บทที่ 4

ผลการศึกษาจากการคำนวณปัญหาต่าง ๆ

ในการใช้โปรแกรม NEUTRON และ DOSE ซึ่งดัดแปลงจากโปรแกรม SABINE-3 มาคำนวณปัญหาต่าง ๆ บนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ IBM PC จะแยกเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นแรกเป็นการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม โดยทำการคำนวณปัญหาทดสอบ (Test case) แล้วเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้กับผลการคำนวณจากโปรแกรม SABINE-3 บน PRIME ขั้นที่สองเป็นการใช้โปรแกรมคำนวณปัญหาที่เกี่ยวกับแหล่งกำเนิดนิวตรอน (neutron source) และเครื่องกำเนิดนิวตรอน (neutron generator) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของโปรแกรมว่าสามารถประยุกต์ใช้งานได้หรือไม่

รายละเอียดแต่ละขั้นตอนดังกล่าว มีดังต่อไปนี้

4.1 การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม

ปัญหาทดสอบในที่นี้ แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่ใช้ คือ แคลิฟอร์เนียม ซึ่งให้นิวตรอนพลังงานสูงจากปฏิกิริยาฟิชชันตามธรรมชาติ (spontaneous fission) มีครึ่งชีวิต 2.65 ปี เกิดปฏิกิริยาฟิชชัน 3.1 เปอร์เซนต์ ฉาบเป็นแผ่นบาง ๆ อยู่บนเหล็กไร้สนิม (stainless steel) ซึ่งจะดูดจับกากที่เกิดจากฟิชชันไว้เป็นส่วนใหญ่

4.1.1 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ [6]

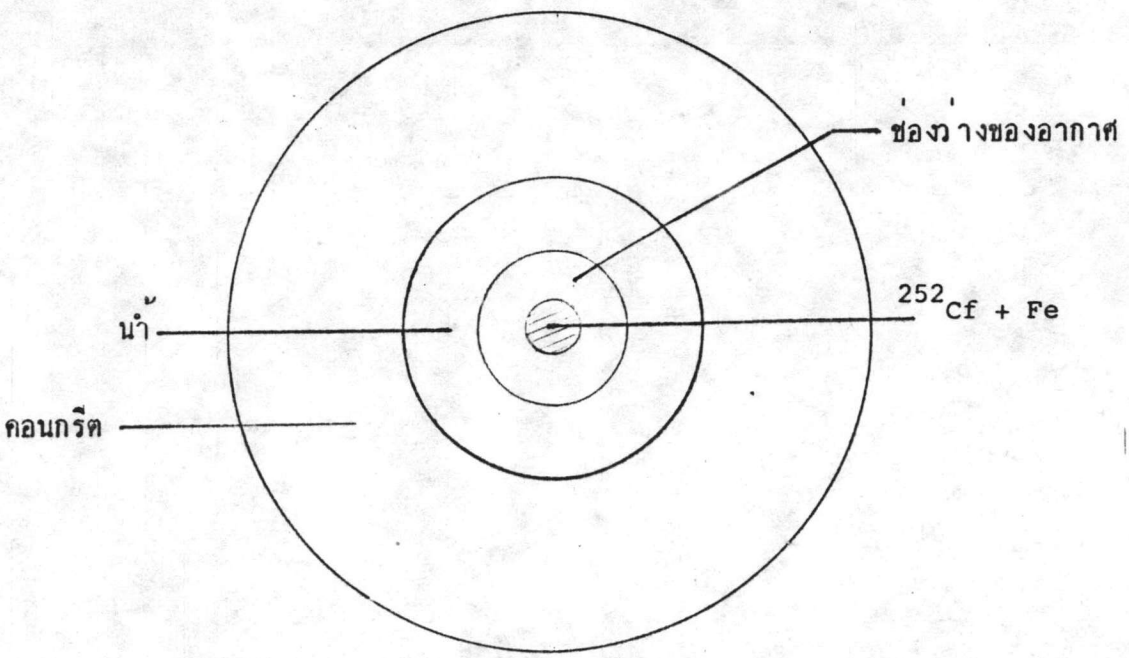
แหล่งกำเนิดนิวตรอน มีอัตราการเกิดฟิชชัน 1.213×10^{7} ครั้งต่อลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาทีโดยบริเวณแหล่งกำเนิด แบ่งเป็น 2 บริเวณ คือ บริเวณที่ 1 ประกอบด้วย เหล็ก และ แคลิฟอร์เนียม มีความหนา 2 เซนติเมตร ความหนาแน่น 5.0 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร บริเวณที่ 2 เป็นช่องว่างของอากาศ (air gap) มีความหนา 3

เซนติเมตร ความหนาแน่น 0.001 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ กำหนดให้มีแหล่งกำเนิดเฉพาะบริเวณที่ 1 เท่านั้น

บริเวณเกราะกำบัง แบ่งออกเป็น 2 บริเวณ คือ บริเวณที่ 1 เป็นน้ำ มีความหนา 10 เซนติเมตร ความหนาแน่น 1.0 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อีกบริเวณหนึ่งเป็นคอนกรีต มีความหนา 100 เซนติเมตร มีความหนาแน่น 2.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

รูปทรงของแหล่งกำเนิด และเกราะกำบังรังสีที่เลือกใช้ในการคำนวณเป็นทรงกลม และบริเวณที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมดมี 4 บริเวณ คือ เป็นบริเวณแหล่งกำเนิด และบริเวณเกราะกำบังอย่างละ 2 บริเวณ การคำนวณบิลอัพแฟคเตอร์เลือกใช้วิธี interpolation

ข้อมูลที่ป้อนเข้าเครื่อง (input data) ของปัญหาทดสอบ ได้รวบรวมแสดงไว้ในตารางที่ ข-1 ภาคผนวก ข



รูปที่ 4.1 ลักษณะของปัญหาทดสอบ

4.1.2 ผลการคำนวณ

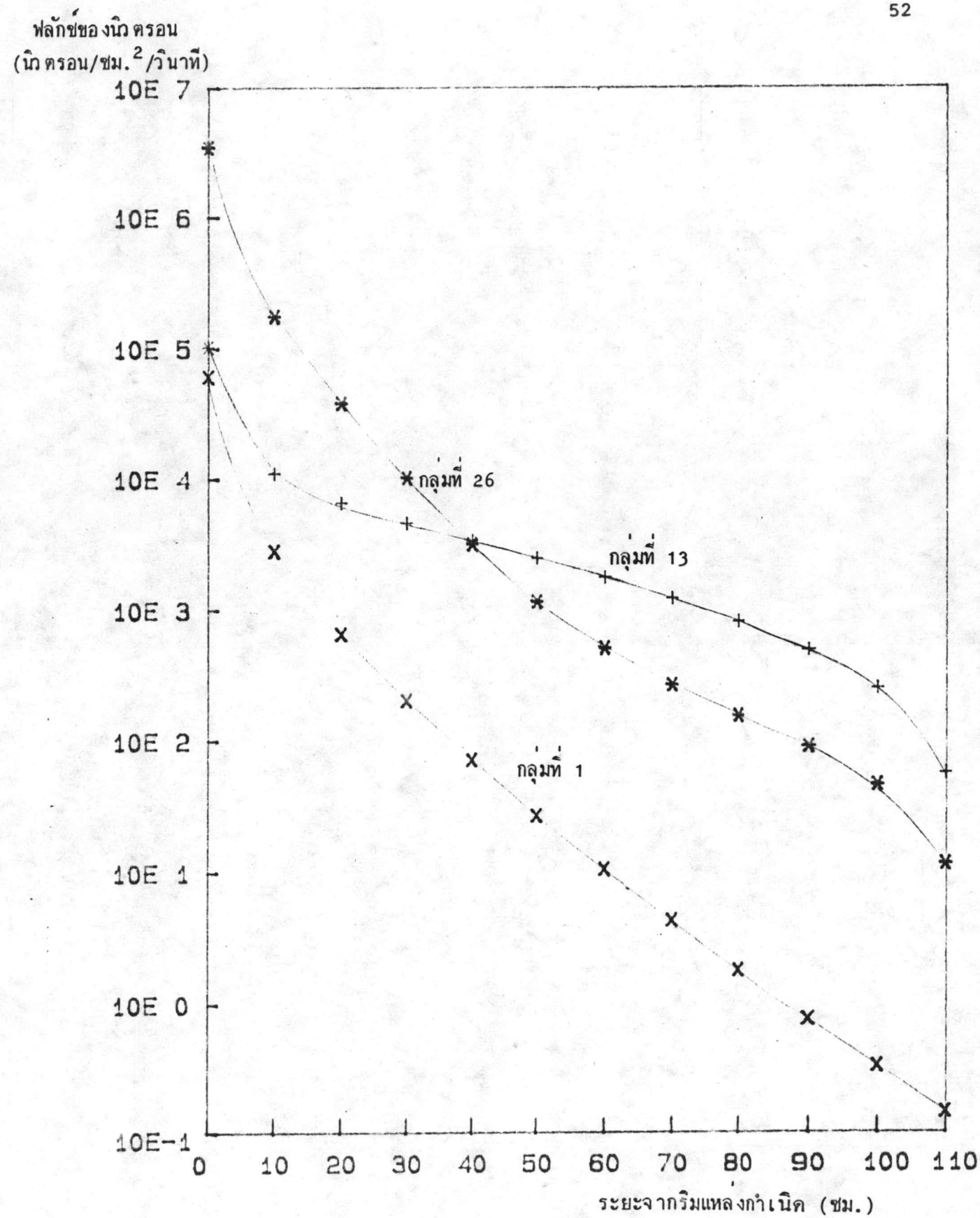
ค่าฟลักซ์ของนิวตรอน และค่าโดส เมื่อคำนวณด้วยโปรแกรม NEUTRON และ DOSE บน IBM PC ให้ค่าตรงกันกับค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรม SABINE-3 บน PRIME ทุกประการ ดังผลการคำนวณที่แสดงไว้ภาคผนวก ข. ยกเว้นฟลักซ์ของนิวตรอนกลุ่มที่ 1 ที่ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี ค่าที่คำนวณได้โดยเครื่อง IBM PC จะแตกต่างจากค่าที่คำนวณได้โดยเครื่อง PRIME ที่ทศนิยมตำแหน่งสุดท้าย (ตำแหน่งที่ 3) ซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากการใช้ค่าคงที่ในเครื่องแตกต่างกันบ้าง หรือการปัดตำแหน่งทศนิยมของเครื่องไม่เหมือนกัน ค่าอื่นทั้งหมดคำนวณได้เหมือนกันทุกประการ

