกอบ 24 การกระจายของฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในพาราฟิน ที่มุม 0 องศา
โดยนิวตรอนที่เกิดเร็วขึ้นและทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม



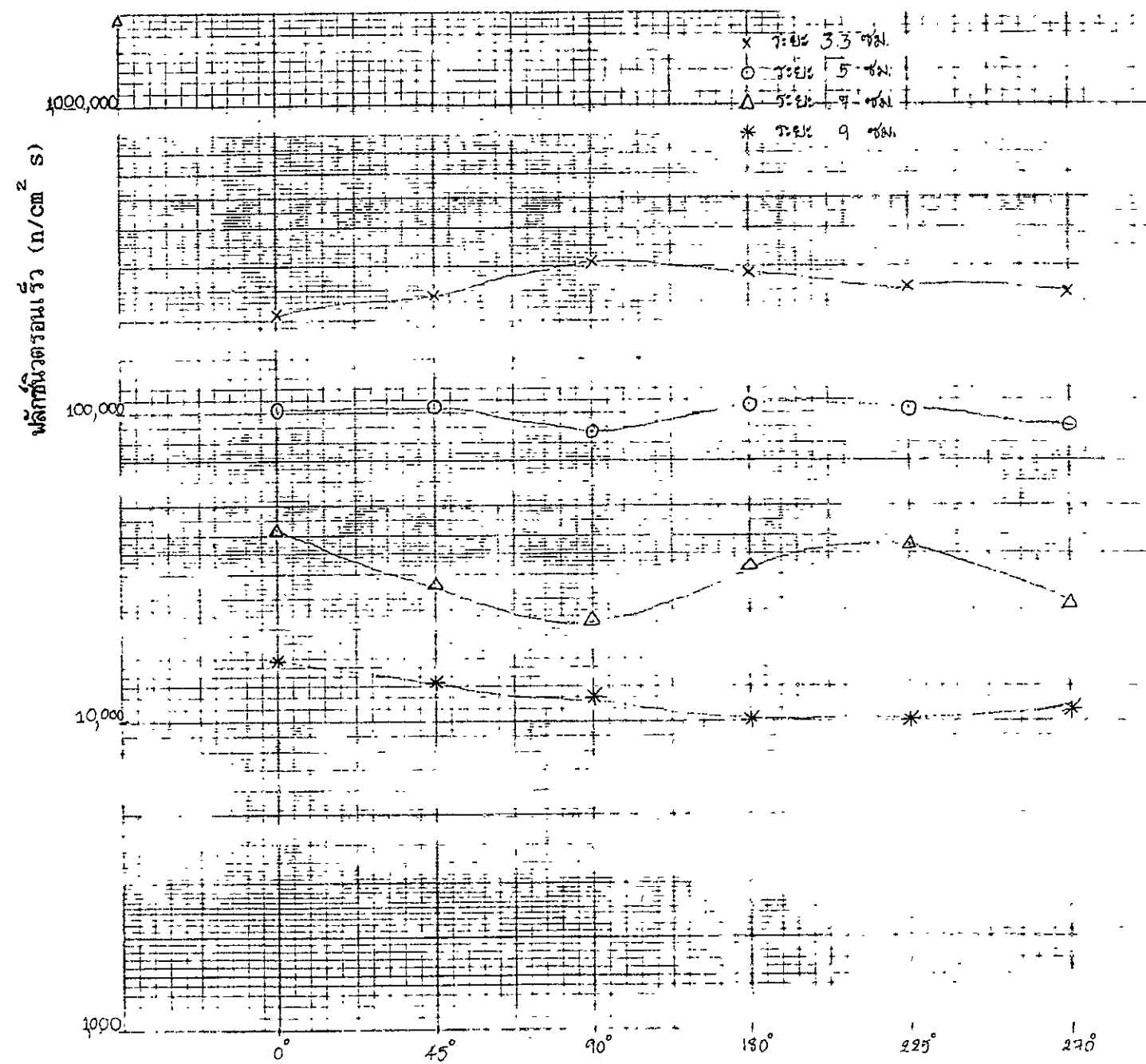
ภาพประกอบ 25 การกระจายของฟลักซ์นิวตรอนเร็วในน้ำและพาราฟิน ที่มุม 0 องศา
โดยการอ่านแผ่นฟิล์มเนยัม วัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 844 keV



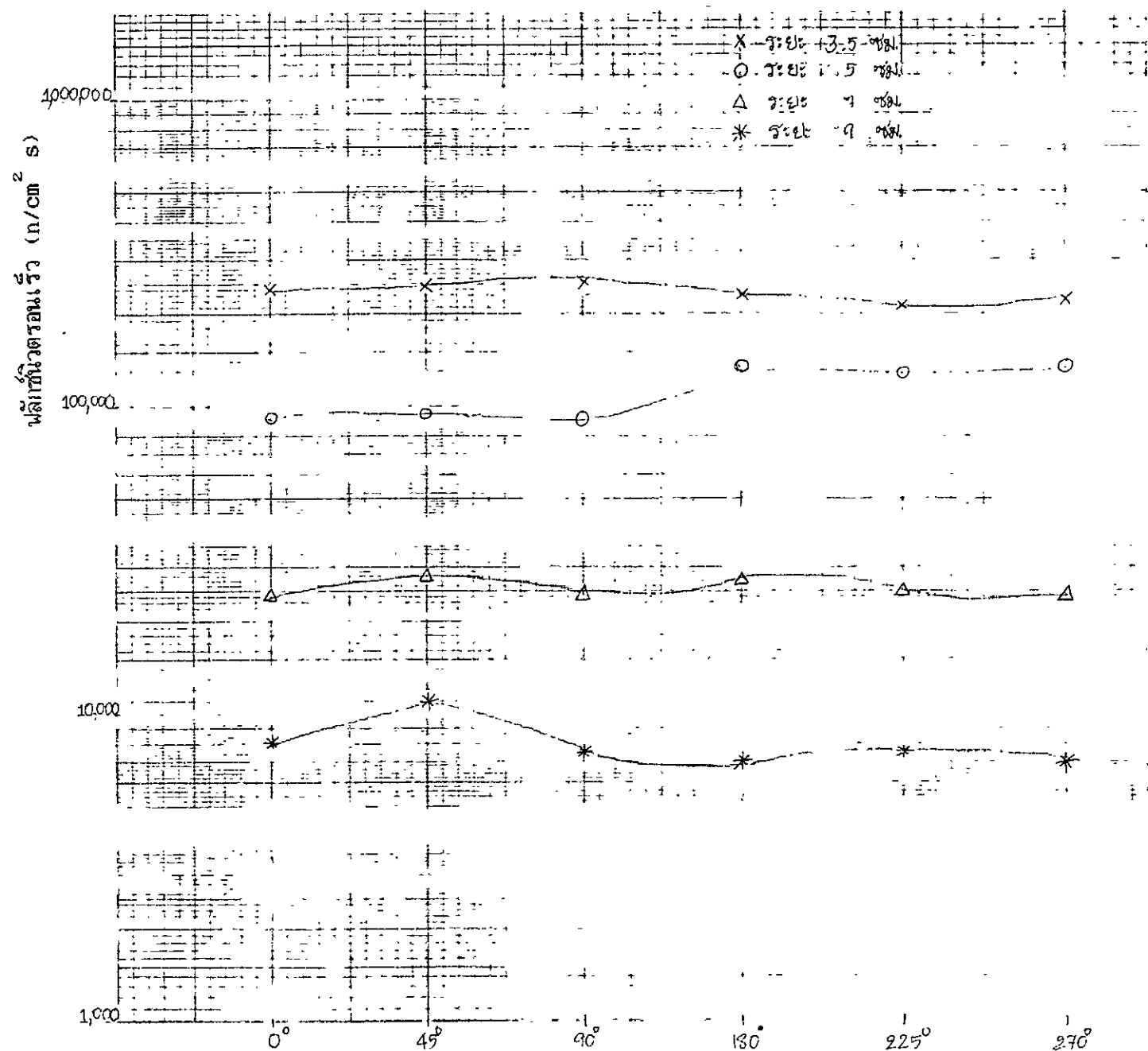
ภาพประกอบ 26 การกระจายของฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในน้ำและพาราฟิน ที่มุม 0 องศา
 โดยการอ่านแผ่นอินเดียม วัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 1293.4 keV

