

539.7216
ท15ก
๔3

การป้องกันนคร

28 ก.พ. 2522

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ตลุมพิต 23 พระโขนง กรุงเทพฯ 11 โทร. 3921676, 3916068
ปริญญานพนธ

ของ

ทง อัครธรรานท

เสนอมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต

มิถุนายน 2521

คณะกรรมการที่ปรึกษาประจำวันนี้ ได้พิจารณาปัญหานี้แล้ว
เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญาการศึกษาพหุวิชา
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒได้.

ศรีฯ 11 ธ.ค. 57 ประธาน

ศรีฯ มจร กรรมการ

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือและให้คำแนะนำอย่างดียิ่ง
จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรีย์ แขวงโสภา ประธานกรรมการที่ปรึกษา และ
อาจารย์ปรีชา การสุทธิ กรรมการที่ปรึกษา ทั้งยังได้รับความเอื้อเฟื้อจากแผนกนิเวศวิทยา
เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ให้ใช้เครื่องมือทำการวิจัยได้
นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้รับความกรุณาจากบรรณารักษ์ห้องสมุด สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ
ช่วยให้อ่านและช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องสมุดของสำนักงานฯ อย่างดียิ่ง
ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณท่านทั้งหลายมาอย่างสูง.

ทง อัครธีรานนท์

สารบัญ

บทที่		หน้า
1	บทนำ	1
	ความมุ่งหมายของการศึกษาค้นคว้า	3
	ความสำคัญของการศึกษาค้นคว้า	3
	ขอบเขตของการศึกษาค้นคว้า	3
	คำจำกัดความและศัพท์เฉพาะ	4
	เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย	7
2	ทฤษฎี	11
	การฟุ้งของนิวตรอน	12
	การลดความเร็วของนิวตรอน	12
	ทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 พก	19
	การหาฟลักซ์ในกรณีนิวตรอนเร็ว	20
	การหาฟลักซ์ในกรณีเทอร์มัลนิวตรอน	22
	นิวตรอนโคส	23
3	เครื่องมือและวิธีดำเนินการ	25
	เครื่องมือ	25
	BF ₃ proportional counter	25
	Neutron survey meter	27
	วิธีดำเนินการ	28
	เตรียมวัสดุที่จะนำมาใช้ในการทดลอง	28
	จัดห้องทดลอง	30
	วัดหาจำนวนเทอร์มัลนิวตรอน	33

เปรียบเทียบจำนวนเทอร์มาลนิวตรอนที่วัดได้กับจำนวน ที่คำนวณได้จากทฤษฎี	36
คำนวณหานิวตรอนโคส	36
4 การคำนวณและผลการทดลอง	37
คำนวณหานิวตรอนโคสเรท	37
การคำนวณหาค่า Σ_r	37
การคำนวณหาค่า Σ_a	45
การคำนวณหาค่า $\rho_{\text{ผลม}}$	46
ผลการทดลอง	48
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	61
สรุปลักษณะและคุณสมบัติของนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน แบบอะเมอริเซียม - เบอริลเลียม ขนาด 1 คูรี	61
สรุปผลการทดลองจากการวางหัววัด BF ₃ counter 3 แบบ	61
การป้องกันอันตรายจากเทอร์มาลนิวตรอน	62
การออกแบบที่เก็บต้นกำเนิดนิวตรอน	64
ข้อเสนอแนะ	67
บรรณานุกรม	68

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 แสดงค่าความหนาแน่นของสารต่าง ๆ	38
2 แสดงค่า Macroscopic removal cross section ของธาตุต่าง ๆ.....	38
3 แสดงค่านิวตรอนโครสเรทและ count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอน ซึ่งได้จากการที่นิวตรอนวิ่งผ่านน้ำที่มีความหนาต่าง ๆ	39
4 แสดงค่านิวตรอนโครสเรท และ count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอน ซึ่งได้จากการที่นิวตรอนวิ่งผ่านพาราฟินที่มีความหนาต่าง ๆ	42
5 แสดงค่าภาคตัดขวางจุลภาคสำหรับการถูกกลืนของสารต่าง ๆ	46
6 แสดงค่าความหนาแน่นผสมของบอริกแอซิครวมกับน้ำในอัตราส่วนผสมต่าง ๆ	47
7 แสดงค่าภาคตัดขวางมหภาคสำหรับการถูกกลืนเทอร์มาลนิวตรอนของสารต่าง ๆ	47
8 แสดงค่านิวตรอนโครสเรท และ count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอน ซึ่งได้จากการที่เทอร์มาลนิวตรอนวิ่งผ่านแคดเมียม	48
9 แสดงค่านิวตรอนโครสเรท และ count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอน ซึ่งได้จากการที่เทอร์มาลนิวตรอนวิ่งผ่านโบรอนคาร์ไบด์	48
10 แสดงค่านิวตรอนโครสเรท และ count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอน ซึ่งได้จากการที่เทอร์มาลนิวตรอนวิ่งผ่านโบรแกซ	49
11 แสดงค่านิวตรอนโครสเรทและ count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอน ซึ่งได้จากการที่เทอร์มาลนิวตรอนวิ่งผ่านบอริกแอซิค	49
12 แสดงค่านิวตรอนโครสเรท และ count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอน ซึ่งได้จากการที่เทอร์มาลนิวตรอนวิ่งผ่านบอริกแอซิครวมกับน้ำ ในอัตราส่วนผสม 1 : 7 โดยปริมาตร	50
13 แสดงค่านิวตรอนโครสเรท และ count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอน ซึ่ง ได้จากการที่เทอร์มาลนิวตรอนวิ่งผ่านบอริกแอซิครวมกับน้ำในอัตราส่วนผสม 1 $\frac{1}{2}$: 6 $\frac{1}{2}$ โดยปริมาตร	50

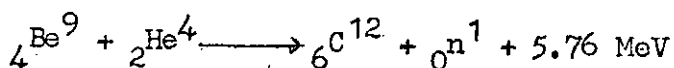
14	แสดงค่านิวตรอนโคสเรท และ count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอน ซึ่งได้จากการที่เทอร์มาลนิวตรอนวิ่งผ่านบอริกแอซิดรวมกับน้ำ ในอัตราส่วนผสม 2 : 6 โดยปริมาตร	51
15	แสดงค่า count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอน ซึ่งได้จากการที่ เทอร์มาลนิวตรอนวิ่งผ่าน Borated paraffin	52
16	แสดงปริมาณเพิ่มมากที่สุดที่จะรับรังสีได้โดยไม่เป็นอันตราย	62
17	แสดงการเปรียบเทียบนิวตรอนโคสเรทของวัสดุสำหรับดูดกลืนเทอร์มาล นิวตรอน ที่ความหนาต่าง ๆ	64

บัญชีภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
1 การชนแบบอีลาสติกแล้วเปลี่ยนทิศทางเดินไปของนิวตรอนกับนิวเคลียสในตัวกลาง	12
2 นิวตรอนเปลี่ยนทิศทางเดินไปใน L system และ C system	14
3 การเปลี่ยนจาก C system ไปยัง L system	16
4 แผนภาพแสดงหลักการทำงานของเครื่อง BF_3 proportional counter	27
5 แผนภาพแสดงหลักการทำงานของ Neutron survey meter	27
6 แสดงการจักษวอุปกรณ์ในบริเวณที่ทำการทดลอง	31
7 แผนผสมของ พาราฟินและโบเร็กซ์ ซึ่งมีรูปกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 นิ้ว	32
8 แสดงการวางเรียงกอนตะกั่ว	33
9 แสดงการวางเรียงของกลองบรรจุพาราฟิน	33
10 แสดงการวางคนกำเนิกนิวตรอน	34
11 แสดงวิธีการวางหัววัด BF_3 counter	35
12 กราฟแสดงนิวตรอนโคสเรทความหนาต่าง ๆ ของน้ำ	40
13 กราฟเปรียบเทียบจำนวน count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอนเมื่อวางหัววัด BF_3 counter 3 แบบ โดยใช้น้ำเป็นวัสดุสำหรับลดความเร็วของนิวตรอนเร็ว	41
14 กราฟแสดงนิวตรอนโคสเรทความหนาต่าง ๆ ของพาราฟิน	43
15 กราฟเปรียบเทียบจำนวน count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอน เมื่อวางหัววัด BF_3 counter 3 แบบ โดยใช้พาราฟินเป็นวัสดุสำหรับลดความเร็วของนิวตรอนเร็ว	44
16 กราฟเปรียบเทียบจำนวน count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอน เมื่อวางหัววัด BF_3 counter 2 แบบ โดยใช้แคดเมียมเป็นวัสดุสำหรับดูดกลืน	53

- 17 กราฟเปรียบเทียบจำนวน count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอนเมื่อวางตัววัด
BF₃ counter 3 แบบ โดยใช้โบรอนคาร์ไบด์เป็นวัสดุสำหรับดูดกลืน
เทอร์มาลนิวตรอน 54
- 18 กราฟเปรียบเทียบจำนวน count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอนเมื่อวางตัววัด
BF₃ counter 3 แบบ โดยใช้โบรเกกซ์เป็นวัสดุสำหรับดูดกลืน
เทอร์มาลนิวตรอน 55
- 19 กราฟเปรียบเทียบจำนวน count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอนเมื่อวางตัววัด
BF₃ counter 3 แบบ โดยใช้บอริกแอซิกเป็นวัสดุสำหรับดูดกลืน
เทอร์มาลนิวตรอน 56
- 20 กราฟเปรียบเทียบจำนวน count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอนเมื่อวางตัววัด
BF₃ counter 3 แบบ โดยใช้บอริกแอซิกรวมกับน้ำในอัตราส่วนผสม
1 : 7 โดยปริมาตร เป็นวัสดุสำหรับดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอน 57
- 21 กราฟเปรียบเทียบจำนวน count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอนเมื่อวางตัววัด
BF₃ counter 3 แบบ โดยใช้บอริกแอซิกรวมกับน้ำในอัตราส่วนผสม
1 $\frac{1}{2}$: 6 $\frac{1}{2}$ โดยปริมาตร เป็นวัสดุสำหรับดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอน 58
- 22 กราฟเปรียบเทียบจำนวน count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอนเมื่อวางตัววัด
BF₃ counter 3 แบบ โดยใช้บอริกแอซิกรวมกับน้ำในอัตราส่วนผสม
2 : 6 โดยปริมาตร เป็นวัสดุสำหรับดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอน 59
- 23 กราฟเปรียบเทียบจำนวน count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอน เมื่อวางตัววัด
BF₃ counter 3 แบบ โดยใช้ Borated paraffin เป็นวัสดุสำหรับ
ดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอน 60
- 24 แสดงให้เห็นแกนกำเนิดนิวตรอนเป็นรูปสี่เหลี่ยม 65

นิวตรอนเป็นอนุภาคซึ่งเป็นส่วนประกอบของนิวเคลียส ค้นพบครั้งแรกโดยการยิงอนุภาคอัลฟา ซึ่งมีประจุ + 2 หน่วย เข้าชนนิวเคลียสของเบอรอลเลียม ซึ่งมีประจุ + 4 หน่วย ไบนิวเคลียสของธาตุใหม่มีประจุ + 6 หน่วย ซึ่งเป็นประจุของธาตุคาร์บอน และมีอนุภาคชนิดหนึ่งออกมา มีความเร็วสูง ไม่แสดงอำนาจไฟฟ้า เจมส์ แชดวิก (James Chadwick) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษเรียกอนุภาคใหม่นี้ว่า นิวตรอน ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



มวลของนิวตรอนใกล้เคียงกับมวลของโปรตอน คือมีมวลเท่ากับ 1.008982 amu.

ชนิดต่าง ๆ ของนิวตรอน แบ่งตามพลังงานไค่งดังนี้คือ

1. นิวตรอนช้า (Slow neutron) มีพลังงานตั้งแต่ 0.001 eV และไม่เกิน 1000 eV หรือ 1 KeV
 2. นิวตรอนชนิดกลาง ๆ (Intermediate neutron) มีพลังงานตั้งแต่ 1 KeV ถึง 500 KeV หรือ 0.5 MeV
 3. นิวตรอนเร็ว (Fast neutron) มีพลังงานตั้งแต่ 0.5 MeV ขึ้นไป
- สำหรับนิวตรอนช้าอาจแบ่งออกได้เป็น 3 พวก คือ
1. นิวตรอนเย็น (Cold neutron) มีพลังงานน้อยกว่า 0.002 eV
 2. เทอร์มัลนิวตรอน (Thermal neutron) นิวตรอนพวกนี้มีพลังงานประมาณ 0.025 eV ถ้าพวกที่สูงกว่านี้ คือประมาณ 0.5 eV เรียกว่า Epithermal neutron
 3. เรโซแนนซ์นิวตรอน (Resonance neutron) มีพลังงานตั้งแต่ 1 eV ขึ้นไป และไม่เกิน 1000 eV หรือ 1 KeV

เนื่องจากนิวตรอนไม่มีประจุ ปฏิกริยาต่าง ๆ กับสารจึงแตกต่างจากพวกที่มีประจุ ปฏิกริยาของนิวตรอนกับสารโดยมากมักจะเป็นการถูกกลืน (Absorption) และการเปลี่ยนทิศทางเดิน (Scattering) ซึ่งปฏิกริยาการเปลี่ยนทิศทางเดินเมื่อชนกับโมเลกุลของสารของนิวตรอนนี้ อาจจะเกิดได้ทั้งชนิด อีลาสติก และอินอีลาสติก (Elastic and inelastic collision)

หลังจากที่ค้นพบนิวตรอนเป็นต้นมา ได้มีการนำเอานิวตรอนมาใช้ประโยชน์ในทางต่าง ๆ อย่างมากมาย เช่น

- ใช้เป็นกระสุนในการทำให้เกิดปฏิกริยา การแตกตัว (Fission)
- ใช้ทำให้สารธรรมดากลายเป็นสารกัมมันตรังสี
- ค้นโลหะวิทยา ใช้วิเคราะห์หาสารที่เป็นอยู่ในโลหะ
- ค้นธรณีวิทยา ใช้วิเคราะห์แร่ต่าง ๆ
- ค้นอาณูวิทยา ใช้ตรวจหาเขม่าดินปืนที่ยังตกค้างอยู่
- ค้นการศึกษา ใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติของนิวตรอน

ในตัวกลาง (Medium)

แต่สิ่งโลกตามที่มีคุณสมบัติ กัมมันตภาพรังสี นิวตรอนก็เช่นเดียวกัน เนื่องจากนิวตรอนเมื่ออำนาจในการทะลุทะลวงได้ ก็จึงอาจก่อให้เกิดอันตรายขึ้นได้ ถ้าไม่มีการระแวดระวัง ก็นั่นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีวัสดุมาป้องกัน เพื่อให้สามารถนำเอานิวตรอนมาใช้งานอย่างปลอดภัย ในการพิจารณาเลือกวัสดุมาป้องกันอันตรายจากนิวตรอนนี้พิจารณาเลือกจากคุณสมบัติที่สามารถกันนิวตรอนได้ดี หาได้ง่ายในประเทศไทยและราคาถูก ดังนั้นในการทดลองเรื่องนี้จึงเลือกใช้ พาราฟิน ร่วมกับโบรเร็คซ์ พาราฟินร่วมกับบอริกแอซิด (Boric acid) และบอริกแอซิดรวมกันมา ทำการทดลองว่าจะต้องใช้วัสดุขนาดเท่าไร จึงจะป้องกันอันตรายจากนิวตรอนได้เป็นอย่างดี สำหรับต้นกำเนิดนิวตรอนที่ใช้คือ

อะเมอริเซียม - เบอริลเลียม (Americium-Beryllium) ขนาดความแรง 1 กูรี
ต้นกำเนิดนิวตรอนนี้ให้รังสีแกมมาออกมา มีพลังงานต่ำ

การศึกษาวิจัยครั้งนี้จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง เพราะสามารถแนะนำเจ้าหน้าที่
ในงานวิจัยอื่น ๆ ได้อย่างปลอดภัย

ความมุ่งหมายของการศึกษาค้นคว้า

1. เพื่อศึกษาคูสมบัติและขนาดที่เหมาะสมในการป้องกันนิวตรอนของ พาราฟิน
ร่วมกับโบเร็กซ์, พาราฟินร่วมกับบอริกแอซิด และบอริกแอซิดรวมกันน้ำ
2. ศึกษาคุณลักษณะและสมบัติของนิวตรอนจากต้นกำเนิด อะเมริเซียม - เบอริล เลี่ยม
ขนาด 1 คูรี

ความสำคัญของการศึกษาค้นคว้า

1. จากผลการทดลองครั้งนี้จะทำให้ทราบขนาดที่เหมาะสมของ พาราฟินร่วมกับโบเร็กซ์,
พาราฟินร่วมกับบอริกแอซิด และบอริกแอซิดรวมกันน้ำ เพื่อนำมาใช้ในการป้องกันนิวตรอนในขณะ
นำไปใช้งาน
2. ผลที่ได้จากการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ จะเป็นประโยชน์ในการออกแบบที่เก็บต้นกำเนิด
นิวตรอนอย่างปลอดภัย และใช้ประโยชน์ในการสร้างเป็นอุปกรณ์สำหรับศึกษาเรื่องนิวตรอน
แอคทีเวชัน (Neutron activation)
3. เทคนิคและวิธีการครั้งนี้ จะเป็นแนวทางในการนำไปทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการ
การวัด นิวตรอนโดส (Neutron dose), การคำนวณหานิวตรอนฟลักซ์ (Neutron
flux) เป็นต้น
4. เทคนิคและวิธีการที่ได้จากการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ สามารถนำไปใช้ในการเรียน
การสอนในระดับอุดมศึกษาได้

ขอบเขตของการศึกษาค้นคว้า

1. ศึกษานิวตรอนจากต้นกำเนิด อะเมริเซียม - เบอริล เลี่ยม ขนาดความแรง
1 คูรี

2. ศึกษาและวัดนิวตรอนด้วย หัววัด Boron trifluoride proportional counter และ Neutron survey meter

3. วัดสัณฐานนิวตรอนโพลาไรซ์พาราฟินร่วมกับโบรเร็คซ์, พาราฟินร่วมกับบอริคแอซิด และบอริคแอซิด รวมกับน้ำ สารทั้งหมดเป็นชนิดที่ขายในท้องตลาด

คำจำกัดความและศัพท์เฉพาะ

1. ภาวตัดขวาง (Glasstone and Sesonske, 1963 : 67 - 68)
หมายถึง โอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยากับอนุภาค

2. ภาวตัดขวางจุลภาค (Microscopic cross section, σ) คือพื้นที่หรือบริเวณของนิวเคลียสที่อนุภาควิ่งไปชนแล้วเกิดปฏิกิริยา หน่วยของภาวตัดขวางจุลภาคตามปกติคือเป็น บาร์น (Barn)

$$\text{กำหนด } 1 \text{ บาร์น} = 10^{-24} \text{ cm}^2$$

3. ภาวตัดขวางมหภาค (Macroscopic cross section, Σ)
คือบริเวณหรือพื้นที่ของนิวเคลียสใน 1 cm^3 ที่จะเกิดปฏิกิริยา เมื่อมีอนุภาควิ่งเข้าไประหว่างนั้นถ้าวัสดุที่ใช้เป็นเป้าประกอบด้วย N นิวเคลียส ต่อ 1 cm^3 แล้วคูณของ N และ σ จะเป็นภาวตัดขวางมหภาค ซึ่งมีหน่วยเป็น cm^{-1} เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Sigma = N \sigma \quad \text{cm}^{-1}$$

4. การชนแบบ อีลาสติก (Bleuler, 1959 ; 18 - 20)
คือการชนที่พลังงานทั้งหมด (Kinetic and potential energy) ก่อนและหลังปฏิกิริยาจะคงเดิม และนิวเคลียสที่เกิดขึ้นใหม่ (Residual nucleus) จะคงอยู่ในภาวะปกติ (Ground state)

5. การชนแบบอินอีลาสติก (Inelastic collision)

การชนแบบที่พลังงานก่อนและหลังปฏิกิริยาจะไม่เท่ากัน แต่โมเมนตัม

(Momentum) เเท่าเพิ่ม การชนแบบนั้นก็จะเกิดนิวตริโน ๆ (มีเลขนวมมาก)

6. วัสดุสำหรับลดความเร็ว (Moderator)

การลดความเร็วของนิวตรอนทำได้โดย นำเอาวัสดุมาขวางกันทางเดินของนิวตรอน หรือเอาตนกำเนิดนิวตรอนไปวางไว้ในวัสดุที่ใช้เป็นตัวลดความเร็วของนิวตรอน วัสดุสำหรับลดความเร็วที่ดีได้แก่ วัสดุที่ทำให้นิวตรอนวิ่งช้าลงได้อย่างรวดเร็ว โดยการชนกับนิวเคลียสของวัสดุนั้นเพียงไม่กี่ครั้ง ซึ่งได้แก่สสารที่ประกอบด้วยอะตอมของธาตุที่มีเลขมวลน้อย ๆ และมีความภาคภูมิใจของการถูกกลืนนิวตรอนน้อยด้วย วัสดุสำหรับลดความเร็วที่ดีได้แก่ พาราฟิน, น้ำ (H_2O), Heavy water (D_2O), เบอริลเลียม และ คาร์บอน สำหรับในการทดลองครั้งนี้ ใช้พาราฟินเป็นวัสดุสำหรับลดความเร็ว

7. ต้นกำเนิดนิวตรอน (Neutron source)

หมายถึงตัวหรือแหล่งที่แผ่รังสีนิวตรอนออกมา นิวตรอนที่เกิดขึ้นได้จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่นิวตรอนออกมาหลายชนิดด้วยกัน เช่น ปฏิกิริยาการแตกตัว (Fission reaction) ปฏิกิริยาการถูกกลืน (Absorption reaction) และปฏิกิริยาการเปลี่ยนทิศทางเดิน (Scattering reaction) เป็นต้น ซึ่งอนุภาคที่ใช้เป็นตัวยิง ทำให้เกิดปฏิกิริยามีหลายตัว เช่น อนุภาคอัลฟา, โปรตอน และทริเทรอน สำหรับต้นกำเนิดนิวตรอนแบบอะเมอริเซียม - เบอริลเลียม ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ มีขนาด 1 คูรี ใช้อนุภาคอัลฟาจากอะเมอริเซียม เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยา ดังสมการ



ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบอะเมอริเซียม - เบอริลเลียม ชนิดนี้ทำได้โดยเอาอะเมอริเซียม 241 ผสมเข้ากับผงเบอริลเลียม นิวตรอนที่แผ่ออกจากต้นกำเนิดชนิดที่มีธาตุเบอริลเลียมเป็นส่วนใหญ่ ส่วนมากมีพลังงานสูง มีค่าพลังงานประมาณ 5 MeV และสูงสุดประมาณ 12 MeV ต้นกำเนิดนิวตรอนที่ใช้ในการศึกษานิวตรอนครั้งนี้ สามารถถือว่าเป็นจุดซึ่งแผ่รังสีนิวตรอนออกมารอบตัว ปริมาณนิวตรอนทุกทิศทางที่ทางจากต้นกำเนิดเท่ากัน จะมีค่าเท่ากัน

เช่น ถ้าคนกำเนิกนิวตรอนมีความแรง a นิวตรอน/วินาที คือปล่อยนิวตรอนออกมา a ตัว
ใน 1 วินาที นิวตรอนฟลักซ์ที่ตำแหน่งห่างจากคนกำเนิกเท่ากับ r cm (ในสุญญากาศ)
ในทิศทางใด ๆ จะมีค่าเป็น

$$\phi(r) = \frac{a}{4\pi r^2} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$$

8. ฟลักซ์ (Flux)

หมายถึงจำนวนของอนุภาคซึ่งเคลื่อนที่ในทิศทางต่าง ๆ กัน ینگผ่านพื้นที่
1 cm² ในเวลา 1 วินาที

9. นิวตรอนฟลักซ์ (Neutron flux)

หมายถึงจำนวนนิวตรอนซึ่งเคลื่อนที่ในทิศทางต่าง ๆ กัน ینگผ่านพื้นที่
1 cm² ในเวลา 1 วินาที ถ้านิวตรอนเหล่านี้มีความเร็วเท่ากันหมดทุกตัว นิวตรอนฟลักซ์
จะมีค่าเท่ากับความหนาแน่นของนิวตรอน n ค่าแห่งหนึ่งคูณด้วยความเร็วของนิวตรอน

ในกรณีที่นิวตรอนมีความเร็วไม่เท่ากันทุกตัว และ $N(v)$ เป็นความหนาแน่น
ของนิวตรอนในหนึ่งหน่วยช่วงความเร็วที่ v นิวตรอนฟลักซ์ในหนึ่งหน่วยช่วงความเร็วที่ v
มีค่าเป็น

$$\phi(v) = N(v)v$$

ดังนั้น $\phi(v) dv$ จะเป็นฟลักซ์ของนิวตรอนที่มีความเร็วอยู่ในช่วง v
และ $v + dv$ เพราะฉะนั้นฟลักซ์ทั้งหมดของนิวตรอนที่มีความเร็วต่าง ๆ กัน มีค่าเท่ากับ

$$\phi_{tot} = \int_0^{\infty} \phi(v) dv$$

ความเร็วเฉลี่ยของนิวตรอนมีค่าเท่ากับ

$$\bar{v} = \frac{\int_0^{\infty} vN(v)dv}{\int_0^{\infty} N(v)dv}$$

ฟลักซ์ทั้งหมดมีค่าเป็น

$$\phi_{tot} = N\bar{v}$$

เมื่อ $N = \int_0^{\infty} N(v)dv =$ ความหนาแน่นของนิวตรอนทุกค่าความเร็ว

10. ฟลัก นิวตรอน ฟลักซ์ (Fast neutron flux)

คือ ฟลักซ์ของนิวตรอนเร็ว

11. เทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์ (Thermal neutron flux)

คือ ฟลักซ์ของเทอร์มาลนิวตรอน

12. นิวตรอนแอคทีเวชัน (Neutron activation)

คือการวิเคราะห์หาและวัดปริมาณของธาตุจากตัวอย่างของสารใด ๆ โดยการทำให้ตัวอย่างนั้น เป็นสารกัมมันตรังสีก่อน โดยการยิงก๊วยนิวตรอน อะตอมของสารกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นใหม่จะแผ่รังสีออกมา ซึ่งจะทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ว่าเป็นธาตุอะไร และมีจำนวนอยู่เท่าใด วิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถวัดได้ละเอียดกว่าวิธีทางเคมี นิยมใช้กันในทางอุตสาหกรรม โบราณคดี และอาชีววิทยา

13. นิวตรอนโดส (Neutron dose)

หมายถึงปริมาณของพลังงานที่นิวตรอนคายให้แก่อัตอมที่เข้าปฏิกิริยากับนิวตรอน

14. นิวตรอนโดสเรต (Neutron dose rate)

หมายถึง อัตราที่นิวตรอนคายพลังงานให้แก่อัตอมที่เข้าปฏิกิริยากับนิวตรอน

ในหนึ่งหน่วยเวลา

15. คิวรี (Curie, Ci)

สารรังสีที่แผ่ความแรง 1 คิวรี หมายความว่าสารรังสีนั้นสามารถแผ่รังสีออกมา 3.7×10^{10} ครั้ง ภายใน 1 วินาที

เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

รอกเวลล์ (Rockwell, 1956) ได้แนะนำวิธีเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้ในการป้องกันนิวตรอนว่า ควรมีคุณสมบัติดังนี้

1. จะต้องมิใช่ไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบอย่างมากเมื่อเทียบกับน้ำ

2. มีน้ำหนักเบา
3. ทนความร้อนได้ดี ถ้าไหม้ไฟอัตราการไหม้ไฟต่ำกว่าและสามารถหยุดไฟไหม้ไฟได้เอง เมื่อนำตะกั่วเนกไฟออกไปแล้ว
4. ไม่กลายเป็นก๊าซพิษเมื่อถูกความร้อน
5. สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่าย
6. สามารถเคลื่อนย้ายไปมาได้สะดวก
7. ราคาถูก

ยู่ทฐ (Yuth, 1968) ได้ทำการทดลองวัดเทอร์มัลฟลักซ์ที่ระยะต่าง ๆ ในน้ำ
ซึ่งเกิดจากกัมมันตนิวตรอนขนาดจุดแบบอะเมอริเซียม - เบอริลเลียม ที่ให้ 1.3×10^6
นิวตรอน/วินาที โดยผลการทดลองดังนี้

ระยะทาง r (cm)	$\phi_s \times 10^3$ (n/cm ² sec)
0	7.00
1.5	6.70
3.5	5.74
5.5	4.85
7.5	3.81
9.5	2.74
10.5	2.30
11.5	1.91
12.5	1.50
13.5	1.19
14.5	1.00
15.5	0.838
16.5	0.680
17.5	0.556
18.5	0.460
19.5	0.393

ปรีชา (Preecha, 1973) ได้ทำการคำนวณค่าเทอร์มัลฟลักซ์ที่ระยะต่าง ๆ ในน้ำ ซึ่งเกิดจากต้นกำเนิดนิวตรอน ขนาดจุดแบบอะเมอริเซียม - เบอริลเลียม ที่ให้ 1.3×10^6 นิวตรอน/วินาที โดยใช้ทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 พวก โดยผลการคำนวณ ดังนี้

ระยะทาง r (cm)	$\phi_s \times 10^3$ (n/cm ² sec)
0	26.2
1.5	18.3
3.5	11.3
5.5	7.13
7.5	4.58
9.5	2.98
10.5	2.44
11.5	1.96
12.5	1.61
13.5	1.31
14.5	1.08
15.5	0.886
16.5	0.736
17.5	0.603
18.5	0.502
19.5	0.418

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ มีมวลใกล้เคียงกับมวลของโปรตอน ปฏิกริยาของนิวตรอนเมื่อชนกับอะตอม อาจเป็นแบบที่นิวตรอนถูกจับเอาไว้ (Captured) หรือเปลี่ยนทิศทางเดิน (Scattered) ถ้านิวตรอนถูกจับเอาไว้ จะทำให้นิวเคลียสกลายเป็นสารกัมมันตรังสี สำหรับปฏิกริยาการเปลี่ยนทิศทางเดินนั้น อาจเป็นชนิดอีลาสติค หรือ อินอีลาสติคก็ได้ ถ้าเป็นชนิดอินอีลาสติค นิวตรอนจะให้พลังงานแก่วัสดุเปลี่ยนสภาวะพลังงานสูงขึ้นจนอยู่ในสภาวะกระตุ้น (Excited state) ซึ่งจะพยายามกลับสู่สภาวะปกติ (Ground state) โดยการปล่อยรังสีแกมมาออกมา สำหรับการชนแบบอีลาสติค มีโอกาสเกิดได้มากกว่าการชนแบบอินอีลาสติค

ในการชนนิวตรอนชนแบบอีลาสติค กับนิวเคลียสที่มีจำนวนมวล (Mass number) เป็น A อัตราส่วนเฉลี่ย (ϵ) ของค่าเฉลี่ยของ ลอการิทึม (Logarithm) ของการลดลงของพลังงานต่อการชน 1 ครั้ง (Average logarithmic energy decrement per collision) จะมีความ

$$\epsilon = \overline{\ln \frac{E_1}{E_2}} = \int_{-1}^1 \ln \frac{E_1}{E_2} d(\cos \theta) / \int_{-1}^1 d(\cos \theta)$$

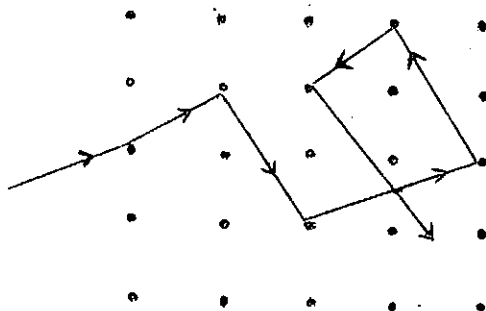
เมื่อ E_1 เป็นพลังงานของนิวตรอนก่อนการชน และ E_2 เป็นพลังงานของนิวตรอนภายหลังการชน

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{A^2 + 2A \cos \theta + 1}{(A + 1)^2}$$

เพราะฉะนั้น $\epsilon = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A-1}{A+1} \dots\dots\dots (1)$

การฟุ้งของนิวตรอน (The diffusion of neutrons)

เมื่อนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของตัวกลาง (Medium) ที่นิวตรอนวิ่งผ่านเข้าไป อย่างอีลาสติกแล้ว เส้นทางที่วิ่งของนิวตรอนจะประกอบไปด้วยเส้นทางสั้น ๆ จำนวนมาก ซึ่งเชื่อมต่อกันระหว่างนิวเคลียสของตัวกลาง มีลักษณะการชน ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การชนแบบอีลาสติกแล้วเปลี่ยนทิศทางเดินไปของนิวตรอน กับนิวเคลียสในตัวกลาง

จากรูปจะเห็นว่าเส้นทางซึ่งเปลี่ยนทิศทางไปมาหลายเส้น ซึ่งค่าเฉลี่ยของมันเรียกว่า Scattering mean free path หลังจากเกิดการชนกันระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสแล้วทิศทางที่เดินทางของนิวตรอนจะเป็นไปอย่างไม่แน่นอน แต่สามารถที่จะบอกในเทอมของความน่าจะเป็นไปได้ของการที่จะไปในทิศทางต่าง ๆ (Probability distribution) แต่ถึงอย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณานิวตรอนจำนวนมาก จะมีการเคลื่อนที่สุทธิจากบริเวณที่มีความหนาแน่นของนิวตรอนมากไปสู่บริเวณที่มีความหนาแน่นของนิวตรอนน้อย ซึ่งอัตราของการเคลื่อนที่เรียกว่า การฟุ้ง (Diffusion)

การลดความเร็วของนิวตรอน (The slowing down of neutrons)

วิธีทำให้นิวตรอนลดความเร็วลง ก็คือการให้นิวตรอนชนกับนิวเคลียสของอะตอมต่าง ๆ การชนอาจเป็นชนอีลาสติก หรือชนอีลาสติกก็ได้ สำหรับการชนอย่างอีลาสติก จะเกิดในกรณีที่นิวตรอนต้องมีพลังงานอย่างน้อย 0.1 MeV ส่วนการชนอย่างอีลาสติก

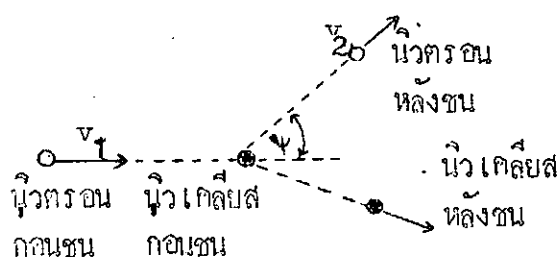
จะเกิดเมื่อนิวตรอนมีพลังงานต่ำกว่า 0.1 MeV ซึ่งโดยปกติแล้ว ปฏิกิริยาการแตกตัวในเครื่องปฏิกรณ์ จะให้นิวตรอนที่มีพลังงานต่ำกว่า 0.1 MeV ดังนั้นการทำให้นิวตรอนลดความเร็วลง จึงใช้วิธีให้นิวตรอนชนกับสารที่มีจำนวนมวลน้อย ๆ เหตุที่ต้องใช้สารที่มีจำนวนมวลน้อย ๆ มาเป็นตัวลดความเร็ว (Moderator) เพราะว่า สำหรับการชนอย่างอีลาสติกระหว่างนิวตรอนกับอะตอมของสารนั้น นิวตรอนจะถ่ายพลังงานให้แก่นิวเคลียสของสารได้ก็ ก็ต่อเมื่อนิวเคลียสมีจำนวนมวลน้อย ๆ

การชนกันอย่างอีลาสติกระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมของสาร จะพิจารณาโดยอาศัยหลักการของวิชา Classical Mechanics โดยสมมุติให้การชนกันนี้เป็นการชนชนิดอีลาสติกที่สมบูรณ์ (Perfectly elastic) จากนั้นนำกฎการของพลังงานและโมเมนตัม (Law of conservation of energy and momentum) เข้ามาใช้ ซึ่งจะช่วยให้ได้รับความสัมพันธ์ของมุมที่เบนไปจากแนวเดิม กับพลังงานของนิวตรอนก่อนและหลังการชนกับนิวเคลียส

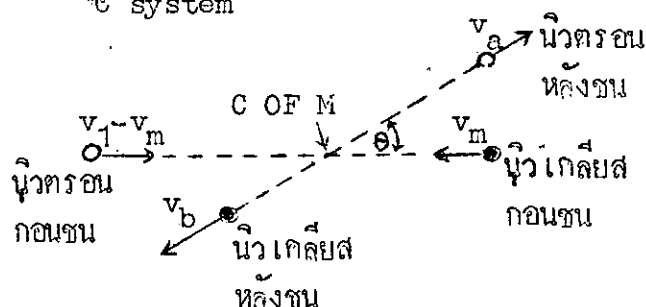
ในการพิจารณาการชนกันแล้วเปลี่ยนทิศทางเดินไปนี้ เพื่อความสะดวกจะใช้ระบบอ้างอิงเป็น 2 แบบคือ Laboratory (L) system และ Center of mass (C) system สำหรับกรณี L system จะสมมุติให้นิวเคลียสอยู่นิ่ง ก่อนการชนกับนิวตรอน และผู้สังเกตจะคอยสังเกตอยู่ภายนอก ส่วนกรณี C system จะสมมุติให้ Center of mass ของนิวตรอนและนิวเคลียส ขยี้หนึ่งตลอดเวลาที่เกิดการชนกัน ซึ่งในกรณีนี้ จะสมมุติให้ผู้สังเกตเหมือนกันว่าเป็นผู้สังเกตอยู่ที่จุด Center of mass

ในการเลือกใช้ระบบอ้างอิงนี้ C system เหมาะที่จะใช้ในทางทฤษฎี คือใช้ในการคำนวณ แต่ L system เหมาะในการใช้ปฏิบัติทดลองจริง ๆ ซึ่งมีเงื่อนไขก่อนและหลังการชนในทั้ง 2 ระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2

L system



C system



รูปที่ 2 นิวตรอนเปลี่ยนทิศทางเกินไปใน L system
และ C system

ให้พิจารณาในมาตราสวมวลอะตอม (Atomic mass scale) เพราะฉะนั้น นิวตรอนจะมีมวลเป็น 1 และนิวเคลียสมีมวลเป็น A นิวตรอนเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v_1 สัมพัทธ์กับนิวเคลียส เพราะว่านิวเคลียสที่เป็นเป้าอยู่ใน L system ดังนั้นโมเมนตัม v_1 ของนิวตรอน จะเป็นโมเมนตัมทั้งหมดของอนุภาคทั้งสองนั่นคือ $A + 1$ และความเร็ว v_m ของ Center of mass ใน L system กำหนดโดย

$$v_m = \frac{v_1}{A + 1}$$

ใน C system ความเร็วของนิวตรอนก่อนการชนเป็น $v_1 - v_m$ ซึ่งเมื่อแทนค่า v_m ลงไปจะได้

$$\begin{aligned} v_1 - v_m &= v_1 - \frac{v_1}{A + 1} \\ &= \frac{A v_1}{A + 1} \end{aligned}$$

จะเห็นว่าใน C system นิวตรอนและนิวเคลียสจะวิ่งเข้าหากันด้วยความเร็ว

$\frac{A v_1}{A + 1}$ และ $\frac{v_1}{A + 1}$ ตามลำดับ โมเมนตัมของนิวตรอนซึ่งมีมวลเป็น 1 จะมีค่า $\frac{A v_1}{A + 1}$

ในขณะที่โมเมนตัมของนิวเคลียสซึ่งมีมวลเป็น A จะมีค่า $\frac{A v_1}{A+1}$ ภาย เหนือทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้นโมเมนตัมทั้งหมดก่อนการชนเมื่อคิดเทียบกับ Center of mass จะเป็นศูนย์ และโดยกฎการของโมเมนตัม โมเมนตัมจะยังคงเป็นศูนย์ภายหลังการชน

เมื่อเกิดการชนกันขึ้น นิวตรอนใน C system จะเบนไปจากแนวเดิมเป็นมุม θ ส่วนนิวเคลียสก็จะเบนไปในทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้น Center of mass ก็ยังคงอยู่บนเส้นซึ่งเชื่อมระหว่างอนุภาคทั้งสอง ถ้า v_a เป็นความเร็วของนิวตรอน และ v_b เป็นความเร็วของนิวเคลียส หลังจากเกิดการชนกันใน C system โมเมนตัมทั้งหมดจะยังคงเป็นศูนย์ ภาย ก่อนเมื่อ

$$v_a = A v_b \quad \dots\dots\dots(2)$$

เพราะฉะนั้น เมื่อพิจารณาโดยกฎการของพลังงานจะได้ว่า

$$\frac{1}{2} \left(\frac{A v_1}{A+1} \right)^2 + \frac{1}{2} A \left(\frac{v_1}{A+1} \right)^2 = \frac{1}{2} v_a^2 + \frac{1}{2} A v_b^2 \quad \dots\dots\dots(3)$$

สมการทางคานชาของกิโล ทราบถึงพลังงานจลน์ทั้งหมดก่อนการชน สมการทางคานชาของกิโล ทราบถึงพลังงานจลน์ทั้งหมดภายหลังการชน จากสมการที่ (2) และสมการที่ (3) หาได้ว่า

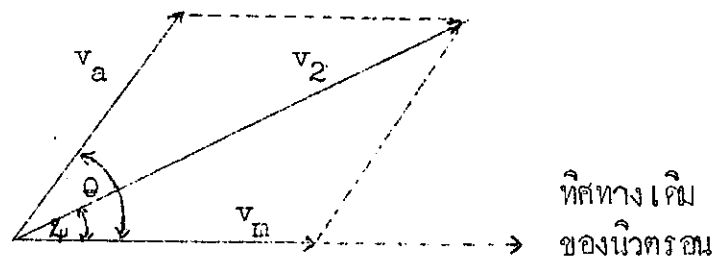
$$v_a = \frac{A v_1}{A+1}$$

$$v_b = \frac{v_1}{A+1}$$

จะพบว่าความเร็วของนิวตรอนและนิวเคลียสภายหลังการชนจะยังคง เท่ากันกับความเร็ว เมื่อก่อนเกิดการชน

เพื่อที่จะพิจารณาการสูญเสียพลังงานจลน์ของนิวตรอน อันเนื่องมาจากการชนกับนิวเคลียส จึงจำเป็นต้องแปลงผลลัพธ์ที่หาได้จาก C system ไปสู่ L system ซึ่งกระทำ

โดยอาศัยความจริงที่ว่า ระบบทั้งสองจะต้องเคลื่อนที่สัมพันธ์กันและกันด้วยความเร็วของ Center of mass (v_m) ใน L system ดังนั้นความเร็วสุดท้ายของนิวตรอนภายหลังจากการชนใน L system จะได้รับโดยการบวกความเร็ว v_m ซึ่งแทนการเคลื่อนที่ของ Center of mass ใน L system ด้วยความเร็ว v_a ซึ่งเป็นความเร็วของนิวตรอน หลังจากเกิดการชนใน C system เวกเตอร์ (vector) ทั้งสองนี้จะเสริมกันดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การเปลี่ยนจาก C system ไปยัง L system

มุมระหว่างเวกเตอร์ v_a และ v_m คือมุม θ ซึ่งบ่ายเบนไปจากแนวเดิม ใน C system ถ้า v_2 เป็นความเร็วของนิวตรอน หลังจากการชนใน L system ดังนั้นโดยกฎของ cosines (Law of cosines)

$$v_2^2 = v_1^2 (A^2 + 2A \cos \theta + 1) / (A + 1)^2$$

มุม ϕ ระหว่างเวกเตอร์ v_2 และ v_m เป็นมุมที่เบนไปจากแนวเดิมใน L system จากรูปที่ 3 จะหาได้ว่า

$$\cos \phi = \frac{A \cos \theta + 1}{\sqrt{A^2 + 2A \cos \theta + 1}}$$

เพราะฉะนั้น ค่าเฉลี่ยของ cosine ของมุมที่ขายเบนไปใน L system จะคือ

$$\cos \bar{\theta} = \frac{\int_0^{4\pi} \cos \theta \, d\Omega}{\int_0^{4\pi} d\Omega}$$

ถ้า E_1 เป็นพลังงานจลน์ของนิวตรอนก่อนการชน มีค่าเป็น $\frac{1}{2} m v_1^2$ และ พลังงานจลน์ E_2 ภายหลังการชนเป็น $\frac{1}{2} m v_2^2$ ดังนั้น อัตราส่วนของพลังงานของนิวตรอน ภายหลังการชน และก่อนการชนจะถูกกำหนดโดย