ผลการคำนวณอย่างละเอียดได้รวบรวมแสดงไว้ในตารางที่ ข-2 และตารางที่ ข-3 ภาคผนวก ข. สำหรับค่าฟลักซ์ของนิวตรอนที่คำนวณได้ในกลุ่มพลังงานที่ 1, 13 และ 26 และค่าโดส ที่ระยะต่าง ๆ แสดงด้วยกราฟในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

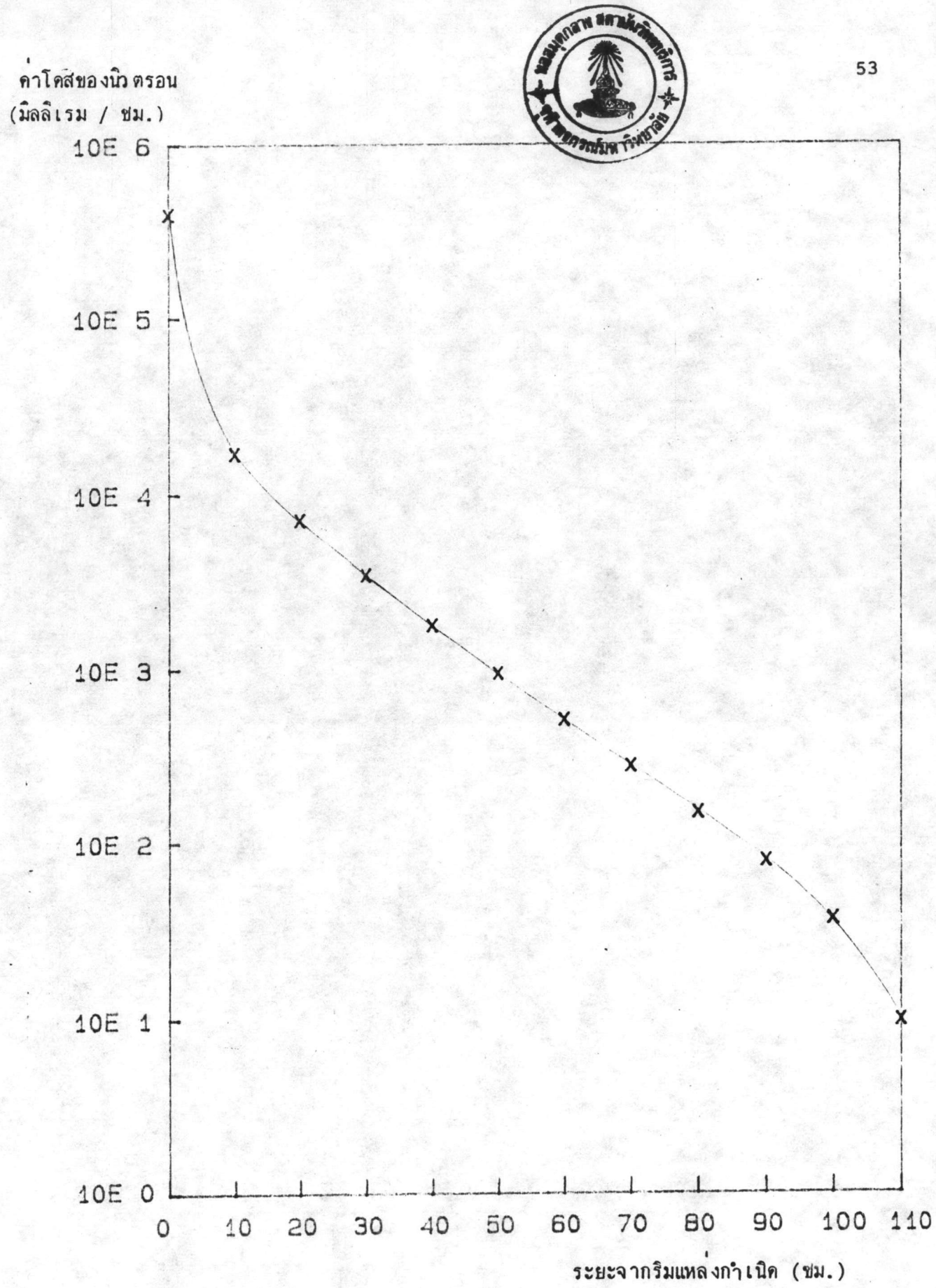
ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า โปรแกรม NEUTRON และ DOSE ที่ดัดแปลงและพัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปใช้แก้ปัญหาอื่น ๆ ได้ ในส่วนที่เกี่ยวกับการคำนวณฟลักซ์ของนิวตรอนและโดสในทำนองเดียวกันกับโปรแกรมเดิม (SABINE-3)

หลังจากที่ได้ทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม NEUTRON และ DOSE แล้ว ได้เลือกนำปัญหาการคำนวณค่าฟลักซ์ของนิวตรอน และค่าโดสในเกราะกำบังรังสีเนื่องจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน และเครื่องกำเนิดนิวตรอนมาทำการคำนวณ เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถของโปรแกรม ในการนำไปใช้ในการแก้ปัญหาอื่น ๆ

เนื่องจากโปรแกรม SABINE-3 เดิม เขียนขึ้นเพื่อคำนวณปัญหาในกรณีที่แหล่งกำเนิดเป็นเตาปฏิกรณ์ หรือแหล่งกำเนิดที่เกิดฟิชชันขึ้นเองเท่านั้น ดังนั้นโปรแกรม NEUTRON และ DOSE ที่ดัดแปลง และพัฒนาเพิ่มเติมก็ต้องกำหนดลักษณะของแหล่งกำเนิดเป็นอย่างเดียวกัน ในกรณีที่แหล่งกำเนิดไม่มีส่วนของฟิชชันเข้ามาเกี่ยวข้อง ต้องนำตัวเลข 2.46 ไปหารค่า



รูปที่ 4.2 ฟลักซ์ของนิวตรอนจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน Cf-252 ในเกราะกำบังรังสี



รูปที่ 4.3 ค่าโคสของนิวตรอนจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน Cf-252 ในเกราะกำบังรังสี

ความหนาแน่นนิวตรอนก่อน เพื่อให้ได้ค่าอัตราการเกิดฟิชชันที่จะนำมาใช้ในการคำนวณในโปรแกรมดังกล่าว

4.2 การวิเคราะห์ปัญหาการลดลงของนิวตรอนในเกราะกำบังเนื่องจากต้นกำเนิดนิวตรอน

4.2.1 ลักษณะของแหล่งกำเนิดนิวตรอนและเกราะกำบัง

ในปัญหานี้ได้เลือกต้นกำเนิดนิวตรอนเป็น Pu-238/Be ซึ่งให้นิวตรอนโดย Pu สลายตัวให้แอลฟา ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับ Be ได้นิวตรอนที่มีความหนาแน่นนิวตรอนแตกต่างกันในแต่ละกลุ่มพลังงาน [6] ดังแสดงในตารางที่ 4.1

สมการการเกิดนิวตรอนจากปฏิกิริยา (α,n) เป็นไปตามสมการ (4.1)

$$ {}^{9}_{4}Be + {}^{4}_{2}He \longrightarrow {}^{12}_{6}C + {}^{1}_{0}n + 5.71\ MeV \qquad (4.1) $$