เพื่อพิจารณาการกระจายของฟลักซ์นิวตรอนรอบ ๆ ต้นกำเนิด เมื่อด้านบนของทรงกระบอกของต้นกำเนิดนิวตรอนทำมุม 0 , 45 , 90 องศา กับแนวที่วัดฟลักซ์นิวตรอน จึงเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์นิวตรอนกับมุมต่าง ๆ คือ มุม 0 , 45 , 90 , 180 , 225 และ 270 องศา โดยที่มุม 180 , 225 , และ 270 องศา คือมุมในแนวทางด้านซ้ายของต้นกำเนิดนิวตรอนเมื่อทรงกระบอกของต้นกำเนิดทำมุม 0 , 45 และ 90 องศา กับแนวที่วัดฟลักซ์นิวตรอนตามลำดับ

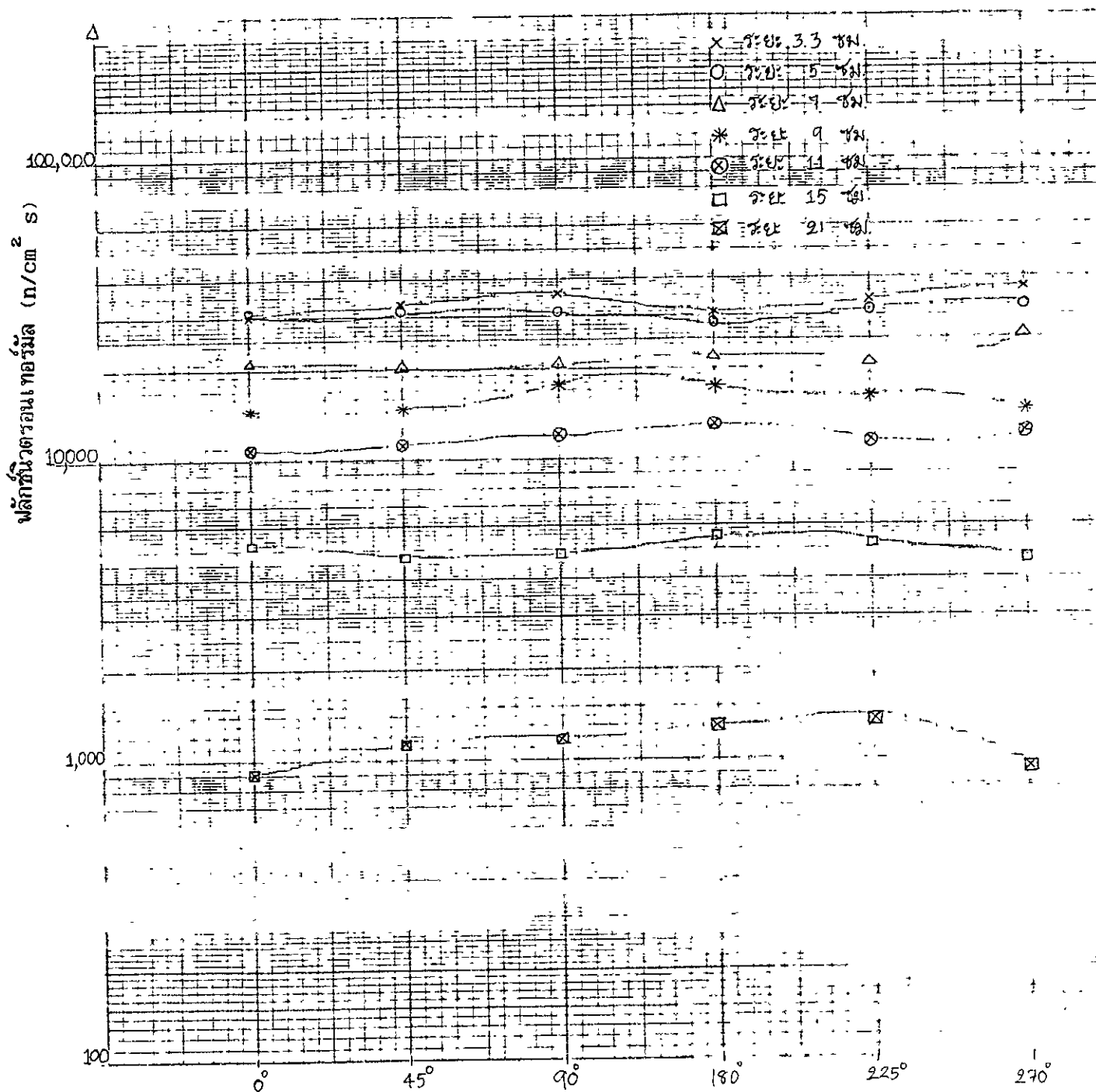
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์นิวตรอน กับมุมต่าง ๆ แสดงในภาพประกอบต่อไปนี้



