

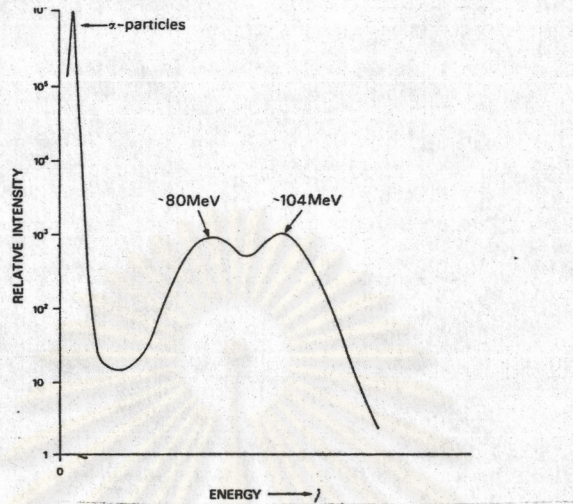
ผลการวิจัย

ในการศึกษานี้ได้ใช้โปรแกรมที่เลือกทำการคำนวณปัญหาต่างๆ ของเกราะกำบังรังสีให้ครอบคลุมปัญหาต่างๆ ที่อาจจะพบได้ในทางปฏิบัติ โดยเลือกทำการคำนวณสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบใช้แก๊สเป็นตัวหล่อเย็น (GCR) , แบบใช้น้ำธรรมดาเป็นตัวหล่อเย็น (LWR) และต้นกำเนิดนิวตรอน

4.1 การคำนวณการลดของนิวตรอนและแกมมาในเกราะกำบังรังสีในปัญหาทดสอบ (Test Case)

ก่อนที่จะนำโปรแกรม SABINE - 3 ไปใช้ในการคำนวณการลดลงของนิวตรอนและแกมมาในปัญหาต่างๆ ได้ทำการแก้ไขตัดแปลงโปรแกรมในบางส่วน เพื่อให้สามารถใช้ได้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ IBM 370 ของสถาบันบริการคอมพิวเตอร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จากนั้นได้ทำการทดสอบ โปรแกรมโดยใช้ปัญหาทดสอบที่ผู้พัฒนาโปรแกรมได้เสนอไว้ เพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้ เป็นการยืนยันความถูกต้องในการใช้โปรแกรม

ปัญหาทดสอบในที่นี้ มีแหล่งกำเนิดนิวตรอนเป็น Californium - 252 ให้นิวตรอนพลังงานสูงจากปฏิกิริยาฟิชชันที่เกิดตามธรรมชาติ ครึ่งชีวิตประมาณ 2.65 ปี เกิดปฏิกิริยาฟิชชัน 3.1 เปอร์เซนต์ นอกนั้นสลายตัวให้อนุภาคแอลฟาซึ่งมีพลังงาน 5.975 - 6.119 เมกกะอิเลคตรอนโวลต์ ลักษณะของไอโซโทปนี้มี Californium - 252 ฉาบเป็นแผ่นบางๆ บน stainless steel ซึ่งจะกูดจับกากที่เกิดจากฟิชชัน (fission fragment) ไว้เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นไอโซโทปนี้ให้นิวตรอนพลังงานสูงทันทีจากฟิชชันและแกมมา ส่วนมากจะนำไปใช้ในการ calibrate และทดสอบเครื่องตรวจวัดสเปกตรัมของนิวตรอนที่ได้จาก Californium - 252 แสดงไว้ในรูปที่ 4.1



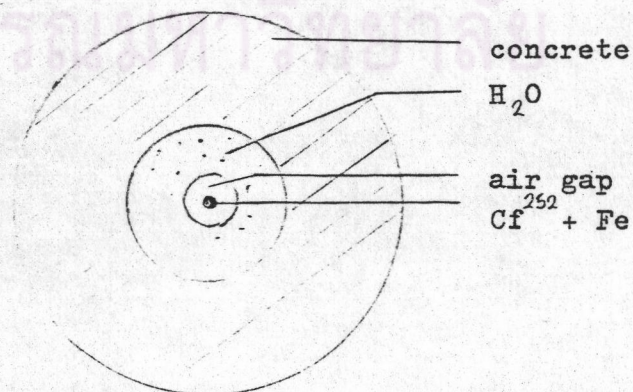
รูปที่ 4.1 สเปกตรัมของนิวตรอนที่ได้จาก Californium - 252

4.1.1 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ มีดังนี้

แหล่งกำเนิดนิวตรอน มีอัตราการเกิดฟิชชัน 1.217×10^7 ครั้งต่อลูกบาศก์ เซนติเมตรต่อวินาที แบ่งเขตการคำนวณเป็น 2 บริเวณ แหล่งกำเนิดมีเฉพาะในบริเวณที่ 1 เท่านั้น ส่วนบริเวณที่ 2 เป็นช่องว่างอากาศ (air gap)

เกราะกำบังรังสี มี 2 บริเวณ จำนวนแอมมาทูดียกภูมิเนื่องจากนิวตรอนทุกกลุ่มพลังงาน จำนวนบิลด์อัปเฟลคเตอร์เฉลี่ยโดยวิธี interpolation

จำนวนแอมมาทูดียกภูมิที่จุดห่างจากริมของแหล่งกำเนิด เป็นระยะ 11, 20 และ 100 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยพิจารณาแหล่งกำเนิดแอมมาเฉพาะจากบริเวณที่ 4



รูปที่ 4.2 ลักษณะของปัญหาอาจสรุปลงได้ดังแสดง โดยสังเขป

ตารางที่ 4.1 สรุปลักษณะของบริเวณต่างๆ ของปัญหา

	ลักษณะและส่วนประกอบของบริเวณต่างๆ ในการคำนวณ			
	ส่วนประกอบ	ความหนา (ซม.)	ความหนาแน่น (กรัม/ซม. ³)	การคำนวณ บิลอับแฟคเตอร์
1. แหลงกำเนด				
- ชั้นที่ 1 (บริเวณที่ 1)	$^{252}\text{Fe} + \text{Cf}$	2	5.0	Interpolate
- ชั้นที่ 2 (บริเวณที่ 2)	O_2 (air gap)	3	0.001	"
2. เกราะกำบังรังสี				
- ชั้นที่ 1 (บริเวณที่ 3)	H_2O	10	1.0	Bröder
- ชั้นที่ 2 (บริเวณที่ 4)	คอนกรีต	100	2.5	Kitazume

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 รายละเอียดและเงื่อนไขในการคำนวณ

รายการเงื่อนไขในการคำนวณ	ข้อมูล
ดัชนีกำหนดรูปทรงของแหล่งกำเนิด	ทรงกลม
ดัชนีกำหนดรูปทรงของเกราะกำบังรังสีในการคำนวณริ้วฟเวเลนิตรอน	ทรงกลม
ดัชนีกำหนดรูปทรงของเกราะกำบังรังสีในการคำนวณตีฟิวชั่นนิวตรอน	ทรงกลม
ดัชนีกำหนดรูปทรงของเกราะกำบังรังสีในการคำนวณแกมมาทุติยภูมิ จำนวนบริเวณทั้งหมด	ทรงกลม 4
คำนวณแกมมาทุติยภูมิจากเกราะกำบังรังสีเนื่องจากนิวตรอนกลุ่มที่	1
ดัชนีกำหนดการคำนวณบิลอับเฟลเตอร์ของเกราะกำบังรังสี	1
ดัชนีกำหนดการคำนวณบิลอับเฟลเตอร์ของแหล่งกำเนิด	1
จำนวนเต็ม M_θ , M_R , M_ϕ ในการคำนวณช่วง (mesh) ต่างๆ Relative accuracy สำหรับการอินทิเกรตเชิงเลข	1 .001
จำนวนช่วงที่แบ่งในบริเวณที่ 3 ในการคำนวณนิวตรอนฟลักซ์	30
จำนวนช่วงที่แบ่งในบริเวณที่ 4 ในการคำนวณนิวตรอนฟลักซ์	100
จำนวนช่วงที่แบ่งระหว่างจุด 2 จุด ห่างกันในการคำนวณนิวตรอนฟลักซ์ในบริเวณที่ 3	6
จำนวนช่วงที่แบ่งระหว่างจุด 2 จุด ห่างกันในการคำนวณนิวตรอนฟลักซ์ในบริเวณที่ 4	5
จำนวนจุดที่คำนวณริ้วฟเวเลนิตรอนฟลักซ์ บริเวณที่ 3	15
จำนวนจุดที่คำนวณริ้วฟเวเลนิตรอนฟลักซ์ บริเวณที่ 4	10
จำนวนช่วงที่คำนวณแกมมาฟลักซ์ บริเวณที่ 3	6
จำนวนช่วงที่คำนวณแกมมาฟลักซ์ บริเวณที่ 4	5
การกระจายการลดลงในแนวรัศมีและ Z	โพลีโนเมียล

4.1.2 ผลการคำนวณ ค่าของนิวตรอนฟลักซ์ แกมมาฟลักซ์ และ โดสเรท ที่คำนวณได้แสดงไว้ในรายละเอียดในตารางที่ ข.1 ภาคผนวก ข. ค่านิวตรอนฟลักซ์ที่คำนวณได้ในกลุ่มพลังงานที่ 1, 13 และ 26 ได้นำมาสรุปในรูปของกราฟ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.3 ส่วนผลการคำนวณนิวตรอนฟลักซ์ในช่วงกลุ่มพลังงานเดียวกัน ที่ผู้พัฒนาโปรแกรมได้ทำไว้ นั้น (Ponti C. et al , 1967) สรุปอยู่ในกราฟรูปที่ 4.4 ทั้งนิวตรอนและแกมมา โดสเรทที่คำนวณได้ และที่ผู้พัฒนา โปรแกรมทำไว้สรุปรวมกันในรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

จากการเปรียบเทียบจะพบว่า การคำนวณนิวตรอนฟลักซ์ทั้ง 26 กลุ่มพลังงาน พิจารณากลุ่มต่อกลุ่ม ได้ผลการคำนวณนิวตรอนฟลักซ์ที่ระยะต่างๆ ในเกาะก่าบังรังสี ไม่ว่าจะเป็นค่าที่ได้แต่ละจุดหรือลักษณะของกราฟที่แสดงการลดจำนวนนั้นใกล้เคียงกัน ดังจะสังเกตได้จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 จำนวนนิวตรอนฟลักซ์ของกลุ่มพลังงานสูงที่ริม บริเวณที่ 2 มีค่าน้อยกว่ากลุ่มพลังงานต่ำอื่นๆ กล่าวคือแหล่งกำเนิดให้นิวตรอนกลุ่มพลังงาน ต่ำมากกว่า

ตารางที่ 4.3 สรุปการลดนิวตรอนฟลักซ์กลุ่มพลังงานที่ 1, 13 และ 26 ในชั้นต่างๆ

กลุ่มพลังงาน	เปอร์เซ็นต์การลดนิวตรอน		นิวตรอนฟลักซ์ที่ริมนอกสุด (นิวตรอน/ชม ² วินาที)
	น้ำ	คอนกรีต	
1	96.1	99.9	0.135
13	86.7	99.5	55.0
26	70.8	99.9	22.5

กลุ่มพลังงานที่ 1 นิวตรอนมีพลังงานสูงสุด (6 - 15 เมกกะอิเลคตรอนโวลต์) บริเวณที่ 3 ที่เป็นน้ำหนา 10 ซม. สามารถลดจำนวนนิวตรอนได้มาก เนื่องจากมีธาตุ ไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบหลัก นิวตรอนพลังงานสูงชนกับนิวไคลด์จะรีมูฟออกจากกลุ่ม

พลังงานสูงนั้น ไปอยู่ในกลุ่มพลังงานอื่นที่ต่ำลงมา และเกิดการชนเพียงไม่กี่ครั้งจะลดพลังงานของนิวตรอนได้มาก ดังเห็นได้จากรูปที่ 4.3 ในชั้นนี้เส้นกราฟแสดงนิวตรอนฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งคล้ายกับในชั้นของคอนกรีต

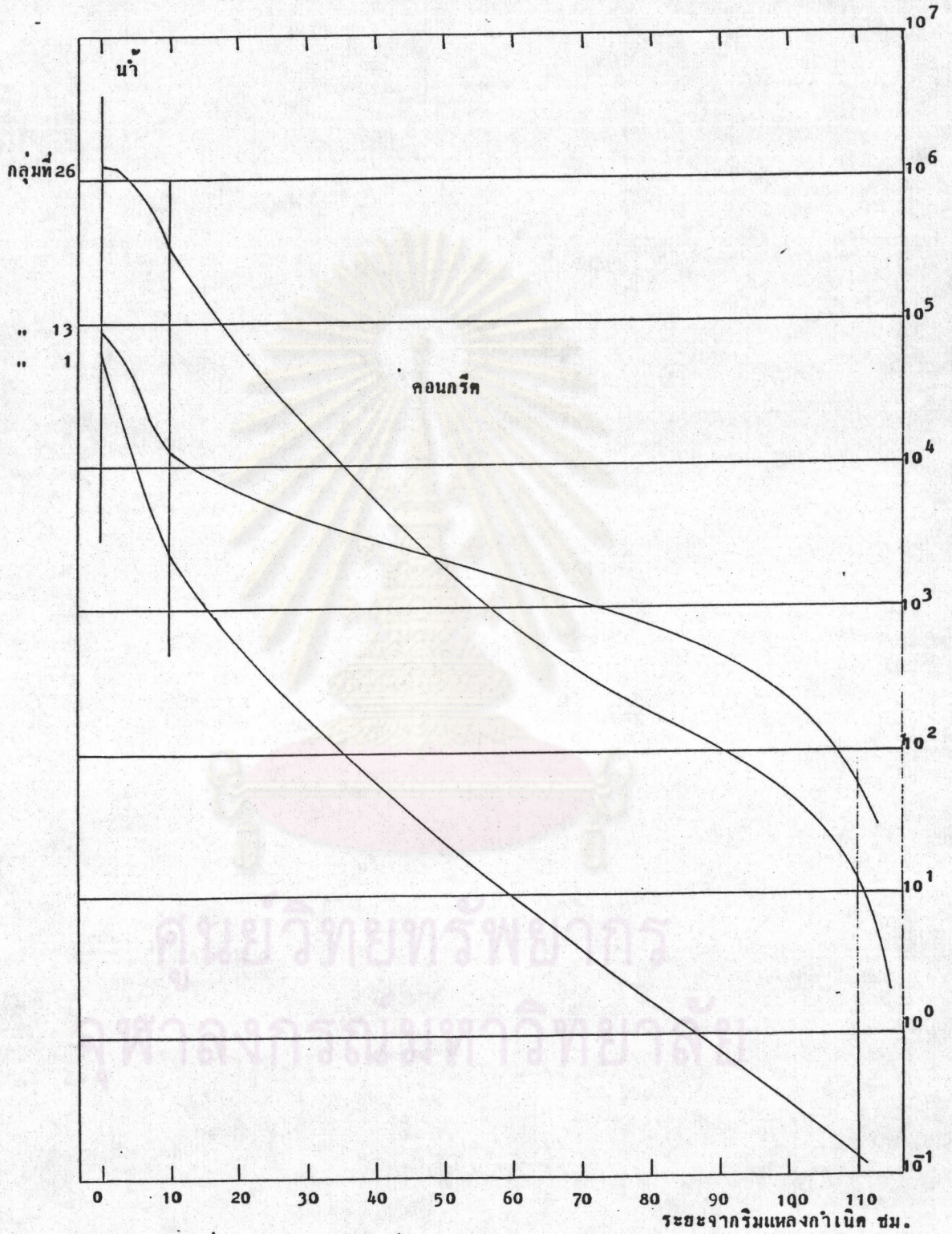
กลุ่มพลังงานที่ 13 นิวตรอนมีพลังงานปานกลาง (1.58 - 4.31 เมกกะอิเลคตรอนโวลต์) ความสามารถการกั้นนิวตรอนพลังงานช่วงนี้ของน้ำไม่ตึก น้อยกว่ากลุ่มที่ 1 นิวตรอนฟลักซ์ในกลุ่มนี้มีค่ามากกว่ากลุ่มที่ 1 เนื่องจากมีนิวตรอนที่รั่วจากกลุ่มพลังงานอื่นรวมอยู่ด้วย