ในการคำนวณนี้ ได้พิจารณาความหนาแน่นนิวตรอนเป็น 2 แบบ คือ ข้อมูลชุดหนึ่งสมมติว่า Pu/Be ให้นิวตรอนทุกกลุ่มพลังงานมีค่าเท่ากัน คือ 2.078×10^{4} นิวตรอนต่อลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที ดังนั้นค่าความหนาแน่นนิวตรอนทุกกลุ่มพลังงาน (13 กลุ่ม) มีค่า = 2.70×10^{5} นิวตรอนต่อลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที เมื่อคิดเป็นอัตราการเกิดฟิชชันจะมีค่าเท่ากับ 1.098×10^{5}ครั้งต่อลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที ส่วนข้อมูลอีกชุดหนึ่งนั้นคิดค่าความหนาแน่นนิวตรอนในกลุ่มพลังงานต่าง ๆ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.899×10^{5} นิวตรอนต่อลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที เมื่อคิดเป็นอัตราการเกิดฟิชชันมีค่าเท่ากับ 1.585×10^{5} ครั้งต่อลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

บริเวณแหล่งกำเนิดที่ใช้ในการคำนวณ แบ่งออกเป็น 2 บริเวณ โดยบริเวณทั้งสองประกอบด้วย Pu/Be ที่มีความหนาบริเวณละ 0.7 เซนติเมตร มีความหนาแน่น 3.78 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และกำหนดให้มีแหล่งกำเนิดเฉพาะบริเวณที่ 2 เท่านั้น

บริเวณเกราะกำบังรังสีที่พิจารณามีบริเวณเดียวเป็นคอนกรีต ที่มีความหนาแน่น

ตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นนิวตรอนในกลุ่มพลังงานต่าง ๆ ของ Pu-238/Be

กลุ่มพลังงานที่	ความหนาแน่นนิวตรอน (นิวตรอน/ซม.^{3}/วินาที)
1	-
2	-
3	-
4	-
5	-
6	-
7	2.90×10^3
8	6.83×10^3
9	1.49×10^4
10	2.25×10^4
11	2.90×10^4
12	5.55×10^4
13	2.43×10^4
14	4.53×10^4
15	2.82×10^4
16	4.17×10^4
17	3.07×10^4
18	3.47×10^4
19	5.34×10^4

2.37 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร การคำนวณนี้ได้เลือกคำนวณที่ความหนาต่างกัน 2 ค่าคือ 70 และ 100 เซนติเมตร

4.2.2 เงื่อนไขในการคำนวณ

รูปทรงของแหล่งกำเนิดและรูปทรงของเกราะกำบังรังสีที่เลือกใช้เป็นรูปทรงกลม การคำนวณบิลอัพแฟคเตอร์บริเวณแหล่งกำเนิด และบริเวณเกราะกำบังรังสี เลือกใช้วิธี interpolation และ Kitazume ตามลำดับ

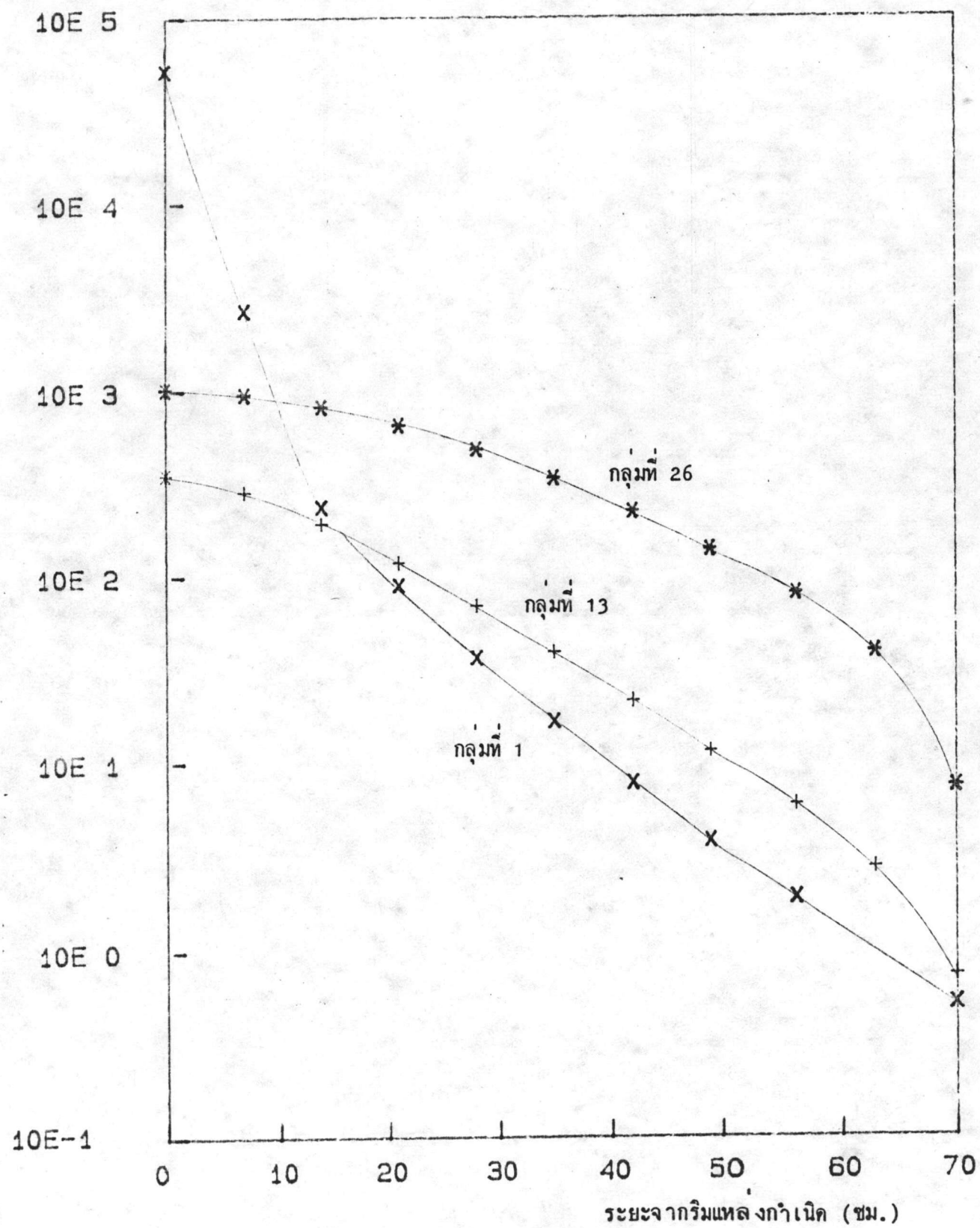
ข้อมูลที่ป้อนเข้าเครื่องของต้นกำเนิดนิวตรอนนี้ ได้แสดงไว้ในตารางที่ ข-4 , ข-6 , ข-8 และ ข-10 ตามลำดับ ในภาคผนวก ข

4.2.3 ผลการคำนวณ

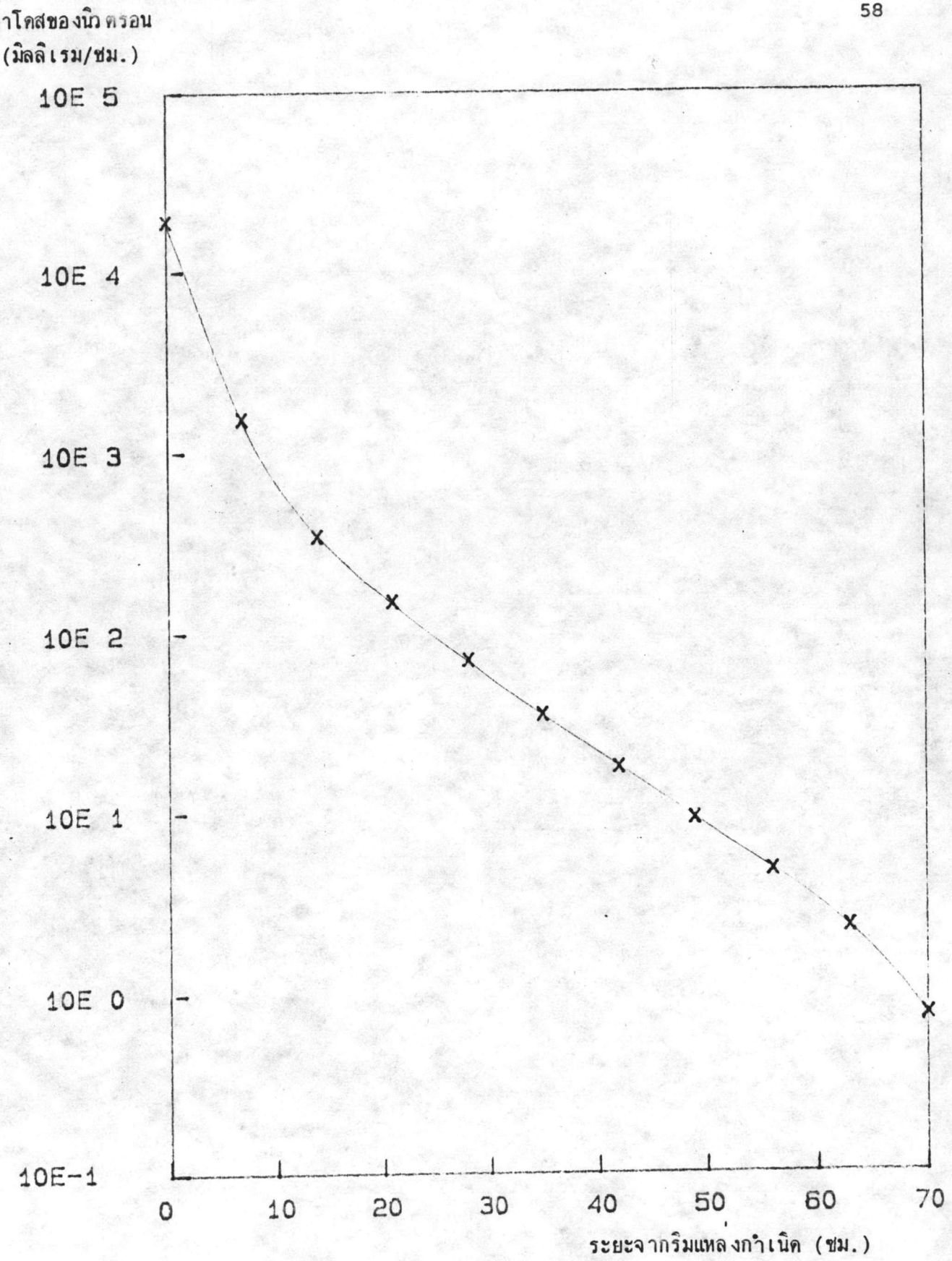
ในการคำนวณปัญหาเกี่ยวกับแหล่งกำเนิดนิวตรอน Pu/Be ได้แยกคำนวณเป็น 2 กรณี ดังนี้