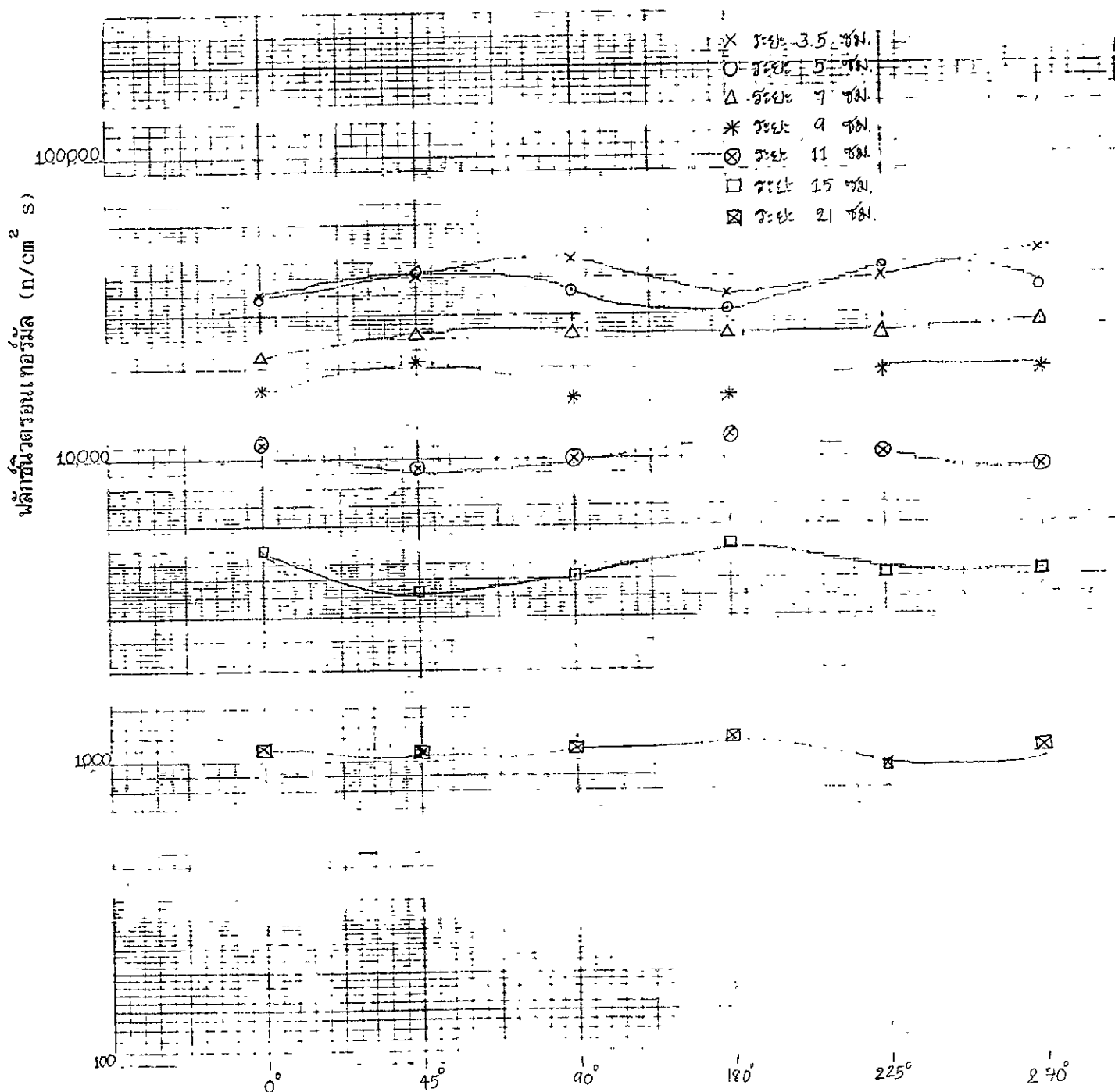
ภาพประกอบ 27 ฟลักซ์นิวตรอนเร็วในน้ำที่มุมต่าง ๆ จากปฏิกิริยา (n,p)



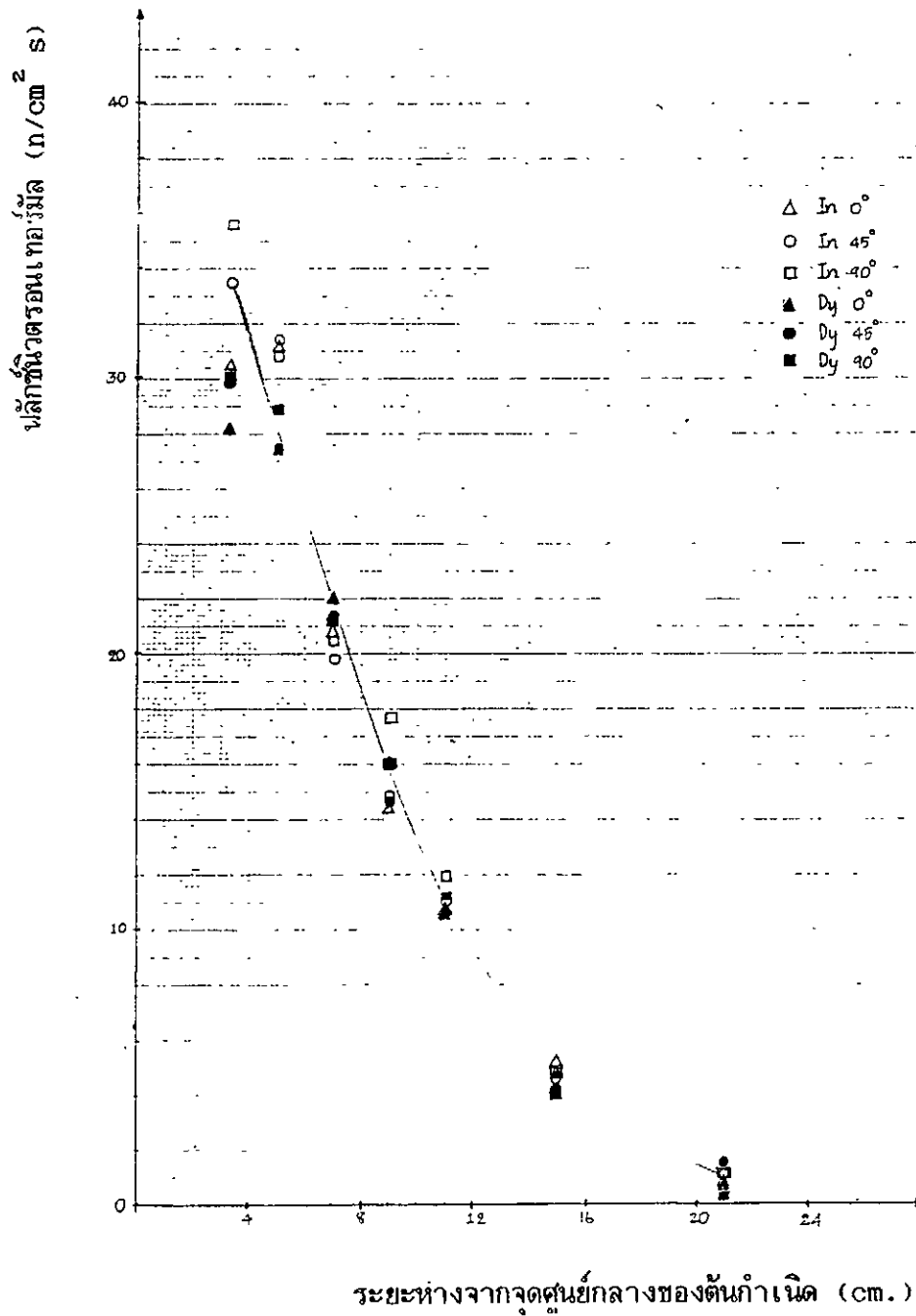
ภาพประกอบ 28 ฟลักซ์นิวตรอนเร็วในพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากปฏิกิริยา (n,p)