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{v_2^2}{v_1^2} = \frac{A^2 + 2A \cos \theta + 1}{(A + 1)^2}$$

ถ้ากำหนดให้ $\alpha = \left(\frac{A-1}{A+1} \right)^2 \dots \dots \dots (4)$

$$\text{ดังนั้น } \frac{E_2}{E_1} = \frac{1}{2} \left[(1 + \alpha) + (1 - \alpha) \cos \theta \right]$$

E_2 จะมีค่ามากที่สุดเมื่อ $\cos \theta = 1$

$$\text{เพราะฉะนั้น } \frac{E_2}{E_1} = \frac{E_{\max}}{E_1} = 1$$

$$\text{นั่นคือ } E_{\max} = E_1$$

ซึ่งในกรณีนี้จะเห็นว่าพลังงานของนิวตรอนก่อนการชน จะเท่ากับพลังงานของนิวตรอนหลังการชน สำหรับค่าต่ำสุดของ E_2/E_1 ซึ่งเป็นค่าที่พลังงานจะส่งผ่านไปได้น้อยที่สุด จะเกิดในกรณี

ที่มุม $\theta = \pi$ นั่นคือนิวตรอนชนกับนิวเคลียสแล้วสะท้อนกลับไปในทิศทางเดิม คือ $\cos \theta = -1$

$$\text{ดังนั้น } \frac{E_2}{E_1} = \frac{E_{\min}}{E_1} = \alpha$$

$$\text{หรือ } E_{\min} = \alpha E_1$$

จะเห็นว่าพลังงาน $\propto E_1$ เป็นพลังงานของนิวตรอนหลังจากเกิดการชนกับนิวเคลียสแล้วสะท้อนกลับไปทางเดิม โดย E_1 เป็นพลังงานก่อนการชน เพราะฉะนั้นสัดส่วนของการสูญเสียพลังงานของนิวตรอนไปมากที่สุดจะหาได้จาก

$$\frac{E_1 - E_{\min}}{E_1} = 1 - \alpha$$

และค่าพลังงานที่จะสูญเสียไปมากที่สุดในการชนจะเป็น $E_1 (1 - \alpha)$

จากการกำหนดค่าของ α ในสมการที่ (4) จะเห็นว่า α มีความสัมพันธ์กับมวลของนิวเคลียสที่เป็นเป้า ดังนั้นจึงเป็นที่แน่ชัดว่าการสูญเสียพลังงานของนิวตรอนขึ้นอยู่กับมวล สำหรับไฮโดรเจน $A = 1$ ดังนั้น $\alpha = 0$ นั่นแสดงว่าเป็นไปได้ที่นิวตรอนจะสูญเสียพลังงานทั้งหมดในการชนกับนิวเคลียสของไฮโดรเจนเพียง 1 ครั้ง

ถ้า E_n เป็นพลังงานเฉลี่ยของนิวตรอน หลังจากการชนกับนิวเคลียส n ครั้ง จากพลังงานเริ่มต้น E_0 ค่าพลังงานเฉลี่ย E_n จะหาได้จากสมการ

$$E_n = E_0 e^{-n\epsilon} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{เพราะฉะนั้น } n = \frac{\ln \frac{E_0}{E_n}}{\epsilon} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ถ้าพลังงานเริ่มต้นของนิวตรอนมีค่าเป็น 2 MeV ชนกับนิวเคลียส n ครั้ง จนกลายเป็นเทอร์มัลนิวตรอน ซึ่งมีพลังงานเป็น 0.025 eV

$$\text{ดังนั้น } n = \frac{\ln \frac{2 \times 10^6}{0.025}}{\epsilon} \quad \dots\dots\dots (7)$$

จากสมการที่ (1) สำหรับไฮโดรเจนซึ่งมี $A = 1$ จะหาค่า $\epsilon = 1$
สำหรับดิวเทอเรียม (Deuterium) ซึ่งมี $A = 2$ จะหาค่า $\epsilon = 0.725$

และโดยวิธีเดียวกัน สามารถหา $\phi_f \in$ ของอีเลียม, เบอริลเลียม และ คาร์บอน มีค่า เป็น 0.425, 0.206 และ 0.158 ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อนำค่า ϕ_f เหล่านี้ไปแทนค่า ในสมการที่ (7) จะสามารถคำนวณหา ϕ_f จำนวนครั้งที่นิวตรอนจะต้องชนกับนิวเคลียสของ ไฮโดรเจน, ลิเทียม, อีเลียม, เบอริลเลียม และ คาร์บอน เพื่อให้กลายเป็นเทอร์มาล นิวตรอน มีค่าเท่ากับ 18, 25, 43, 86 และ 114 ครั้ง ตามลำดับ

การหาฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วที่ระยะทาง r ใดๆ โดยที่ r เป็นค่าเป็นจุด หาได้จากสมการ

$$\phi_f = \frac{a}{4\pi r^2}$$

เมื่อ ϕ_f = ฟลักซ์ของนิวตรอนเร็ว

a = ความแรงของต้นกำเนิดนิวตรอน หน่วยเป็น นิวตรอน/วินาที

r = ระยะทางจากต้นกำเนิดนิวตรอนถึงจุดที่ต้องการหาฟลักซ์

ทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 พวก (Murray, 1957 : 110 - 113)

เป็นทฤษฎีที่อธิบาย การกระจายของนิวตรอนที่แผ่ออกจากต้นกำเนิดนิวตรอน ที่วางอยู่ในวัสดุสำหรับลดความเร็วใดๆ โดยที่นิวตรอนที่วิ่งออกจากต้นกำเนิดนิวตรอน แล้วไปฟุ้งอยู่ในตัวกลาง มี 2 พวกเท่านั้น คือ นิวตรอนเร็วกับเทอร์มาลนิวตรอน และถือว่า นิวตรอนแต่ละพวกมีความเร็วเฉลี่ยเพียงค่าใดค่าหนึ่ง นิวตรอนที่แผ่ออกจากต้นกำเนิดเป็น นิวตรอนเร็ว เมื่อนิวตรอนเหล่านี้วิ่งไปปรากฏที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในตัวกลาง จะกลายเป็น ต้นกำเนิดของเทอร์มาลนิวตรอนที่ตำแหน่งนั้น ดังนั้นต้นกำเนิดของเทอร์มาลนิวตรอนจะปรากฏ อยู่ทุกแห่งในตัวกลาง ส่วนนิวตรอนเร็วมีต้นกำเนิดอยู่เพียงแห่งเดียวคือ ที่ต้นกำเนิดนิวตรอน

ทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 พวกนี้ เป็นทฤษฎีที่อาศัยสมการการฟุ้ง (Diffusion equation) คำนวณหาฟลักซ์ของนิวตรอนเร็ว แล้วใช้ค่าฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วตามจุด ต่าง ๆ ที่คำนวณได้เป็นต้นกำเนิดของเทอร์มาลนิวตรอน คำนวณหาเทอร์มาลฟลักซ์ออกมา โดยอาศัยสมการการฟุ้งเช่นเดียวกัน

สมการการฟุ้งของนิวตรอน (System) ที่อยู่ในสภาวะสม่ำเสมอ (Steady state) มีค่าเป็น

$$D \nabla^2 \phi - \sum_a \phi + S = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

เมื่อ D = สัมประสิทธิ์การฟุ้งของนิวตรอน (Diffusion coefficient) มีหน่วยเป็น cm

ϕ = นิวตรอนฟลักซ์มีหน่วยเป็น $n/cm^2 \text{ sec}$

$\sum_a$ = ภาคตัดขวางมหภาคสำหรับการดูดกลืน (Macroscopic absorption cross section) มีหน่วยเป็น cm^{-1}

S = อัตราการผลิตนิวตรอนในแท่งกลาง $1 \text{ cm}^3/\text{sec}$

สำหรับระบบที่ศึกษาอยู่คือมีแท่งกำเนิดนิวตรอนขนาดยาวอยู่ในแท่งกลางเอกพันธ์ที่มีขอบเขตอนันต์ (Infinite homogeneous medium) ในการแก้สมการดิฟเฟอเรนเชียล (8) เพื่อหาค่าฟลักซ์ เพื่อความสะดวกเลือกให้แท่งกำเนิดนิวตรอนอยู่ตำแหน่งเดียวกับจุดกำเนิดของ Coordinate system ดังนั้นการกระจายของนิวตรอนจากแท่งกำเนิดนิวตรอนจึงมีความสมมาตรกับจุดกำเนิด (Spherical symmetry) ฟลักซ์จะไม่ขึ้นกับมุม เพราะฉะนั้น Laplacian operator มีค่าเป็น

$$\nabla^2 = \frac{d^2}{dr^2} + \frac{2d}{r dr} \quad \dots\dots\dots (9)$$

กรณีของนิวตรอนเร็ว

แทน S มีค่าเท่ากับ 0 ณ ตำแหน่งใด ๆ ยกเว้นตำแหน่งของแท่งกำเนิดนิวตรอน ดังนั้น สมการการฟุ้งของนิวตรอนเร็วคือ

$$\nabla^2 \phi_f - K_f^2 \phi_f = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

โดย $K_f^2 = \frac{\sum_{af}}{D_f} = \frac{1}{L_f^2}$

เมื่อ L_f เป็นความยาวของการพุ่งของนิวตรอนเร็ว

Σ_{af} ในกรณีนี้ไม่เรียกว่าภาคตัดขวางมหภาคสำหรับการถูกกลืน แต่เรียกว่าภาคตัดขวางมหภาค ในการทำให้นิวตรอนวิ่งช้าลง (Slowing down or removal macroscopic cross section) เนื่องจาก

1. ภาคตัดขวางสำหรับการถูกกลืนนิวตรอนเร็วของวัสดุที่ใช้เป็นตัวลดความเร็วของนิวตรอนมีค่าน้อยมาก

2. การเคลื่อนที่ของนิวตรอนเร็วส่วนมากเป็นการวิ่งช้าลงเรื่อย ๆ จนกลายเป็นเทอร์มาลนิวตรอน เนื่องจากการชนกับนิวเคลียส

เงื่อนไขที่ขอบเขต (Boundary condition) สำหรับหาค่าฟังก์ชันในสมการที่ (10) มีดังนี้

1. ฟังก์ชัน มีค่าไม่เป็นอนันต์ทุก ๆ จุดและฟังก์ชันมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อรัศมีมีค่าเข้าใกล้อนันต์

2. จำนวนนิวตรอนที่พบที่ผิวของทรงกลมซึ่งมีรัศมียาวเท่ากับ r ใน 1 วินาที มีค่าเท่ากับจำนวนนิวตรอนที่แผ่ออกจากศูนย์กลางนิวตรอนใน 1 วินาที เมื่อรัศมี r ของทรงกลมมีค่าเข้าใกล้ 0

ถ้า J เป็นความหนาแน่นของกระแสนิวตรอน (Neutron current density) ที่ผิวของทรงกลมซึ่งมีรัศมียาวเท่ากับ r มีหน่วยเป็น $n/cm^2 \text{ sec}$ เพราะฉะนั้นเงื่อนไขข้อที่ 2 เขียนได้เป็น

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

เมื่อ a = จำนวนนิวตรอนที่แผ่ออกจากศูนย์กลางนิวตรอนใน 1 วินาที

$$J = -D \vec{\nabla} \phi \quad \text{จากกฎของฟิค (Fick's law)}$$

นำค่า ∇^2 ในสมการที่ (9) แทนลงในสมการที่ (10) แล้วใช้เงื่อนไขทั้ง 2 ข้อช่วยจะได้อคำตอบเป็น

$$\phi_f(r) = \frac{a}{4\pi D_f r} e^{-K_f r} \dots\dots\dots (11)$$

สมการที่ (11) นี้ ก็คือค่าฟังก์ชันของนิวตรอนเร็วรอบ ๆ ศูนย์กำเนิดนิวตรอนที่ระยะทางออกไปเท่ากับ r ในตัวกลางที่มีขนาดอนันต์ ซึ่งนำไปใช้กรณีที่ตัวกลางมีขนาดไม่เป็นอนันต์ได้ ถ้าค่าแห่ง r ไม่อยู่ในขอบเขตของตัวกลางมากนัก เนื่องจากค่าฟังก์ชันที่ค่าแห่ง r ใด ๆ นั้น ส่วนใหญ่เกิดจากนิวตรอนที่กระจายอยู่ในตัวกลางที่บริเวณใกล้ ๆ กับค่าแห่ง r นั้น เท่านั้น

กรณีของเทอร์มาลนิวตรอน

แทน S มีค่าเท่ากับ $\sum_{af} \phi_f$ ดังนั้นสมการการฟุ้งของเทอร์มาลนิวตรอนคือ

$$\nabla^2 \phi_s - K_s^2 \phi_s + \frac{\sum_{af} \phi_f}{D_s} = 0 \dots\dots\dots (12)$$

โดย $K_s^2 = \frac{\sum_{as}}{D_s} = \frac{1}{L_s^2}$

เมื่อ L_s เป็นความยาวของการฟุ้งของเทอร์มาลนิวตรอน

เงื่อนไขขอบเขต สำหรับหาค่าฟังก์ชันในสมการที่ (12) เป็นดังนี้

1. ฟังก์ชันไม่เป็นอนันต์ทุกจุดและฟังก์ชันมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อรัศมี r มีค่าเข้าใกล้อนันต์
2. จำนวนนิวตรอนที่แผ่ออกจากศูนย์กำเนิดนิวตรอน ซึ่งวางอยู่ในตัวกลางที่มีขอบเขตอนันต์มีค่าเท่ากับจำนวนนิวตรอนที่ถูกดูดกลืนอยู่ในตัวกลาง

เงื่อนไขข้อ 2 เขียนได้ดังนี้

$$\int_0^\infty (\sum_{as} \phi_s) 4\pi r^2 dr = a \dots\dots\dots (13)$$

เมื่อ $\sum a_s$ = จำนวนเทอมมาลนิวตรอนที่ถูกดูดกลืนอยู่ในตัวกลาง $1 \text{ cm}^3/\text{sec}$

นำค่า ∇^2 จากสมการ (9) และ ϕ_f จากสมการ (11) แทนลงในสมการที่ (12). แล้วใช้เงื่อนไขขอบเขตขวาจะได้คำตอบเป็น

$$\phi_s(r) = \frac{a K_f^2 (e^{-K_f r} - e^{-K_s r})}{4 D_s (K_s^2 - K_f^2) r} \dots\dots\dots (14)$$

สมการที่ (14) นี้ คือค่าเทอมมาลฟลักซ์ระยะทางจากต้นกำเนิดนิวตรอนเท่ากับ r นิวตรอนโดส (Neutron dose)

นิวตรอนโดส หมายถึงปริมาณของพลังงานที่นิวตรอนคายให้แก่เนื้อวัตถุที่ทำปฏิกิริยากับนิวตรอน สำหรับต้นกำเนิดนิวตรอนขนาดจุด ซึ่งถูกหุ้มด้วยวัสดุสำหรับป้องกันนิวตรอน คำนวณนิวตรอนโดสเรท (Neutron dose rate) หาได้จากสูตร เอ็มไพริคัล (Empirical formular)

$$D = 5.69 \times 10^{-9} \frac{BA e^{-\sum r t}}{d^2} \text{ rem/sec} \dots\dots\dots (15)$$

เมื่อ B = Build up factor ของนิวตรอน ซึ่งจะเป็นค่าเฉพาะสำหรับต้นกำเนิดนิวตรอนและวัสดุป้องกันนิวตรอน

A = จำนวนของนิวตรอน ซึ่งถูกส่งออกมาโดยต้นกำเนิดนิวตรอนใน 1 วินาที

t = ความหนาของวัสดุป้องกันนิวตรอน มีหน่วยเป็น cm

d = ระยะทางจากต้นกำเนิดนิวตรอน ถึงจุดที่เราจะหาอัตราการคายพลังงาน มีหน่วยเป็น cm

$\sum_r$ = Macroscopic removal cross section มีหน่วยเป็น cm^{-1}

$$\sum_r = \sum_{i=1}^n W_i \sum_{ri} \text{ cm}^{-1} \dots\dots\dots (16)$$

เมื่อ ρ = ความหนาแน่นมีหน่วยเป็น gm/cm^3

w_i = สัดส่วนน้ำหนัก (Weight fraction) ของธาตุ i ในวัสดุที่ใช้กั้นนิวตรอน

$\sum_{ri}$ = Macroscopic removal cross section ของธาตุ i มีหน่วย
เป็น cm^2/gm

เครื่องมือและวิธีดำเนินการ

1. เครื่องมือ

เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ คือ

1.1 BF_3 proportional counter (Boron trifluoride proportional counter) คือเข้ากับระบบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งประกอบด้วย Preamplifier, High Voltage Amplifier และ Scaler

1.2 Neutron survey meter

1.1 BF_3 proportional counter (Price, 1964 : 314 - 315)

หัววัดนิวตรอนโดยมากมักจะทำเป็นรูปทรงกระบอก มีแกนกลางทำด้วยลวด (Wire) เป็นขั้วบวก (Anode) มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 0.002 นิ้ว และทรงกระบอกเป็นขั้วลบ (Cathode) มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.87 นิ้ว อัดก๊าซ BF_3 ชนิด 90 % ของ enriched BF_3 ความยาว 12 cm. ของโปรต และมีบริเวณที่ไวต่อการนับ (Sensitive region) 6 นิ้ว

หลักการทํางานของ BF_3 proportional counter

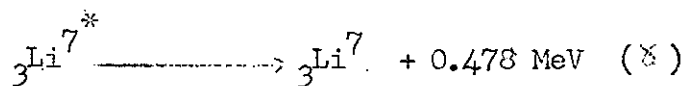
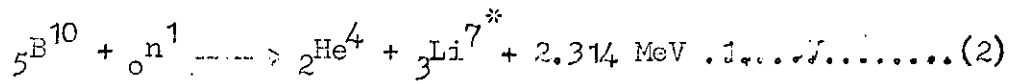
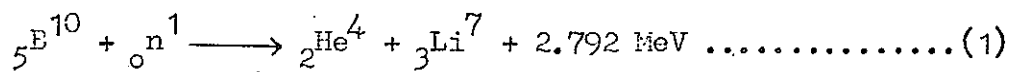
เนื่องจากนิวตรอนไม่มีประจุ เพราะฉะนั้นในการตรวจ (Detect) นิวตรอนนั้น จะใช้หลักการในการตรวจวัดไม่เหมือน Ionization chamber, Geiger counter และ Cloud chamber ซึ่งใช้สำหรับตรวจและวัดพวกที่มีประจุเท่านั้น ในการตรวจนิวตรอนต้องอาศัยปฏิกิริยาระหว่างนิวตรอนและวัตถุอื่น ๆ ในอนุภาคที่มีประจุออกมา ซึ่งจากประจุนี้ จะทำให้เกิด Secondary ionization แล้วทำให้เกิดกระแสไหลในวงจร เครื่องนี้ก็สามารถทํางานได้

จากหลักการก็กล่าวการทํางานของ BF_3 proportional counter

คือ นิวตรอนจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับโบรอน แล้วให้อนุภาคอัลฟาออกมา ปฏิกิริยานี้ใช้ตรวจนิวตรอนช้า (Slow neutron) หรือ เทอร์มาลนิวตรอน (Thermal neutron)

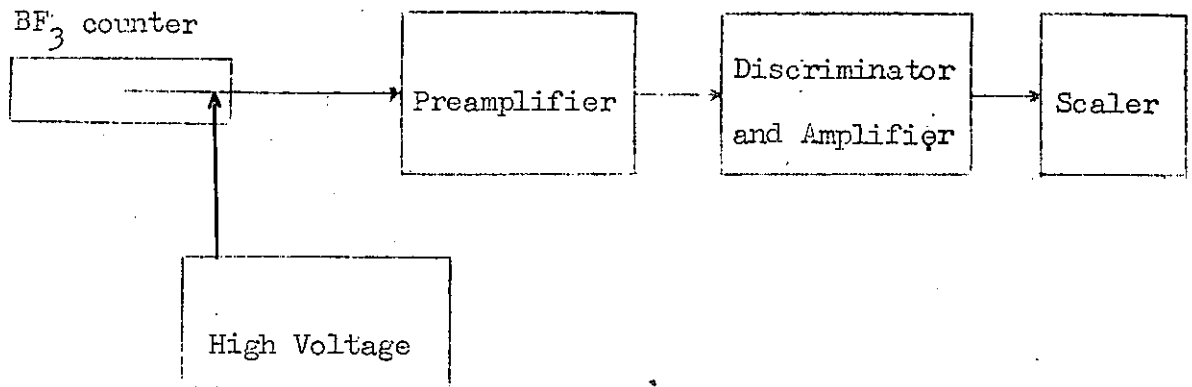
เพราะภาคตัดขวางของการดูดกลืน (Absorption cross section) มีค่าสูง อนุภาคอัลฟาที่ถูกปล่อยออกมาจากปฏิกิริยานี้มีพลังงานสูง และมีอำนาจในการไอออนไนซ์ โมเลกุลของก๊าซสูง (High specific ionization) เมื่อเกิดไอออนมาก กระแสที่ไหลมาจนจรมาก พัลส์ (Pulse) ที่ออกมาจะมีขนาดใหญ่ สามารถจะแยกออกจากพัลส์ของแกมมาซึ่งมีขนาดเล็กได้ง่าย ดังนั้นสามารถตรวจวัดนิวตรอนที่รวมกับแกมมาได้

ไอออนไนเซชัน และปรอบปรอนนอลเคาน์เตอร์ (Ionization and proportional counter) เมื่อบรรจุโบรอนเข้าไป ไม่ว่าเป็นโลหะหรือก๊าซใช้เป็นเครื่องมือสำหรับตรวจนิวตรอนได้คือ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



การที่จะเกิดปฏิกิริยา (1) หรือ (2) นั้น ขึ้นอยู่กับพลังงานของนิวตรอน สำหรับนิวตรอนช้าจะเกิดปฏิกิริยา (2) คือจะเกิดลิเทียม (${}^3_3\text{Li}^{7*}$) อยู่ในสภาวะเรียว (Excited state) โดยมีพลังงาน 0.478 MeV ซึ่งต่อมาจะกลับมามาอยู่ในภาวะปกติ (Ground state) โดยปล่อยพลังงานจำนวนนี้ออกมาในรูปของรังสีแกมมา