4.2.3.1 ทำการคำนวณเมื่อกำหนดให้ แหล่งกำเนิดให้นิวตรอนเฉลี่ยทุกกลุ่มพลังงานมีค่าเท่ากันเท่ากับ 2.078×10^4 นิวตรอนต่อลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที โดยคำนวณเมื่อความหนาของคอนกรีตเท่ากับ 70 และ 100 เซนติเมตรตามลำดับ ลักษณะของแหล่งกำเนิด และรูปทรงของเกราะกำบังเป็นทรงกลม ผลการคำนวณค่าฟลักซ์ของนิวตรอนของกลุ่มพลังงานที่ 1 , 13 และ 26 และค่าโคส ที่ระยะต่าง ๆ แสดงด้วยกราฟในรูปที่ 4.4 , 4.5 , 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ ส่วนผลการคำนวณที่ริมนอกสุดของเกราะกำบังแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 และแสดงผลการคำนวณอย่างละเอียดในตารางที่ ข-5 และตารางที่ ข-7 ภาคผนวก ข.

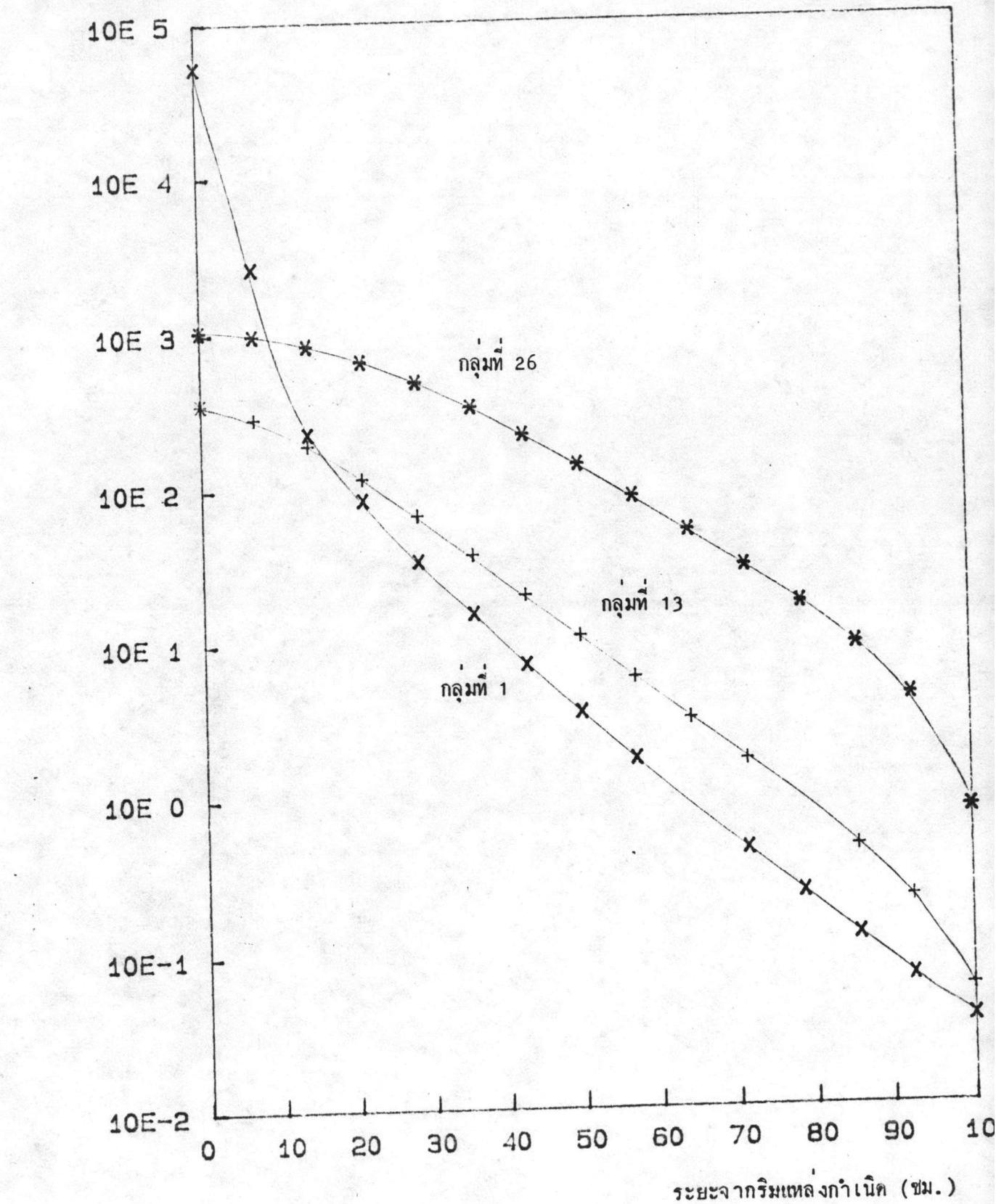
4.2.3.2 ทำการคำนวณ เมื่อกำหนดให้ แหล่งกำเนิดให้นิวตรอนเป็นสเปคตรัม คิดเป็นอัตราการเกิดฟิชชันทั้งหมดเท่ากับ 1.585×10^5 ครั้งต่อลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที โดยคำนวณเมื่อความหนาของคอนกรีตเท่ากับ 70 และ 100 เซนติเมตรตามลำดับ ลักษณะของแหล่งกำเนิด และรูปทรงของเกราะกำบังเป็นทรงกลม ผลการคำนวณค่าฟลักซ์ของ



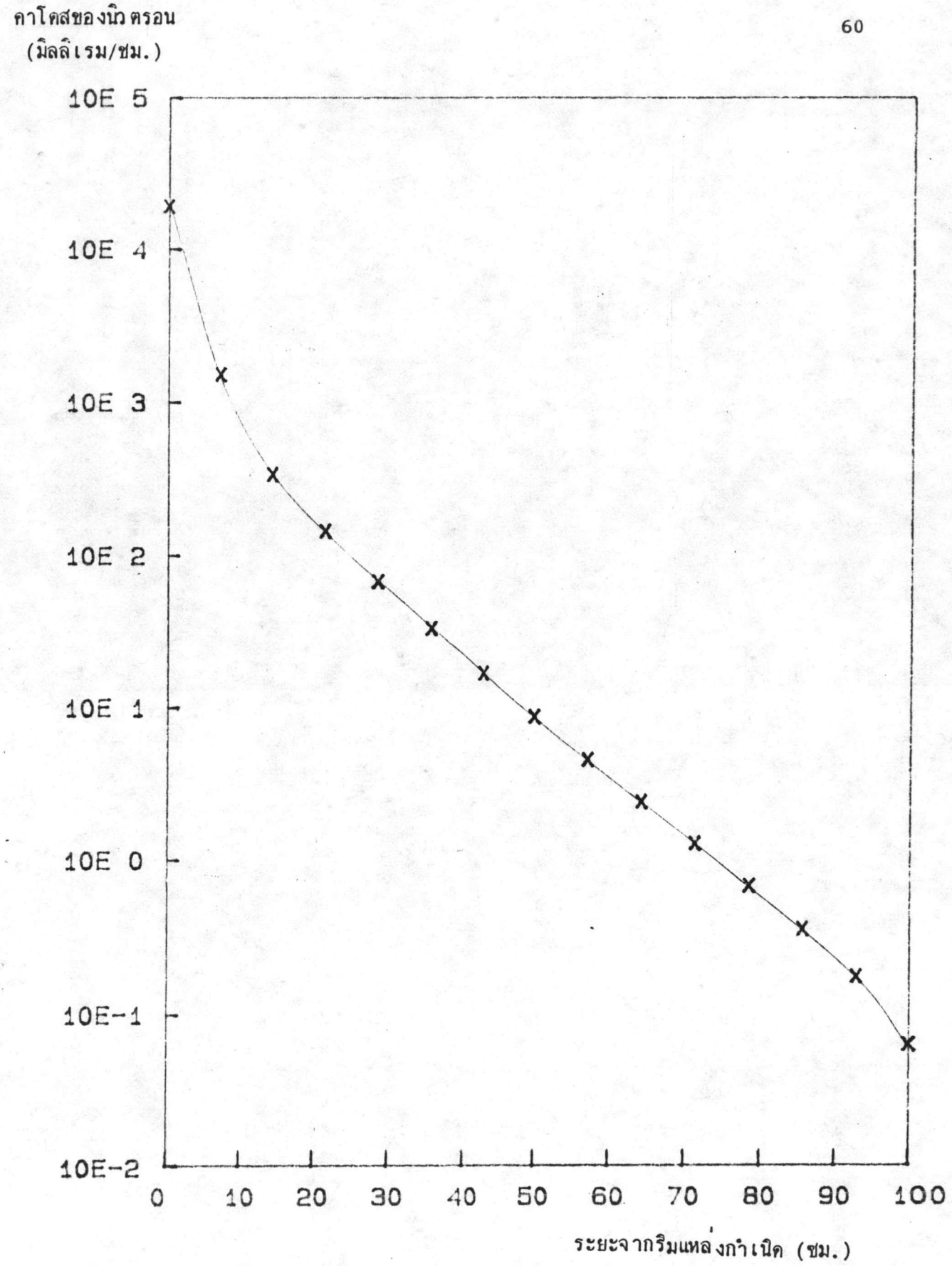
รูปที่ 4.4 ฟลักซ์ของนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน Pu/Be