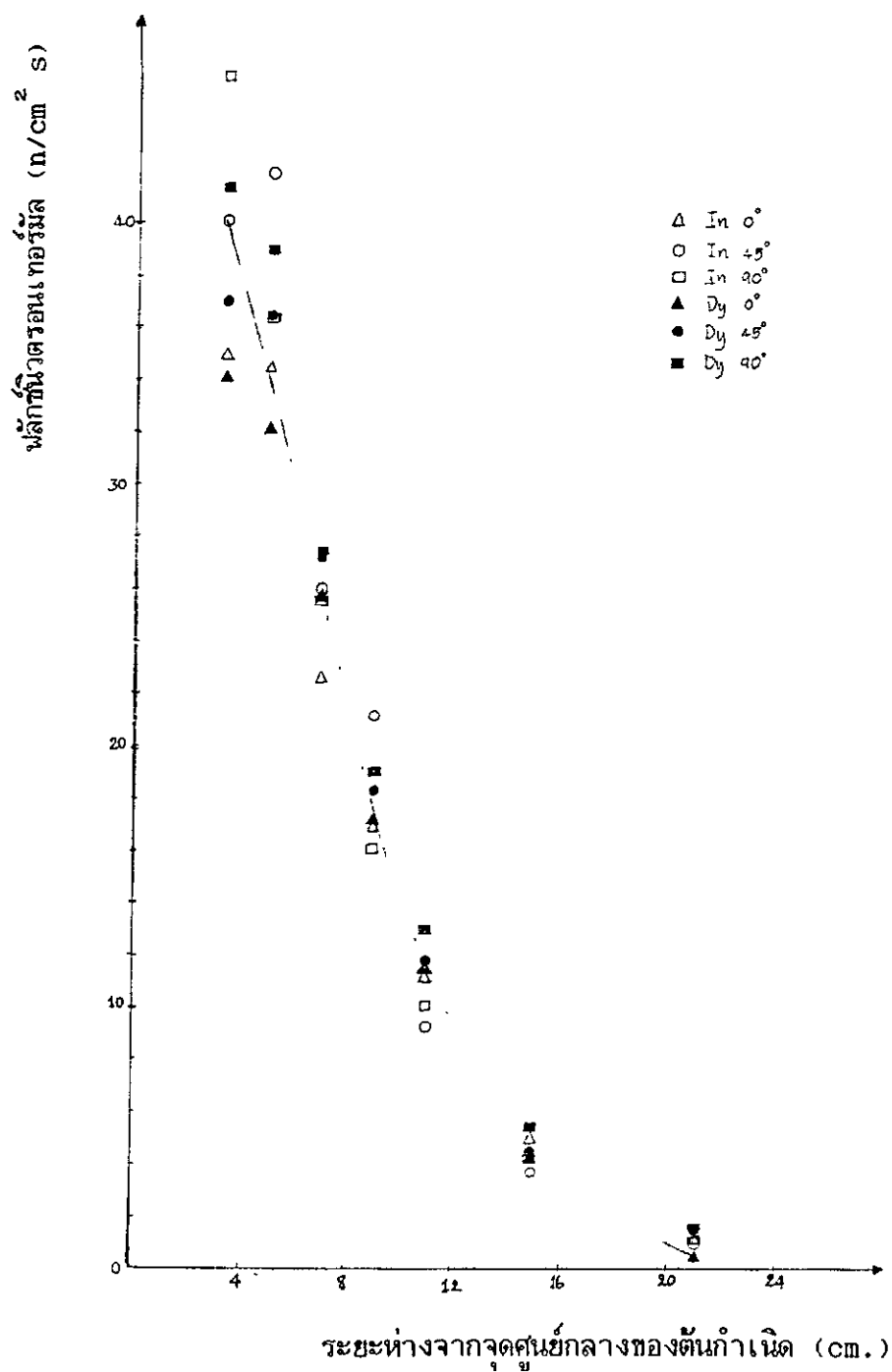
ภาพประกอบ 29 ฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในน้ำที่มุมต่าง ๆ จากการอ่านแผ่นอินเดียม วัดรังสีแกมมา ที่พลังงาน 1293.4 keV