หลักการทำงานของเครื่อง BF_3 proportional counter อาจแสดงเป็นแผนภาพได้ ดังรูปที่ 4



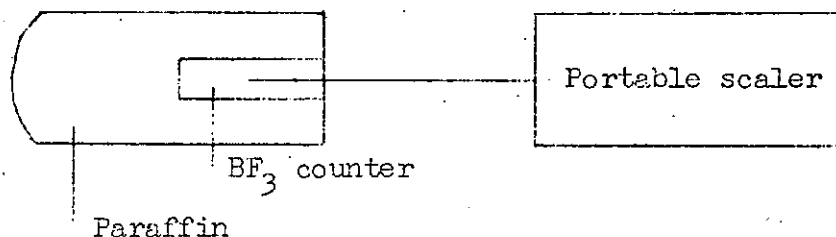
รูปที่ 4 แผนภาพแสดงหลักการทำงานของเครื่อง BF_3 proportional counter

1.2 Neutron survey meter

มีหลักการทำงานเช่นเดียวกับ BF_3 proportional counter แต่มีข้อแตกต่างเล็กน้อย คือตรงบริเวณที่ไวต่อการนับ (Sensitive region) ของหัววัดจะมีพาราฟินหุ้มอยู่ เพื่อให้หลักการทำงานของนิวตรอนเร็วได้

หลักการทำงานของ Neutron survey meter อาจแสดงเป็นแผนภาพได้

รูปที่ 5



รูปที่ 5 แผนภาพแสดงหลักการทำงานของ Neutron survey meter

2. ต้นกำเนิดนิวตรอน (Neutron source)

ต้นกำเนิดนิวตรอนที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้คือ อะเมริซิئم - เบอริลเลียม (Americium-Beryllium) ซึ่งมีความแรง 1 คูรี ปล่อยนิวตรอน 2.2×10^6 นิวตรอน/วินาที

วิธีดำเนินการ

วิธีดำเนินการทดลอง แบ่งเป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

1. เตรียมวัสดุที่จะนำมาใช้ในการทดลอง
 2. จัดห้องทดลอง
 3. วัดหาจำนวนเทอร์มาลนิวตรอน
 4. คำนวณหา นิวตรอนโกส
1. เตรียมวัสดุที่จะนำมาใช้ในการทดลอง
วัสดุที่จะนำมาใช้ในการทดลองครั้งนี้ 5 ชนิด คือ
 - 1.1 แผ่นพาราฟิน
 - 1.2 ผงโบเร็กซ์
 - 1.3 ผงบอริกแอซิด
 - 1.4 สารละลายบอริกแอซิด
 - 1.5 แผ่นผสมของพาราฟินและโบเร็กซ์

1.1 แผ่นพาราฟิน

ในการนำแผ่นพาราฟินมาใช้ในการทดลองนั้น แผ่นพาราฟินที่นำมา มีขนาดใหญ่เกินไป คือเป็นแผ่นขนาดกว้าง 12 นิ้ว ยาว 20 นิ้วหนา $1\frac{1}{2}$ นิ้ว ดังนั้น เมื่อจะนำมาใช้จึงต้องแบ่งให้มีขนาดเล็กลง โดยแบ่งแผ่นใหญ่นั้นออกเป็นแผ่นเล็ก 4 แผ่นเท่า ๆ กัน แต่ละแผ่นจะมีขนาดกว้าง 6 นิ้ว ยาว 10 นิ้วหนา $1\frac{1}{2}$ นิ้ว

1.2 ผงโบเร็กซ์

ในการทำการทดลองต้องการจะทราบว่าโบเร็กซ์ที่มีความหนาต่าง ๆ กัน จะมีผลในการกั้นนิวตรอนต่างกันอย่างไร แต่โบเร็กซ์ที่ใช้นี้มีลักษณะเป็นผงหยาบ ดังนั้นจึงต้องทำการลองสำหรับบรรจุผงโบเร็กซ์ขึ้นมา 3 กลอง โดยให้ทั้ง 3 กลองมีขนาดกว้าง 6 นิ้ว

ยาว 10 นิ้ว เท่ากัน แต่มีความหนาต่างกัน คือหนา 1, 2 และ 3 นิ้ว ตามลำดับ สำหรับวัสดุที่นำมาใช้ในการทำกลอง เลือกใช้กระดาษแข็ง เพราะว่ามีรูปร่างคงตัว และทำให้ผิวทรงกลมตามเขมา มีพลังงานเปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก ดังนั้นการลดพลังงานและการถูกจับของนิวตรอนถือได้ว่าเกิดจากผนังโบเร็กซ์เท่านั้น

ในการบรรจุผนังโบเร็กซ์ลงกลองต้องค่อย ๆ ใส่ลงไปทีละน้อย และค่อยเคาะข้างกลองอยู่เสมอ เพื่อให้ผนังติดตัวกันแน่นก็ไม่เกิดช่องว่างภายใน

1.3 ผนังบอริกแอซิก

ผนังบอริกแอซิกที่มีลักษณะเป็นผงละเอียด ดังนั้นในการนำมาใช้ทำการทดลองจึงต้องบรรจุในกลองซึ่งมีขนาดเล็ก, หลักการในการเลือกวัสดุมาทำ และหลักการในการบรรจุ เช่นเดียวกับกรณีของ โบเร็กซ์

1.4 สารละลายบอริกแอซิก

สารละลายบอริกแอซิก ที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ ได้มาจากการนำผนังบอริกแอซิกมาผสมกับน้ำ ซึ่งการผสมจะผสมให้มีความเข้มข้นต่าง ๆ กัน ในการกำหนดความเข้มข้นกระทำโดยนำถังพลาสติกใสซึ่งมีขนาดกว้าง 4.85 นิ้ว ยาว 6 นิ้ว สูง 9 นิ้ว มาขีดเส้นแบ่งดังออกเป็นส่วน ๆ ให้แต่ละส่วนห่างกัน 1 นิ้ว ดังนั้นจะแบ่งดังได้เป็น 9 ส่วน จากนั้นนำผนังบอริกแอซิกมาทำการทดลองผสมกับน้ำ เพื่อหาจุดอิ่มตัว ซึ่งจุดอิ่มตัวนี้หมายถึงจุดที่ผนังบอริกแอซิกที่มากที่สุดที่จะละลายได้หมดในน้ำนั้นโดยไม่มีการตกตะกอน ปรากฏจากการทำการทดลองพบว่า ถ้าใช้ผนังบอริกแอซิก 2 ส่วน ของที่แบ่งดังไว้จะละลายได้หมดพอดีกับน้ำ 6 ส่วน ดังนั้นอัตราส่วนนี้จะเป็นความเข้มข้นของสารละลายบอริกแอซิกที่มากที่สุดที่จะใช้ในการทดลองนี้ ส่วนความเข้มข้นรองลงมาคือใช้น้ำ $6 \frac{1}{2}$ ส่วน ผสมกับผนังบอริกแอซิก $1 \frac{1}{2}$ ส่วน และน้ำ 7 ส่วน ผสมกับผนังบอริกแอซิก 1 ส่วน ตามลำดับ

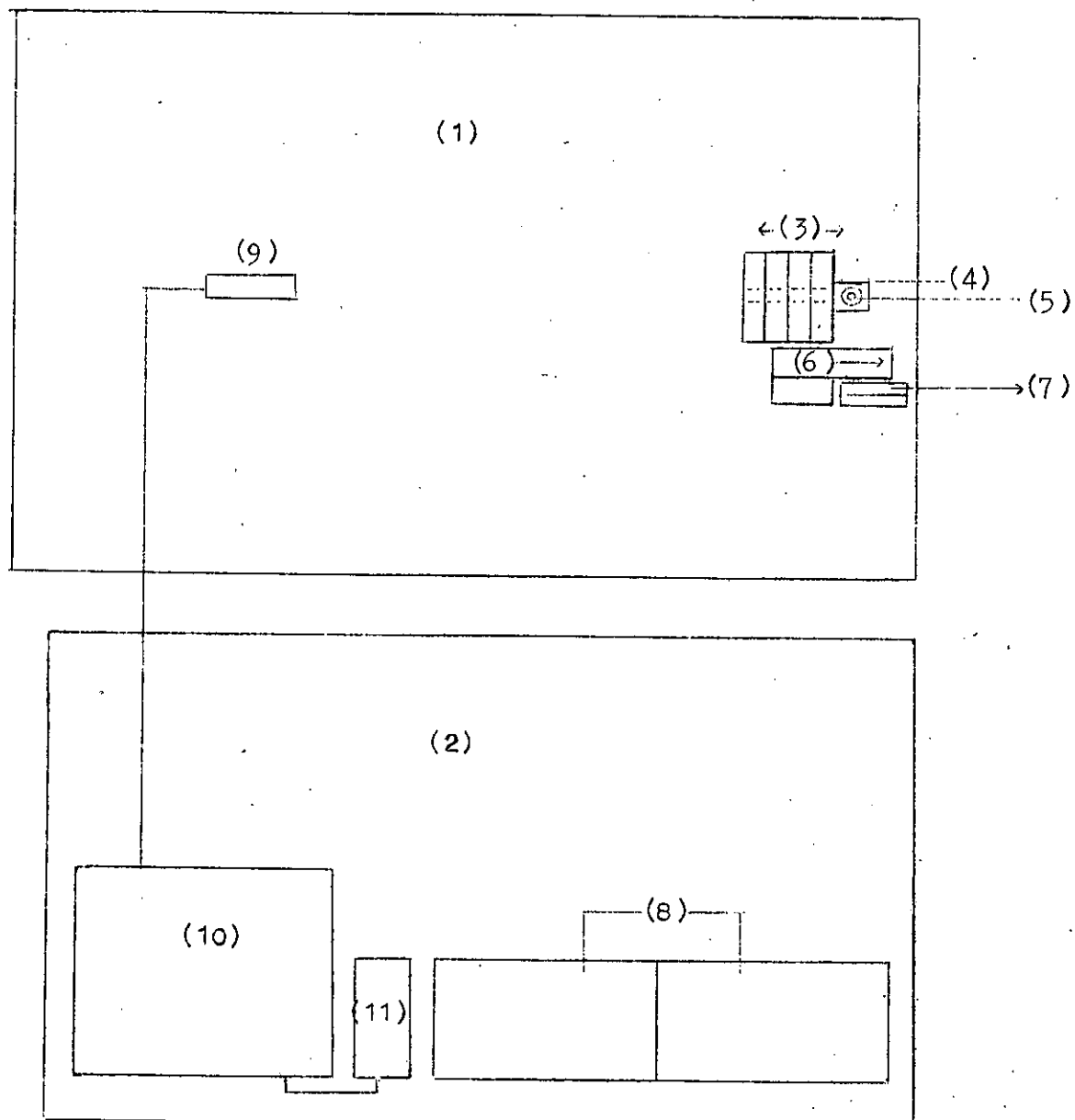
1.5 แผนผสมของพาราฟิน และโบเร็กซ์ (Borated paraffin)

แผนผสมของพาราฟินและโบเร็กซ์ ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นชนิดที่ส่งชื่อจากต่างประเทศ เป็นแผนขนาดกว้าง 6 นิ้ว ยาว 8 นิ้ว หนา 1 นิ้ว มีราคาแพง แต่ที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ก็ยก ก็เพื่อเปรียบเทียบผลการกั้นนิวตรอนกับวัสดุที่กำลังศึกษา คือ

พาราฟิน รวมกับโบเร็กซ์, พาราฟิน รวมกับบอริกแอซิด และ บอริกแอซิดรวมกับน้ำ

2. จัดห้องทดลอง

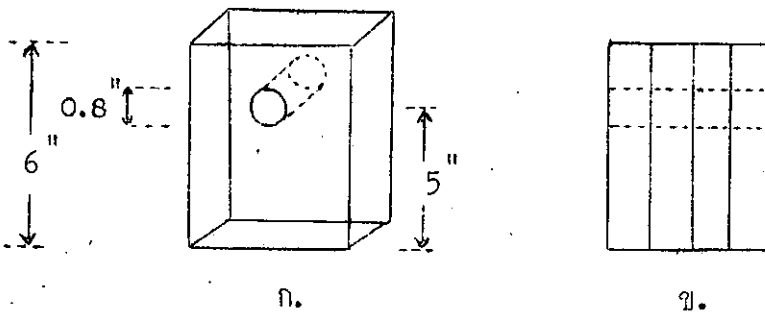
ในการทำทดลองต้องคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้ทำการทดลองด้วย เพราะว่าคนกำเนตนิวตรอนที่ใช้ในการทดลองนี้มีความแรงมาก คือ 1 คูรี จึงต้องนำพาราฟิน, ตะกั่ว และแผ่นสมของพาราฟินและโบเร็กซ์ มากั้นเพื่อไม่ให้นิวตรอนและรังสีแกมมาที่ออกมาจากคนกำเนตนิวตรอน มาทำอันตรายผู้ทำการทดลองได้ ในขณะที่เดียวกันก็ต้องไม่วางวัสดุ ป้องกันอันตรายเหล่านี้ชิดบริเวณคานหนาของคนกำเนตนิวตรอนมากเกินไป เพราะอาจจะช่วยสะท้อนนิวตรอนกลับไปเข้าหัววัด BF_3 counter ทำให้ค่าหัววัดได้มากเกินไปกว่าที่ควรจะเป็น ดังนั้น จึงจัดบริเวณที่จะทำการทดลอง ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงการจัดวางอุปกรณ์ในบริเวณที่ทำการทดลอง

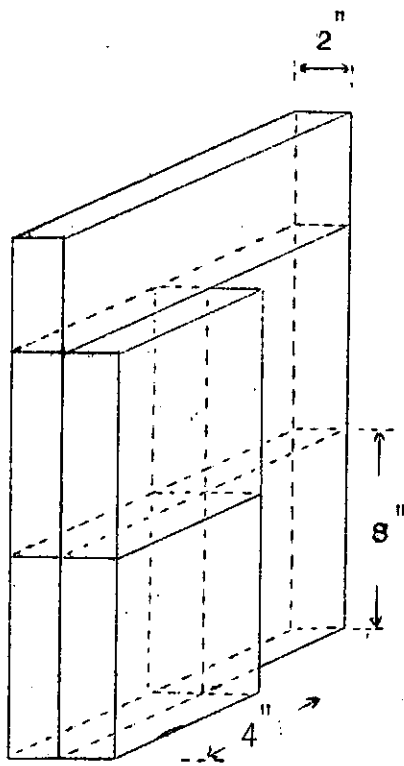
อธิบายอุปกรณ์ต่าง ๆ จากรูปที่ 6

- (1) คือโต๊ะขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 2 เมตร สูง 90 cm.
- (2) คือโต๊ะขนาดกว้าง 60 cm ยาว 160 cm สูง 90 cm
- (3) คือแผนผังของพาราฟิน และโบเร็กซ์ มีขนาดกว้าง 3 นิ้ว ยาว 6 นิ้ว
หนา 1 นิ้ว มีรูกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 นิ้ว นำมาวางเรียงชิดกัน 4 แผน
ดังรูปที่ 7

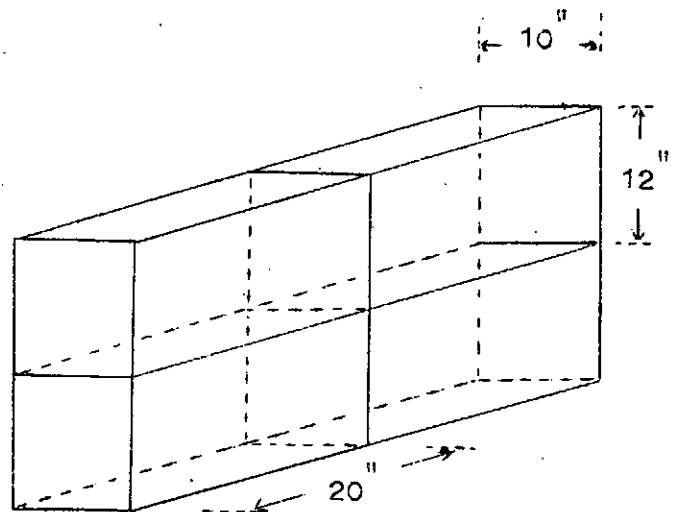


รูปที่ 7 แผนผังของพาราฟินและโบเร็กซ์ ซึ่งมีรูกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 นิ้ว

- ก. แสดงความหนา 1 แผน
 - ข. แสดงความยาว 4 แผน วางเรียงชิดกัน
- (4) คือแท่นไม้ซึ่งใช้หนุนคนกำเนินิวตรอน เพื่อให้อยู่ตรงรูกลมของแผนผังของพาราฟินและโบเร็กซ์พอดี
 - (5) คือคนกำเนินิวตรอน ชนิดอะเมอริเซียม - เบอริลเลียม ขนาด 1 คูรี
 - (6) คือแท่งตะกั่วขนาด $8 \times 4 \times 2$ ลูกบาศก์นิ้ว จำนวน 7 ก้อน วางเรียงชิดกันดังรูปที่ 8 เพื่อกันไม่ให้รังสีแกมมาเข้ามาอันตรายผู้ทำการทดลอง
 - (7) คือ แผนผังของพาราฟินและโบเร็กซ์ ขนาด $8 \times 12 \times 1$ ลูกบาศก์นิ้ว 2 แผน วางเรียงชิดกัน
 - (8) คือกล่องบรรจุพาราฟินเต็ม ขนาด $12 \times 20 \times 10$ ลูกบาศก์นิ้ว จำนวน 4 กล่อง วางเรียงชิดกันดังรูปที่ 9 เพื่อกันนิวตรอนไม่ให้มาอันตรายผู้ทำการทดลอง



รูปที่ 8 แสดงการวางเรียงก้อนตะกั่ว



รูปที่ 9 แสดงการวางเรียงของกล่องบรรจุ
พาราฟิน

- (9) คือ BF_3 counter
- (10) คือ Preamplifier, Discriminator, Amplifier
และ Scaler
- (11) คือ High Voltage

3. วัดหาจำนวนเทอร์มาลนิวตรอน

ในการวัดหาจำนวนเทอร์มาลนิวตรอน กระทำโดย นำหัววัด BF_3 counter ไปวางไว้ที่จุดห่างจากแกนกำเนิดนิวตรอนเป็นระยะทาง 50 cm ต้นกำเนิดนิวตรอนจะส่งนิวตรอนออกมา และมาเข้าหัววัด BF_3 counter จกจากหัววัด BF_3 counter นับได้ใน 3 นาที แล้วนำค่าหัววัดได้มาเฉลี่ยหาจำนวนนิวตรอนออกมาที่ จากนั้นจึงนำผลลัพธ์ต่อการ-

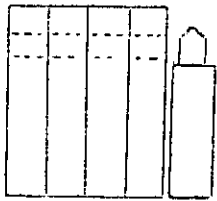
ศึกษาคุณสมบัติในการนับนิวตรอน มาวางกันระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับหัววัดนิวตรอน โดยให้แผ่นกั้นอยู่ชิดตัวต้นกำเนิดนิวตรอน จดค่าที่หัววัด BF₃ counter นับได้ใน 3 นาทีไว้ต่อไปก็เพิ่มจำนวนแผ่นกั้นขึ้นไปเรื่อย ๆ ทีละแผ่น จดค่าที่หัววัด BF₃ counter นับได้ใน 3 นาที นำมาเฉลี่ยหาจำนวนนิวตรอนต่อวินาที

สิ่งที่ต้องระวังในขณะนำแผ่นกั้นเข้าไปวางหรือนำแผ่นกั้นออกมาก็คือ จะต้องพยายามทำความรวดเร็ว และใช้เข็มกับแผ่นกั้นด้วย เพื่อมิฉะนั้นจะก่อให้เกิดอันตรายขึ้นได้ สำหรับวิธีการวางต้นกำเนิดนิวตรอนและการวางหัววัด BF₃ counter มีรายละเอียดดังนี้คือ

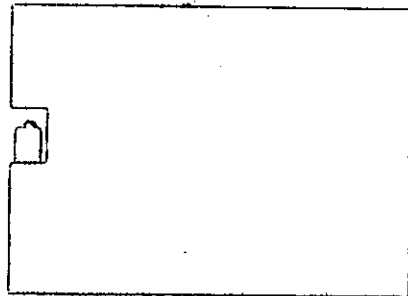
3.1 การวางต้นกำเนิดนิวตรอน

ในการทดลองครั้งนี้ ทำการวางต้นกำเนิดนิวตรอนเป็น 2 แบบ คือ

3.1.1 วางต้นกำเนิดนิวตรอนบนแท่นไม้ เพื่อให้ต้นกำเนิดนิวตรอนอยู่ตรงของกลมของแผ่นผสมของพาราฟิน และโบเร็กซ์พอดี เพื่อเป็นการรวบรวมให้นิวตรอนวิ่งออกไปในทิศทางที่ต้องการ ดังรูปที่ 6 และรูปที่ 10 ก.



ก.



ข.