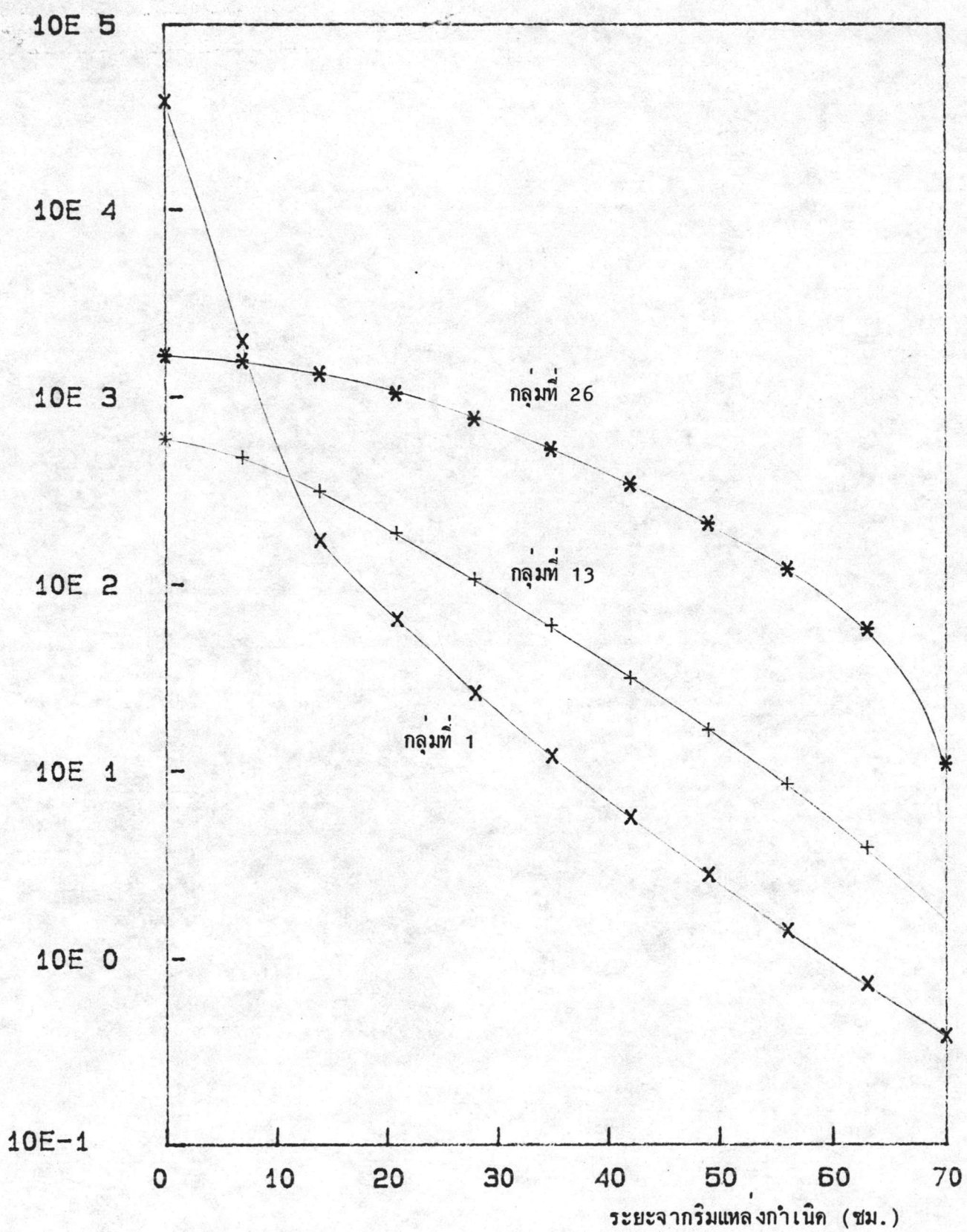
รูปที่ 4.5 ค่าโดสของนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน Pu/Be



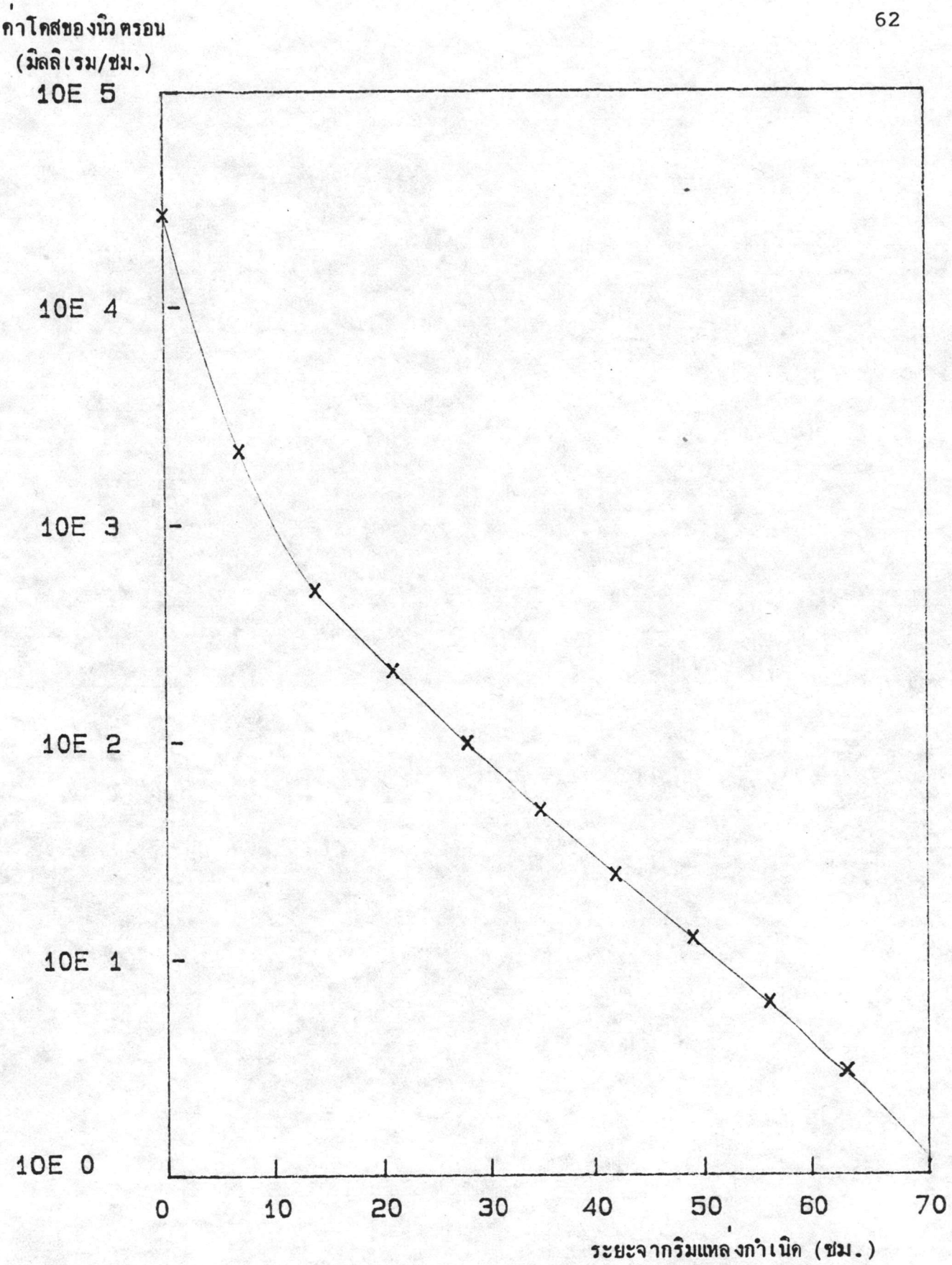
รูปที่ 4.6 ฟลักซ์ของนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน Pu/Be