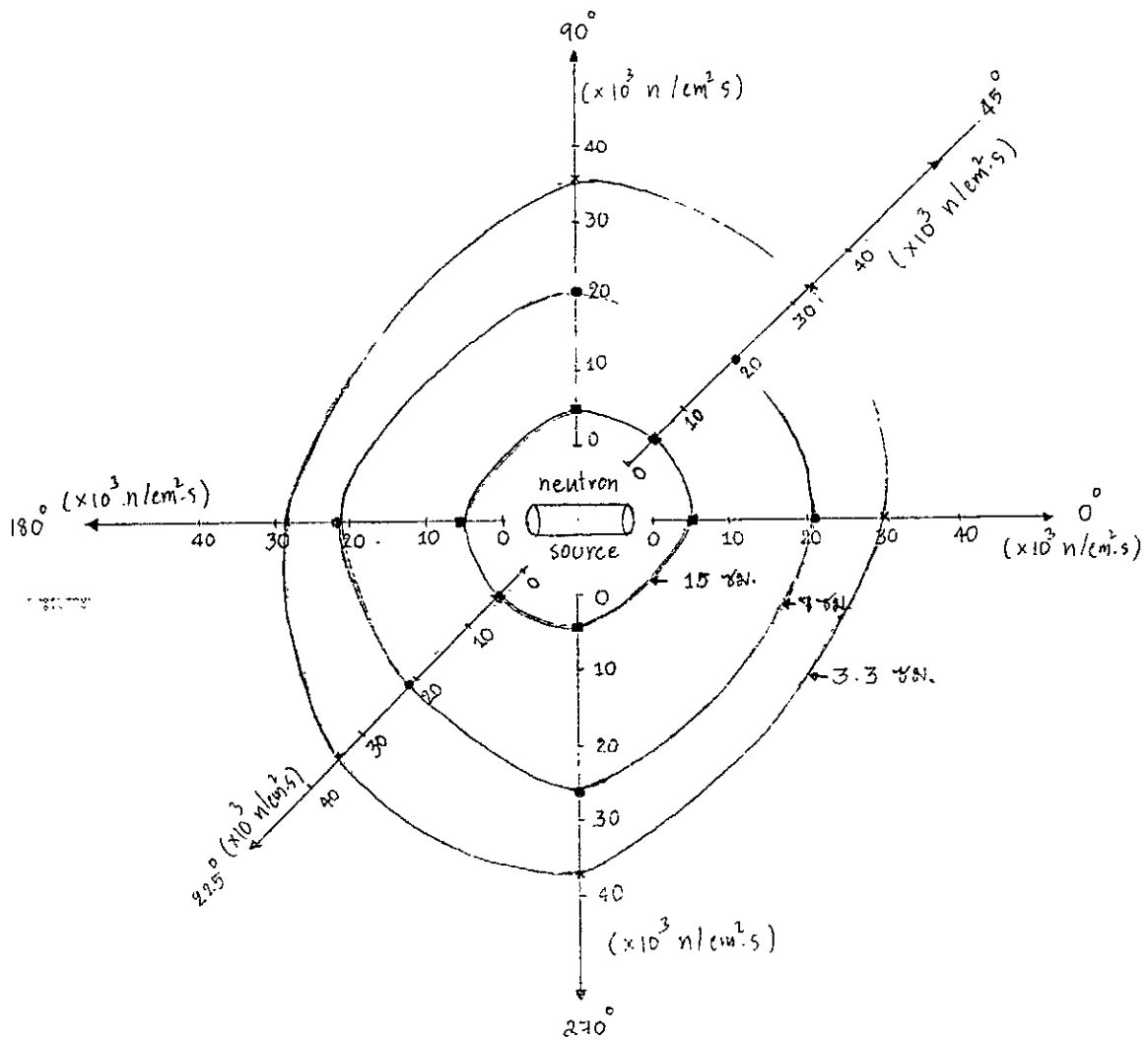
ภาพประกอบ 30 ฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในพาราฟินที่มิดต่าง ๆ จากการอาบแผ่นอินเดียม วัดรังสี
แกมมาที่พลังงาน 1293.4 keV



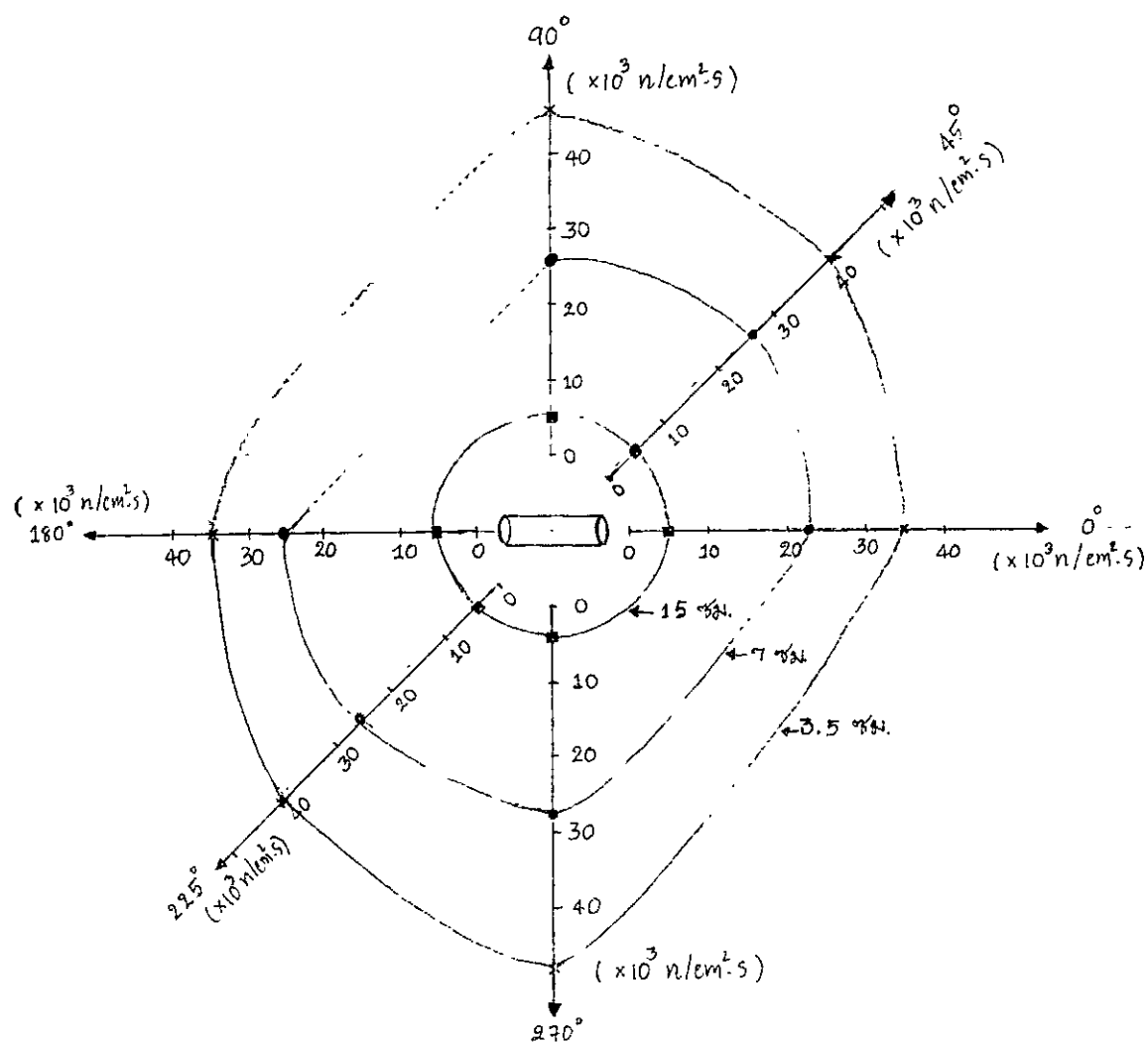
ภาพประกอบ 31 การกระจายของฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในน้ำ ที่มุม 0°, 45°, 90° จากแผ่น In วัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 1293.4 keV และแผ่น Dy วัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 361.7 keV