รูปที่ 10 แสดงการวางต้นกำเนิดนิวตรอน

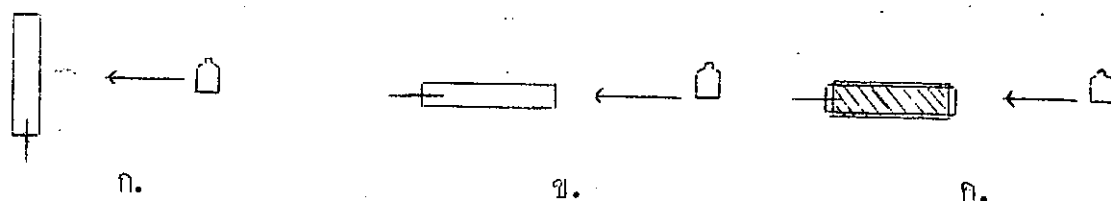
- ก. วางบนแท่นไม้ให้ตรงกับช่องของกลมของแผ่นผสมของพาราฟินและโบเร็กซ์
- ข. วางในช่องสี่เหลี่ยมที่เจาะเข้าไปในแผ่นพาราฟิน

3.1.2 วางต้นกำเนิดนิวตรอนในช่องสี่เหลี่ยม ซึ่งเจาะเข้าไปในแผ่นพาราฟิน ดังรูปที่ 10 ข. เวลาทำการทดลองกันวัสดุต่าง ๆ ที่ต้องการศึกษาคุณสมบัติการกั้นนิวตรอน มาปิดกั้นลงไปที่หน้าของสี่เหลี่ยมนี้

3.2 การวางหัววัด BF_3 counter

มีวิธีการเป็น 2 แบบ คือ

3.2.1 วางขวางกับแนวทางเดินของนิวตรอน ดังรูปที่ 11 ก. ซึ่งการวางในลักษณะนี้จะทำให้พื้นที่ในการรับนิวตรอนเข้าไปทำปฏิกิริยาไครมิก



รูปที่ 11 แสดงวิธีการวางหัววัด BF_3 counter

- วางขวางกับแนวทางเดินของนิวตรอน
- วางตามแนวเดียวกับแนวทางเดินของนิวตรอน
- วางตามแนวเดียวกับแนวทางเดินของนิวตรอน และมีแผ่น Cadmium หนึ่บริเวณทรงกระบอกกั้นขวางของหัววัด BF_3 counter

3.2.2 วางตามแนวเดียวกับแนวทางเดินของนิวตรอน ซึ่งในกรณีนี้แบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ

- วางหัววัด BF_3 counter โดยไม่มีอะไรหุ้ม ดังรูปที่ 11 ข. ในกรณีนี้ นิวตรอนส่วนใหญ่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับก๊าซ BF_3 ภายใน โดยเข้าไปทางส่วนปลายของทรงกระบอก แต่นิวตรอนที่สะท้อนจากผนังห้องและวัสดุป้องกัน ก็อาจไปเข้าหัววัด BF_3 counter บริเวณทรงกระบอกกั้นขวางได้ด้วย

ข. วางหัววัด BF_3 counter โดยนำแผ่น Cadmium ไปหุ้มบริเวณทรงกระบอกด้านข้าง ดังรูปที่ 11 ค. ในกรณีที่นิวตรอนที่วัดได้จะเป็นเฉพาะส่วนที่เข้าทางส่วนปลายของหัววัด BF_3 counter เท่านั้น ส่วนนิวตรอนที่สะท้อนมาเข้าบริเวณด้านข้างจะถูกแผ่น Cadmium จับไว้

4. เปรียบเทียบค่าเทอร์มาลนิวตรอน ที่วัดได้ในข้อ 3 กับค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ (12) คือ

$$\phi_s(r) = \frac{a K_f^2 (e^{-K_f r} - e^{-K_s r})}{4 \pi D_s (K_s^2 - K_f^2) r}$$

5. นำค่าเทอร์มาลนิวตรอนที่วัดได้ ไปคำนวณหานิวตรอนโครส จากสูตรในสมการที่ 16 คือ

$$D = 5.69 \times 10^{-9} \frac{BAe}{d^2} e^{-\sum_r t} \text{ rem/sec}$$

บทที่ 4

การคำนวณและผลการทดลอง

การคำนวณหาอัตราที่นิวตรอนภายในให้แก่วัสดุและพาราฟิน ซึ่งใช้เป็นวัสดุสำหรับลดความเร็วของนิวตรอนนั้น คำนวณได้จากสูตร

$$D = 5.69 \times 10^{-9} \frac{BAe}{d^2} \sum_r t \quad \text{rem/sec}$$

เมื่อ $B = \sum_r t$
 $A = 2.2 \times 10^6$ นิวตรอน/วินาที
 $d = 50$ cm

ในการหาค่า $\sum_r$ นั้น คำนวณได้จากสูตร

$$\sum_r = \int_0^n \sum_{i=1}^n W_i \sum_{ri} \quad \text{cm}^{-1}$$

เมื่อ $\int_0^n$ = ความหนาแน่นของวัสดุต่าง ๆ ที่นำมาใช้กันนิวตรอน ซึ่งหาค่าได้จากตาราง 1

ตาราง 1 แสดงค่าความหนาแน่นของสารต่าง ๆ

ชนิดของสาร	ความหนาแน่น (g/cm ³)
น้ำ (H ₂ O)	1
พาราฟิน (C ₂₂ H ₄₆)	0.90
บอริกแอซิด (H ₃ BO ₃)	1.43
โบเร็กซ์ (Na ₂ B ₄ O ₇ · 10H ₂ O)	1.73
แคดเมียม (Cd)	8.65
โบรอนคาร์ไบด์ (BC ₄)	2.50

$\sum_{ri}$ คือค่า Macroscopic removal cross section ของธาตุ i
หาค่าได้จากตาราง 2

ตาราง 2 แสดงค่า Macroscopic removal cross section ของธาตุต่าง ๆ

ชนิดของสาร	$\sum_{ri}$ (cm ² /g)
ไฮโดรเจน (H)	0.602
โบรอน (B)	0.055
คาร์บอน (C)	0.050
ออกซิเจน (O)	0.041

ดังนั้นค่า $\sum_r$ ของน้ำคือ

$$\begin{aligned}\sum_r &= 1 \left[\frac{2}{18} (0.602) + \frac{16}{18} (0.041) \right] \text{ cm}^{-1} \\ &= 0.1033 \text{ cm}^{-1}\end{aligned}$$

และค่า Σ_r ของพาราฟิน คือ

$$\Sigma_r = 0.9 \left[\frac{(22 \times 12) (0.050)}{(22 \times 12) + (46 \times 1)} + \frac{(46 \times 1) (0.602)}{(22 \times 12) + (46 \times 1)} \right] \text{cm}^{-1}$$

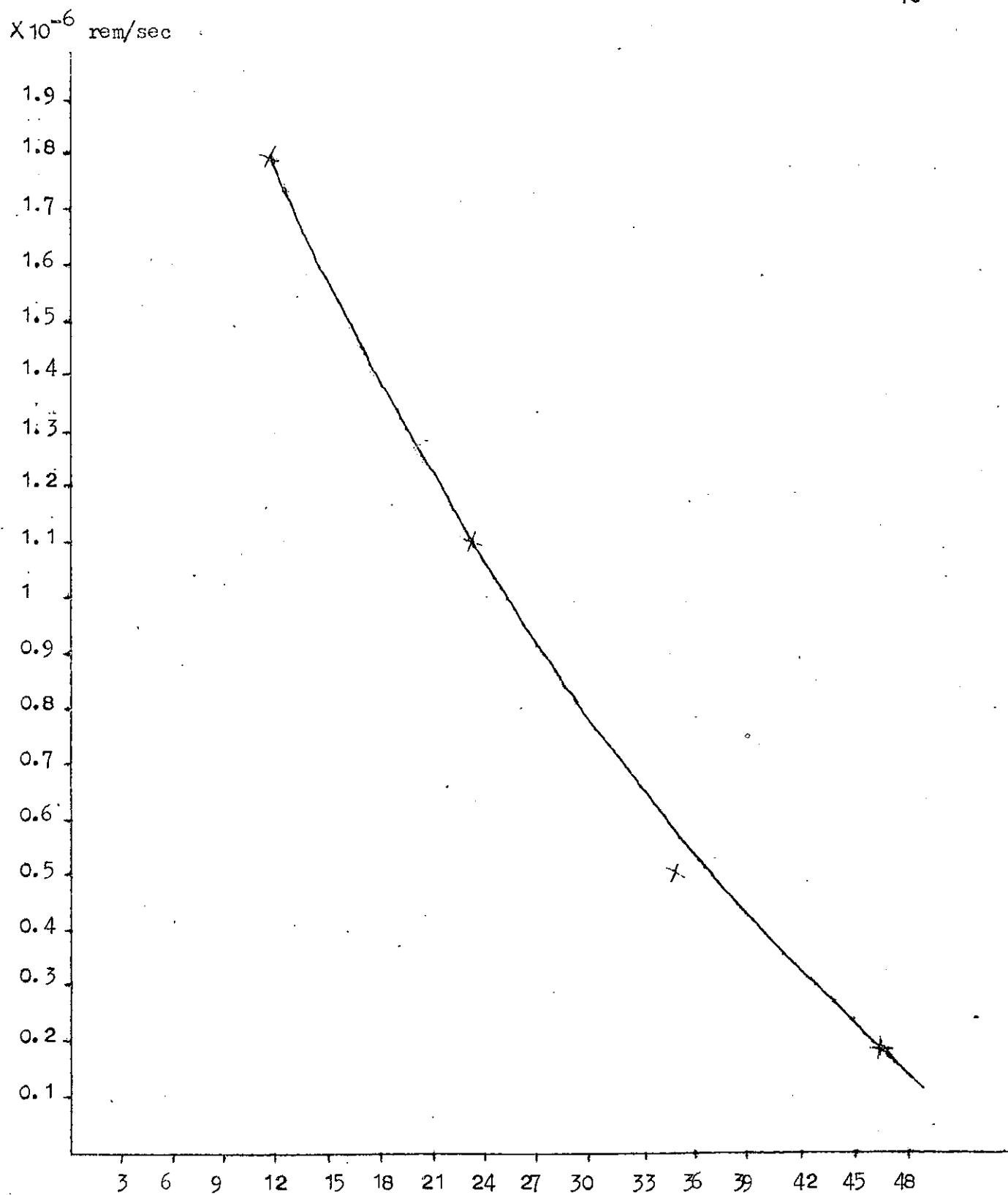
$$= 0.1187 \text{ cm}^{-1}$$

ค่า t ของน้ำคือความกว้างของถังที่ไซเบอร์รอนำ ซึ่งแต่ละถังกว้าง 11.63 cm ดังนั้นจึงหาคำนวณนิวตรอนโคสเรท โค่งการาง 3 ซึ่งการาง 3 นี้ แสดงค่าหาค่าจากการทำการทดลองโดยใช้ BF_3 counter วัดจำนวน count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอนที่โค่งหลังจากนิวตรอนเร็ว วิ่งผ่านน้ำไวคย

ตาราง 3 แสดงคำนวณนิวตรอนโคสเรท และ count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอน ซึ่งโค่งจากการที่นิวตรอนเร็ววิ่งผ่านน้ำความหนาต่าง ๆ

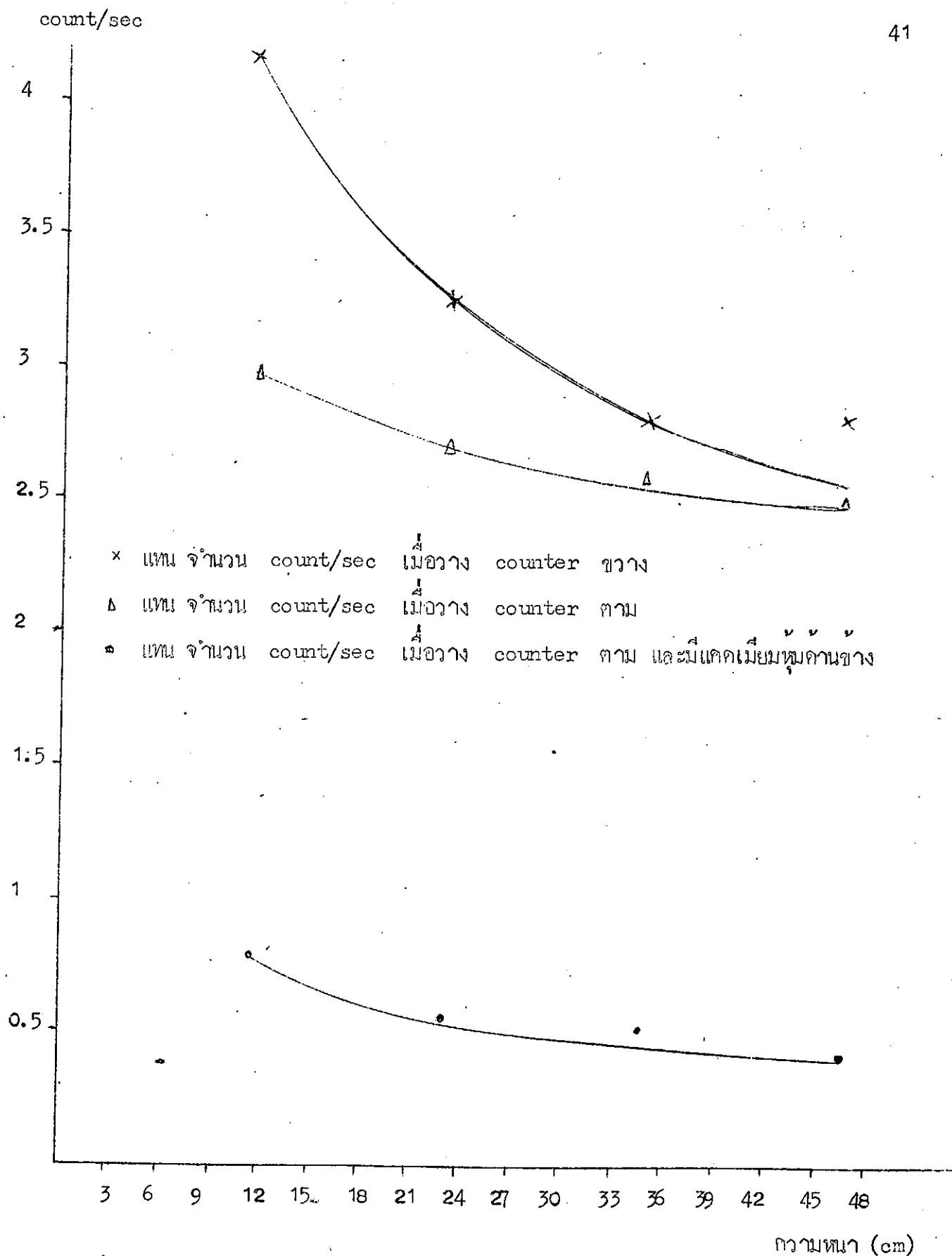
ความหนา (cm)	วาง BF_3 counter ขวาง (c/sec)	วาง BF_3 counter คม (c/sec)	วาง BF_3 counter คม และหุ้บคยแคคเมี่ยม (c/sec)	นิวตรอนโคสเรท (rem/sec)
11.63	4.16	2.97	0.78	1.8×10^{-6}
23.27	3.24	2.72	0.55	1.1×10^{-6}
34.90	2.82	2.57	0.51	5×10^{-7}
46.53	2.80	2.50	0.42	1.97×10^{-7}

จากตาราง 3 นำมาเขียนกราฟโค่งรูปที่ 12 และรูปที่ 13



รูปที่ 12 กราฟแสดงนิวตรอนโคสเรท ที่ความหนาต่าง ๆ ของน้ำ

ความหนา (cm)



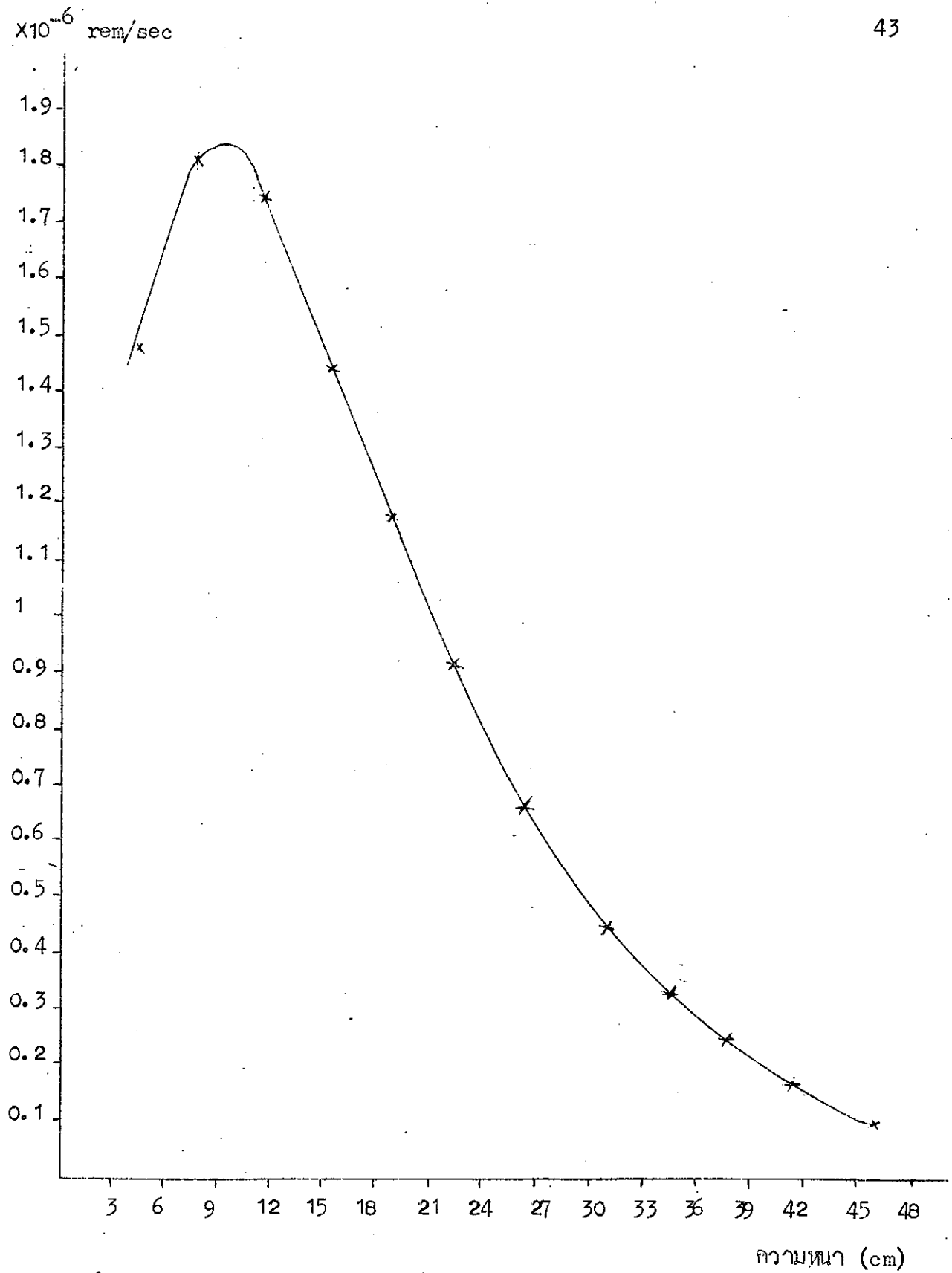
รูปที่ 13 กราฟเปรียบเทียบจำนวน count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอน เมื่อวางหัววัด BF_3 counter 3 แบบ โดยใช้ น้ำ เป็นวัสดุสำหรับลดความเร็วของนิวตรอนเร็ว

สำหรับค่า t ของพาราฟิน คือความหนาของแผ่นพาราฟิน ซึ่งแต่ละแผ่นหนา 3.81 cm ดังนั้นจึงคำนวณค่านิวตรอนโคสเรทโคจังกี่ตาราง 4 ซึ่งตาราง 4 นี้ แสดงค่าหาค่าจากการทำการทดลองโดยใช้ BF_3 counter วัดจำนวน count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอนที่ไถ่หลังจากนิวตรอนเร็ววิ่งผ่านพาราฟินไว้ด้วย

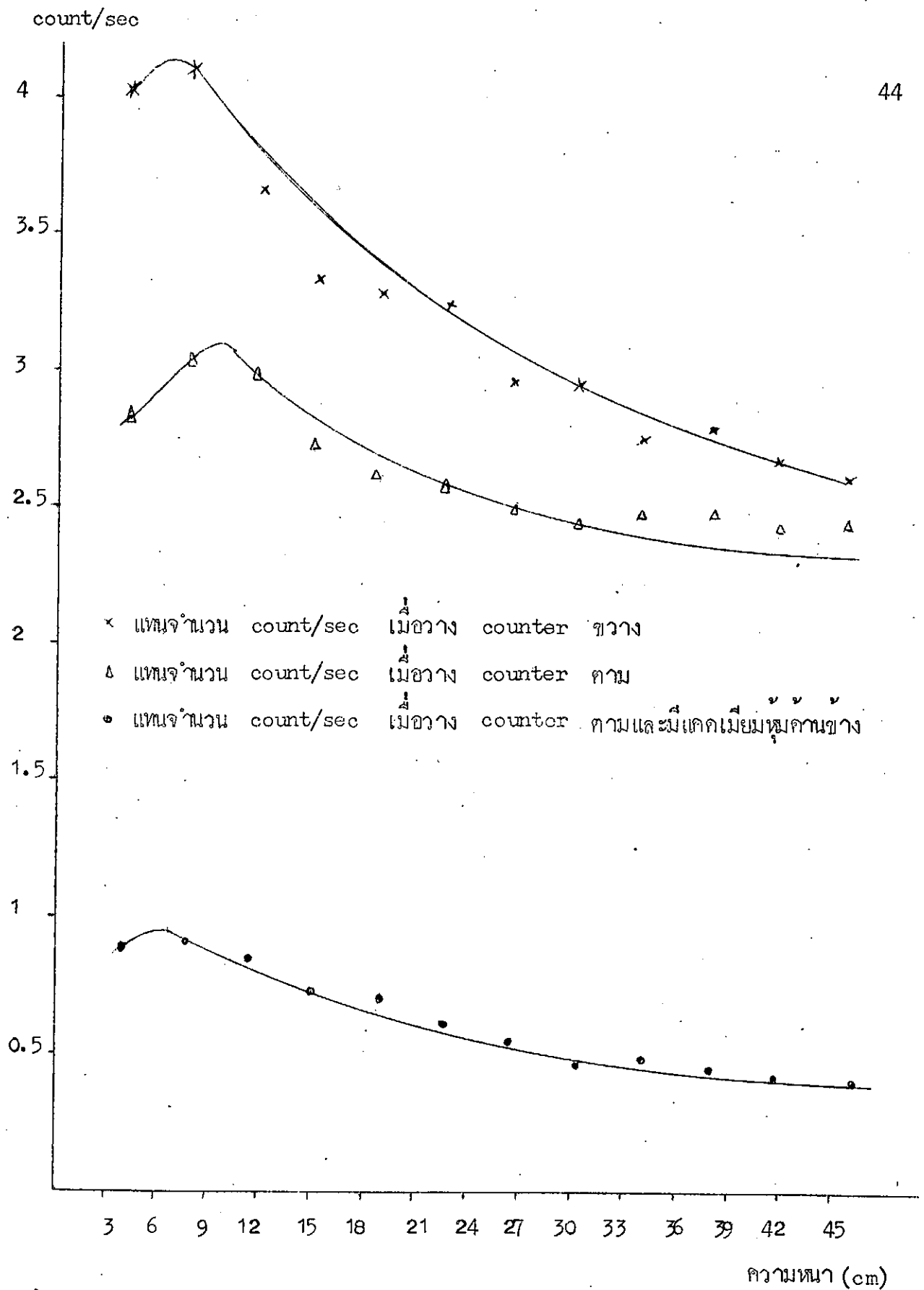
ตาราง 4 แสดงค่านิวตรอนโคสเรท และ count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอน ซึ่งไถ่จากการที่นิวตรอนเร็ววิ่งผ่านพาราฟินที่ความหนาต่าง ๆ