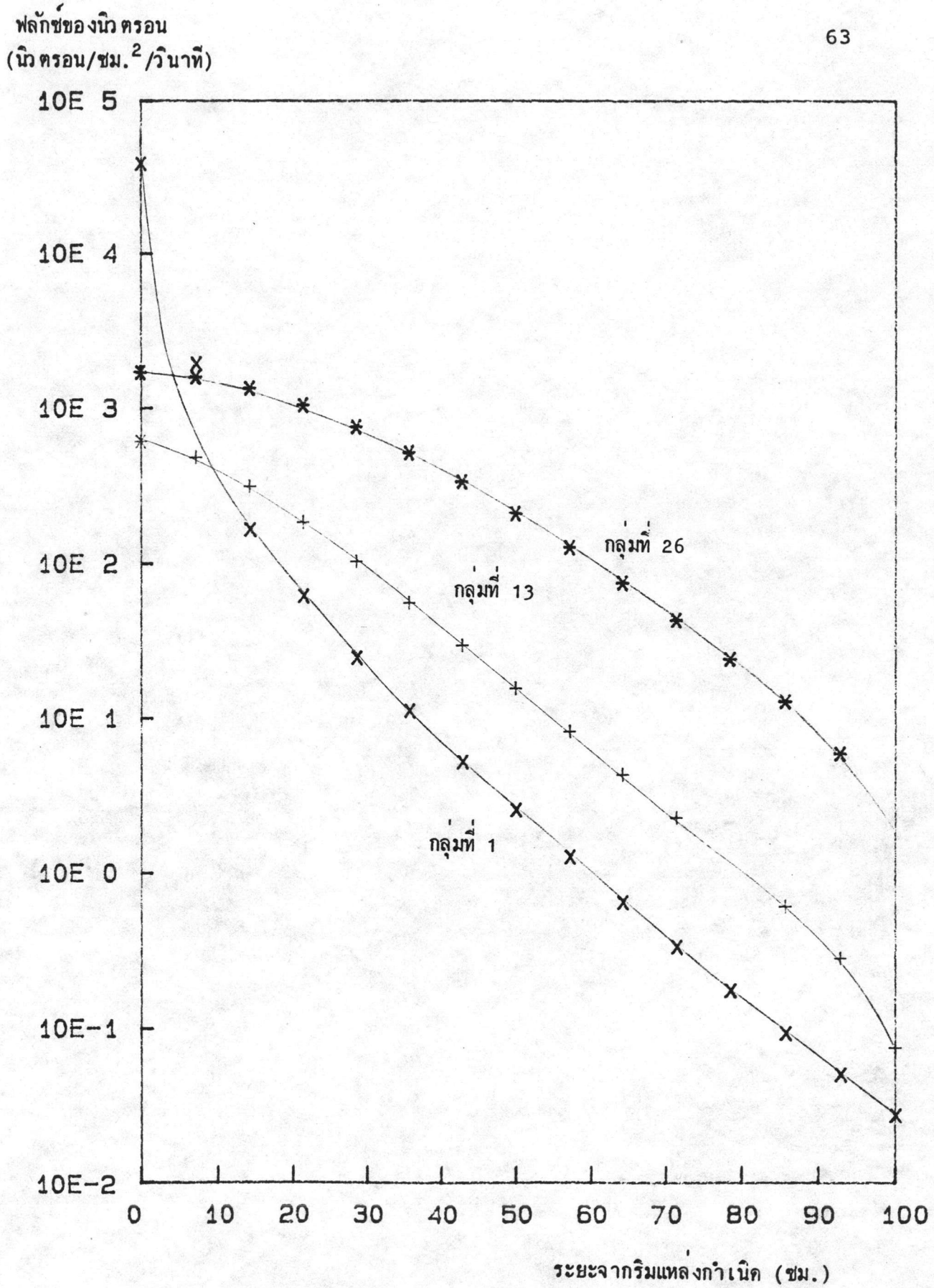
รูปที่ 4.7 ค่าโคสของนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน Pu/Be



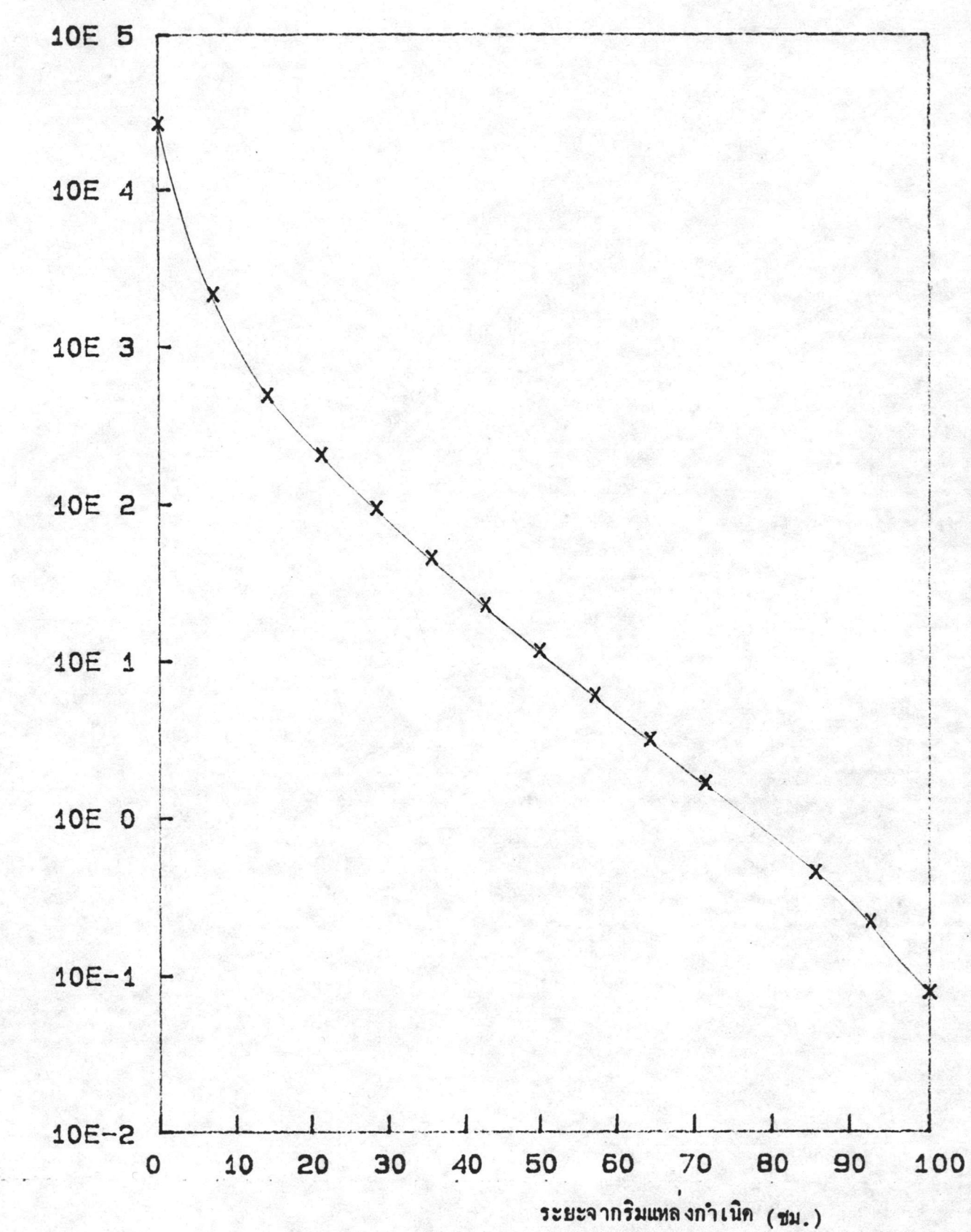
รูปที่ 4.8 ฟลักซ์ของนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน Pu/Be(สเปคตรัม)



รูปที่ 4.9 ค่าโคสของนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน Pu/Be(สเปคตรัม)



รูปที่ 4.10 ฟลักซ์ของนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน Pu/Be(สเปคตรัม)



รูปที่ 4.11 ค่าโดสของนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน Pu/Be(สเปคตรัม)

ตารางที่ 4.2 สรุปผลการคำนวณเมื่อความหนาแน่นนิวตรอน เท่ากับ 1.098×10^5 ครั้ง/ซม.^{3}/วินาที ที่ความหนาต่างกัน

ความหนาของคอนกรีต (ซม.)	ฟลักซ์ของนิวตรอน (นิวตรอน/ซม.^{2}/วินาที)			ค่าโดส (มิลลิเรม/ซม.)
	กลุ่มที่ 1	กลุ่มที่ 13	กลุ่มที่ 26	
70	0.5223	0.7343	7.296	0.853
100	0.0363	0.0574	0.786	0.063

ตารางที่ 4.3 สรุปผลการคำนวณเมื่อความหนาแน่นนิวตรอน เท่ากับ 1.585×10^5 ครั้ง/ซม.^{3}/วินาที ที่ความหนาต่างกัน

ความหนาของคอนกรีต (ซม.)	ฟลักซ์ของนิวตรอน (นิวตรอน/ซม.^{2}/วินาที)			ค่าโดส (มิลลิเรม/ซม.)
	กลุ่มที่ 1	กลุ่มที่ 13	กลุ่มที่ 26	
70	0.3848	1.030	10.88	1.098
100	0.0273	0.075	1.101	0.078

นิวตรอนของกลุ่มพลังงานที่ 1 , 13 และ 26 และค่าโดส ที่ระยะต่าง ๆ แสดงด้วยกราฟในรูปที่ 4.8, 4.9 , 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ ส่วนผลการคำนวณที่ริมนอกสุดของเกราะกำบัง แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 และแสดงผลการคำนวณอย่างละเอียดในตารางที่ ข-9 และ ตารางที่ ข-11 ภาคผนวก ข.