กลุ่มเทอร์มัลนิวตรอน บริเวณน้ำกั้นได้เพียง 70 % มีเทอร์มัลนิวตรอนที่เกิดจากคาร์ทีฟิวของนิวตรอนในเกราะกำบังรังสี แต่คอนกรีตกั้นได้ดี เพราะธาตุในคอนกรีตสามารถดูดจับนิวตรอนไว้ได้มาก จำนวนนิวตรอนจึงลดลงตามความหนาของชั้นนี้

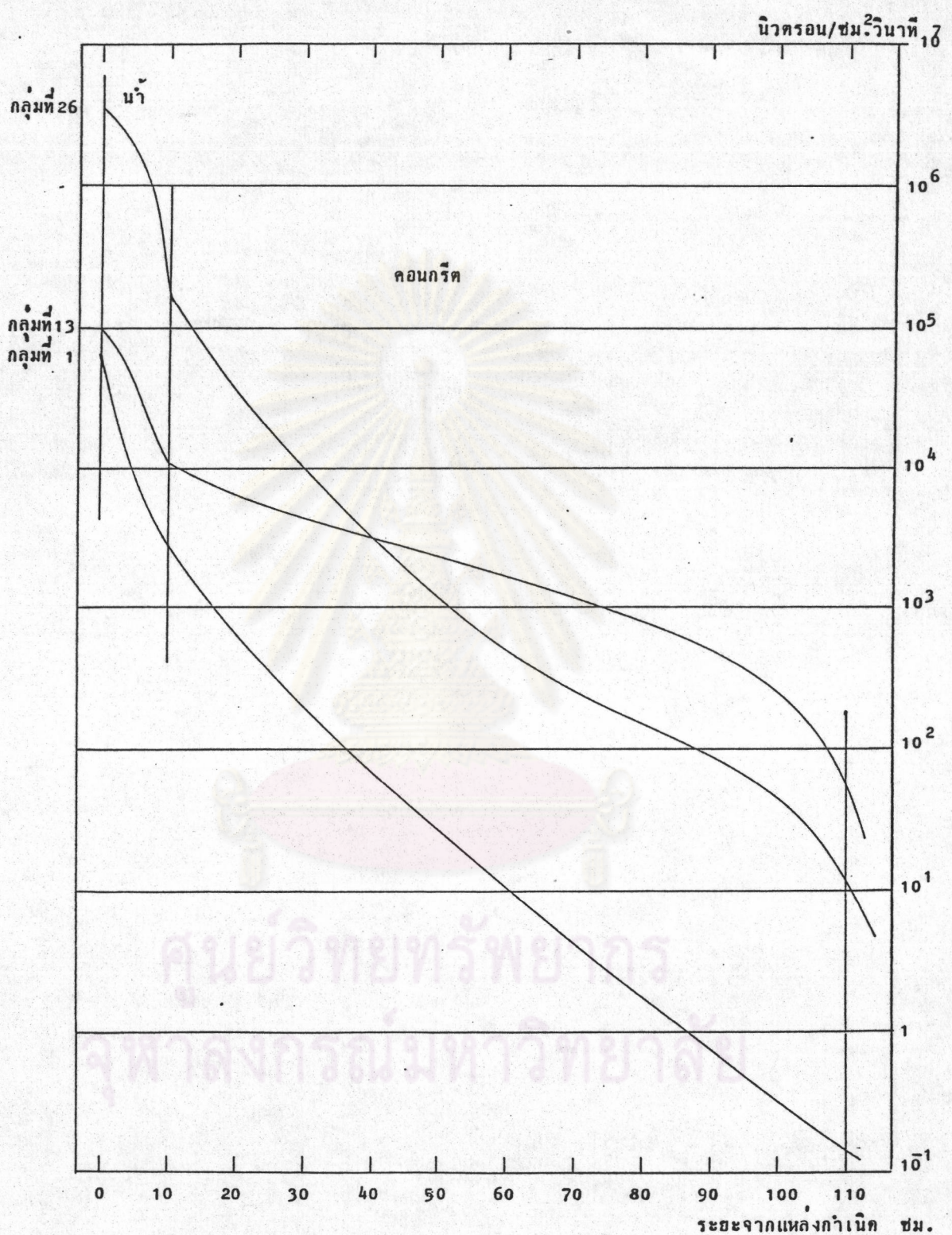
ค่านิวตรอนโคสเรทสรุปดังรูปที่ 4.5 เห็นได้ว่า ผลการคำนวณได้ใกล้เคียงกันจะต่างกันบ้างในช่วงของคอนกรีต แต่ผลการคำนวณที่ได้ยังอยู่ในลำดับเดียวกัน

ค่าแอมมาโคสเรทนั้น จากกราฟรูปที่ 4.6 ได้ทำการคำนวณไว้ 2 กรณีคือคิดและไม่คิด inelastic scattering ของธาตุบางธาตุ แต่ผลการคำนวณไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับที่ผู้พัฒนา โปรแกรมทำไว้กับกรณีที่ไม่คิด inelastic scattering จะไม่มีความหนาแน่นของแหล่งกำเนิดทุกกลุ่มพลังงาน (ดังจะเห็นได้ในตารางที่ ข.1 ภาคผนวก ข.) แต่ผลของแอมมาฟลักซ์เนื่องจากบริเวณที่ 4 นั้นต่างกันพอสมควร มีสาเหตุเนื่องมาจากค่าสัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียลที่แสดงถึงการกระจายของแหล่งกำเนิดแอมมาในบริเวณที่ 4 นี้ ได้ค่าสูงกว่าที่เขาทำไว้ทุกกลุ่มพลังงาน จึงทำให้ค่าแอมมาฟลักซ์มีค่ามากขึ้น สืบเนื่องจากการคำนวณของเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยการคำนวณของเขาจัดให้โปรแกรมคำนวณเป็นชั้นๆ แต่ที่คำนวณนี้จำเป็นต้องใส่โปรแกรมพร้อมกันทั้งหมด

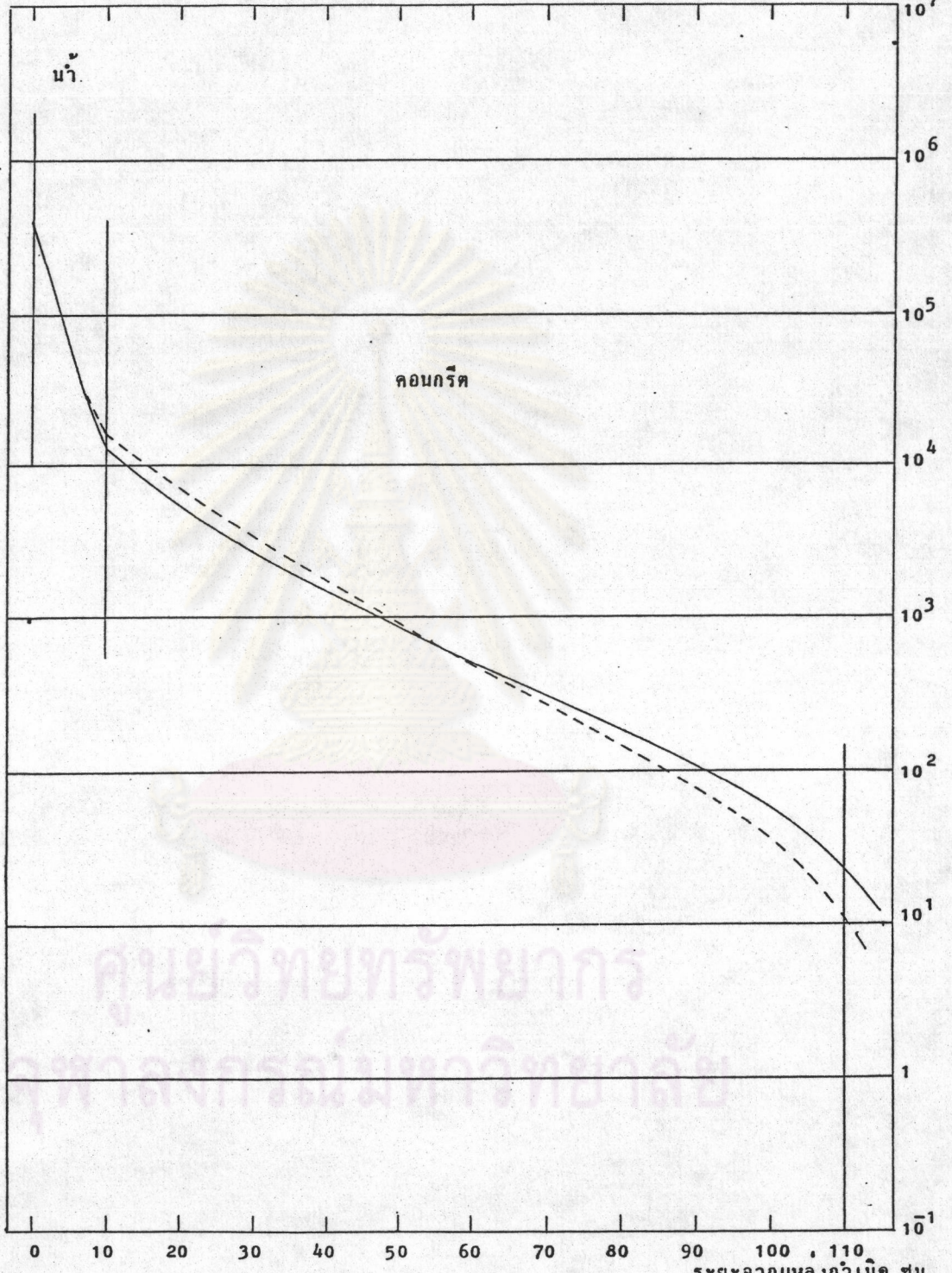
สรุปผลการคำนวณในกรณีของนิวตรอน ใกล้เคียงกันมาก ให้ผลดี แต่ส่วนของแอมมาให้ผลต่างกัน แต่ลักษณะที่แสดงถึงความสามารถในการลดแอมมาใกล้เคียงกันมากในเกราะกำบังรังสีชั้นต่างๆ ความแตกต่างนี้เป็นผลเนื่องมาจาก โปรแกรม SABINE - 3 ที่ใช้คำนวณในการวิจัยนี้ได้รับการปรับปรุงเพิ่มเติม (Ponti C. & Van Heusden R. , 1974) จาก โปรแกรมเดิม โดยแก้ไขเล็กน้อยในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณนิวตรอน



รูปที่ 4.3 นิวตรอนฟลักซ์ของ Californium - 252 ในเกราะกำบังรังสีที่คำนวณได้



รูปที่ 4.4 นิาตรอนฟลักซ์ของCalifornium - 252 ที่ผู้พัฒนาโปรแกรมเสนอไว้ (Pont, 1967)

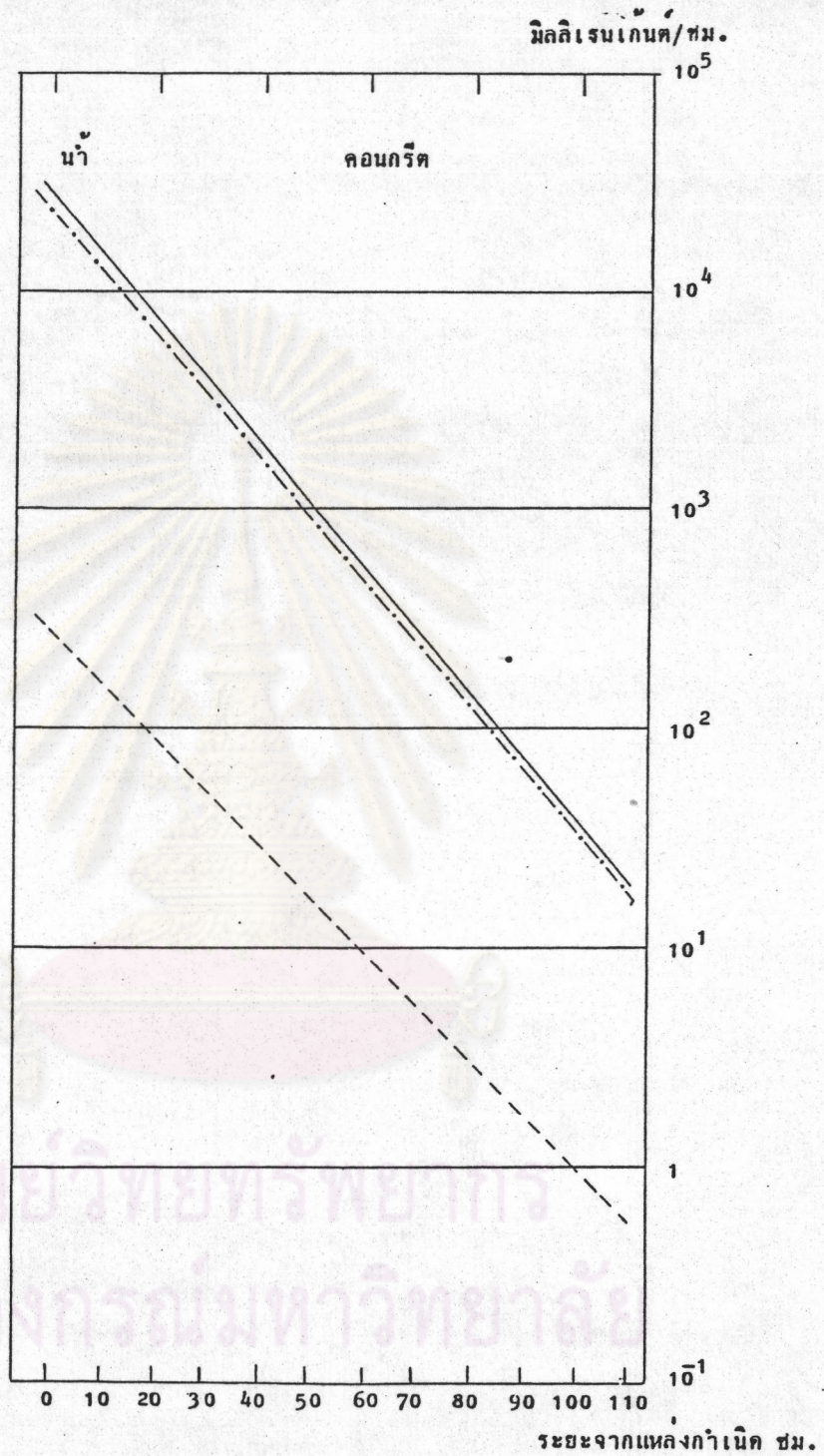


รูปที่ 4.5 นิวตรอนโคสเรทของ Californium - 252

———— จำนวนใหม่

----- (Ponti, 1967)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.6 แกมมาโคสเรทของ Californium - 252 ในเกาะกำบังรังสี
 ---- (Pont, 1967) ——— คิด inelastic scattering
 - · - · - · ไม่คิด " " " "