ความหนา (cm)	วาง BF_3 counter ขวาง (c/sec)	วาง BF_3 counter ตาม (c/sec)	วาง BF_3 counter ตาม และหุ้มกบดกเมียม (c/sec)	นิวตรอนโคสเรท (rem/sec)
3.81	4.00	2.82	0.88	1.44×10^{-6}
7.62	4.09	3.03	0.91	1.83×10^{-6}
11.43	3.64	2.97	0.84	1.75×10^{-6}
15.24	3.32	2.72	0.75	1.48×10^{-6}
19.05	3.28	2.62	0.71	1.18×10^{-6}
22.86	3.23	2.57	0.62	9×10^{-7}
26.67	2.96	2.5	0.54	6.9×10^{-7}
30.48	2.94	2.46	0.48	4.9×10^{-7}
34.29	2.76	2.48	0.50	3.5×10^{-7}
38.10	2.79	2.49	0.46	2.4×10^{-7}
41.91	2.68	2.45	0.43	1.7×10^{-7}
45.72	2.78	2.45	0.40	1.1×10^{-7}

จากตาราง 4 นำมาเขียนกราฟโคจังกี่รูปที่ 14 และรูปที่ 15



รูปที่ 14 กราฟแสดงนิวตรอนไอส์เรทที่ความหนาต่าง ๆ ของพลาสติก



รูปที่ 15 กราฟเปรียบเทียบจำนวน count/sec ของเทอร์มัลนิวตรอน เมื่อวางหัววัด

BF_3 counter 3 แบบโดยใช้พาราฟินเป็นวัสดุสำหรับลดความเร็วของนิวตรอนเร็ว

ในการคำนวณหาอัตราที่นิวตรอนคายพลังงานให้แก่ บอริกแอซิก, โบเร็กซ์, บอริก-แอซิกรวมกับน้ำ, แคดเมียม และโบรอนคาร์ไบด์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นวัสดุสำหรับดูดกลืน (Absorber) เทอร์มาลนิวตรอน ที่เกิดจากนิวตรอนเร็ววิ่งผ่านพาราฟินหนา 7.62 cm นั้น คำนวณหาได้จากสูตร

$$N(x) = N(0) e^{-\sum_a x}$$

เมื่อ $N(x)$ = เทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์ หรือนิวตรอนโคสเรท หลังจากที่ผ่านมาเข้าไปในวัสดุสำหรับดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอน

$N(0)$ = เทอร์มาลนิวตรอนฟลักซ์ หรือนิวตรอนโคสเรทก่อนที่จะเข้ามาเข้าไปในวัสดุสำหรับดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอน

$\sum_a$ = ภาควัดความมหภาคสำหรับการดูดกลืน (Macroscopic absorption cross section)

x = ความหนาของวัสดุสำหรับดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอน

ในการคำนวณครั้งนี้ $N(0) = 1.83 \times 10^{-6}$ rem/sec หาคามาจากตาราง 4 ซึ่งเป็นกานิวตรอนโคสเรทที่ได้มาจากการที่นิวตรอนเร็ววิ่งผ่านพาราฟินหนา 7.62 cm ส่วนค่า $\sum_a$ หาคาได้จากสูตร

$$\sum_a = \int^A \frac{N_a}{M} \sum_{i=1}^n v_i \sigma_{ai}$$

เมื่อ N_a = Avogadro number

$$= 0.602 \times 10^{24}$$

M = น้ำหนักโมเลกุลของสาร

v_i = จำนวนอะตอมของธาตุชนิดที่ i ในโมเลกุลของสาร

σ_{ai} = ภาควัดความจุลภาคสำหรับการดูดกลืน (Microscopic absorption cross section) ซึ่งหาคาได้จากตาราง 5

ตาราง 5 แสดงค่าภาคตัดขวางจุลภาคสำหรับการถูกกลืนของสารต่าง ๆ

ชนิดของสาร	ρ_{ai} (บาร์)
ไฮโดรเจน	38
โบรอน	755
ออกซิเจน	2×10^{-4}
โซเดียม	0.525
คาร์บอน	0.004
แก๊สเฉื่อย	2450

$\rho =$ ความหนาแน่นของวัสดุสำหรับถูกกลืนเทอร์มอลนิวตรอน ซึ่งหาค่าได้จากตาราง 1 ส่วนค่า ความหนาแน่นของบอริกแอซิด รวมกับน้ำ หาค่าได้จากสูตร

$$\frac{1}{\rho_{\text{ผสม}}} = \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\rho_i}$$

เมื่อ $\rho_{\text{ผสม}}$ = ความหนาแน่นของของผสม

w_i = Weight fraction ของสารชนิดที่ i

ρ_i = ความหนาแน่นของสารชนิดที่ i

ดังนั้นค่า $\rho_{\text{ผสม}}$ ของบอริกแอซิดรวมกับน้ำในอัตราส่วนต่าง ๆ จึงหาค่าได้จากตาราง 6

ตาราง 6 แสดงค่าความหนาแน่นผสมของ บอริกแอซิดรวมกับน้ำในอัตราส่วนผสมต่าง ๆ

อัตราส่วนผสมของบอริกแอซิดกับน้ำโดยปริมาตร	$\rho_{\text{ผสม}}$ (g/cm^3)
1 : 7	1.03
1 $\frac{1}{2}$: 6 $\frac{1}{2}$	1.06
2 : 6	1.09

คำนวณค่า $\sum_a$ ของสารต่าง ๆ ได้ดังตาราง 7

ตาราง 7 แสดงค่าภาคตัดขวางมหภาคสำหรับการถูกกลืนเทอร์มาลนิวตรอนของสารต่าง ๆ

ชนิดของสาร	$\sum_a$ (cm^{-1})
แคดเมียม	114
โบรอนคาร์ไบด์	19.26
โบรเร็ค	8.25
บอริกแอซิด	10.50
บอริกแอซิดรวมกับน้ำในอัตราส่วน 1:7	5.86
บอริกแอซิดรวมกับน้ำในอัตราส่วน 1 $\frac{1}{2}$: 6 $\frac{1}{2}$	6.04
บอริกแอซิดรวมกับน้ำในอัตราส่วน 2:6	6.21

จากการทราบ $N(0)$ และ $\sum_a$ ทำให้สามารถคำนวณค่านิวตรอนไหลเรทที่ผ่านออกมาจากวัสดุสำหรับถูกกลืนเทอร์มาลนิวตรอนแต่ละชนิดได้ดังตาราง 8 - 14 ซึ่งตารางนี้-

จะแสดงค่านิวตรอนโคสเรทเฉพาะที่ค่าไม่เกินเลขจำนวนเต็ม $\times 10^{-20}$ และตารางที่กล่าว
 แสดงค่า count/sec ที่ไดจากการทดลองโดยใช้ BF₃ counter วัดไว้ด้วย ส่วน
 ตาราง 15 เป็นตารางที่แสดงค่าที่ไดจากการทำการทดลองเพิ่มขึ้นในกรณีข้างต้น แต่ใช้
 Borated paraffin เป็นวัสดุสำหรับกักกั้นเทอร์มาลนิวตรอน ตาราง 8 - 15 นี้ นำมา
 เขียนกราฟได้ดังรูปที่ 16 - 23

ตาราง 8 แสดงค่านิวตรอนโคสเรท และ count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอน
 ซึ่งไดจากการที่เทอร์มาลนิวตรอนวิ่งผ่านแท่งเมียม

ความหนา (cm)	วาง BF ₃ counter ขวาง (c/sec)	วาง BF ₃ counter ตาม (c/sec)	นิวตรอนโคสเรท (rem/sec)
0.06	3.30	2.53	2.02×10^{-9}
0.12	3.19	2.50	2.23×10^{-12}

ตาราง 9 แสดงค่านิวตรอนโคสเรท และ count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอน
 ซึ่งไดจากการที่เทอร์มาลนิวตรอนวิ่งผ่านโบรอนคาร์ไบค์

ความหนา (cm)	วาง BF ₃ counter ขวาง (c/sec)	วาง BF ₃ counter ตาม (c/sec)	วาง BF ₃ counter ตาม และเพิ่มด้วยแท่งเมียม (c/sec)	นิวตรอนโคสเรท (rem/sec)
0.28	3.1	2.45	0.67	8.32×10^{-9}

ตาราง 10 แสดงกานิวตรอนโคสเรท และ count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอน
ซึ่งได้จากการที่เทอร์มาลนิวตรอนวิ่งผ่านโบรอน

ความหนา (cm)	วาง BF ₃ counter ขวาง (c/sec)	วาง BF ₃ counter ตาม (c/sec)	วาง BF ₃ counter ตาม และหุ้บคายแตกเมี่ยม (c/sec)	นิวตรอนโคสเรท (rem/sec)
2.54	2.62	2.62	0.66	1.45×10^{-15}
5.08	2.40	2.49	0.61	
7.62	2.38	2.41	0.59	
10.16	2.32	2.36	0.56	
12.7	2.30	2.33	0.54	
15.24	2.16	2.24	0.49	

ตาราง 11 แสดงกานิวตรอนโคสเรทและ count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอน
ซึ่งได้จากการที่เทอร์มาลนิวตรอนวิ่งผ่านบอริกแอซิด

ความหนา (cm)	วาง BF ₃ counter ขวาง (c/sec)	วาง BF ₃ counter ตาม (c/sec)	วาง BF ₃ counter ตาม และหุ้บคายแตกเมี่ยม (c/sec)	นิวตรอนโคสเรท (rem/sec)
2.54	2.58	2.37	0.65	4.78×10^{-18}
5.08	2.34	2.24	0.56	
7.62	2.16	2.19	0.56	
10.16	2.13	2.15	0.52	
12.7	2.06	2.10	0.50	
15.24	2.02	2.04	0.48	

ตาราง 12 แสดงค่านิวตรอนโคสเรท และ count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอนซึ่งได้จากการที่เทอร์มาลนิวตรอนวิ่งผ่านบอริกแอซิครวมกับน้ำในอัตราส่วนผสม 1 : 7 โดยปริมาตร

ความหนา (cm)	วาง BF ₃ counter ขวาง (c/sec)	วาง BF ₃ counter ตาม (c/sec)	วาง BF ₃ counter ตาม และพบกบยแตกเมี่ยม (c/sec)	นิวตรอนโคสเรท (rem/sec)
11.63	2.8	2.88	0.69	3.5×10^{-13}
23.24	2.48	2.56	0.59	
34.90	2.12	2.4	0.52	

ตาราง 13 แสดงค่านิวตรอนโคสเรท และ count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอนซึ่งได้จากการที่เทอร์มาลนิวตรอนวิ่งผ่านบอริกแอซิครวมกับน้ำ ในอัตราส่วนผสม $1 \frac{1}{2} : 6 \frac{1}{2}$ โดยปริมาตร

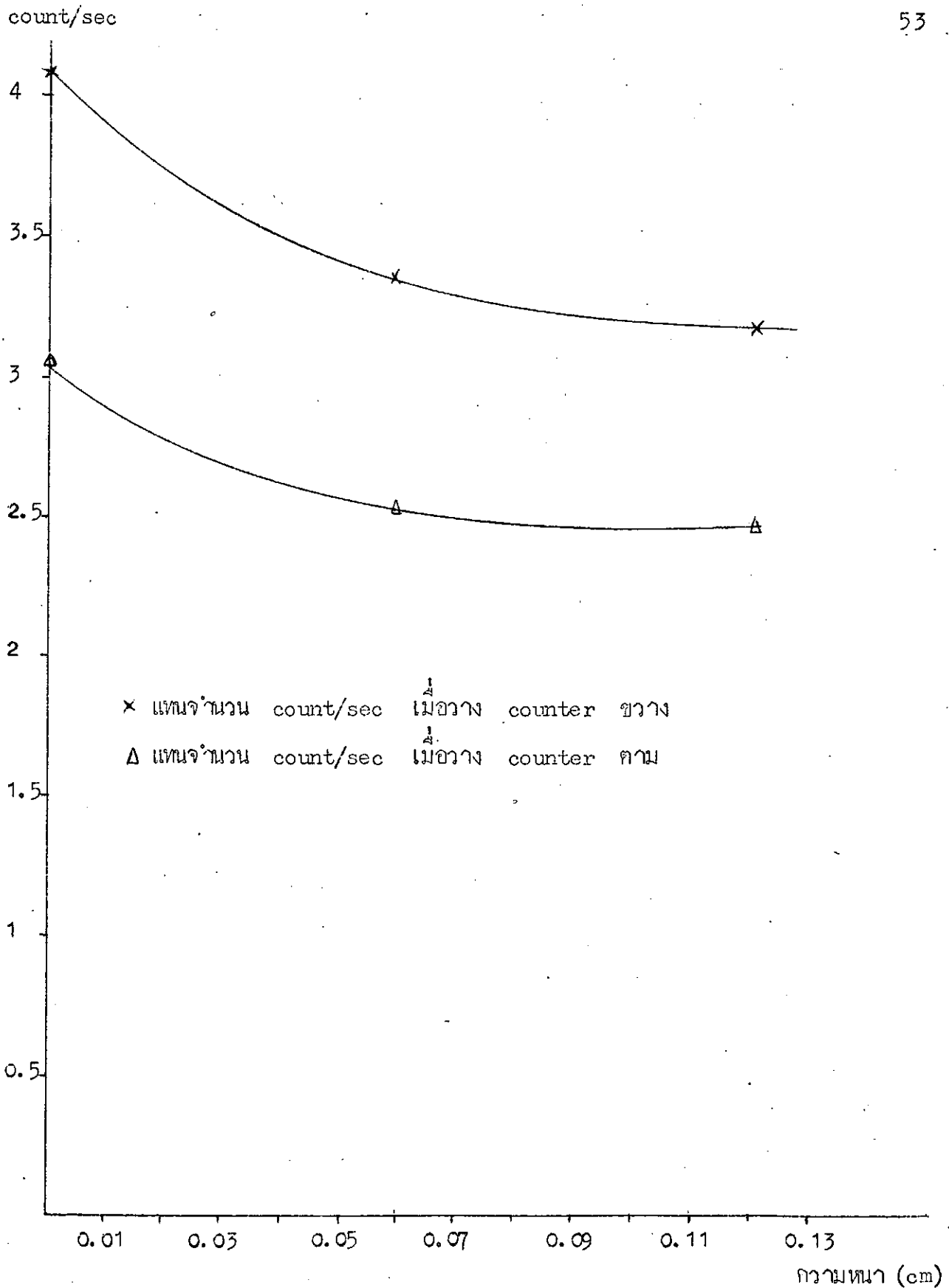
ความหนา (cm)	วาง BF ₃ counter ขวาง (c/sec)	วาง BF ₃ counter ตาม (c/sec)	วาง BF ₃ counter ตาม และพบกบยแตกเมี่ยม (c/sec)	นิวตรอนโคสเรท (rem/sec)
11.63	2.65	2.81	0.61	1.63×10^{-16}
23.24	2.36	2.49	0.56	
34.90	1.88	2.32	0.51	

ตาราง 14 แสดงค่านิวตรอนโกลด์เรท และ count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอน ซึ่งได้จากการที่เทอร์มาลนิวตรอนวิ่งผ่านบอริกแอซิดรวมกับน้ำ ในอัตราส่วนผสม 2 : 6 โดยปริมาตร

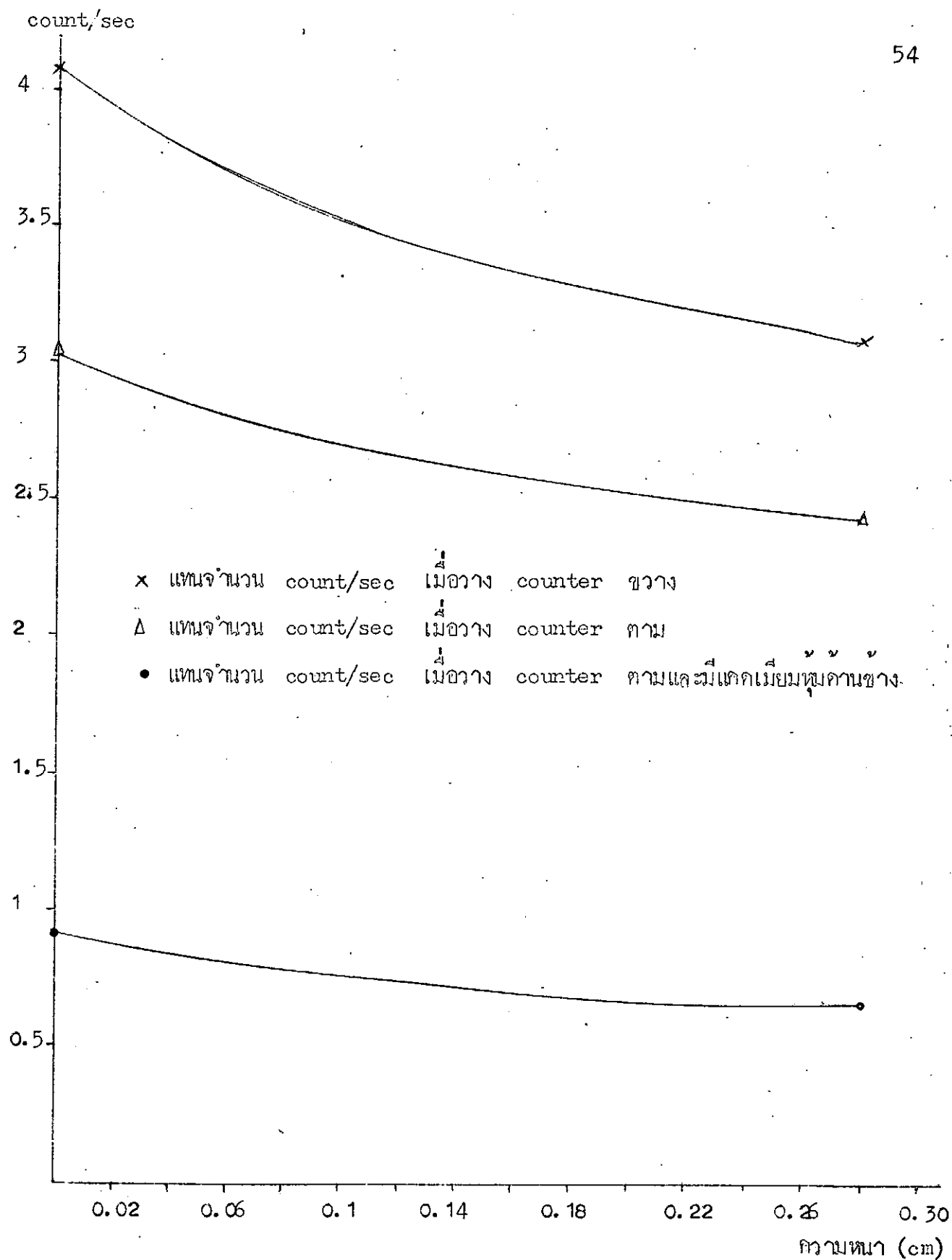
ความหนา (cm)	วาง BF ₃ counter ขวาง (c/sec)	วาง BF ₃ counter ตาม (c/sec)	วาง BF ₃ counter ตาม และหุ้มด้วยตะกั่ว (c/sec)	นิวตรอนโกลด์เรท (rem/sec)
11.63	2.52	2.72	0.55	8.5×10^{-20}
23.24	2.13	2.37	0.54	
34.90	1.85	2.26	0.49	

ตาราง 15 แสดงค่า count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอน ซึ่งได้จากการที่
เทอร์มาลนิวตรอนวิ่งผ่าน Borated paraffin

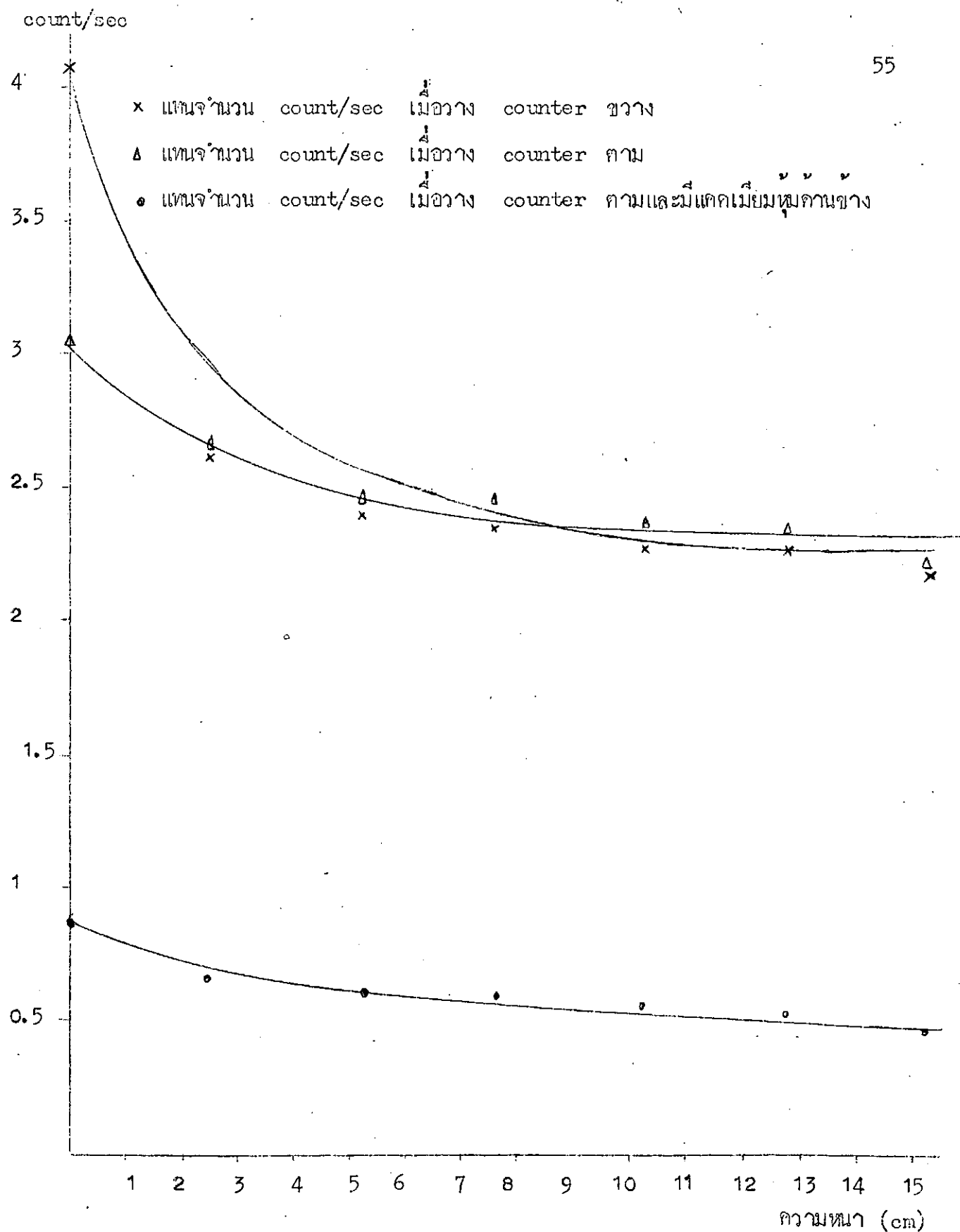
ความหนา (cm)	วาง BF ₃ counter ขวาง (c/sec)	วาง BF ₃ counter ตาม (c/sec)	วาง BF ₃ counter ตาม และพบกษแดกเมี่ยม (c/sec)
2.54	2.88	2.12	0.56
5.08	2.82	2.10	0.55
7.62	2.78	2.00	0.51
10.16	2.60	1.91	0.50
12.70	2.58	1.86	0.48
15.24	2.52	1.84	0.46
17.78	2.49	1.82	0.44
20.32	2.45	1.74	0.42
22.86	2.36	1.71	0.41
25.40	2.12	1.71	0.41
27.94	2.03	1.71	0.42
30.48	1.82	1.74	0.40