ภาพประกอบ 32 การกระจายของฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในพาราฟิน ที่มุม $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ จากแผ่น In วัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 1293.4 keV และแผ่น Dy วัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 361.7 keV



ภาพประกอบ 33 การกระจายของฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลรอบต้นกำเนิดในน้ำ ที่ระยะ 3.3 , 7 และ 15 เซนติเมตร จากแผ่น In วัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 1293.4 keV



ภาพประกอบ 34 การกระจายของฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลรอบต้นกำเนิดในพาราฟิน ที่ระยะ 3.5 , 7 และ 15 เซนติเมตร จากแผ่น In วัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 1293.4 keV

บทที่ 5

สรุป อภิปราย และข้อเสนอแนะ

สรุป และอภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาการกระจายของปลั๊กซ์นิวตรอนเร็วและปลั๊กซ์นิวตรอนเทอร์มัล จากต้นกำเนิดนิวตรอนอเมอริเซียม-เบอริลเลียม ขนาด 5 คูรี ในตัวกลางน้ำและพาราฟิน โดยมีขอบเขตว่า ในแต่ละตัวกลางจะศึกษาการกระจายของปลั๊กซ์นิวตรอนเร็ว และปลั๊กซ์นิวตรอนเทอร์มัล ในด้านแนวนอน (0 องศา) ด้านแนวตั้ง (90 องศา) และในแนวมุม 45 องศาของต้นกำเนิดนิวตรอนอเมอริเซียม-เบอริลเลียม และในแต่ละแนวจะศึกษาการกระจายของปลั๊กซ์นิวตรอนที่ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของต้นกำเนิดนิวตรอน 3.3 , 5 , 7 , 9 , 11 , 15 และ 21 เซนติเมตรทั้งสองข้าง สำหรับการหาปลั๊กซ์นิวตรอนเร็วและนิวตรอนเทอร์มัลในตัวกลางทั้งสองจะใช้วิธีนิวตรอนเอกติเวชัน เปรียบเทียบกับทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอนสองกลุ่ม ในการหาปลั๊กซ์นิวตรอน โดยวิธีนิวตรอนเอกติเวชัน จะหาปลั๊กซ์นิวตรอนเร็วโดยการอ่านแผ่นอลูมิเนียม และหาปลั๊กซ์นิวตรอนเทอร์มัลจากการอ่านแผ่นอินเดียม และแผ่นดีสโพรเซียม ผลงานวิจัยสรุปได้ดังนี้

1. การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ชุดการทดลองการหาปลั๊กซ์นิวตรอนในน้ำและพาราฟิน

ในการออกแบบอุปกรณ์ชุดการอ่านนิวตรอนในตัวกลางทั้งสอง ต้องคำนึงถึงประโยชน์ในการนำอุปกรณ์กลับมาใช้ได้ใหม่ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบชุดการอ่านนิวตรอนในพาราฟินโดยการนำแท่งพาราฟินมาประกอบเป็นชุดการอ่านนิวตรอน เพื่อว่าหลังจากเสร็จงานวิจัยแล้ว สามารถนำพาราฟินมาใช้ประโยชน์ทางด้านอื่นได้อีก และสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงในการออกแบบอุปกรณ์คือความเมื่อออกแบบเสร็จแล้วต้องมีความปลอดภัยต่อผู้ทำการวิจัยและผู้ที่อยู่ใกล้เคียง ดังนั้นต้องมีการตรวจวัดรังสีรอบ ๆ บริเวณที่ทำการวิจัย ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้ได้รับการอนุเคราะห์จากเจ้าหน้าที่ของสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติมาตรวจวัดรังสี และเคลื่อนย้ายต้นกำเนิดนิวตรอนไปยังอุปกรณ์ชุดการทดลองที่สร้างเสร็จแล้ว เมื่อทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ชุดการทดลองการอ่านนิวตรอนในน้ำและพาราฟินเสร็จเรียบร้อยแล้ว ได้ผลดังภาพประกอบ 14 และ 18

2. การหาฟลักซ์นิวตรอนในน้ำและพาราฟิน

วิธีการและขั้นตอนในการหาฟลักซ์นิวตรอนเร็วและฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัล โดยวิธีนิวตรอนแอกติเวชัน และทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอนสองกลุ่มได้กล่าวไว้อย่างละเอียดในบทที่ 3 และ บทที่ 4 ซึ่งสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

2.1 จากการศึกษาการกระจายของฟลักซ์นิวตรอนเร็ว และฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัล ในน้ำและพาราฟิน โดยการทดลองด้วยวิธีนิวตรอนแอกติเวชัน เปรียบเทียบกับทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม พบว่า ค่าของฟลักซ์นิวตรอนเร็วในน้ำที่คำนวณได้จากทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่มและจากการทดลองด้วยวิธีนิวตรอนแอกติเวชัน ดังภาพประกอบ (21) จะมีความแตกต่างกันที่ระยะใกล้ต้นกำเนิด โดยค่าที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่า และมีค่าใกล้เคียงกันที่ระยะห่างจากต้นกำเนิดออกมา ทั้งนี้เพราะการคำนวณฟลักซ์นิวตรอนเร็วจากทฤษฎี ได้กำหนดขอบเขตในการแก้สมการการฟุ้งของนิวตรอนเร็วว่า ต้นกำเนิดนิวตรอนเป็นแบบจุดและนิวตรอนเร็วมีการกระจายรอบตัวแต่ต้นกำเนิดนิวตรอน Am-Be ที่ใช้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกยาว 6 เซนติเมตร ที่ระยะใกล้ต้นกำเนิดจะให้ทรงกระบอกมีขนาดเป็นจุดจึงไม่ถูกต้อง แต่ที่ระยะห่างจากต้นกำเนิดออกมาพออนุโลมให้ทรงกระบอกมีขนาดเป็นจุดได้ค่าฟลักซ์ที่ได้จากทฤษฎีจึงใกล้เคียงกับการทดลอง ส่วนค่าฟลักซ์นิวตรอนเร็วในพาราฟิน ค่าที่ได้จากทฤษฎีมีค่าแตกต่างจากการทดลองมาก ดังภาพประกอบ (22) และลักษณะการกระจายแตกต่างจากในน้ำ ทั้งนี้เพราะ ค่าคงที่ K_f และ D_f ที่ใช้คำนวณค่าฟลักซ์นิวตรอนเร็วจากทฤษฎี ได้มาจากสูตรการหาความยาวการฟุ้งของนิวตรอนเร็ว ซึ่งเป็นค่าที่คลาดเคลื่อนเนื่องจากค่า L_f มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทาง และพลังงานของนิวตรอนเร็ว ส่วนในน้ำ ค่า K_f และ D_f ได้จากการทดลองที่มีผู้ทดลองมาแล้ว จึงมีความถูกต้องมากกว่า และผลการวัดฟลักซ์นิวตรอนเร็วจากวิธีนิวตรอนแอกติเวชัน สามารถหาฟลักซ์ที่ระยะใกล้ต้นกำเนิดนิวตรอนเท่านั้น ทั้งนี้เพราะที่ระยะห่างออกมาค่าฟลักซ์มีค่าน้อยมาก จนไม่สามารถวัดได้

สำหรับฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในน้ำ ที่คำนวณได้จากทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม กับค่าที่ได้จากวิธีนิวตรอนแอกติเวชัน ปรากฏว่า ที่ระยะใกล้ต้นกำเนิดนิวตรอนคือระยะน้อยกว่า 9 เซนติเมตร ค่าฟลักซ์ที่ได้จากทั้งสองวิธีมีค่าแตกต่างกัน ดังภาพประกอบ (23) และมีค่าใกล้เคียงกันที่ระยะห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอนออกมา ทั้งนี้มีเหตุผลเดียวกับค่าฟลักซ์นิวตรอนเร็ว คือ ในทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่มกำหนดให้ต้นกำเนิดนิวตรอนมีขนาดจุด แต่ต้นกำเนิดนิวตรอนที่ใช้เป็นทรงกระบอก ที่ระยะใกล้ต้นกำเนิดนิวตรอนจะอนุโลมให้ทรงกระบอกมีขนาดจุดจึงไม่ถูกต้อง ส่วนที่ระยะ

ห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอนออกมาพออนุโลมให้ทรงกระบอกมีขนาดเป็นจุดได้ ส่วนในตัวกลางพาราฟิน ค่าฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลที่ได้จากการทดลองและทฤษฎีมีค่าใกล้เคียงกันที่ระยะ 9 - 15 เซนติเมตร ซึ่งจะแตกต่างจากในน้ำ เพราะค่าคงที่ K_{∞} ที่ใช้คำนวณในทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 กลุ่ม มีวิธีการหาแตกต่างกัน โดยในตัวกลางน้ำได้จากข้อมูลที่มืออยู่แล้ว ส่วนในตัวกลางพาราฟินได้จากการคำนวณจากสูตรในทางทฤษฎี ซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อนได้

2.2 การกระจายของฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลในตัวกลางน้ำ และพาราฟิน ดังภาพประกอบ 25 พบว่าที่ระยะใกล้ต้นกำเนิดนิวตรอนค่าฟลักซ์นิวตรอนในน้ำมีค่าน้อยกว่าฟลักซ์นิวตรอนในพาราฟิน เพราะพาราฟินมีความสามารถในการลดพลังงานนิวตรอนได้ดีกว่าน้ำ แต่ที่ระยะห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอนออกมาฟลักซ์นิวตรอนในพาราฟินมีค่าน้อยกว่าน้ำ ทั้งนี้เพราะพาราฟินมีค่าภาคตัดขวางในการดูดกลืนนิวตรอนมากกว่าน้ำ ดังนั้นที่ระยะห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอน นิวตรอนจะถูกดูดกลืนในพาราฟินได้มาก จึงเหลือนิวตรอนไปทำปฏิกิริยากับธาตุที่อาบนิวตรอนได้น้อยลง จึงทำให้ที่ระยะห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอนค่าฟลักซ์นิวตรอนน้อยกว่าในน้ำ

2.3 การกระจายของฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลที่มุมต่าง ๆ ดังภาพประกอบ 29-34 พบว่าการกระจายของนิวตรอนที่มุมต่าง ๆ มีค่าไม่เท่ากัน ฟลักซ์นิวตรอนทางด้านข้าง (90° , 270°) ของทรงกระบอกของต้นกำเนิดมีมากกว่าทางด้านอื่น แสดงว่าฟลักซ์นิวตรอนกระจายออกด้านข้างได้ดี ที่ด้านบนของทรงกระบอกของต้นกำเนิด (0°) ฟลักซ์นิวตรอนส่วนมากมีค่าน้อยกว่าทางด้านล่าง (180°) เพราะระยะที่วัดฟลักซ์นิวตรอนเป็นระยะที่วัดจากจุดศูนย์กลางของต้นกำเนิดนิวตรอน ซึ่งเป็นทรงกระบอก ถ้าวัดฟลักซ์นิวตรอนทางด้านล่างของต้นกำเนิด ส่วนที่เป็น active component ของต้นกำเนิดนิวตรอน Am-Be ไปอยู่ทางด้านล่างมากกว่าทางด้านบน ดังนั้นฟลักซ์นิวตรอนที่ออกทางด้านล่างจึงมีค่ามากกว่าทางด้านบน

2.4 ในการวัดฟลักซ์นิวตรอนเร็วโดยวิธีนิวตรอนแอกติเวชัน จากปฏิกิริยา (n,p) และ (n,α) ค่าฟลักซ์ที่ได้จากปฏิกิริยา (n,p) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีค่าถูกต้องกว่า เพราะมีค่าภาคตัดขวางในการเกิดปฏิกิริยามากกว่า ส่วน Na-24 มีค่าภาคตัดขวางในการเกิดปฏิกิริยาดำกว่า และมีครึ่งชีวิตยาวนาน ทำให้กัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นต่ำ ต้องใช้เวลายาวนานเกินไปในการวัดรังสี ทำให้การนับของรังสีพื้นหลัง (background) มีมาก การวัดฟลักซ์นิวตรอนเร็วของต้นกำเนิดนิวตรอน Am-Be จากปฏิกิริยา (n,α) จึงมีความคลาดเคลื่อนมาก

2.5 ในการวัดฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลโดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน จากการอาบแผ่นอินเดียมและแผ่นดีสโพรเซียม พบว่า ค่าฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลที่ได้จากการอาบแผ่นดีสโพรเซียม แล้ววัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 94.6 keV มีค่าฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลสูงสุด ทั้งนี้เพราะดีสโพรเซียมมีค่าภาคตัดขวางในการดูดกลืนนิวตรอนสูงมาก ส่วนที่พลังงาน 361.7 keV มีค่าฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลน้อย เพราะที่พลังงานนี้มีค่าความเข้มของรังสีแกมมาน้อยมาก ส่วนค่าฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลจากการอาบแผ่นอินเดียมโดยวัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 1097.1 keV และ ที่พลังงาน 1293.4 keV จะได้ค่าฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลเกือบเท่า ๆ กัน และจากงานวิจัยนี้การวัดฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลโดยใช้แผ่นอินเดียมจะมีความถูกต้องมากกว่า เพราะสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่ได้จากการอาบแผ่นอินเดียมมีรังสีพื้นหลังน้อยมาก และฟลักซ์นิวตรอนที่ได้จากทั้งสองพลังงาน มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนสเปกตรัมที่ได้จากแผ่นดีสโพรเซียม ที่พลังงาน 94.6 keV มีจำนวนนับของรังสีพื้นหลังมาก ทำให้ฟลักซ์นิวตรอนที่ได้อาจไม่ถูกต้อง