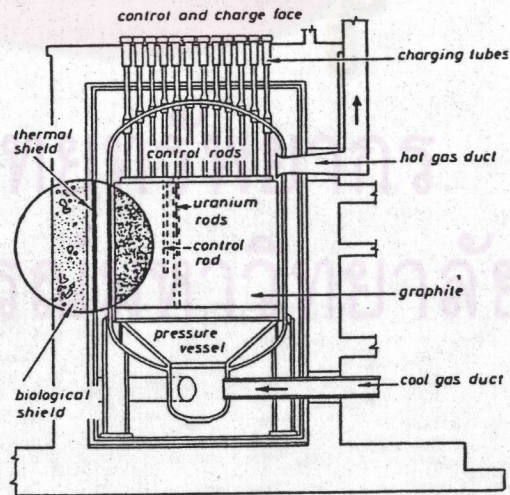
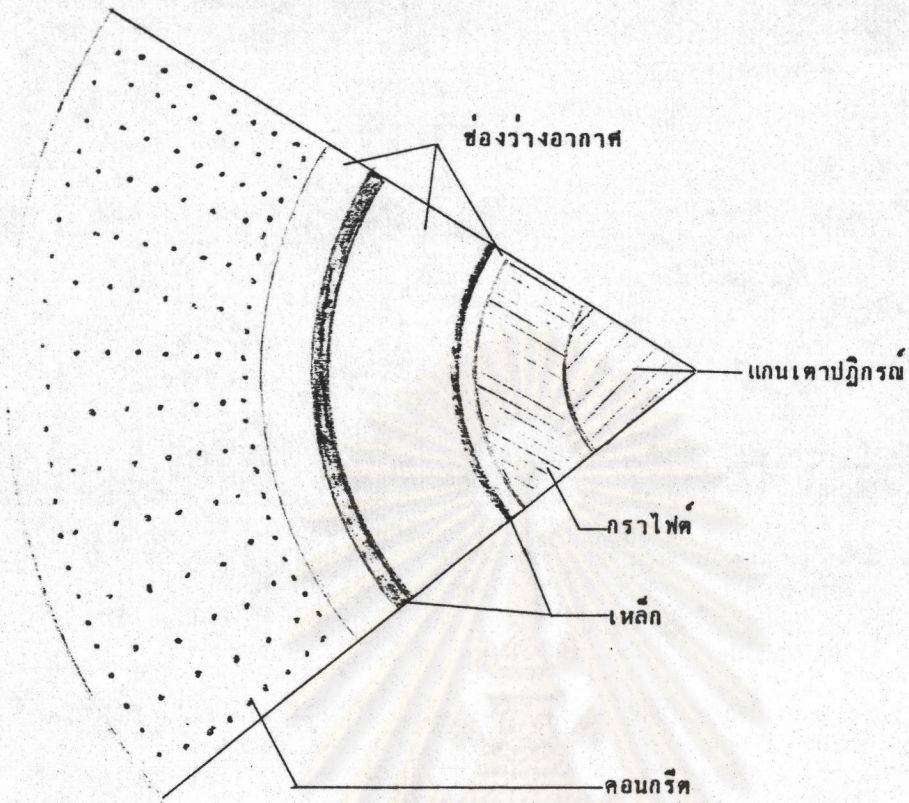
คือปรับปรุงสูตรการคำนวณที่คำนึงถึงค่า thermal absorption cross - section ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ส่วนการคำนวณแอมมาฟลักซ์นั้นมีการปรับปรุงมาพอสมควร ทั้งวิธีการอินทิเกรตเชิงเลข และ Gamma-Ray Data Library จึงทำให้ผลการคำนวณในการศึกษานี้ต่างจากผลที่ผู้พัฒนา โปรแกรมทำไว้เดิมตั้งได้กล่าวมาแล้ว แต่แนวโน้มโดยทั่วไปสอดคล้องกันตลอด จึงสรุปได้ว่า โปรแกรมนี้คำนวณได้ถูกต้องในความหมายที่ผู้พัฒนาได้จัดไว้ และในขีดความถูกต้องที่วิธีการนี้ (Removal-Diffusion Method) จะพึงให้ได้

4.2 การคำนวณการลดของนิวตรอนและแอมมาในเกราะกำบังรังสีของเตาปฏิกรณ์แบบใช้แก๊สเป็นตัวหล่อเย็น (GCR)

ในการศึกษานี้ได้เลือกเตาปฏิกรณ์ Calder Hall ซึ่งเป็นเตาปฏิกรณ์แบบใช้แก๊สเป็นตัวหล่อเย็น มาเป็นตัวอย่างในการศึกษาและคำนวณ และเมื่อได้ผลการคำนวณแล้วก็นำไปเปรียบเทียบกับการคำนวณด้วย โปรแกรมอื่นซึ่งผู้ที่เสนอวิธีการคำนวณริมูฟเวลดีฟิวชันได้ทำไว้

จากหนังสือ Methods of Calculation for Use in the Design of Shields for Power Reactors โดย Avery , Bendall & Spinney (1960) ได้ศึกษาเตาปฏิกรณ์ Calder Hall นี้ โดยคำนวณนิวตรอนฟลักซ์ด้วย โปรแกรม RASH ดังนั้นในการศึกษานี้จึงใช้เงื่อนไขการคำนวณทั้งไปเช่นเดียวกัน

เตาปฏิกรณ์ Calder Hall เป็นเตาปฏิกรณ์ที่ให้ไฟฟ้าเชิงพาณิชย์แห่งแรกของโลก ตั้งอยู่ในประเทศอังกฤษ เริ่มทำงานในเดือนตุลาคม ค.ศ.1956 เชื้อเพลิงอยู่ในสภาพเป็นแท่งยูเรเนียมธรรมชาติ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2.92 ซม. แกนของเตาปฏิกรณ์มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 9.4 เมตร สูง 6.4 เมตร หล่อเย็นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ให้ความร้อน 180 เมกกะวัตต์ มีกราไฟต์เป็นวัสดุลดความเร็วนิวตรอน (moderator) ลักษณะของเตาปฏิกรณ์นี้ แสดงโดยสังเขปในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ลักษณะของเตาปฏิกรณ์และชั้นต่างๆ ของเกราะกำบังรังสี

4.2.1 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ มีดังนี้

แหล่งกำเนิดนิวตรอน มีทั้ง 2 บริเวณ โดยในบริเวณแรกมีการเกิดฟิชชัน 1.897×10^{10} และบริเวณที่ 2 มี 1.243×10^{10} ครั้งต่อลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ

เกราะกำบังรังสี มี 7 ชั้น (รวมช่องว่างอากาศ) จำนวนแอมมาทูดิยุมิเนื่องจากนิวตรอนทุกกลุ่มพลังงานในเกราะกำบังรังสี จำนวนบิล็อบเฟคเตอร์เฉลี่ยโดยวิธี

Broder

จำนวนแอมมาทูดิยุมิที่จุดห่างจากริมแหล่งกำเนิดเป็นระยะ 76.2, 96.52, 213.36 และ 468.96 ซม. (ริมเกราะกำบังรังสีแต่ละชั้น)

ตารางที่ 4.4 สรุปลักษณะของบริเวณต่างๆ ของปัญหา

	ลักษณะและส่วนประกอบของบริเวณต่างๆ ในการคำนวณ			
	ส่วนประกอบ	ความหนา (ซม.)	ความหนาแน่น (กรัม/ซม ³)	การคำนวณ บิล็อบเฟคเตอร์
1. แหล่งกำเนิด				
- ชั้นที่ 1 (บริเวณที่ 1)	$^{235}\text{UO}_2, ^{238}\text{UO}_2$	382.44	10.38	Broder&Kitazume
- ชั้นที่ 2 (บริเวณที่ 2)	"	90.0	10.38	"
2. เกราะกำบังรังสี				
- ชั้นที่ 1 (บริเวณที่ 3)	Graphite(C)	76.2	1.6	"
- ชั้นที่ 2 (บริเวณที่ 4)	air gap	15.24	0.0012	"
- ชั้นที่ 3 (บริเวณที่ 5)	Iron(Fe)	5.08	7.85	"
- ชั้นที่ 4 (บริเวณที่ 6)	air gap	101.6	0.0012	"
- ชั้นที่ 5 (บริเวณที่ 7)	Iron(Fe)	15.24	7.85	"
- ชั้นที่ 6 (บริเวณที่ 8)	air gap	42.24	0.0012	"
- ชั้นที่ 7 (บริเวณที่ 9)	concrete	213.36	2.5	"

ตารางที่ 4.5 รายละเอียดและเงื่อนไขในการคำนวณ

รายการเงื่อนไขในการคำนวณ	ข้อมูล
ดัชนีกำหนดรูปทรงแหล่งกำเนิด	ทรงกระบอก
ดัชนีกำหนดรูปทรงเกราะกำบังรังสีในการคำนวณริ้วฟเวเลนิตรอน	ทรงกระบอก
ดัชนีกำหนดรูปทรงเกราะกำบังรังสีในการคำนวณที่พิวชันนิวตรอน	ทรงกระบอก
ดัชนีกำหนดรูปทรงเกราะกำบังรังสีในการคำนวณแกมมาทุติยภูมิ	ทรงกระบอก
จำนวนบริเวณทั้งหมด	9
คำนวณแกมมาทุติยภูมิจากเกราะกำบังรังสีเนื่องจากนิวตรอนตั้งแต่กลุ่มที่	1
ดัชนีกำหนดการคำนวณบิลอับเฟคเตอร์ของแหล่งกำเนิด	1
ดัชนีกำหนดการคำนวณบิลอับเฟคเตอร์ของเกราะกำบังรังสี	1
จำนวนเต็ม M_{θ} , M_R , M_{μ} ในการคำนวณช่วง (mesh) ต่างๆ	1
Relative accuracy สำหรับการอินทิเกรตเชิงเลข	.001
จำนวนช่วงที่ถูกแบ่งใน 9 บริเวณในการคำนวณนิวตรอนฟลักซ์ บริเวณละ	25
จำนวนช่วงที่แบ่งระหว่าง 2 จุดห่างกันในการคำนวณนิวตรอนฟลักซ์บริเวณละ	5
จำนวนจุดที่คำนวณริ้วฟเวเลนิตรอนฟลักซ์และแกมมาฟลักซ์บริเวณละ	5
การกระจายการลดลงในแนวรัศมีและ Z	โพลีโนเมียล

4.2.2 ผลการคำนวณ มีดังนี้ นิวตรอนและแกมมาฟลักซ์ โดสเรทที่ได้คำนวณ แสดงไว้ในรายละเอียดในตารางที่ ข.2 ภาคผนวก ข. ทุกกลุ่มพลังงาน จากนั้นเฉลี่ย กลุ่มพลังงานใหม่จาก 26 เป็น 5 กลุ่มพลังงาน เพื่อความเหมาะสมในการศึกษา ดังนั้น ค่านิวตรอนฟลักซ์ที่คำนวณได้แล้วเฉลี่ยกลุ่มพลังงานใหม่ได้นำมาสรุปไว้ในรูปของกราฟ ดัง แสดงไว้ในรูปที่ 4.8 ส่วนผลการคำนวณจากเอกสารอ้างอิงที่คำนวณโดย โปรแกรม RASH Spinney⁽¹¹⁾ สรุปอยู่ในรูปกราฟรูปที่ 4.9 ทั้งแกมมาและนิวตรอนโดสเรทที่คำนวณได้สรุป ไว้ในรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ ในการวิจัยนี้ นอกจากจะเปรียบเทียบผลการคำนวณ กับ โปรแกรมอื่นแล้ว ยังได้เริ่มศึกษาผลจากการใช้วิธีคำนวณค่าบิลอับเฟคเตอร์ต่างๆ

นิวตรอนฟลักซ์ที่คำนวณได้ในชั้นของกราไฟต์และเหล็ก ก็นิวตรอนพลังงานสูงได้มาก ส่วนที่พลังงานต่ำยังคงที่จำนวนฟลักซ์สูง ในรูปที่ 4.8 ชั้นที่เป็นเหล็กมีการดูดจับนิวตรอนพลังงานไปมากตามคุณสมบัติของธาตุ ที่ริมชั้นคอนกรีตให้นิวตรอนฟลักซ์ใกล้เคียงกับที่มีผู้ได้คำนวณไว้ด้วย RASH ช่วงที่เป็นช่องว่างอากาศแทบจะไม่มีผลกับจำนวนนิวตรอนเลย จาก RASH ลดนิวตรอนฟลักซ์ได้รวดเร็วในความหนาไม่มากนัก

ค่าโดสเรทที่คำนวณได้มีค่าประมาณ 1.1×10^{-6} มิลลิเรมต่อชม. ดังสรุปในรูปที่ 4.10 เทอร์มัลซีลกันนิวตรอนได้ไม่มาก แต่กันความร้อนได้ดี ในบริเวณที่เป็นเหล็กในชั้นที่ 2 ค่าโดสเรทเพิ่มขึ้นหลังจากลดลงบ้างเล็กน้อย เนื่องมาจากจำนวนนิวตรอนที่เพิ่มขึ้นจากการชน

แกมมาโดสเรทได้สรุปไว้ในรูปที่ 4.11 เมื่อคิดบิลอับเฟคเตอร์โดยวิธี interpolate มีค่า $M_0=3$ (เป็นการเปลี่ยนค่าจำนวนเต็มในกาอินทิเกรตเชิงเลข) ผลทำให้การคำนวณแกมมาโดสเรทเปลี่ยนไปมาก โดยเฉพาะในชั้นของเหล็กชั้นแรก คือแกมมาจะลดลงแทนที่จะเพิ่มขึ้นดังเมื่อ คำนวณที่จำนวนเต็มมีค่าเป็นหนึ่ง เป็นผลมาจากการอินทิเกรตเชิงเลข และทำให้ค่าแกมมาโดสเรทที่ได้อลดลงจาก 10^0 เป็น 10^{-2} โดยประมาณ สำหรับการกำหนดการคำนวณบิลอับเฟคเตอร์โดยวิธี Broder และ Kitazume ได้สรุปในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 สรุปแกมมาโดสเรทที่ระยะต่างๆ เมื่อกำหนดบิลอับเฟคเตอร์ 2 แบบ Broder , Kitazume

ระยะห่างแหล่งกำเนิด (ซม.)	แกมมาโดสเรท (mR/hr) เมื่อกำหนดบิลอับเฟคเตอร์	
	Broder	Kitazume
76.2	6.126×10^7	3.749×10^7
92.6	2.134×10^8	1.153×10^8
213.36	6.656×10^7	3.390×10^7
468.96	1.41	1.148