4.3 การวิเคราะห์และออกแบบเกราะกำบังรังสี เนื่องจากเครื่องกำเนิดนิวตรอน

4.3.1 ลักษณะของแหล่งกำเนิด และเกราะกำบัง

สำหรับเครื่องกำเนิดนิวตรอน ผลิตนิวตรอนที่มีพลังงานเดี่ยว (monoenergetic neutron) มีค่าเท่ากับ 14 เมกกะอิเลคตรอนโวลต์ ในการคำนวณนี้เลือกคำนวณนิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยา T(d,n) ซึ่งเป็นการชนกันระหว่างดิวเทอเรียมกับอะตอมของตริเตียมที่อยู่ภายในอลูมิเนียมทรงกลมที่มีรัศมี 1.5 เซนติเมตร สมการ (4.2) แสดงถึงการเกิดนิวตรอนจากปฏิกิริยานี้

$$ {}^{3}_{1}H + {}^{2}_{1}H \longrightarrow {}^{1}_{0}n\ (14\ MeV) + {}^{4}_{2}He\ (3.6\ MeV) \qquad (4.2) $$

นิวตรอนที่เกิดขึ้นจะกระจัดกระจายจากเป้าทุกทิศทุกทาง ในการคำนวณนี้กำหนดให้แหล่งกำเนิดนิวตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแบบจุด ผลิตนิวตรอนในอัตรา 10^9 นิวตรอนต่อวินาที เมื่อคำนวณโดยโปรแกรมนี้จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนให้อยู่ในรูปอัตราการเกิดฟิชชันเช่นเดียวกับปัญหา 4.2 ปริมาตรของแหล่งกำเนิดเท่ากับ 14.137 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้นอัตราการเกิดฟิชชันที่ใช้มีค่าเท่ากับ 2.875×10^7 ครั้งต่อลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

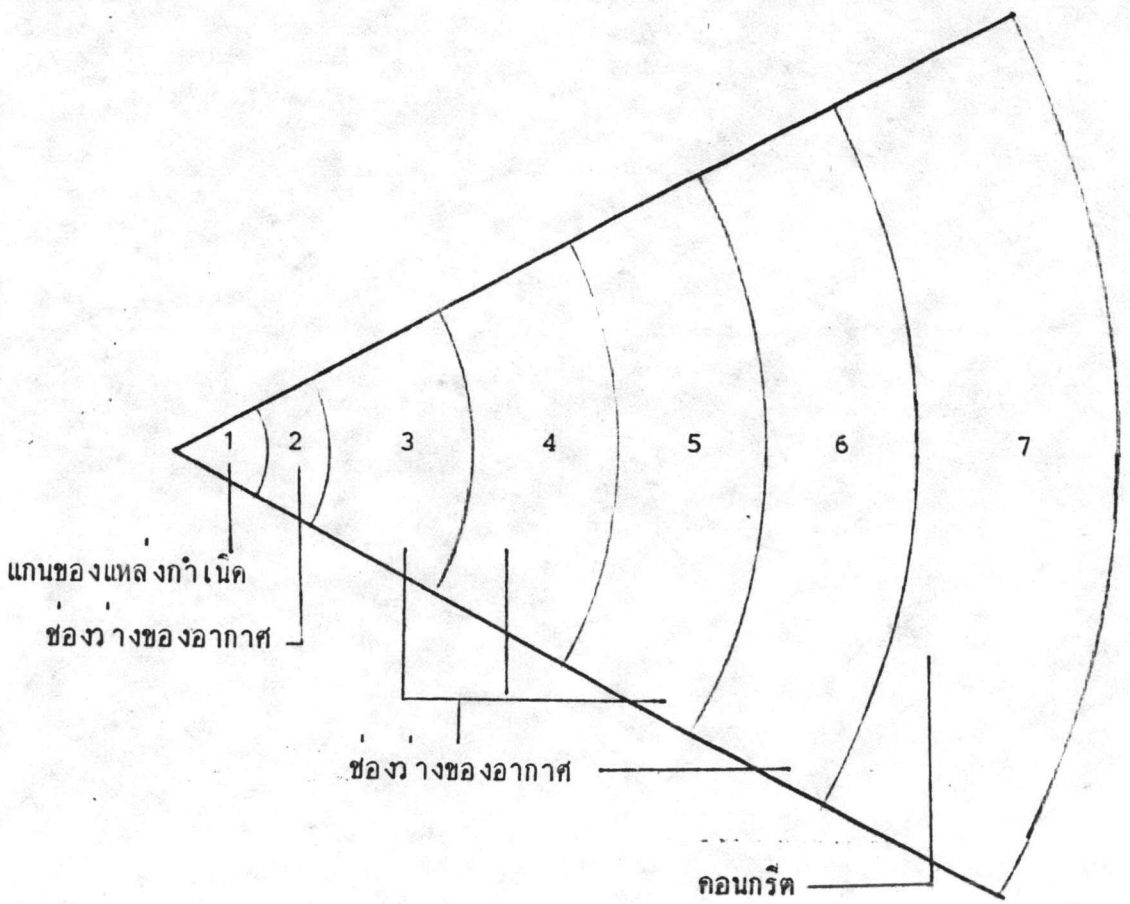
บริเวณแหล่งกำเนิดในการคำนวณแบ่งออกเป็น 2 บริเวณ บริเวณที่ 1 เป็นอลูมิเนียมและ ตริเตียม มีความหนา 1.5 เซนติเมตร ความหนาแน่น 2.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร บริเวณที่ 2 เป็นช่องว่างของอากาศ มีความหนา 1.0 เซนติเมตร ความหนาแน่น 0.001 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร กำหนดให้มีแหล่งกำเนิดเฉพาะในบริเวณที่ 1 เท่านั้น

บริเวณเกราะกำบัง แบ่งออกเป็น 5 บริเวณ คือ เป็นช่องว่างของอากาศ 4 บริเวณ หนาบริเวณละ 76.2 เซนติเมตร และบริเวณสุดท้ายเป็นคอนกรีตที่มีความหนา 70 เซนติเมตร และมีความหนาแน่น 2.35 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

4.3.2 เงื่อนไขในการคำนวณ

รูปทรงของแหล่งกำเนิด และเกราะกำบังรังสีที่เลือกใช้เป็นทรงกลม บริเวณที่ใช้ในในการคำนวณมีทั้งหมด 7 บริเวณ คือ เป็นบริเวณแหล่งกำเนิด 2 บริเวณ และบริเวณเกราะกำบัง 5 บริเวณ ดังรูปที่ 4.12 การคำนวณบิลอัพแฟคเตอร์ในบริเวณแหล่งกำเนิด เลือกใช้วิธี interpolation และในบริเวณเกราะกำบัง 5 บริเวณ เลือกใช้วิธี Kitazume