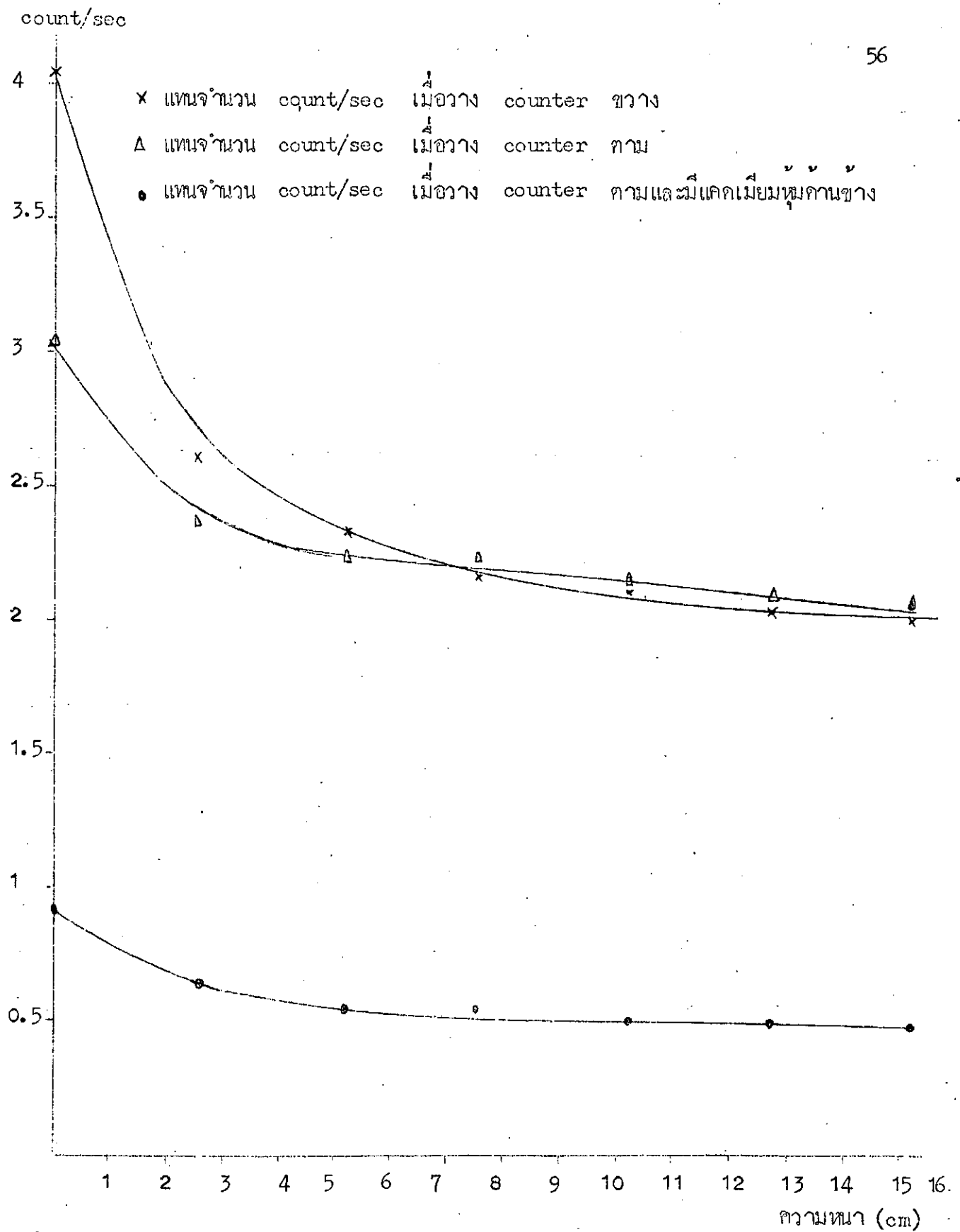
รูปที่ 16 กราฟเปรียบเทียบจำนวน count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอน เมื่ออาจหัววัด BF_3 counter 2 แบบ โดยใช้ฉากเมียมเป็นวัสดุสำหรับกูดกลืน



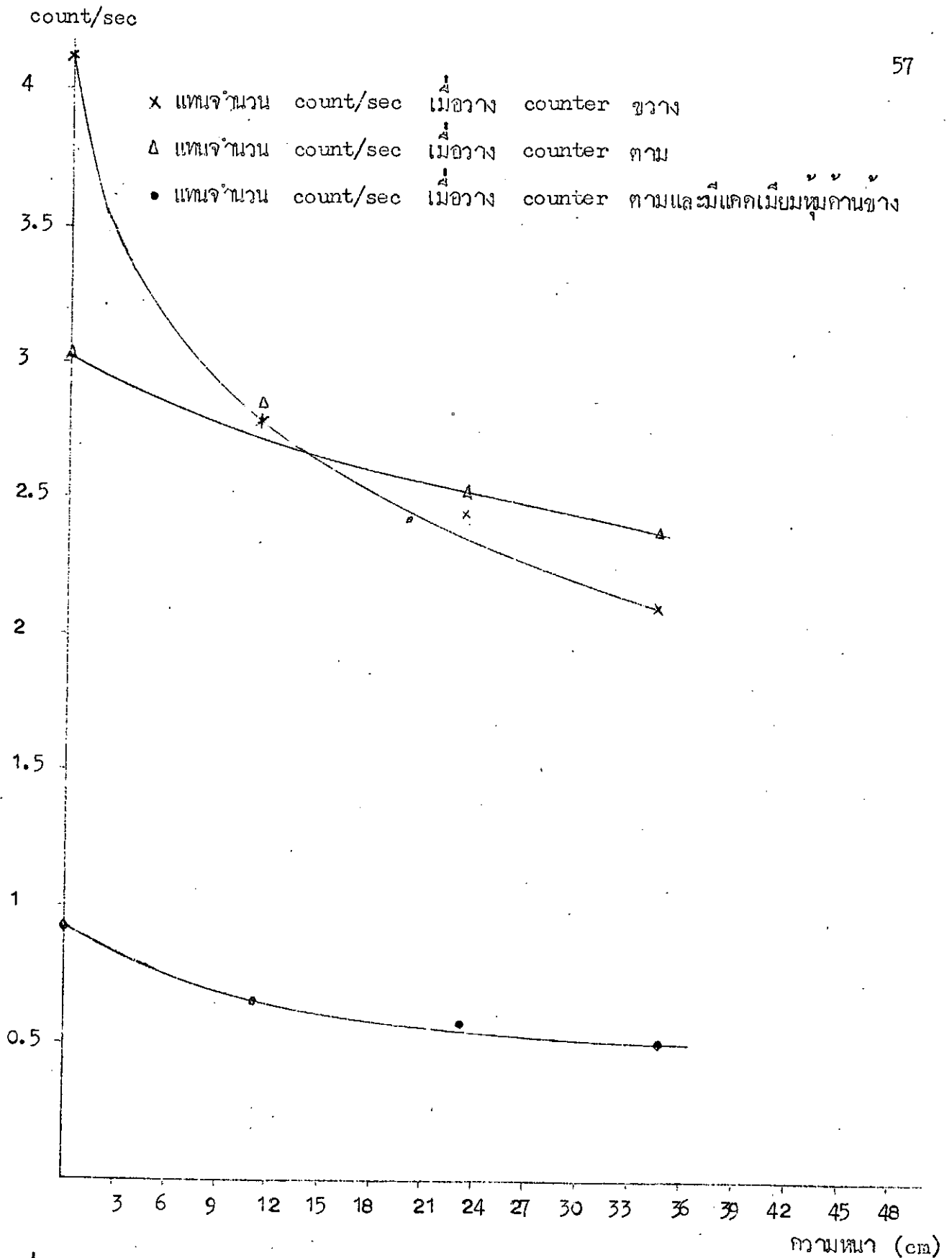
รูปที่ 17 กราฟเปรียบเทียบจำนวน count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอน เมื่อวางหัววัด BF_3 counter 3 แบบ โดยใช้โบรอนคาร์ไบด์เป็นวัสดุสำหรับกักกั้นเทอร์มาลนิวตรอน



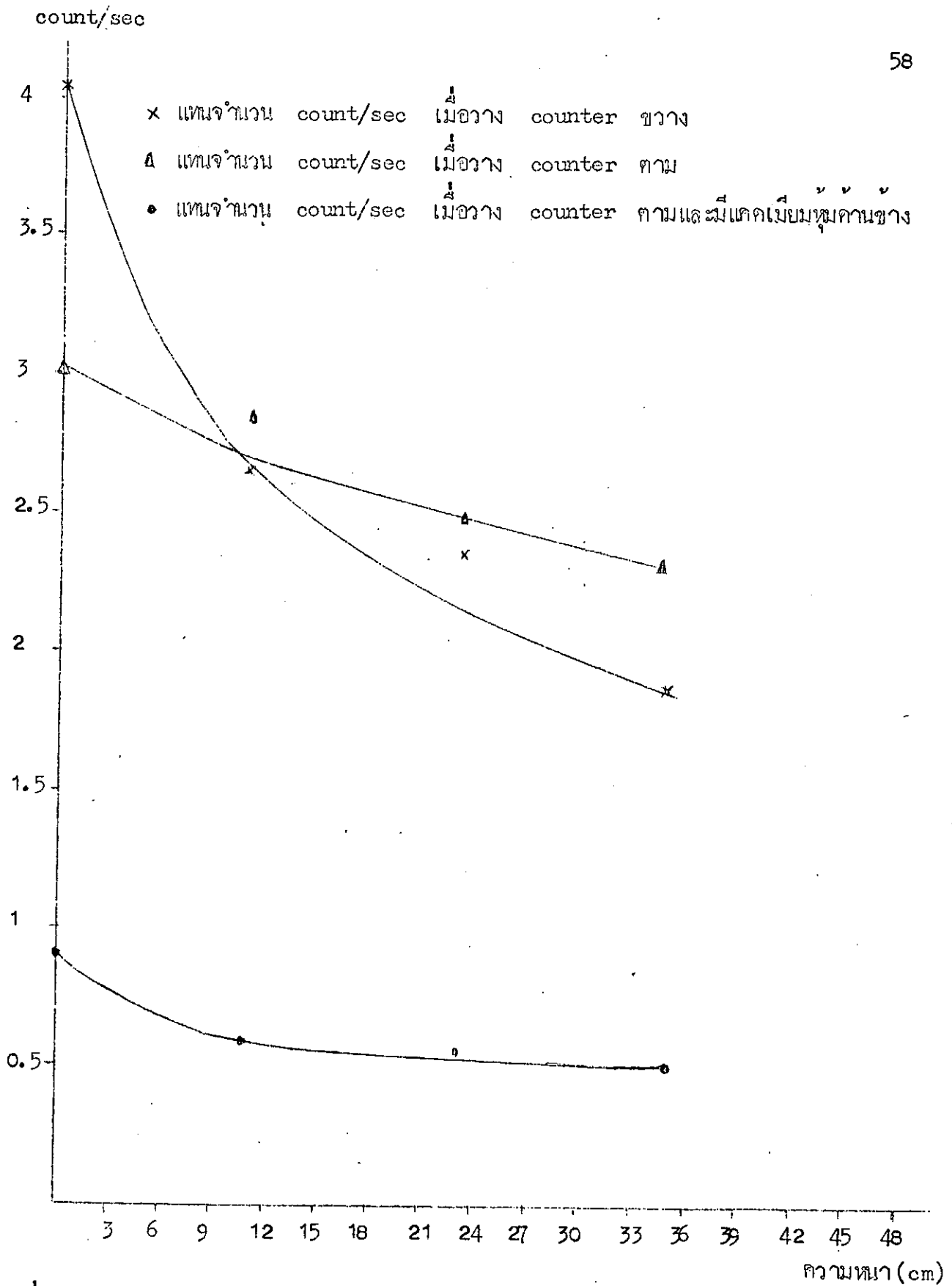
รูปที่ 18 กราฟเปรียบเทียบจำนวน count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอน เมื่อวางหัววัด BF_3 counter 3 แบบ โดยใช้โบแรกซ์เป็นวัสดุสำหรับกักคลื่นเทอร์มาลนิวตรอน



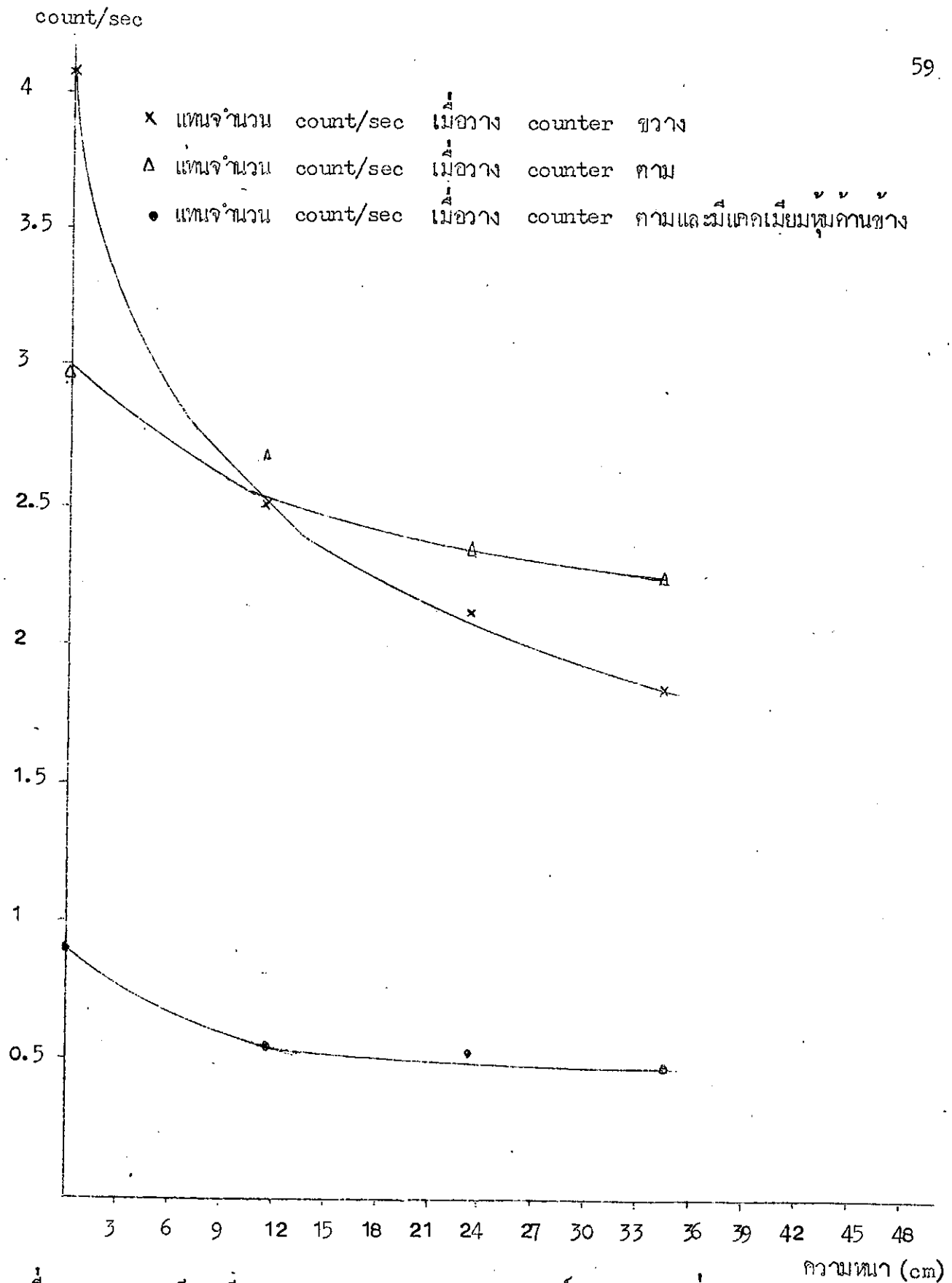
รูปที่ 19 กราฟเปรียบเทียบจำนวน count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอนเมื่อวางหัววัด BF_3 counter 3 แบบ โดยใช้ขั้วกริดและฉากเป็นวัสดุสำหรับดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอน



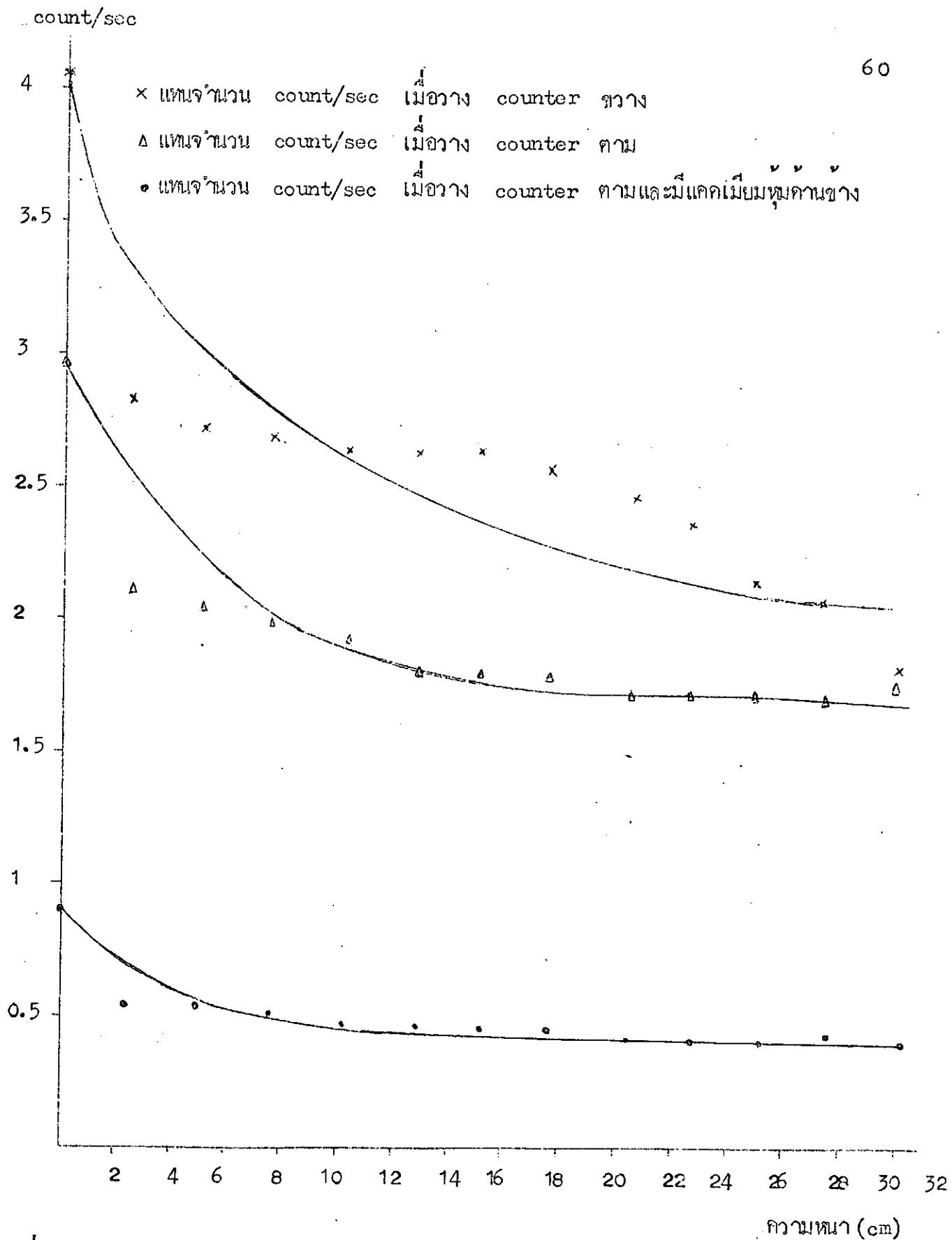
รูปที่ 20 กราฟเปรียบเทียบจำนวน count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอน เมื่อวางหัววัด BF_3 counter 3 แบบ โดยใช้ขบอริกแอซิดรวมกับน้ำในอัตราส่วนผสม 1 : 7 โดยปริมาตร เป็นวัสดุสำหรับ คัดกลั่นเทอร์มาลนิวตรอน



รูปที่ 21. กราฟเปรียบเทียบจำนวน count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอน เมื่อวางหัววัด BF_3 counter 3 แบบ โดยใช้บอริกแอซิกความเข้มข้นในอัตราส่วนผสม $1 \frac{1}{2} : 6 \frac{1}{2}$ โดยปริมาตร เป็นวัสดุ สำหรับดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอน