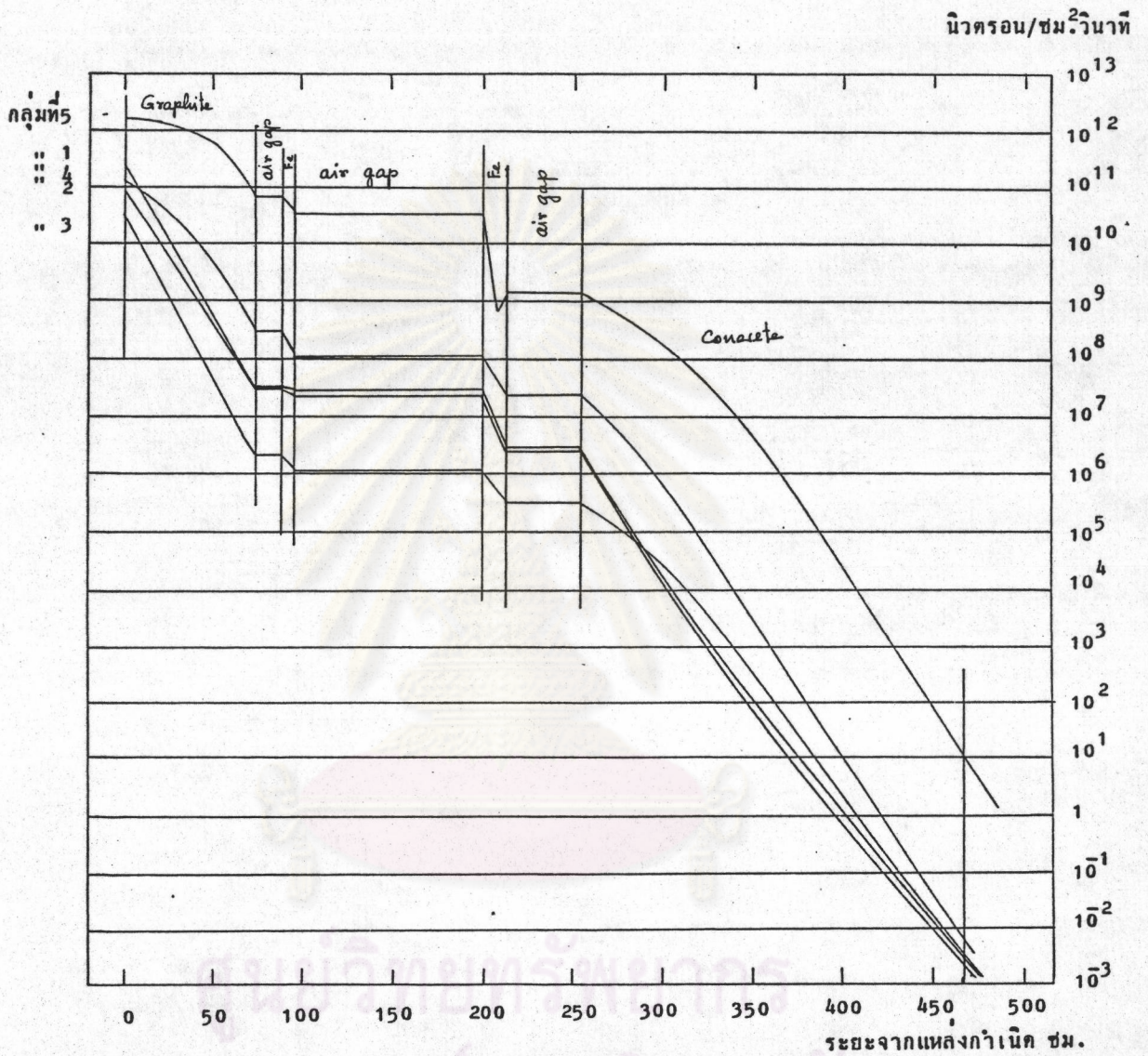
พบว่าค่าเกมมาโดสเรทที่คำนวณบิลอับเพคเตอร์โดยวิธี Kitazume ให้ผลการคำนวณน้อยกว่าวิธี Broder ทุกชั้นของเกราะกำบังรังสี จากรูปที่ 4.11 แสดงได้ชัดว่าเมื่อผ่านไปในตัวกลางมากย่อมเกิดเกมมามีมากขึ้น เพราะเกิดการดูดจับนิวตรอน และให้เกมมาของนิวไคลด์เหล็ก ในชั้นอื่นๆ เกมมาโดสเรทจะลดลง โดยเฉพาะในคอนกรีตลดอย่างรวดเร็ว

สรุปผลการคำนวณต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบการคำนวณจากโปรแกรม SABINE - 3 และ RASH ได้ผลว่า จำนวนนิวตรอนที่มีพลังงานสูงคำนวณได้น้อยกว่าที่คำนวณจาก RASH แต่เทอร์มัลนิวตรอนได้ผลใกล้เคียงมากในบริเวณที่ 1 และในบริเวณถัดมา ลักษณะการลดจำนวนนิวตรอนโดยทั่วไปเป็นเช่นเดียวกัน แต่ในบริเวณที่เป็นคอนกรีตที่คำนวณจาก SABINE - 3 ลักษณะการลดเข้าไป โดยเฉพาะกลุ่มเทอร์มัลนิวตรอนคำนวณจาก SABINE - 3 ได้ค่าประมาณ 1 แต่ถ้าวัดจาก RASH ได้ค่าประมาณ 10^{-3} การที่ได้ผลแตกต่างกันข้างไปรายละเอียดนี้ เนื่องมาจาก

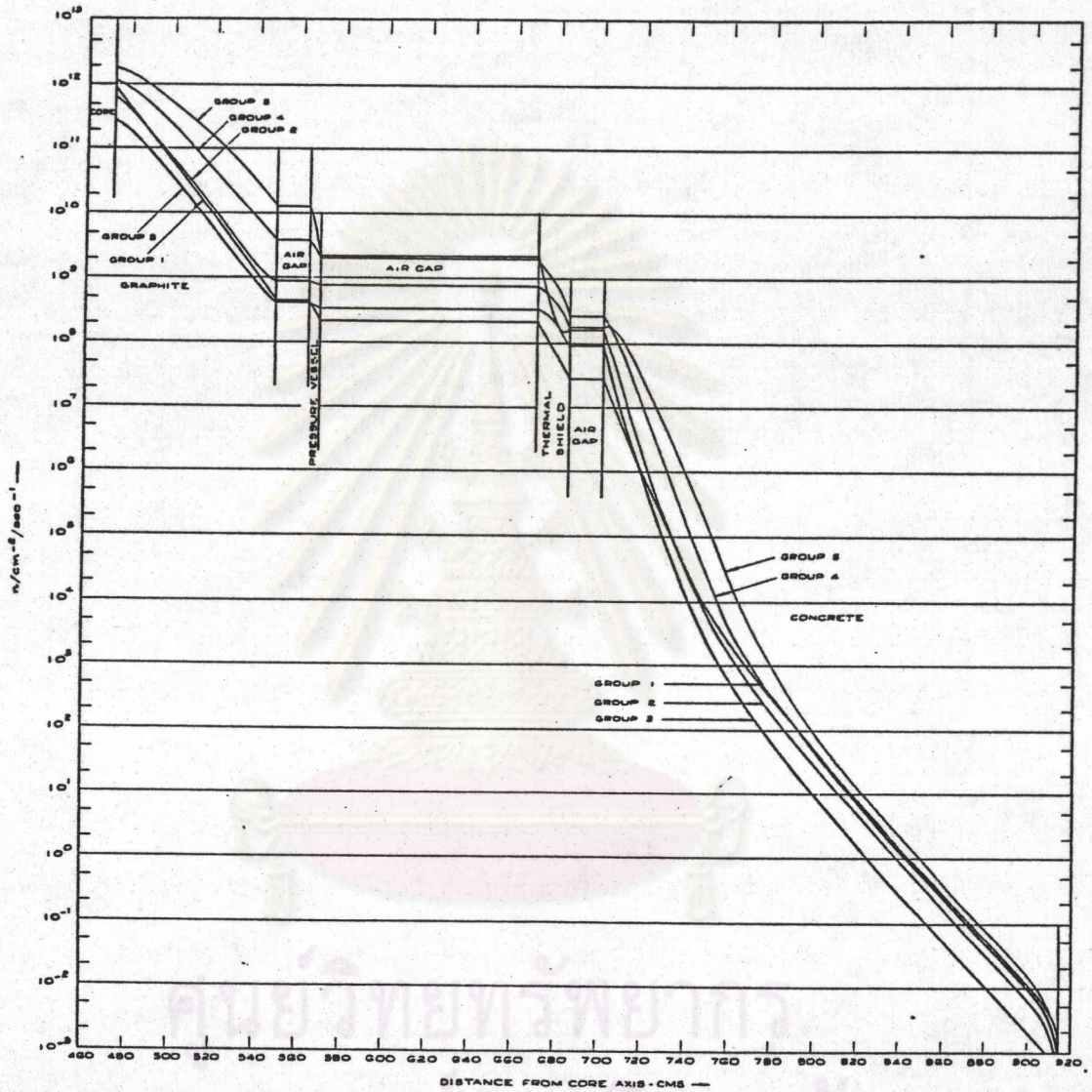
ก. จำนวนกลุ่มพลังงานที่แบ่งในการคำนวณแต่ละ โปรแกรมต่างกัน ใน RASH แบ่งช่วงพลังงานเพียง 5 กลุ่มพลังงาน จาก 2 เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ - เทอร์มัล แต่ SABINE - 3 แบ่งถึง 26 กลุ่มพลังงาน

ข. ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณแตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นค่า cross section ต่างๆ และลักษณะการคำนวณค่าที่นำไปใช้เป็นข้อมูลต่างกัน

ค. วิธีการคำนวณในโปรแกรมทั้งสอง ถึงแม้จะใช้หลักการคำนวณเช่นเดียวกัน แต่การเขียนโปรแกรม การคำนวณทางคณิตศาสตร์ และวิธีการต่างๆ โดยผู้พัฒนาโปรแกรม SABINE - 3 ได้ปรับปรุงการคำนวณโดยวิธีริมูฟเวล - คีฟวู้ช โดยใช้ coupling ริมูฟเวลปลั๊กซ์เข้าไปในสมการการแพร่กระจายด้วย เพื่อให้ได้สเปกตรัมของนิวตรอนเร็วที่คี่ขึ้น ในขณะที่โปรแกรม RASH ซึ่งเป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นก่อนมิได้ใช้วิธีการนี้

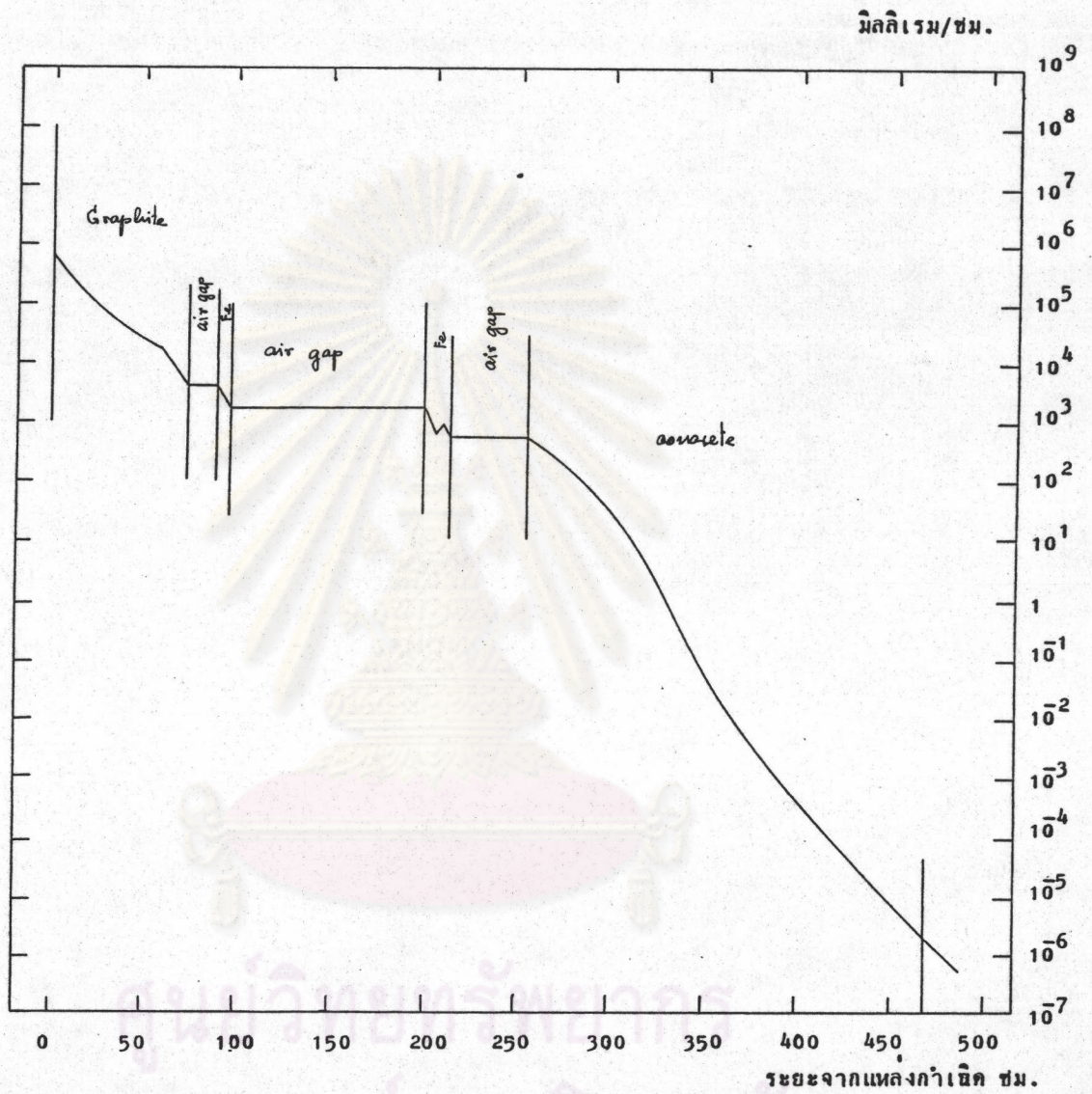


รูปที่ 4.8 นิวตรอนฟลักซ์ที่คำนวณได้จาก SABINE - 3 ในกรณี Calder Hall

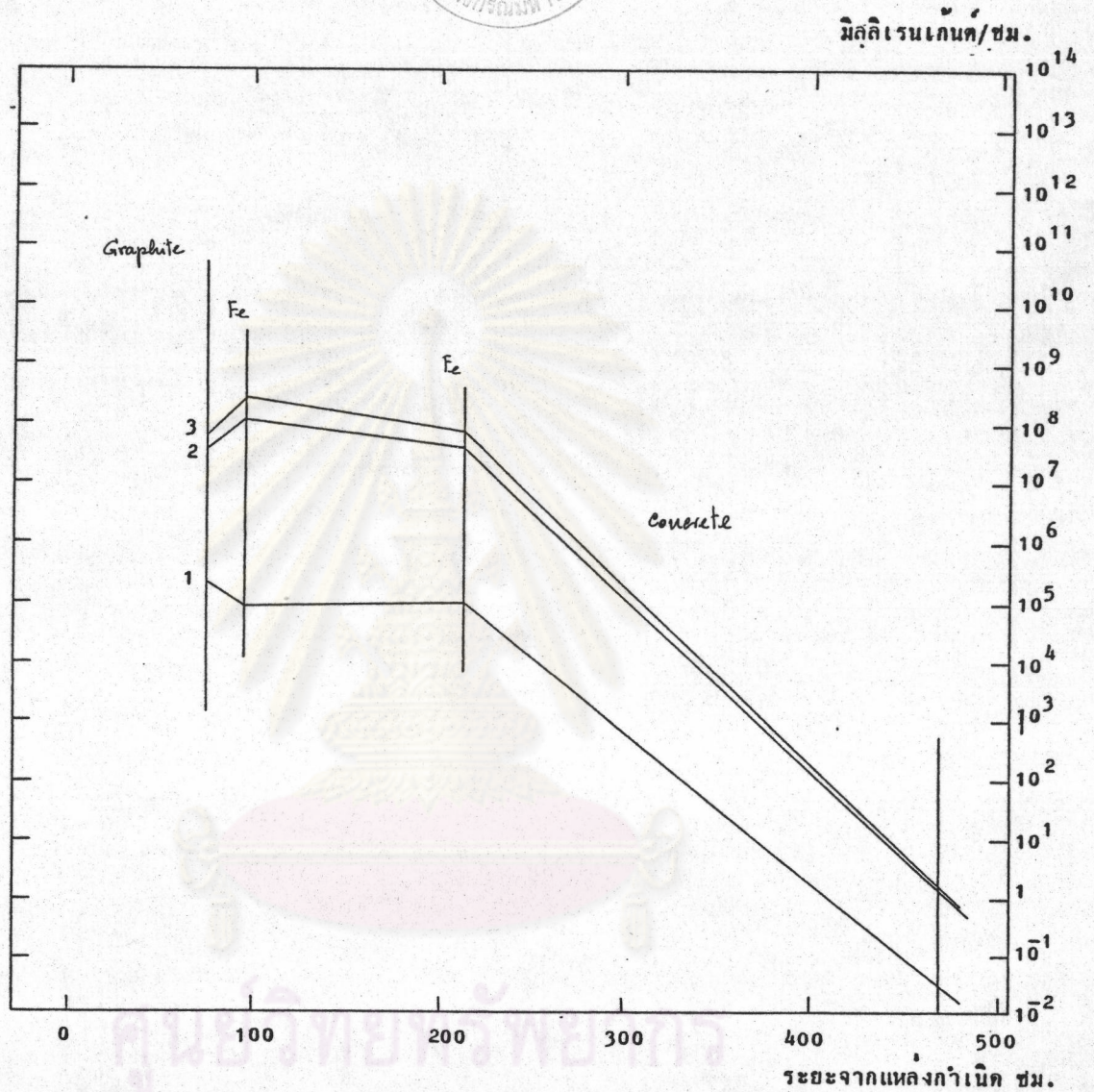


A.E.R.E. R 3216. FIG. 4. CALCULATED DISTRIBUTION OF NEUTRONS IN ENERGY GROUPS 1 TO 5, NORMALISED TO 180 MW REACTOR POWER (FISSION ENERGY RELEASE)