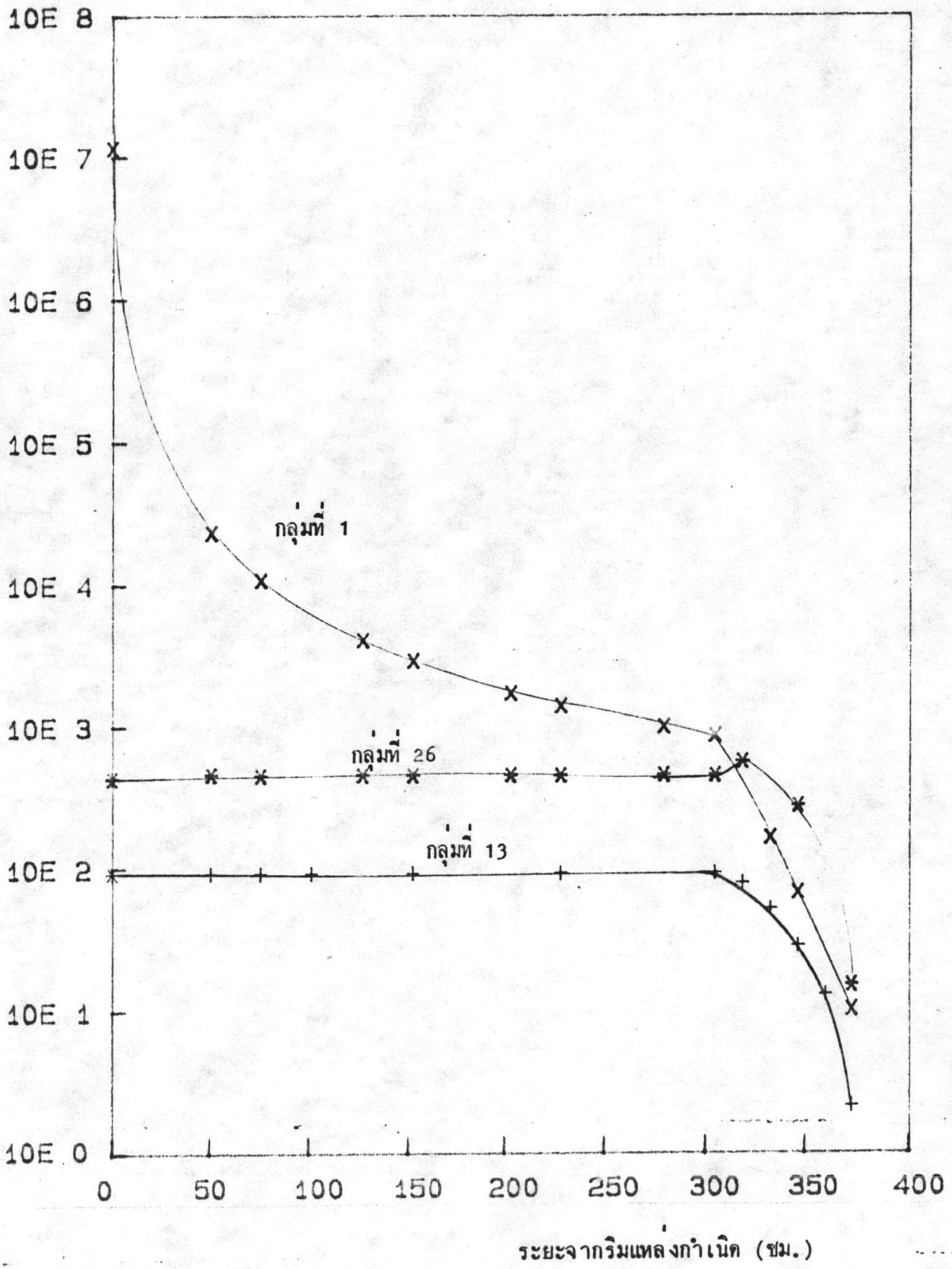
ข้อมูลป้อนเข้าเครื่องของเครื่องกำเนิดนิวตรอน รวบรวมแสดงไว้ในตารางที่ ข-12 ภาคผนวก ข.



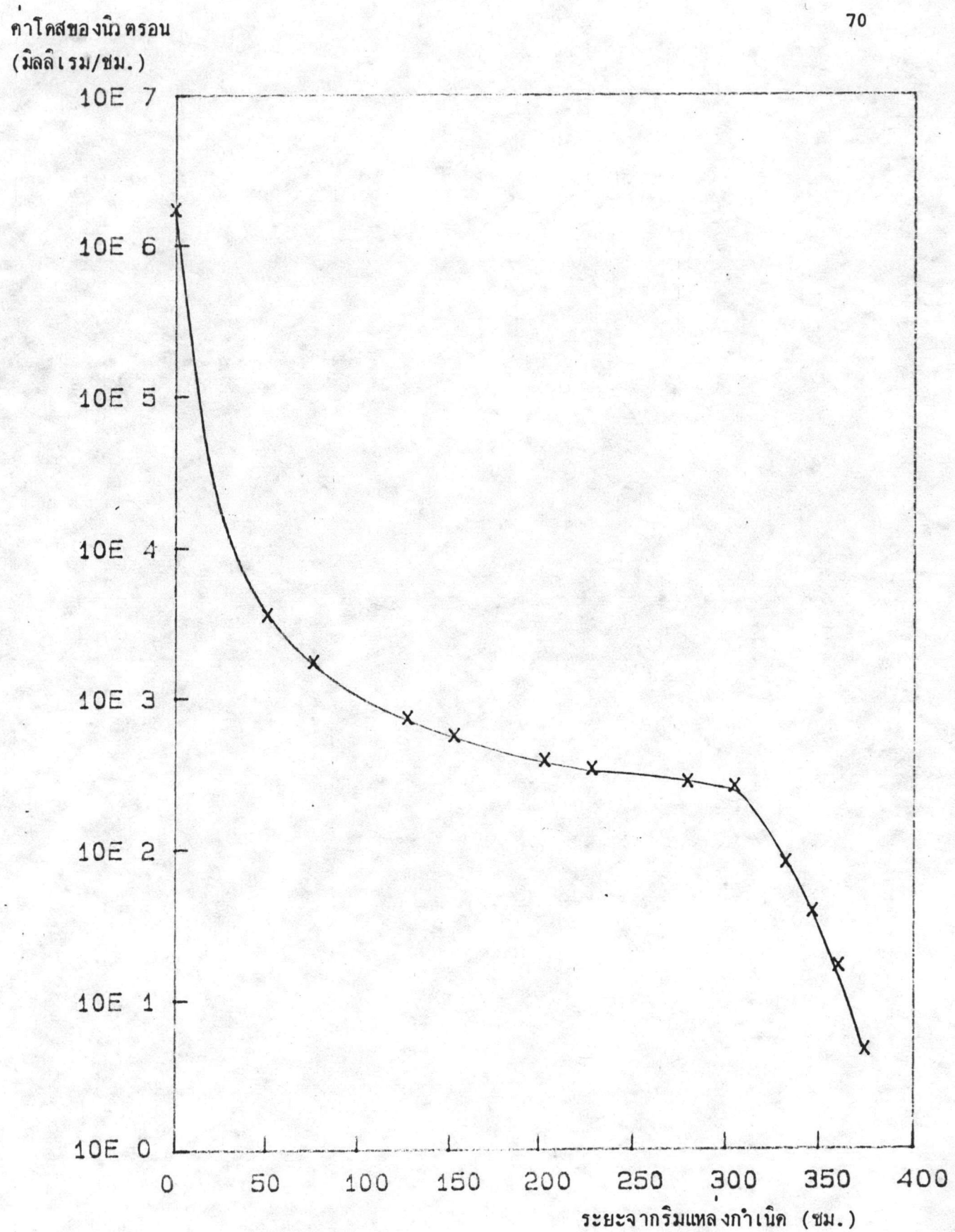
รูปที่ 4.12 ลักษณะการกำหนดบริเวณในการคำนวณปัญหาเครื่องกำเนิดนิวตรอน

4.3.3 ผลการคำนวณ

ในการคำนวณปัญหาเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดนิวตรอน ซึ่งให้นิวตรอนที่มีพลังงานเดี่ยว มีค่าเท่ากับ 14 เมกกะอิเลคตรอนโวลต์ และพบว่าอยู่ในกลุ่มรีมูฟเวลกลุ่มที่ 4 เมื่อเกิดปฏิกิริยากับวัสดุของเกราะกำบัง บางส่วนจะมีการกระจัดกระจาย (scatter) ขึ้นไปในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงขึ้น บางส่วนจะแพร่กระจาย (diffuse) เราจึงคำนวณค่าฟลักซ์ของนิวตรอนในกลุ่มดิฟฟิวชันได้ทุกกลุ่ม และ หาค่าโดสของนิวตรอนได้ แสดงผลการคำนวณค่าฟลักซ์ของนิวตรอนในกลุ่มพลังงานที่ 1 , 13 และ 26 และค่าโดส ที่ระยะต่าง ๆ ด้วยกราฟในรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ ส่วนผลการคำนวณที่ริมนอกสุดของเกราะกำบังแสดงในตารางที่ 4.4 และผลการคำนวณอย่างละเอียดได้แสดงไว้ในตารางที่ ข-13 ภาคผนวก ข.



รูปที่ 4.13 ฟลักซ์ของนิวตรอนจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน



รูปที่ 4.14 ค่าโคสของนิวตรอนจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน

ตารางที่ 4.4 สรุปผลการคำนวณปัญหาเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดนิวตรอน

ความหนาของคอนกรีต (ซม.)	ฟลักซ์ของนิวตรอน (นิวตรอน/ซม.^{2}/วินาที)			ค่าโคสของนิวตรอน (มิลลิเรม/ซม.)
	กลุ่มที่ 1	กลุ่มที่ 13	กลุ่มที่ 26	
70	10.06	2.127	14.90	4.634

หมายเหตุ : ตารางที่ 4.2 , ตารางที่ 4.3 , ตารางที่ 4.4 แสดงผลการคำนวณเฉพาะค่าฟลักซ์ของนิวตรอนเร็ว (กลุ่มที่ 1) นิวตรอนที่มีความเร็วปานกลาง (กลุ่มที่ 13) และเทอร์มัลนิวตรอน (กลุ่มที่ 26) พร้อมทั้งค่าโคสของนิวตรอนที่คำนวณได้ที่ผิวนอกสุดของเกราะกำบังรังสี