รูปที่ 22. กราฟเปรียบเทียบจำนวน count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอนเมื่อวางตัววัด BF_3 counter 3 แบบ โดยใช้บอริกแอซิกรวมกับน้ำในอัตราส่วนผสม 2 : 6 โดยปริมาตร เป็นวัสดุสำหรับ ดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอน



รูปที่ 23 กราฟเปรียบเทียบจำนวน count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอน เมื่อวางหัววัด BF_3 counter 3 แบบ โดยใช้ Borated paraffin เป็นวัสดุสำหรับดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอน

สรุปผลการทดลอง และ ข้อเสนอแนะ

1. สรุปลักษณะและคุณสมบัติของนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอนแบบอะเมอร์เซียม - เบอริลเลียม

ขนาด 1 คูรี

ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบอะเมอร์เซียม - เบอริลเลียม ขนาด 1 คูรี ให้นิวตรอนเร็วออกมา แต่นิวตรอนที่นำไปใช้ประโยชน์ส่วนมากเป็นเทอร์มาลนิวตรอน ทั้งนี้ในการทดลองนี้จึงใช้พาราฟินซึ่งเป็นวัสดุที่ประกอบไปด้วยอะตอมของธาตุไฮโดรเจนเป็นจำนวนมาก เมื่อเทียบกับเขาวางขวางทางเดินของนิวตรอน เพื่อให้เกิดการชนกันอย่างอีลาสติค ความเร็วของนิวตรอนก็จะลดลง ทำให้จำนวนเทอร์มาลนิวตรอนไ้มากขึ้น ก็จะได้เห็นได้จากเมื่อใช้พาราฟิน 1 แผ่น กับ จะได้จำนวนเทอร์มาลนิวตรอนมากขึ้น และเมื่อใช้พาราฟิน 2 แผ่นก็จะทำให้ได้เทอร์มาลนิวตรอนมากที่สุด ซึ่งหมายความว่าพาราฟินทำให้นิวตรอนเร็วกลายเป็นเทอร์มาลนิวตรอนได้เกือบหมด แต่เนื่องจากพาราฟินมีภาคัควางสำหรับการดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอนด้วย ดังนั้นเมื่อวางแผ่นพาราฟินตอกลงไปอีก พาราฟินจะจับเทอร์มาลนิวตรอนบางส่วนไว้ทำให้จำนวนเทอร์มาลนิวตรอนทั่วห้องค่อย ๆ ลดลง จึงผลการทดลองในตาราง 4 และรูปที่ 15 แสดงหลังจากที่ใช้พาราฟิน 2 แผ่น กับนิวตรอนแล้ววางตอกลงไปด้วยวัสดุสำหรับดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอน เช่น โบรเร็คซ์, บอริกแอซิด หรือบอริกแอซิดรวมกับน้ำ ซึ่งมีภาคัควางสำหรับการดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอนสูงกว่าพาราฟิน จะทำให้จำนวนเทอร์มาลนิวตรอนได้ลดลงกว่าที่ใช้พาราฟินมาก ก็จะได้เห็นได้จากตาราง 10 - 15 และรูปที่ 18 - 23

2. สรุปผลการทดลองจากการวางหัววัด BF_3 counter 3 แบบ

จากผลการทดลองทั้งในตาราง 3, 4, 8 - 15 และกราฟในรูปที่ 13, 15, 16 - 23 พบว่าข้อมูลทั่วๆไปโดยใช้การวางหัววัด BF_3 counter แบบที่ 1 คือวางขวางกับแนวทางเดินของนิวตรอน จะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้น ๆ ลง ๆ ไม่แน่นอน ไม่ค่อยตรง-

กับทฤษฎีนี้ เพราะถ้าเป็นไปตามทฤษฎีเมื่อเพิ่มความหนาของวัสดุสำหรับดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอนขึ้น จำนวนเทอร์มาลนิวตรอนที่วัดได้ควรจะลดลง ไม่ใช่ขึ้น ๆ ลง ๆ เปลี่ยนแปลงอย่างไม่แน่นอน ส่วนการวางแบบที่ 2 คือ วางหัววัด BF_3 counter ตามแนวเดียวกับแนวทางเดินของนิวตรอน ขบวนการเปลี่ยนแปลงขึ้น ๆ ลง ๆ ไม่มากนัก ใกล้เคียงกับทฤษฎีมากขึ้น สำหรับการวางแบบที่ 3 คือวางหัววัดตามแนวเดียวกับแนวทางเดินของนิวตรอน และทุบทรงกระบอกด้านข้างด้วยแคดเมียม ได้ผลการทดลองเป็นไปตามทฤษฎี คือวัดจำนวนเทอร์มาลนิวตรอนได้น้อยลงเรื่อย ๆ สาเหตุที่เป็นเช่นนั้นเพราะว่าตนกำเนิดนิวตรอนนอกจากจะปล่อยนิวตรอนออกมาทางด้านหน้าทาง BF_3 counter แล้ว ยังปล่อยออกมาในด้านหลัง ๆ ทุกด้าน แต่การทดลองทำในห้องที่ไม่ทึบนัก นิวตรอนจึงไปชนกับผนังห้อง และมีบางส่วนสะท้อนกลับมา เมื่อวางหัววัดแบบที่ 1 ซึ่งมีพื้นที่สำหรับรับนิวตรอนไผ่มาก หัววัดจึงรับนิวตรอนพวกนี้เข้าไปด้วย จึงทำให้ค่าหัววัดไผ่มากกว่าที่เป็นจริง เมื่อวางหัววัดแบบที่ 2 พื้นที่ในการรับนิวตรอนพามาจากทางด้านบนน้อยลง ผลการทดลองหัววัดจึงใกล้เคียงทฤษฎีมากขึ้น เมื่อวางหัววัดแบบที่ 3 มีแผ่นแคดเมียมหุ้มด้านข้าง นิวตรอนที่สะท้อนมาจากทางด้านบนเข้ามาเข้าหัววัดได้น้อยลง นิวตรอนที่นับได้ส่วนใหญ่จึงเป็นนิวตรอนพามาจากทางด้านหน้า ผลการทดลองที่ได้อาจใกล้เคียงกับทฤษฎีมากกว่า 2 แบบแรก

3. การป้องกันอันตรายจากเทอร์มาลนิวตรอน

ปริมาณที่จะรับเทอร์มาลนิวตรอนไผ่มากที่สุด โดยไม่เป็นอันตราย อยู่ที่ค่าตาราง 16

ตาราง 16 แสดงปริมาณไผ่มากที่สุดที่จะรับรังสีได้โดยไม่เป็นอันตราย

รังสี	m rem/week
เอ็กซ์ หรือ แกมมา	300
เทอร์มาลนิวตรอน	300
นิวตรอนเร็ว	300

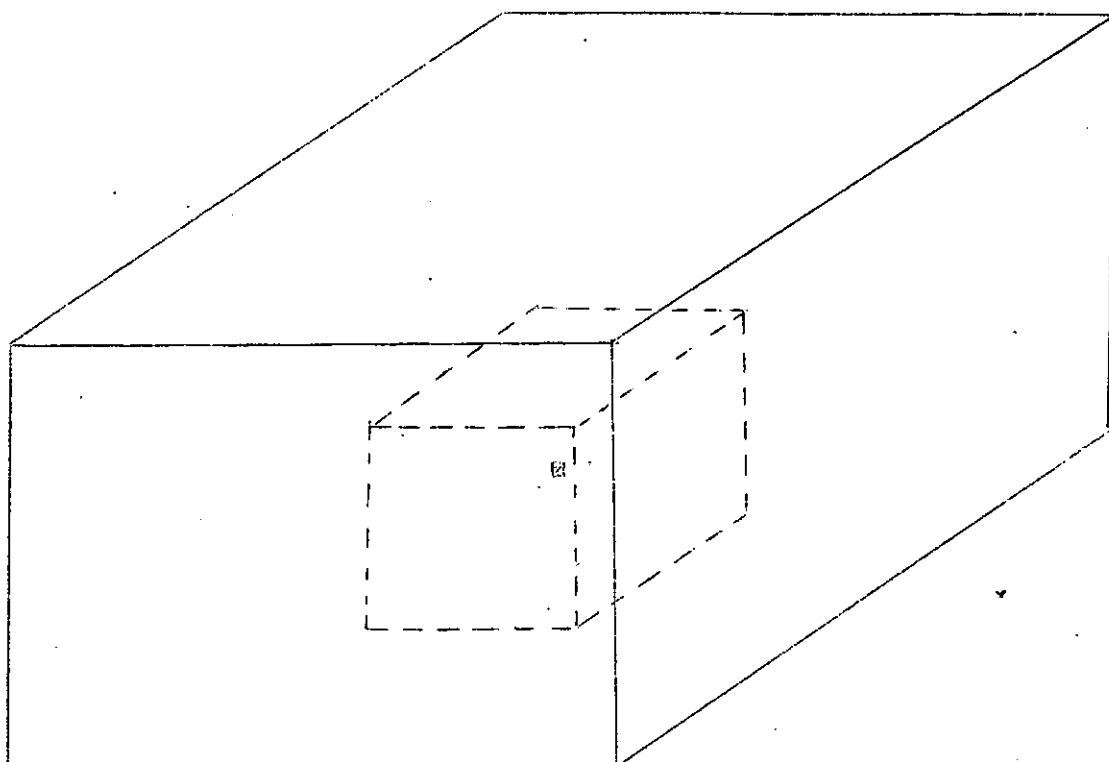
ดังนั้นจะพบว่า ถ้าพิจารณาให้พาราฟินเป็นตัวกั้นนิวตรอน ความหนาของแผ่นพาราฟินที่จะช่วยในปลอดภัยของหนาน้อย 30.48 cm จากต้นกำเนิดนิวตรอน เพราะที่ความหนาของนิวตรอนคือเรฟมีค่า 4.9×10^{-7} rem/sec หรือ 296.35 m rem/week ซึ่งอยู่ในปริมาณที่จะรับได้โดยปลอดภัย แต่จากตาราง 10 - 14 ซึ่งสามารถดัดแปลงมาเป็นตาราง 17 จะพบว่า ถ้าใช้พาราฟิน 2 แผ่นวางกันเพื่อลดความเร็วของนิวตรอนลง จากนั้นวางคอกวยโบเร็กซ์, บอริกแอซิด หรือ บอริกแอซิดรวมกับน้ำ จะใช้ความหนาลดลงจากที่ใช้พาราฟินอย่างเดียวมาก เพราะวัสดุเหล่านี้มีภาคทศขวางสำหรับการดูดกลืน เทอร์มาลนิวตรอนสูงกว่าพาราฟินดังกล่าวนำแล้ว และเมื่อเปรียบเทียบผลจากการทำการทดลองในตาราง 10 - 15 และกราฟรูปที่ 18 - 23 พบว่า บอริกแอซิด และโบเร็กซ์ สามารถป้องกันอันตรายจากเทอร์มาลนิวตรอนได้ดีกว่า Borated paraffin เสียอีก ส่วนบอริกแอซิดรวมกับน้ำให้ผลในการป้องกันอันตรายได้ใกล้เคียงกับ Borated paraffin

ตาราง 17 แสดงการเปรียบเทียบนิวตรอนโคสเรทของวัสดุสำหรับकुकल्ल
เทอร์มาลนิวตรอน ที่ความหนาต่าง ๆ

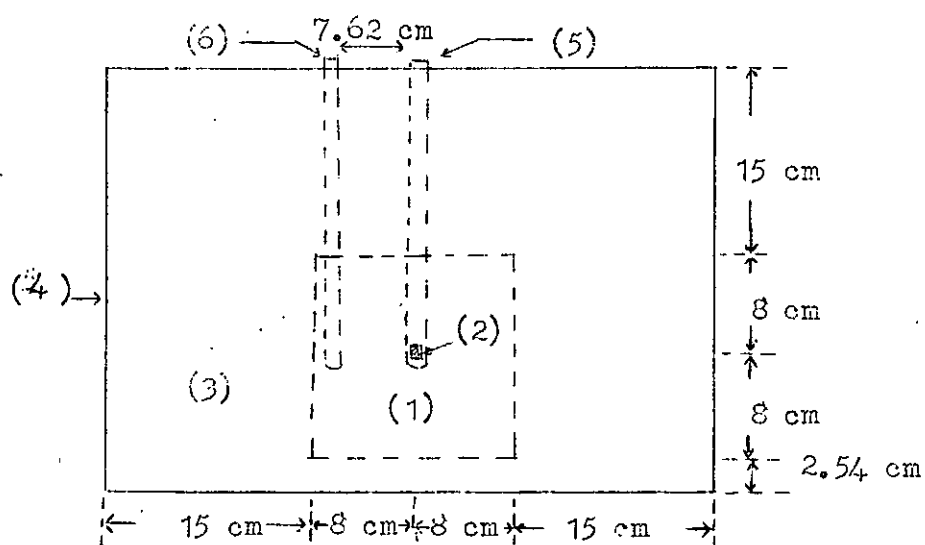
วัสดุสำหรับकुकल्ल เทอร์มาลนิวตรอน	ความหนา (cm)	นิวตรอนโคสเรท (n/cm/week)
บอริกแอซิก	2.54	2.9×10^{-9}
	10.16	5.17×10^{-43}
โบรเร็คซ์	2.54	8.77×10^{-6}
	10.16	4.38×10^{-34}
บอริกแอซิกรวมกับน้ำ ในอัตราส่วน 2 : 6 โดยปริมาตร	11.63	5.14×10^{-11}
บอริกแอซิกรวมกับน้ำ ในอัตราส่วน $1 \frac{1}{2} : 6 \frac{1}{2}$ โดยปริมาตร	11.63	9.86×10^{-8}
บอริกแอซิกรวมกับน้ำ ในอัตราส่วน 1 : 7 โดยปริมาตร	11.63	2.12×10^{-4}

4. การออกแบบที่เก็บต้นกำเนิดนิวตรอน

จากตาราง 17 จะพบว่า บอริกแอซิกสามารถป้องกันอันตรายจากนิวตรอนโคสเรทต่ำสุดรองลงมาคือโบรเร็คซ์ เพราะความหนาเพียง 2.54 cm ก็ทำให้ค่านิวตรอนโคสเรทต่ำกว่าค่าสูงสุดที่คนจะรับได้ ดังในตาราง 16 เป็นจำนวนมาก ดังนั้นในการออกแบบที่เก็บต้นกำเนิดนิวตรอนจึงควรใช้พาราฟินรวมกับบอริกแอซิก หรือบอริกแอซิกรวมกับโบรเร็คซ์ เพราะสามารถกันเทอร์มาลนิวตรอนได้ดี ทำให้อายุการใช้งานยาว และมีราคาถูกกว่า Borated paraffin มาก ซึ่งในการออกแบบที่เก็บต้นกำเนิดนิวตรอนควรออกแบบในลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม เพราะสามารถสร้างได้ง่าย ดังรูปที่ 24



ก.



ข.

รูปที่ 24 แสดงที่เกนบนทำเนียบวทรชนเป็นรูปสี่เหลี่ยม

ก. เมฆของทะเลแสง

ข. เมฆของคานขวาง

จากรูปที่ 24 (1) คือ แผงพาราฟินขนาด $16 \times 16 \times 16 \text{ cm}^3$

(2) คือ ตะกั่วเนกนิวตรอนแบบอะเมอริเซียม - เบอริลเลียม ขนาด 1 คูรี ใส่ไว้ในใจกลางของแผงพาราฟิน

(3) คือ วัสดุสำหรับดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอน อาจใช้บอริกแอซิกหรือโบรเร็กซ์ก็ได้

(4) คือ ภาชนะบรรจุบอริกแอซิกหรือโบรเร็กซ์ ซึ่งอาจทำด้วยพลาสติก, โลหะ หรือไม้ก๊อก มีขนาดกว้าง 46 cm ยาว 46 cm และสูง 33.54 cm สาเหตุที่ให้ความหนาทางด้านข้างและด้านบนมีขนาด 15 cm (จากรูป 24 ข.) ทั้ง ๆ ที่ความจริง บอริกแอซิกหรือ โบรเร็กซ์ หนาเพียง 2.54 cm ก็สามารถป้องกันอันตรายจากเทอร์มาลนิวตรอนได้เป็นอย่างดีแล้วนั้น ก็เพราะว่า ตะกั่วเนกนิวตรอนแบบอะเมอริเซียม - เบอริลเลียม ขนาด 1 คูรี นั้น นอกจากจะให้นิวตรอนออกมาแล้ว ยังปล่อยรังสีแกมมาออกมาด้วย ซึ่งจากการใช้ Gamma survey meter ทดลองวัดพบว่า ที่ระยะทางประมาณ 15 cm ขึ้นไป เครื่องจะวัดบอกขนาดที่มนุษย์จะรับรังสีแกมมาจากตะกั่วเนกนิวตรอนขนาด 1 คูรีนี้ได้โดยปลอดภัย ดังนั้นจึงให้ความหนาของบอริกแอซิกหรือโบรเร็กซ์ทางด้านข้างและด้านบนเป็น 15 cm เพื่อเป็นการป้องกันอันตรายให้แก่มนุษย์เอาตะกั่วเนกนิวตรอนไปใช้ ไม่ให้เขาไปกลืนตะกั่วเนกนิวตรอนไ้มากกว่าระยะที่ปลอดภัย

(5) คือ ห่อซึ่งอาจทำด้วยพลาสติก ใช้เป็นทางสำหรับนำตะกั่วเนกนิวตรอนใส่ไปใจกลางของแผงพาราฟิน หรือนำตะกั่วเนกนิวตรอนออกจากใจกลางของแผงพาราฟิน ซึ่งห่อจะมีหลอดพลาสติกปลายลงปิดันหนึ่งสวมไว้พอดี และหลอดที่จมน้ำสามมุนี ภายในหลอดกลางบรรจุพาราฟินสูง 8 ซม. ต่อจากนั้นขึ้นมาเป็นเมงบอริกแอซิกหรือโบรเร็กซ์ เหตุที่ต้องมีหลอดจมน้ำสามมุนีเอาไว้ก็เพื่อเป็นการป้องกันอันตรายอันจะเกิดจากการที่นิวตรอนวิ่งตามท่อขึ้นมา

(6) คือ ห่อที่ทำด้วยพลาสติกใช้เป็นทางสำหรับนำวัสดุที่ต้องการใส่ลงไปในเพื่อไปขวางทางเดินของเทอร์มาลนิวตรอน ทำให้เกิดการชนกันขึ้น

จากการออกแบบที่เก็บตะกั่วเนกนิวตรอนดังกล่าว จะทำให้สามารถได้เทอร์มาลนิวตรอนมาใช้ประโยชน์ตามต้องการ และโดยปลอดภัย

ขอเสนอแนะ

1. เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ถูกต้องและแม่นยำกว่าที่ทดลองในครั้งนี้ ควรใช้การสร้างเครื่องปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้ค่าคงที่ตลอดเวลา เพราะจากการทำการทดลองในครั้งนี้ ผู้ทำการทดลองได้ทำการวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้า พบว่าไม่คงที่ มีการเปลี่ยนแปลงระหว่าง 220 - 240 โวลท์ ซึ่งมีผลทำให้การวัด count/sec ของเทอร์มาลนิวตรอนในการทดลองครั้งนี้คลาดเคลื่อนไปบ้าง
2. ผู้ทำการทดลองควรมีเวลาในการทำการทดลองนาน ๆ เพื่อให้จะได้สามารถทำการทดลองซ้ำหลาย ๆ ครั้ง ข้อมูลที่ได้จะได้มีความถูกต้องและแม่นยำยิ่งขึ้น
3. ในการทำการทดลองเรื่องนี้ ควรใช้ห้องที่มีขนาดกว้างมาก ๆ เพราะถ้าห้องแคบ ผนังห้องจะช่วยสะท้อนนิวตรอนที่พุ่งออกทางภายนอก ๆ ให้กลับมาเข้าหัววัด BF_3 counter ทำให้จำนวน count/sec หัววัดได้มากกว่าที่ควรจะเป็น และทำให้ค่าหัววัดได้ขึ้น ๆ ลง ๆ ไม่แน่นอน ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ได้แก้ไขโดยวางหัววัด BF_3 counter ตามแนวเดียวกับแนวทางเดินของนิวตรอน และหุ้มภายนอกด้วยแผ่นตะกั่ว เพื่อไม่ให้เทอร์มาลนิวตรอนเข้าหัววัดได้เฉพาะบริเวณคอนปลายเท่านั้น การทดลองจึงได้ผลแน่นอนและถูกต้องขึ้นยิ่งขึ้น ถ้าใช้ชีวิตคงที่ตลอดเวลา และทำการทดลองในห้องกว้าง ๆ ควบ ผลการทดลองที่ได้ย่อมถูกต้องและแม่นยำกว่าอย่างแน่นอน.

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- ปรีชา เทียนสมประสงค์ การกระจายของนิวตรอนจากตัวกัมมันตภาพรังสีในน้ำ ปรินธิพนธ์
วศ.ม. พุทธलगรณมหาวิทยาลัย 2517, 61 หน้า อักสำเนา.
- สุนันทา ภักธจักร การกระจายของนิวตรอนความเร็วสูงและความเร็วต่ำรอบ ๆ เครื่องปฏิกรณ์
ปรมาณู ปรินธิพนธ์ วศ.ม. พุทธलगรณมหาวิทยาลัย 2517, 47 หน้า อักสำเนา.
- Glasstone, Samuel, Principles of Nuclear Reactor Engineering,
D. Van Nostrand Co., New York, 1957, 861 pp.
- Glasstone, Samuel and Edlund, Milton C., The Element of Nuclear
Reactor Theory, D. Van Nostrand Co., New York, 1952, 416 pp.
- Glasstone, Samuel and Sesonske, Alexander, Nuclear Reactor Engineering,
D. Van Nostrand Co., New York, 1967, 830 pp.
- Hughes, D.J., Pile Neutron Research, Addison-Wesley Publishing Co.,
New York, 1953, 386 pp.
- Murray, Raymond L., Nuclear Reactor Physics, Prentice-Hall, New York,
1957, 317 pp.
- Price, William J., Nuclear Radiation Detection, Mc Graw-Hill Book
Company, Inc., New York, 1958, 382 pp.
- Rockwell, T., Reactor Shielding Design Manual, D. Van Nostrand Co.,
Toronto, 1956, 365 pp.
- Yuth Akkaramas, Neutron Measurement, Master's Thesis, Chulalongkorn
University, 1968 53 pp.