รูปที่ 4.9 นิวตรอนฟลักซ์ที่คำนวณจาก RASH ในกรณีของ Calder Hall



รูปที่ 4.10 นิวตรอนโดสเรทคำนวณโดย SABINE - 3 ในกรณี Calder Hall



รูปที่ 4.11 แกมมาโคสเรท ที่ได้จากเตาปฏิกรณ์ Calder Hall

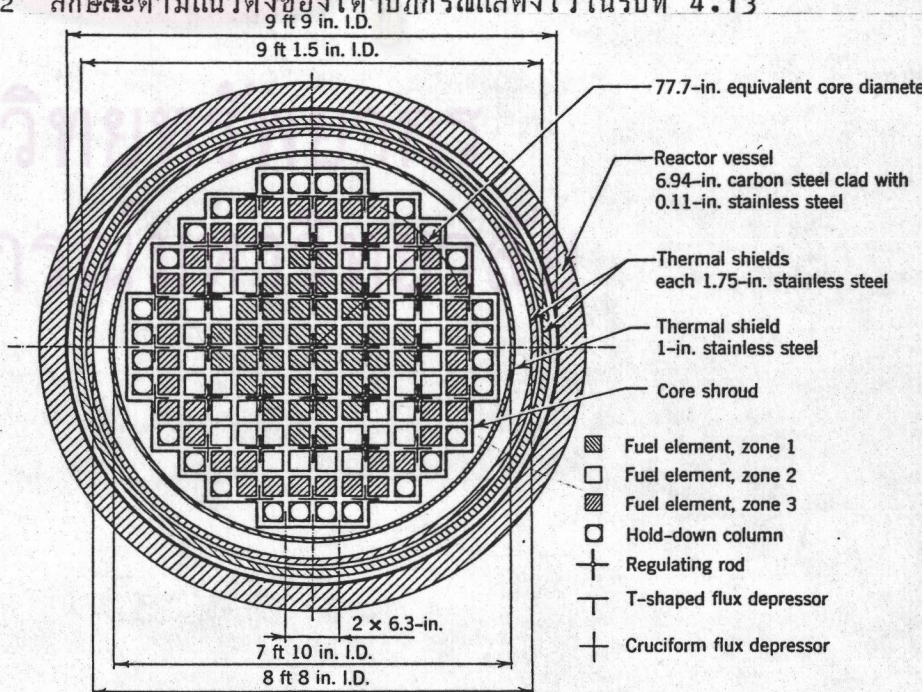
1. เมื่อ $M_0 = 3$
2. เมื่อดำนวนบิลอับเฟคเตอร์โดยวิธี Broder
3. เมื่อดำนวนบิลอับเฟคเตอร์โดยวิธี Kitazume

4.3 การคำนวณการลดของนิวตรอนและแกมมาในเกราะกำบังรังสีของเตาปฏิกรณ์แบบใช้น้ำเป็นตัวหล่อเย็น (LWR)

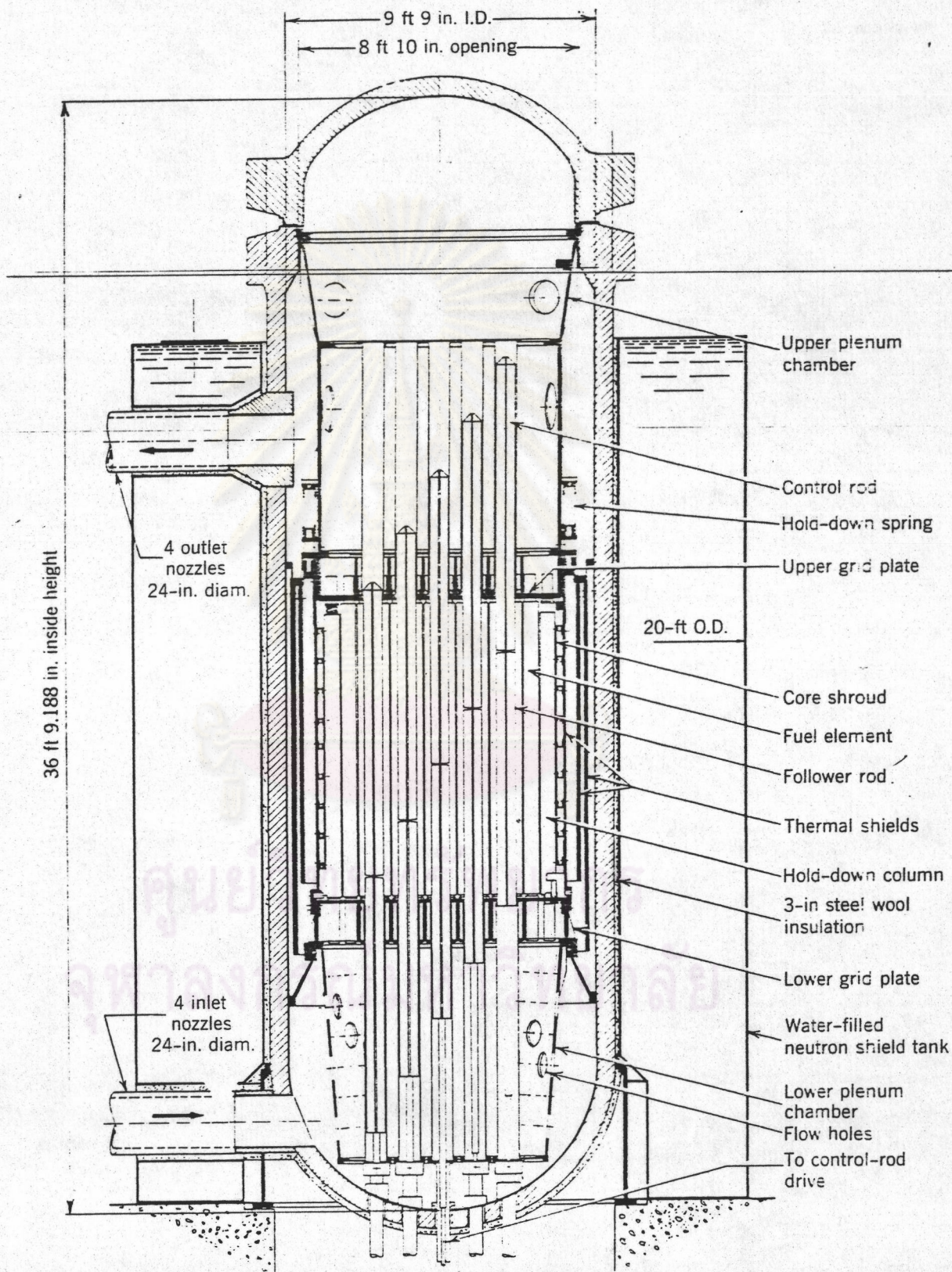
ปัญหาที่นำมาศึกษาอีกกรณีหนึ่ง คือกรณีที่เตาปฏิกรณ์ใช้น้ำธรรมดาเป็นตัวหล่อเย็น ซึ่งเลือกศึกษาชนิด Pressurized Water Reactor โรงไฟฟ้าที่เลือกมาศึกษาชื่อ Indian Point Atomic Power Plant

Indian Point Atomic Power Reactor เป็นโรงไฟฟ้าจ่ายพลังงาน ตั้งอยู่บนแม่น้ำฮัดสัน รัฐนิวยอร์ก สหรัฐอเมริกา เริ่มต้นทำงานเต็มทีเมื่อมกราคม ปี ค.ศ. 1963 ให้อำนาจไฟ 272 เมกกะวัตต์

เตาปฏิกรณ์ที่ศึกษาในปัญหานี้ เป็นเตาปฏิกรณ์แบบ heterogerous รูปทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 78 นิ้ว (198.12 ซม.) สูง 101.5 นิ้ว (257.81 ซม.) เชื้อเพลิงเป็นยูเรเนียมออกไซด์ ใช้ยูเรเนียม 24,800 กิโลกรัม ทำให้มียูเรเนียม (enrichment) โดยเฉลี่ย 3.4 เปอร์เซ็นต์อัดเป็นเม็ด (pellet) ทรงกระบอกมีความหนาแน่นบริเวณริมอกและใน 10.36 และ 10.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับ บรรจุในแท่งเชื้อเพลิง (fuel rods) ทำด้วย stainless steel 120 แท่ง มีพื้นที่หน้าตัดแท่งละ 6.3 ตารางนิ้ว เรียงกันโดยบริเวณแกนกลางมีความหนาแน่นสูงกว่า บรรจุใน pressure vessel ภาคตัดขวางของแกนเตาปฏิกรณ์นี้แสดงไว้โดยสังเขปในรูปที่ 4.12 ลักษณะตามแนวตั้งของเตาปฏิกรณ์แสดงไว้ในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.12 ภาคตัดขวางของแกนเตาปฏิกรณ์ Indian Point Atomic Power Plant



รูปที่ 4.13 ลักษณะภายนอกและภายในของ pressure vessel

4.3.1 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ มีดังนี้

แหล่งกำเนิดนิวตรอนและแกมมาจากแกดเตอปิอัม ซึ่งเป็นยูเรเนียมออกไซด์ ในบริเวณที่ 1 และ 2 เกิดฟิชชัน โดยมีความหนาแน่น 9.96×10^{12} และ 2.19×10^{12} ครั้งต่อลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

เกราะกำบังรังสีมีทั้งสิ้น 11 บริเวณ คำนวณแกมมาฟลักซ์หัตถิยภูมิเนื่องจาก นิวตรอนทุกกลุ่มพลังงาน คำนวณบิลอับเฟคเตอร์เฉลี่ยโดยวิธี Kitazume

การคำนวณแกมมาฟลักซ์ กำหนดค่าการคำนวณที่จุดริมนอกสุดของเกราะกำบัง รังสีที่ระยะ 329.6 ซม. จากขอบนอกของแหล่งกำเนิด

ลักษณะของบริเวณต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ สรุปลงในตารางที่ 4.7 และ เงื่อนไขในการคำนวณสรุปลงในตารางที่ 4.8 ส่วนประกอบของวัสดุที่ใช้ทำเกราะกำบัง รังสีแสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.7 สรุปลักษณะบริเวณต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ

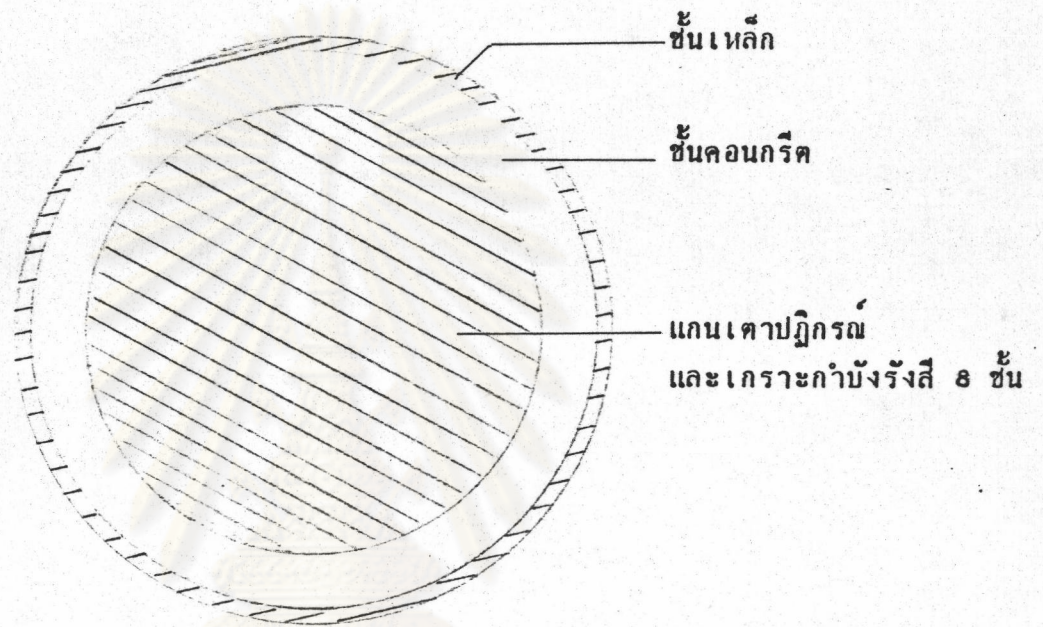
	ลักษณะและส่วนประกอบของบริเวณต่างๆ ในการคำนวณ			
	ส่วนประกอบ	ความหนา (ซม.)	ความหนาแน่น (กรัม/ซม. ³)	การคำนวณ บิลอับเฟคเตอร์
1. แหล่งกำเนิด				
- ชั้นที่ 1 (บริเวณที่ 1)	^{235}U , ^{238}U	56.0	10.5	interpolate
- ชั้นที่ 2 (บริเวณที่ 2)	"	63.38	10.36	"
2. เกราะกำบังรังสี				
- ชั้นที่ 1 (บริเวณที่ 3)	stainless st.	2.54	7.2197	interpolate
- ชั้นที่ 2 (บริเวณที่ 4)	"	4.445	7.2197	"
- ชั้นที่ 3 (บริเวณที่ 5)	"	4.445	7.2197	"
- ชั้นที่ 4 (บริเวณที่ 6)	carbon steel	17.6276	7.83	"
- ชั้นที่ 5 (บริเวณที่ 7)	stainless st.	0.2794	7.2197	"
- ชั้นที่ 6 (บริเวณที่ 8)	H ₂ O	99.06	1.0	"
- ชั้นที่ 7 (บริเวณที่ 9)	concrete	94.44	3.488	Kitazume
- ชั้นที่ 8 (บริเวณที่ 10)	carbon steel	2.222	7.83	interpolate
- ชั้นที่ 9 (บริเวณที่ 11)	concrete	167.64	2.37	Kitazume

ตารางที่ 4.8 รายละเอียดและเงื่อนไขในการคำนวณ

รายการเงื่อนไขในการคำนวณ	ข้อมูล
ดัชนีกำหนดครุรูปทรงแหล่งกำเนิด	ทรงกระบอก
ดัชนีกำหนดครุรูปทรงเกราะกำบังรังสีในการคำนวณริ้วฟเวเลนิตรอน	ทรงกระบอก
ดัชนีกำหนดครุรูปทรงเกราะกำบังรังสีในการคำนวณกึ่งพิวชั้นนิวตรอน	ทรงกระบอก
ดัชนีกำหนดครุรูปทรงเกราะกำบังรังสีในการคำนวณแกมมาทุติยภูมิ	ทรงกระบอก
จำนวนบริเวณทั้งหมด	11
คำนวณแกมมาทุติยภูมิจากเกราะกำบังรังสีเนื่องจากนิวตรอนตั้งแต่กลุ่มที่	1
ดัชนีกำหนดการคำนวณบิลด์อัพเฟคเตอร์ของแหล่งกำเนิด	1
ดัชนีกำหนดการคำนวณบิลด์อัพเฟคเตอร์ของเกราะกำบังรังสี	3
จำนวนเต็ม M_{θ} , M_R , M_{μ} ในการคำนวณช่วง (mesh) ต่างๆ	1
Relative accuracy สำหรับการอินทิเกรตเชิงเลข	.001
จำนวนช่วงที่ถูกแบ่งใน 11 บริเวณในการคำนวณนิวตรอนฟลักซ์	20, 20, 20, 20, 20, 30
จำนวนช่วงที่แบ่งระหว่าง 2 จุดห่างกันในการคำนวณนิวตรอนฟลักซ์บริเวณละ	30, 20, 30
จำนวนจุดที่คำนวณริ้วฟเวเลนิตรอนฟลักซ์และแกมมาฟลักซ์บริเวณละ	5
การกระจายการลดลงในแนวรัศมีและ Z	โพลีโนเมียล