ข้อเสนอแนะ

- 1 ในการหาฟลักซ์นิวตรอนเร็วและฟลักซ์นิวตรอนเทอร์มัลโดยใช้ทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอนสองกลุ่ม น่าจะมีการแก้สมการการฟุ้งของนิวตรอนทั้งสอง โดยกำหนดขอบเขตให้ต้นกำเนิดนิวตรอนมีลักษณะเป็นทรงกระบอก น่าจะทำให้ค่าฟลักซ์นิวตรอนที่ได้จากทฤษฎีมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองมากขึ้น
- 2 ในการวัดฟลักซ์นิวตรอนโดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชันในงานวิจัยนี้ สิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่งคือการหาประสิทธิภาพของหัววัดรังสีแกมมาที่พลังงานต่าง ๆ จะต้องพยายามให้ความถูกต้องมากที่สุด โดยที่ต้นกำเนิดรังสีแกมมามาตรฐานที่ใช้หาประสิทธิภาพของหัววัดมีลักษณะเป็นจุด ส่วนรังสีแกมมาจากการอาบนิวตรอนมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังนั้นในการหาประสิทธิภาพของหัววัดควรหารอบสี่เหลี่ยมจัตุรัสหลาย ๆ ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย ซึ่งทำให้ได้ประสิทธิภาพของหัววัดถูกต้องมากขึ้น
- 3 ในการอาบแผ่นอินเดียม แผ่นอลูมิเนียม และแผ่นดีสโพรเซียมทุกครั้ง ควรจัดให้แผ่นธาตุทั้งสามหันด้านหน้าเข้าหาต้นกำเนิดนิวตรอน
- 4 บริเวณที่ตั้งอุปกรณ์การทดลองการอาบนิวตรอนในน้ำและในพาราฟิน จะต้องนำแท่งตะกั่วและแท่งคอนกรีต มากั้นล้อมรอบเสมอ เพื่อกันรังสีแกมมา และนิวตรอนที่ออกมาจากต้นกำเนิดนิวตรอน

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- จิตปราณี เกียรติกุล. การศึกษาความเหมาะสมของการอาบรังสีนิวตรอนด้วยต้นกำเนิดนิวตรอน
พลูโตเนียม-เบอริลเลียม. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ,
2520. อัดสำเนา.
- ปรีชา เทียนสมประสงค์. การกระจายนิวตรอนจากต้นกำเนิดขนาดจุดในน้ำ. วิทยานิพนธ์ วศ.ม.
กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2517. อัดสำเนา
- ทอง อัครธีรานนท์. การป้องกันนิวตรอน. วิทยานิพนธ์ กศ.ม. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัย
ศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร , 2521. อัดสำเนา.
- พงษ์วุฒิ ดวงศรี. การออกแบบและสร้างถังสำหรับเก็บต้นกำเนิดนิวตรอนเพื่อใช้งาน. วิทยานิพนธ์
กศ.ม. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร , 2530. อัดสำเนา.
- อุไรวรรณ จุณาคต์. การกระจายของนิวตรอนเข้าในตัวกลางซึ่งเป็นของผสมระหว่างน้ำกับของแข็ง.
วิทยานิพนธ์ วศ.ม. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2521. อัดสำเนา

Anderson, David W. Absorption of Ionization Radiation. Maryland :
University Park Press, 1984.

Buczko, CS. M. and others. Nuclear Instruments and Method. 134 :
101-105 : 1981.

Daroezy, S. , P.Raics and J.Csikai. Laboratory manual,IAEA Training
Course. Debrecen , 1982.

Eichholz, Geoffrey G. and John W.Poston. Principles of Nuclear Radiation
Detection. Michigan : Ann Arbor Science Publishers,Inc., 1979.

Glasstone, Samuel. Nuclear Reactor Engineering. New York : D.
Vannostrand Company , Inc., 1963

Instruction Manual. Model NH-3 Neutron Howitzer Experiment. Chicago :
Nuclear Chicago Coperation, 1960.

Kaplan, I. Nuclear Physics. 2nd ed. Massachusetts : Addison-Publishing
Company, 1962.

Knoll , Glenn F. Radiation Detection and Measurement. New York : John
Wiley & Sons,Inc., 1979.

Lamash John R. Introduction to Nuclear Engineering. Massachusetts :
Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1975.

Lorch, E.A. Journal of Applied Radiation of Isotopes. 24 : 588 ; 1973.

Murray, Raymond L. Nuclear Reactor Physics. N.J. : Englewood Cliffs,
Printice-Hall, Inc., 1975.

Nagy , S., J. Chikai and I. Angeli. Nuclear Instruments and Methods.
91 : 345-347 ; 1971.

Nisle. Nucleonics. 21 :143 ; 1963.

Price, William J. Nuclear Radiation Detection. 2nd ed. New York :
McGraw-Hill Book Company, 1964.

Wong, Samuel S.M. Introduction Nuclear Physics. N.J. : Englewood Cliffs,
Printice-Hall , Inc., 1990.

ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ นางสาววิชุดา ชื่อสกุล สุบรรณ
 เกิดวันที่ 17 เดือน สิงหาคม พุทธศักราช 2510
 สถานที่เกิด อำเภอปากพะนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช
 สถานที่อยู่ปัจจุบัน 299/6 หมู่บ้านร่วมแก่นนิเวศน์ หมู่ 8 ถนนพุทธมณฑลสาย 4
 แขวงทวีวัฒนา เขตตลิ่งชัน กรุงเทพฯ 10170
 สถานที่ทำงานปัจจุบัน มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย 126/1 ถนนวิภาวดีรังสิต
 เขตห้วยขวาง กรุงเทพฯ 10400

ประวัติการศึกษา

- พ.ศ. 2529 มัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนวัดน้อยใน
 พ.ศ. 2533 กศ.บ. (วิทยาศาสตร์นิสิทธ์) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
 ประสานมิตร
 พ.ศ. 2537 วท.ม. (วิชาเอกนิสิทธ์) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
 ประสานมิตร