4.3.2 ผลการคำนวณ คำนวณนิวตรอนฟลักซ์ แกมมาฟลักซ์ นิวตรอนโตสเรทและแกมมาโตสเรท ที่คำนวณได้ แสดงไว้ในรายละเอียดในตารางที่ ข.3 ภาคผนวก ข. ในภาคศึกษาผลที่ได้ศึกษาเฉพาะที่ระยะริมนอกสุดของเกราะกำบังรังสีห่างจากแหล่งกำเนิด 389.7 ซม. เมื่อบริเวณที่ 11 เป็นคอนกรีต ซึ่งผลในรายละเอียดปรากฏดังตารางที่ 4.9

เทอร์มัลซีลที่บรรจุใน pressure vessel ของ PWR นี้ ทำหน้าที่เป็นตัวกั้นความร้อนที่อาจจะไปสะสมในเกราะชั้นต่อไป สร้าวด้วย stainless steel ลดจำนวนนิวตรอนเร็วได้อย่างรวดเร็ว ลดนิวตรอนความเร็วปานกลางได้เพียงเล็กน้อย



รูปที่ 4.14 ลักษณะทอสังเขปในการเพิ่มชั้นของเกราะกำบังรังสี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.9 สรุปผลการคำนวณที่ริมสุดของเกราะกำบังรังสี

วัสดุที่ใช้	ระยะจากแหล่งกำเนิด (ชม.)	จำนวนนิวตรอนฟลักซ์ (นิวตรอน/ชม.วินาที)			นิวตรอนโตสเรท (มิลลิเรมต่อ ชม.)	แกมมาโตสเรท (มิลลิเรนเกนต/ช)
		กลุ่มที่ 1	กลุ่มที่ 13	กลุ่มที่ 26		
1. คอนกรีต	398.7	6.936×10^{-9}	1.693×10^{-8}	8.479×10^{-7}	2.670×10^{-8}	1.260×10^{-6}
2. คอนกรีต เหล็ก	329.6	3.315×10^{-7}	7.082×10^{-6}	2.409×10^{-8}	9.139×10^{-6}	1.336×10^{-6}
3. เหล็ก คอนกรีต	329.6	4.242×10^{-7}	1.353×10^{-6}	1.396×10^{-4}	1.962×10^{-6}	4.066×10^{-6}
4. คอนกรีต เหล็ก คอนกรีต	329.6	3.994×10^{-7}	2.865×10^{-6}	1.685×10^{-4}	3.168×10^{-6}	3.360×10^{-6}
5. คอนกรีต เหล็ก คอนกรีต เหล็ก	329.6	3.486×10^{-7}	2.620×10^{-6}	1.063×10^{-7}	3.675×10^{-6}	1.364×10^{-6}

ตารางที่ 4.10 รายละเอียดชั้นเกราะกำบังรังสีที่เพิ่มเติมในการคำนวณ

วัสดุที่ใช้เป็นเกราะกำบังรังสี	ความหนา (ซม.)	จำนวน m.f.p.
1. บริเวณที่ 11 เป็น คอนกรีต	167.64	11
2. บริเวณที่ 11 เป็น คอนกรีต	84.0	5.5
บริเวณที่ 12 เป็น เหล็ก	23.2	5.5
3. บริเวณที่ 11 เป็น เหล็ก	23.2	5.5
บริเวณที่ 12 เป็น คอนกรีต	84.0	5.5
4. บริเวณที่ 11 เป็น คอนกรีต	42.0	2.75
บริเวณที่ 12 เป็น เหล็ก	23.2	5.5
บริเวณที่ 13 เป็น คอนกรีต	42.0	2.75
5. บริเวณที่ 11 เป็น คอนกรีต	42.0	2.75
บริเวณที่ 12 เป็น เหล็ก	11.6	2.75
บริเวณที่ 13 เป็น คอนกรีต	42.0	2.75
บริเวณที่ 14 เป็น เหล็ก	11.6	2.75

ตารางที่ 4.11 สรุปรูปนิเวศรอนฟลักซ์ที่ริมเกราะกำบังรังสีที่เพิ่มขึ้นในการ
คำนวณของกลุ่มพลังงานที่ 1 และ 26

ลักษณะของปัญหา	ส่วนประกอบ	นิเวศรอนฟลักซ์ (นิเวศรอน/ซม ² วินาที)	
		กลุ่มที่ 1	กลุ่มที่ 26
1. วางคอกกรีตอยู่ชั้นริมสุด			
- บริเวณที่ 10	carbon steel	5.759×10^2	2.058
- บริเวณที่ 11	Iron(Fe)	1.059×10^3	1.020
- บริเวณที่ 12	concrete	4.242×10^7	1.996×10^4
2. วางเหล็กอยู่ชั้นริมสุด			
- บริเวณที่ 10	carbon steel	5.704×10^2	8.081
- บริเวณที่ 11	concrete	2.002×10^5	3.714×10^2
- บริเวณที่ 12	Iron(Fe)	3.315×10^7	2.409×10^8
3. วางเหล็กคั่นระหว่าง แผ่นคอนกรีต			
- บริเวณที่ 10	carbon steel	5.705×10^2	6.975
- บริเวณที่ 11	concrete	1.089×10^3	2.052×10^1
- บริเวณที่ 12	Iron(Fe)	1.913×10^5	6.849×10^3
- บริเวณที่ 13	concrete	3.994×10^7	1.685×10^4
4. วางคอกกรีตและเหล็ก สลับกัน			
- บริเวณที่ 10	carbon steel	5.705×10^2	6.975
- บริเวณที่ 11	concrete	1.089×10^3	2.026×10^1
- บริเวณที่ 12	Iron(Fe)	1.372×10^4	1.132×10^2
- บริเวณที่ 13	concrete	2.803×10^6	7.865×10^4
- บริเวณที่ 14	Iron(Fe)	3.486×10^7	1.063×10^7

ในเกราะกำบังรังสีบริเวณที่ 3 ซึ่งเทอร์มัลนิวตรอนเริ่มเพิ่มจำนวนขึ้น ในชั้นของ carbon steel นั้นคล้ายกัน แต่จำนวนนิวตรอนเพิ่มอย่างรวดเร็ว ดังนั้นหลังจากไ้ผ่านเกราะกำบังรังสีจนถึงชั้นของ pressure vessel จำนวนเทอร์มัลนิวตรอนมีมาก แต่นิวตรอนเร็วมีไม่มากนัก เพราะ stainless steel สามารถลดจำนวน - นิวตรอนเร็วได้มาก

ในช่วงเกราะกำบังรังสีที่เป็นน้ำ จำนวนนิวตรอนทุกช่วงพลังงานลดลงอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทอร์มัลนิวตรอนบริเวณที่เป็นคอนกรีตซึ่งมีความหนาแน่นสูง เกิดนิวตรอนความเร็วปานกลางเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากธาตุเหล็ก ต่อมาจึงลดลงเช่นเดียวกับคอนกรีตธรรมดา ดังแสดงในตารางที่ ข.3

เพื่อเป็นการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับเกราะกำบังรังสี ในการวิจัยนี้จึงได้เปลี่ยนการวางเกราะกำบังรังสีจากเดิมซึ่งเป็นคอนกรีตในชั้นสุดท้ายมาเป็นเหล็กและคอนกรีตวางสลับที่กัน โดยให้ความหนาของเหล็กและคอนกรีตมีจำนวน mf.p. เท่ากัน ดังรายละเอียดในตารางที่ 4.10 หัวข้อ 2 และ 3 และสรุปผลนิวตรอนและแกมมาโคสเรทจากตารางที่ 4.9

จากตารางที่ ข.3 สำหรับนิวตรอนพลังงานสูง บริเวณที่เป็น stainless steel ลดจำนวนนิวตรอนได้เพียงเล็กน้อยเนื่องจากชั้นของเกราะกำบังรังสีบาง แต่ลดจำนวนมากในเกราะกำบังรังสีที่เป็นน้ำ คอนกรีตและเหล็กในกรณีที่มีการเพิ่มขึ้น นิวตรอนฟลักซ์พลังงานต่ำมีข้อสังเกตที่บริเวณที่เป็น stainless steel จะให้ค่านิวตรอนฟลักซ์เพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกับ carbon steel เนื่องจากธาตุที่ประกอบนั้น จากชั้นดังกล่าวปรากฏผลเช่นเดียวกับนิวตรอนพลังงานสูง

การที่มีชั้นเหล็กมาขวางอยู่หน้าคอนกรีตลดเทอร์มัลนิวตรอนได้ดีด้วยวิธีการดูดจับ แต่ในขณะเดียวกันให้แกมมาพลังงานค่อนข้างสูง ถ้าเป็นคอนกรีตอยู่ด้านหน้าเหล็กลดจำนวนนิวตรอนฟลักซ์ได้ไม่ดีเท่า แต่การวางคอนกรีตก่อนจะช่วยกันเทอร์มัลนิวตรอนได้ดีกว่า ลักษณะการเพิ่มขึ้นของเกราะกำบังรังสีแสดงไว้ในรูปที่ 4.14 ส่วนผลการคำนวณนิวตรอนฟลักซ์และส่วนประกอบของเกราะกำบังรังสีที่เพิ่มขึ้นนั้นแสดงไว้ในตารางที่ 4.12

สรุปว่าการวางคอนกรีตก่อนหน้าเหล็กให้นิวตรอนโคสเรทสูงกว่าให้แกมมาโคสเรทต่ำกว่าเมื่อวางเหล็กก่อนคอนกรีต แต่โคสรวมโดยทั่วไปใช้เหล็กวางก่อนหน้าคอนกรีตให้โคสรวมต่ำกว่า

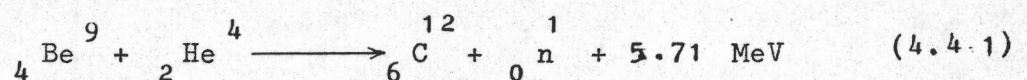
เมื่อเพิ่มขึ้นของเหล็กและคอนกรีตในรูปการวางสลับนั่นกัน ดังรายละเอียดในตารางที่ 4.10 หัวข้อ 4 และ 5 และสรุปผลนิวตรอนและแกมมาโคสเรทจากตารางที่ 4.9 ในการจัดความหนาของชั้นเกราะกำบังรังสีที่เพิ่ม ยังคงให้จำนวน mfp. รวมเท่าเดิม และแต่ละชั้นมีจำนวน mfp. เท่ากัน พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนการวางสลับนั่นจะยิ่งกั้นแกมมาได้ดี แต่ - นิวตรอนโคสเรทในกรณีที่เพิ่ม 3 ชั้นมีค่าต่ำกว่า โดยเหล็กจะกั้นเทอร์มัลนิวตรอนหลังจากผ่านชั้นคอนกรีต เนื่องจากคอนกรีตเป็นส่วนผสมของธาตุเบาและหนัก ดังนั้นส่วนที่เป็นธาตุเบาจะทำให้นิวตรอนเร็วช้าลงโดยอันตรกิริยาต่างๆ ส่วนธาตุหนักจะกั้นแกมมา

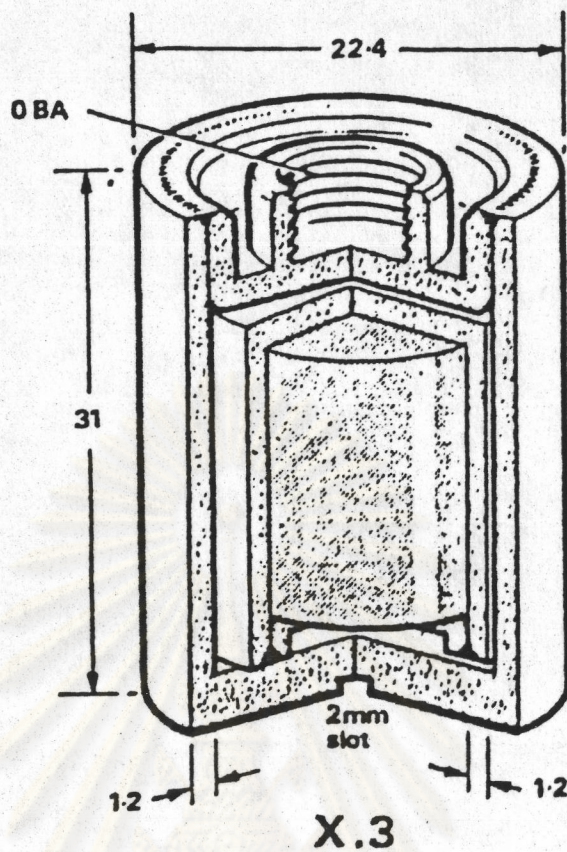
จากการสรุปรวมในทุกกรณี พบว่า ในกรณีของเหล็กที่วางหน้าคอนกรีตให้ค่านิวตรอนโคสเรทน้อยที่สุด แต่คอนกรีตอยู่หน้าเหล็กให้แกมมาโคสเรทน้อยที่สุด เมื่อสรุปโคสรวมแล้ว ในกรณีที่วางคอนกรีตและเหล็กสลับนั่นกัน 4 ชั้น ให้โคสเรทรวมน้อยที่สุด

4.4 การคำนวณการลดของนิวตรอนและแกมมาในเกราะกำบังรังสีเนื่องจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน

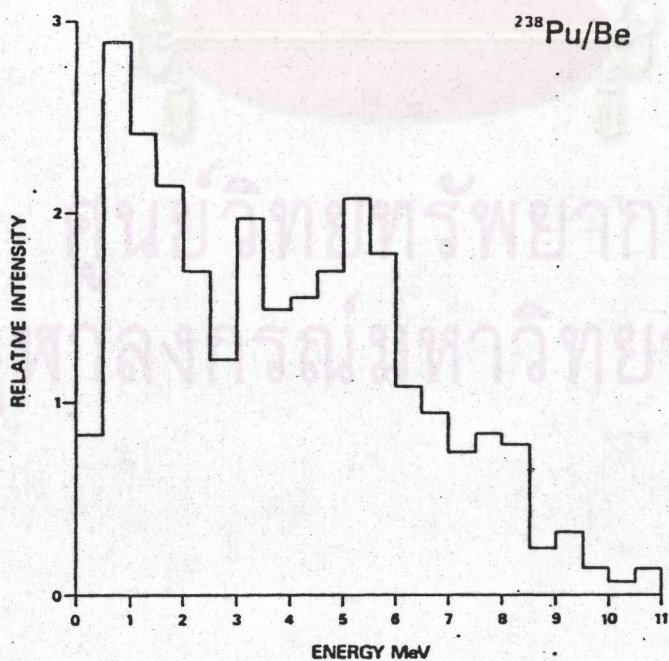
เพื่อเป็นการขยายประโยชน์และความสามารถของโปรแกรม ในการนำไปใช้แก้ปัญหาต่างๆ ให้ได้มากขึ้น เนื่องจากโปรแกรม SABINE - 3 เดิม เขียนขึ้นเพื่อคำนวณเมื่อแหล่งกำเนิดเป็นเตาปฏิกรณ์ หรือแหล่งกำเนิดที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชันที่เกิดตามธรรมชาติเท่านั้น ในกรณีที่ปัญหาที่เกิด ไม่มีส่วนของฟิชชันเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น มีแหล่งกำเนิดเป็นไอโซโทปที่ให้นิวตรอนจากการสลายตัวตามธรรมชาติ จึงต้องมีการแก้ไขโปรแกรม SABINE - 3 นี้บางส่วนเพื่อให้ใช้งานได้ วิธีดัดแปลงอาจทำได้โดยเพิ่มและดัดแปลงการจัดข้อมูล แต่วิธีนี้ทำให้ระบบการอ่านข้อมูลเปลี่ยนแปลงไปมากพอสมควร ทั้งยังต้องจัดการอ่านในโปรแกรมใหม่อีก ดังนั้นเพื่อความสะดวกจึงมาเปลี่ยนที่ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมโดยตรง โดยในส่วนการคำนวณนิวตรอนฟลักซ์ จัดให้โปรแกรมไม่ต้องคำนวณแหล่งกำเนิดจากฟิชชันในสับรูทีน SGOSP และแกมมาฟลักซ์ในสับรูทีน GMACRO แล้วกำหนดค่าของแหล่งกำเนิดแต่ละกลุ่มพลังงานใน SGOSP แทน

ในการศึกษาเลือกศึกษาเมื่อแหล่งกำเนิดนิวตรอนเป็น ^{238}Pu / ^9Be ขนาด 5 คูรี ซึ่งมีรูปลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.15 ให้นิวตรอนโดย ^{238}Pu สลายตัวให้อนุภาคแอลฟา ซึ่งจะเกิดอันตรกิริยากับ ^9Be ให้นิวตรอนดังสมการ 4.1 โดยมีสเปกตรัมนิวตรอนที่พลังงานต่างๆ ดังรูปที่ 4.16





รูปที่ 4.15 ลักษณะของไอโซโทปแหล่งกำเนิดนิวตรอน $^{238}\text{Pu} / \text{Be}$



รูปที่ 4.16 สเปกตรัมการไหลนิวตรอนของ $^{238}\text{Pu} / \text{Be}$ (10)

ตารางที่ 4.12 ความหนาแน่นนิวตรอนในกลุ่มพลังงานต่างๆ 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

4.4.1 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ มีดังนี้

แหล่งกำเนิดนิวตรอน $^{238}\text{Pu} / \text{Be}$ ให้นิวตรอนโดยมีความหนาแน่นนิวตรอน
ดังสรุปในตารางที่ 4.12 และมีแหล่งกำเนิดเฉพาะในบริเวณที่ 2 เท่านั้น ลักษณะของ
บริเวณที่ใช้ในการคำนวณและเงื่อนไขในการคำนวณได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.13 และ
4.14 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.13 สรุปลักษณะของบริเวณต่างๆ ในการคำนวณ

	ลักษณะและส่วนประกอบของบริเวณต่างๆ ในการคำนวณ			
	ส่วนประกอบ	ความหนา (ซม.)	ความหนาแน่น (กรัม/ซม. ³)	การคำนวณ บิลอับเพคเตอร์
1. แหล่งกำเนิด				
- ชั้นที่ 1 (บริเวณที่ 1)	$\text{Pu} + \text{Be}$	0.5	3.78	interpolate
- ชั้นที่ 2 (บริเวณที่ 2)	"	0.5	3.78	"
2. เกราะกำบังรังสี				
- ชั้นที่ 1 (บริเวณที่ 3)	คอนกรีต	70.0	2.37	Kitazume

ตารางที่ 4.14 รายละเอียดและเงื่อนไขการคำนวณ

รายการเงื่อนไขการคำนวณ	ข้อมูล
ดัชนีกำหนดรูปทรงแหล่งกำเนิด	ทรงกระบอก
ดัชนีกำหนดรูปทรงเกราะกำบังรังสีในการคำนวณริ้วเฟลวนิวตรอน	ระนาบ
ดัชนีกำหนดรูปทรงเกราะกำบังรังสีในการคำนวณตีฟิวชั่นนิวตรอน	ระนาบ
ดัชนีกำหนดรูปทรงเกราะกำบังรังสีในการคำนวณแกมมาทุติยภูมิ	ระนาบ
จำนวนบริเวณทั้งหมด	3
คำนวณแกมมาทุติยภูมิจากเกราะกำบังรังสีเนื่องจากนิวตรอนตั้งแต่กลุ่มที่	1
ดัชนีกำหนดการคำนวณบิลอับเฟคเตอร์ของแหล่งกำเนิด	1
ดัชนีกำหนดการคำนวณบิลอับเฟคเตอร์ของเกราะกำบังรังสี	3
จำนวนเต็ม M_{θ} , M_R , M_{μ} ในการคำนวณช่วง (mesh) ต่างๆ	1
Relative accuracy สำหรับการอินทิเกรตเชิงเลข	.001
จำนวนช่วงที่ถูกแบ่งใน 1 บริเวณในการคำนวณนิวตรอนฟลักซ์ บริเวณละ	50
จำนวนช่วงที่แบ่งระหว่าง 2 จุดห่างกันในการคำนวณนิวตรอนฟลักซ์บริเวณละ	5
จำนวนจุดที่คำนวณริ้วเฟลฟลักซ์และแกมมาฟลักซ์บริเวณละ	10
การกระจายการลดลงในแนวลำตัวและ Z	โพลิโนเมียล

4.4.2 ผลการคำนวณ ในการแก้ปัญหานี้ เริ่มจากการสมมติให้ Pu^{238} -Be ให้นิวตรอนทุกกลุ่มพลังงานมีค่าเท่ากันเท่ากับ 2.078×10^4 นิวตรอนต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อวินาที คำนวณนิวตรอนฟลักซ์ แกมมาฟลักซ์เนื่องมาจากการชนและการถูกจับนิวตรอน ในเกราะกำบังรังสี (neutron capture) นิวตรอนและแกมมาโคสเรท ที่คำนวณได้แสดงในรายละเอียดไว้ในตาราง ข.4 ภาคผนวก ข. ส่วนนิวตรอนฟลักซ์กลุ่มพลังงานที่ 1, 13 และ 26 ได้รวมสรุปไว้ในรูปที่ 4.17 และ 4.18 ในเมื่อมีเกราะกำบังรังสีเป็นคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตความหนาแน่นสูง ตามลำดับ คำนวณนิวตรอนโคสเรทได้สรุปรวมคอนกรีตทั้ง 2 ชนิด ในกราฟรูปที่ 4.19

จากนั้นได้ศึกษาการให้นิวตรอนของ Pu^{238} / Be จากสเปกตรัม ในกรณีนี้
 คำนวตรอนฟลักซ์ แกมมาฟลักซ์ นิวตรอนและแกมมาโตสเรท ที่คำนวณได้แสดงไว้ใน
 รายละเอียดในตารางที่ ข.5 ภาคผนวก ข. คำนวตรอนฟลักซ์ในช่วงกลุ่มพลังงานที่
 1, 13 และ 26 ได้สรุปไว้ในรูปของกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.20 ต่อมาได้ทำการศึกษา
 ว่าถ้าเมื่อปนโบรอนลงไปคอนกรีต 2 % โดยประมาณ ซึ่งคำนวณฟลักซ์ แกมมา
 ฟลักซ์ นิวตรอนและแกมมาโตสเรทที่คำนวณได้แสดงในรายละเอียดในตารางที่ ข.6
 ภาคผนวก ข. คำนวตรอนฟลักซ์สรุปไว้ในกราฟที่ 4.21 และค่าโตสเรททั้งที่ปนและ
 ไม่ปนโบรอนสรุปในรูปกราฟรูปที่ 4.22

เมื่อเริ่มต้น คำนวณเหมือนแหล่งกำเนิดให้นิวตรอนเฉลี่ยทุกพลังงานเท่ากัน
 คำนวณความหนาของคอนกรีตที่ควรใช้ตั้งแต่ 100, 70 และ 60 ซม. โดยที่ 100 ซม.
 คำนวณการใช้คอนกรีตทั้ง 2 ชนิด คือ คอนกรีตธรรมดา(light concrete) และ
 คอนกรีตความหนาแน่นสูง(heavy concrete) ได้ผลการคำนวณคร่าวๆ ดังตาราง
 ที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 สรุปผลการคำนวณที่ความหนาต่างๆ กันของคอนกรีต

ความหนา คอนกรีต (ซม.)	นิวตรอนฟลักซ์ (นิวตรอน/ซม ² วินาที)		โตสเรท	
	กลุ่มที่ 1	กลุ่มที่ 26	นิวตรอน (มิลลิเรม/ซม.)	แกมมา (มิลลิเรนเกนต./ซม.)
60	0.5513	660.10	2.999	1.665
70	0.1633	272.40	1.119	0.860
100	0.0004	18.89	0.007	0.104
100 (คอนกรีตความ หนาแน่นสูง)	0.0906	13.81	0.102	0.074

จากผลการคำนวณที่ได้ จึงเลือกศึกษาที่ความหนา 70 ซม. ต่อไป เมื่อเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตความหนาแน่นสูง พบว่า คอนกรีตความหนาแน่นสูง กันเทอร์มัลนิวตรอนได้ดีกว่า แต่กันนิวตรอนพลังงานสูงได้ไม่ดี เพราะคอนกรีตความหนาแน่นสูงมีธาตุน้ำหนักเป็นส่วนประกอบมากกว่าในคอนกรีตธรรมดา ทำให้นิวตรอนโตสเรทมีค่ามากกว่าคอนกรีตธรรมดา แต่มีค่าแกมมาโตสเรทต่ำ จากการคำนวณสรุปได้ว่า แหล่งกำเนิดที่ให้นิวตรอนทุกพลังงานเท่ากันหมด ถึงแม้จะให้ผลการคำนวณมีค่าสูงกว่าที่เป็นจริง แต่ผลการคำนวณนี้สามารถนำมาศึกษาลักษณะการลดทอนของนิวตรอนและแกมมาได้ เพียงแต่จำนวนฟลักซ์สูงเท่านั้น

เมื่อดำเนินการแหล่งกำเนิดตามสเปกตรัม $^{238}\text{Pu} / \text{Be}$ สรุปผลได้ตามตารางที่

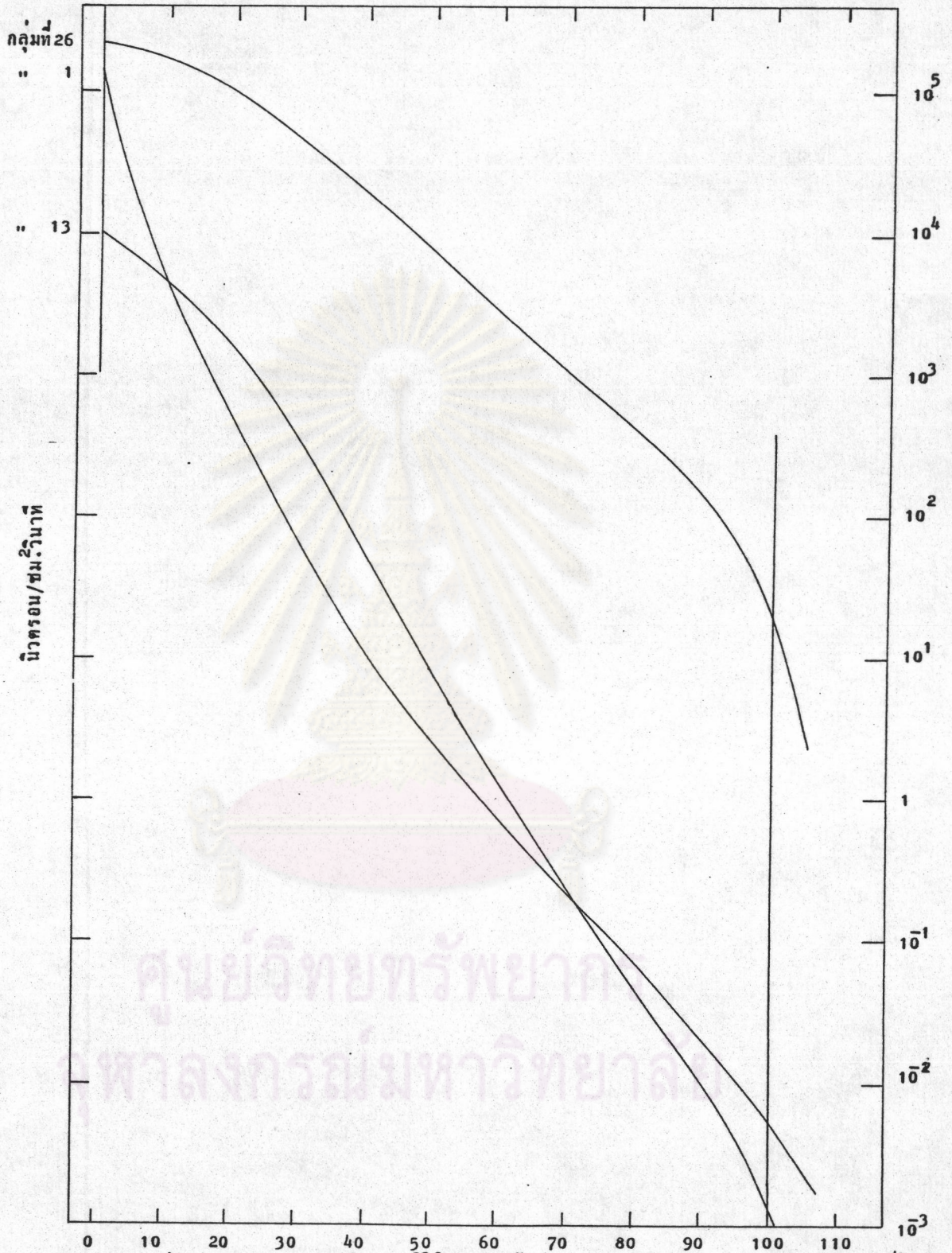
4.16

ตารางที่ 4.16 สรุปผลการคำนวณกรณีต่างๆ ในการคำนวณ

ความหนา คอนกรีต (ซม.)	วัสดุของเกราะ	นิวตรอนฟลักซ์ (นิวตรอน/ซม. ² /วินาที)		โตสเรท	
		กลุ่มที่ 1	กลุ่มที่ 26	นิวตรอน (มิลลิเรม/ซม.)	แกมมา (มิลลิเรนเกน/ซม.)
70	light concrete ไม่มีโบรอน	1.347×10^{-3}	50.490	0.193	0.167
70	light concrete โบรอน 2 %	1.183×10^{-3}	3.296×10^{-4}	2.937×10^{-3}	2.785×10^{-3}
100	light concrete ไม่มีโบรอน	4.079×10^{-5}	3.677	1.384×10^{-2}	2.146×10^{-2}
100	heavy concrete ไม่มีโบรอน	8.990×10^{-4}	2.128	9.729×10^{-3}	1.371×10^{-2}

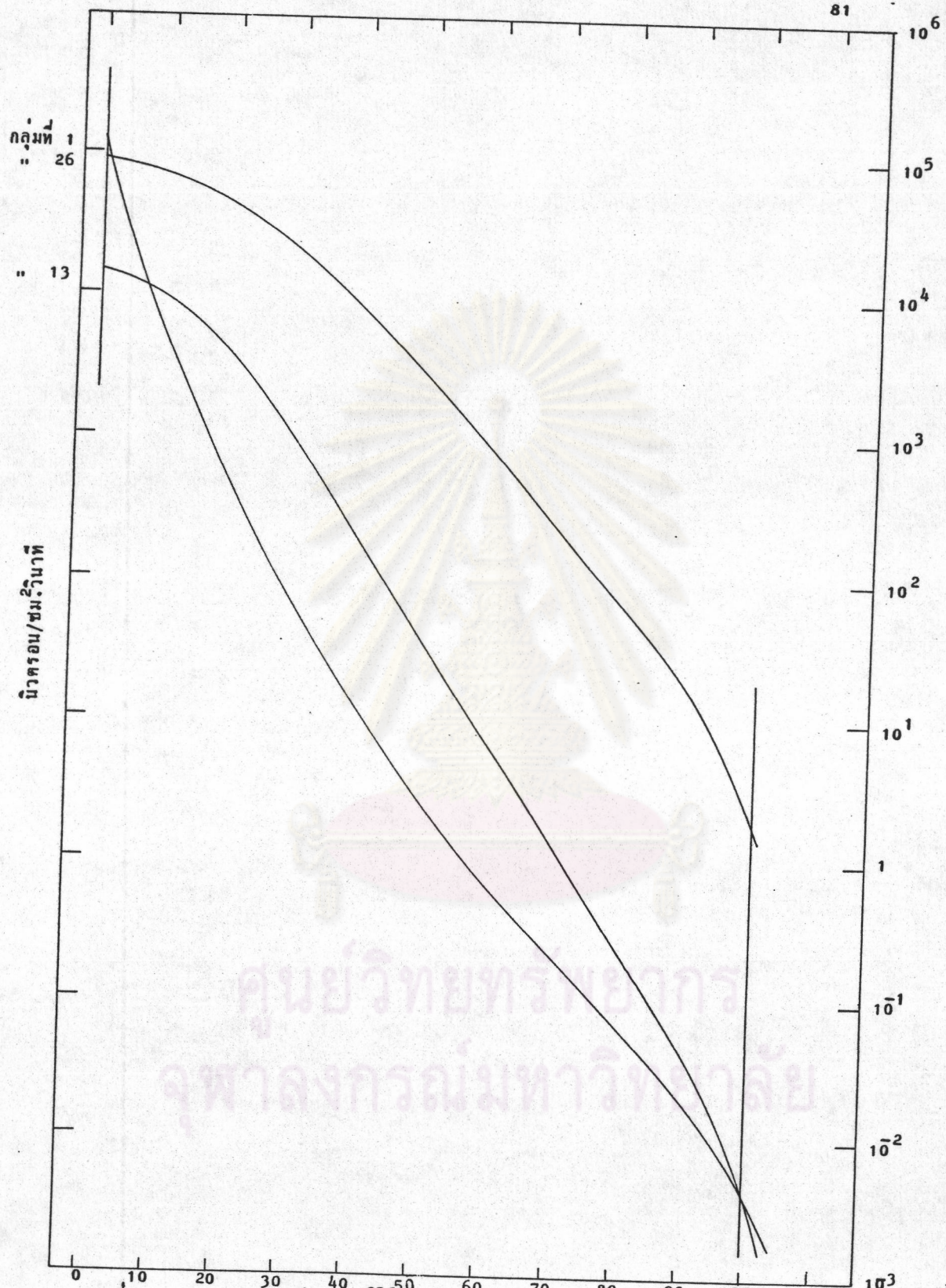
เนื่องจาก โบรอนมีคุณสมบัติดูดจับนิวตรอนที่ช้าลงลดความเร็วจนเป็นเทอร์มัลนิวตรอนได้ดี และหลังจากจับนิวตรอนแล้ว ให้แกมมาพลังงานต่ำ ดังนั้นเมื่อเติมโบรอนเพียง 2 % เท่านั้น ปรากฏผลดังตารางที่ ข.4 ภาคผนวก ข. ที่ริมสุดของเกราะกำบังรังสีลดจาก 0.167 เหลือเพียง 2.62×10^{-3} mR/hr. และเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ลดจาก 50.49 เป็น 3.296×10^{-4} นิวตรอน/ซม²วินาที ทำให้โคสลดลงมาก แต่โบรอนดูดจับนิวตรอนพลังงานสูงและปานกลางได้น้อยมาก (ค่า capture cross section) ของ โบรอนที่เทอร์มัลประมาณ 760 บาร์น และการดูดจับนิวตรอนช้าให้แกมมาพลังงานเพียง 0.478 เมกกะอิเลคตรอนโวลต์) จะเห็นได้ชัดเจนในรูปที่ 4.20 และ 4.21 โดยนิวตรอนกลุ่มพลังงานที่ 26 ลดลงอย่างมากเพียงกลุ่มเดียว

ศูนย์วิทยพัชยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.17 นิวตรอนฟลักซ์ของ Pu^{238}/Be เมื่อให้นิวตรอนทุกกลุ่มพลังงาน ในคอนกรีตธรรมดา

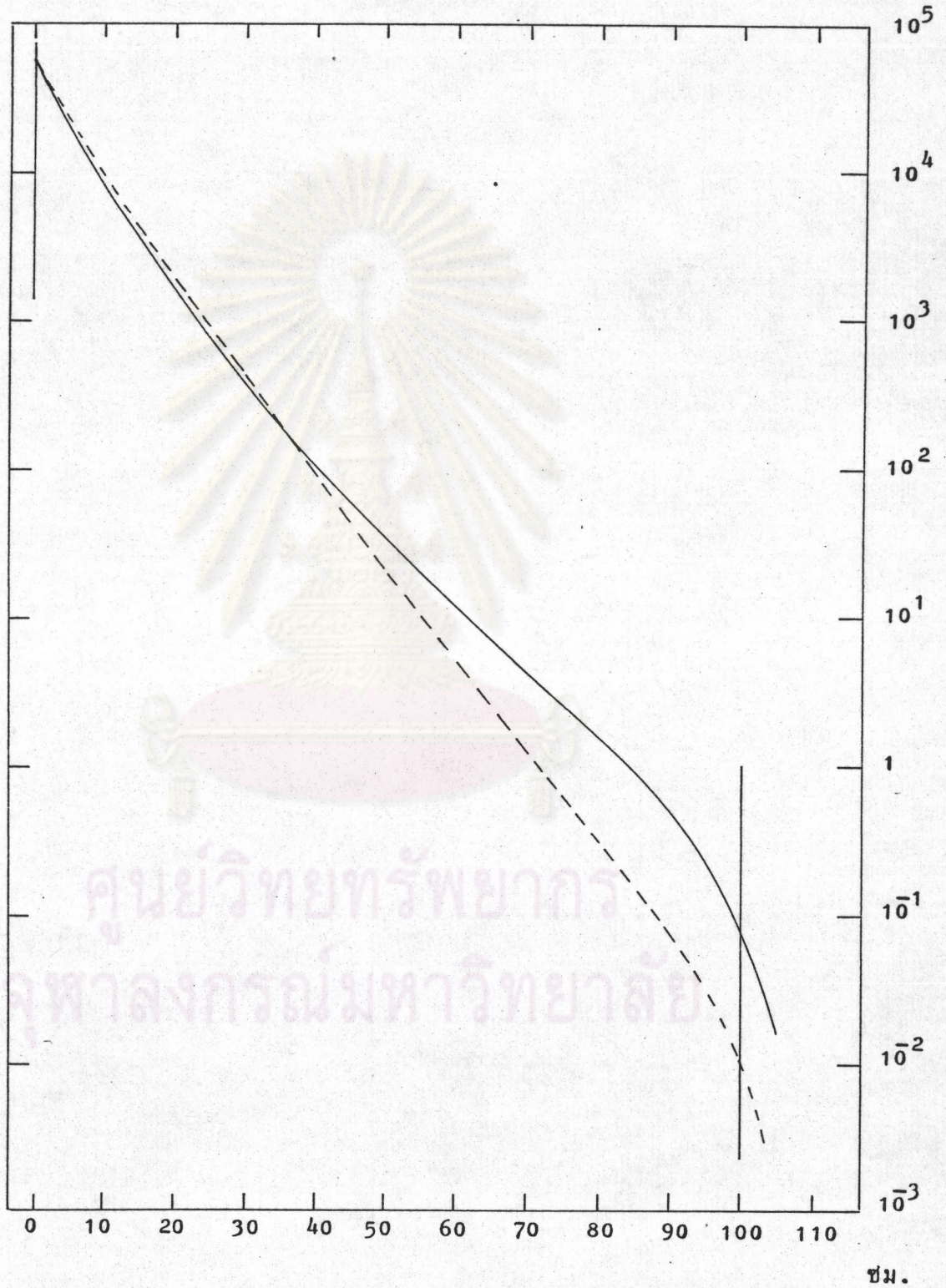
ศูนย์วิจัยทรัพยากร
 ภาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.18 นิวตรอนหลักซ์ของ Pu/Beเมื่อให้นิวตรอนทุกกลุ่มพลังงาน ในคอนกรีตความหนาแน่นสูง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

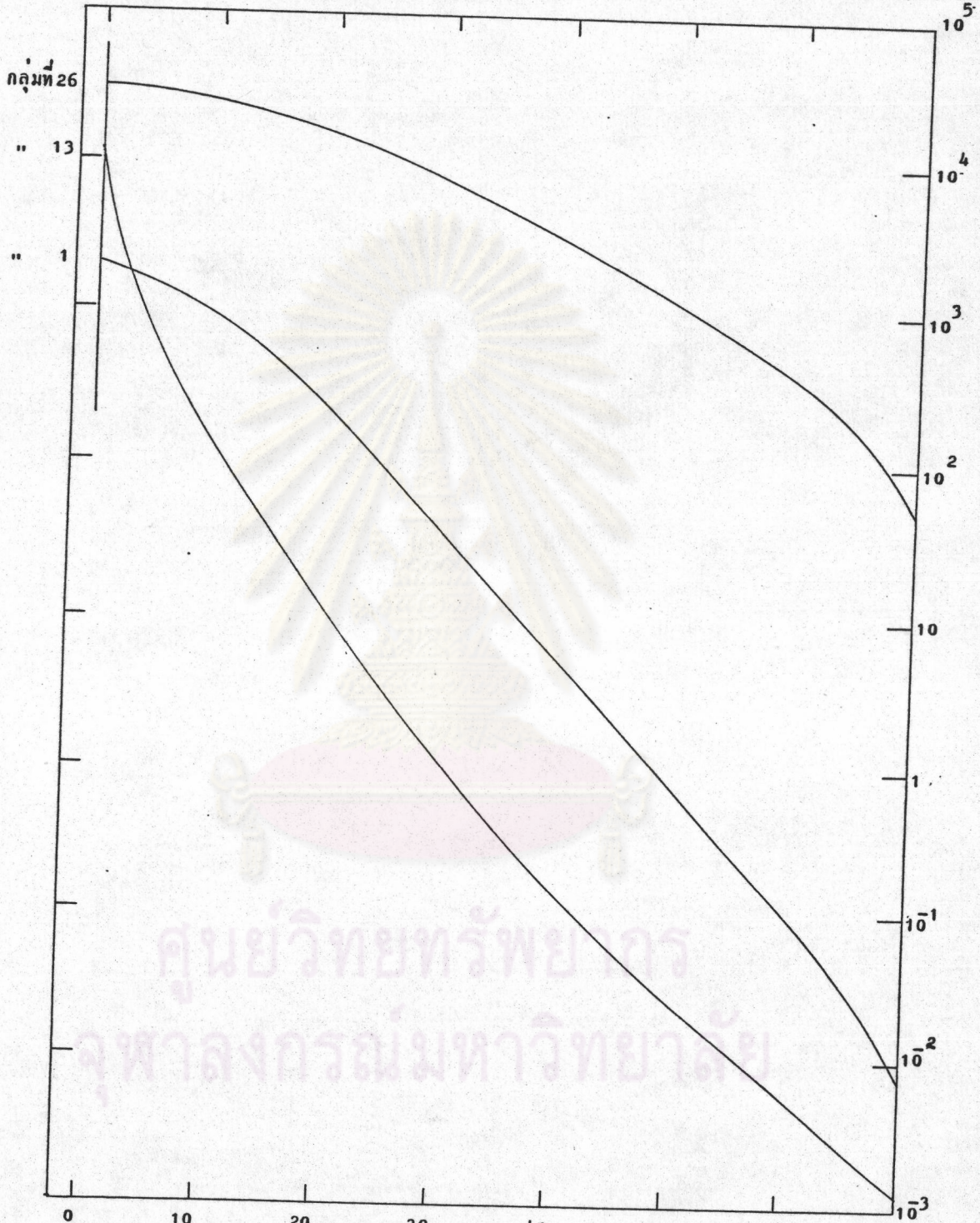
มิลลิเรม/ชม.



รูปที่ 4.19 นิวตรอนโดสเรทของ²³⁸Pu/Be เมื่อให้นิวตรอนทุกกลุ่มพลังงาน

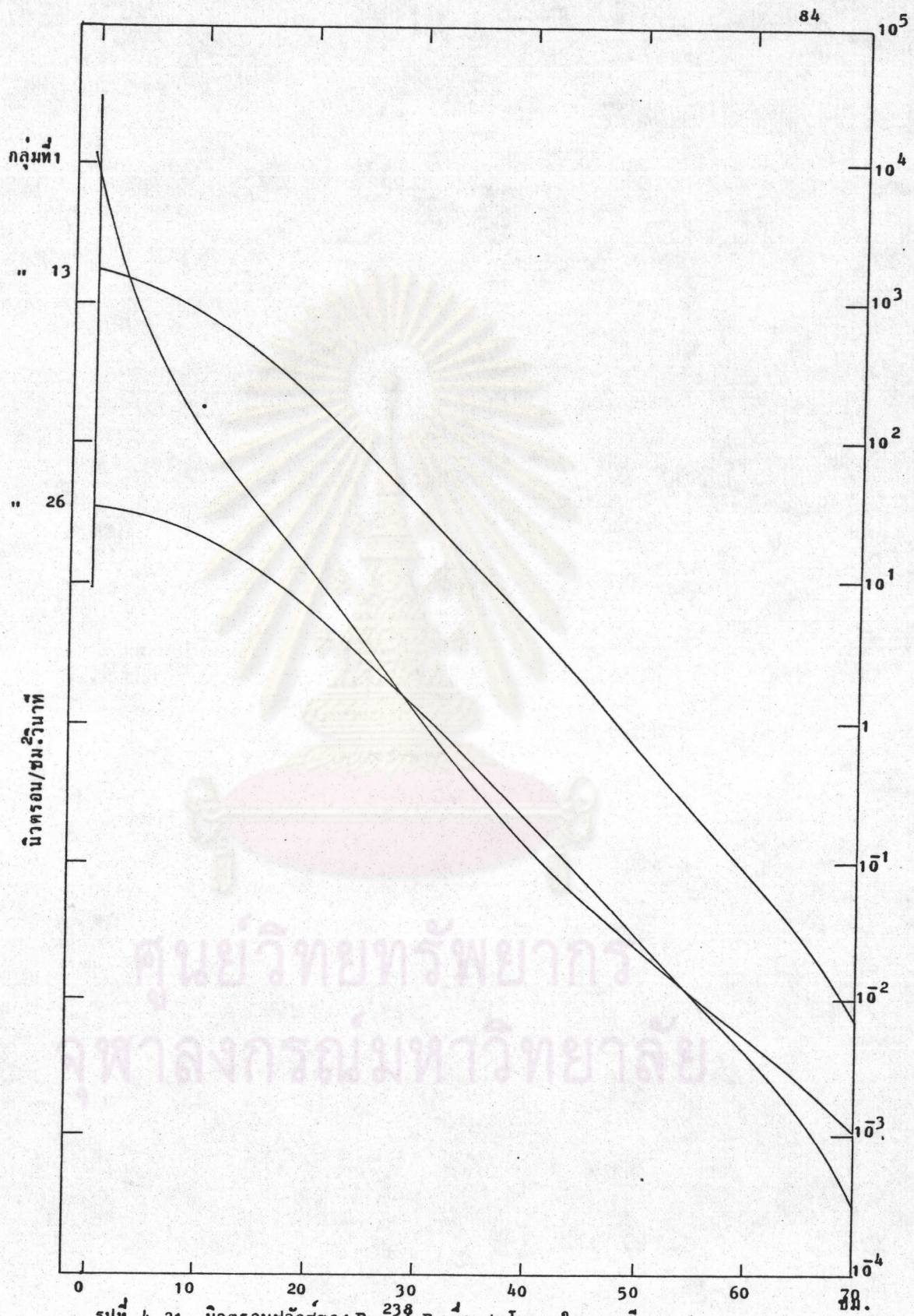
———— คอนกรีตธรรมดา - - - - - คอนกรีตความหนาแน่นสูง

นิวตรอน/ซม.²วินาที
10⁵

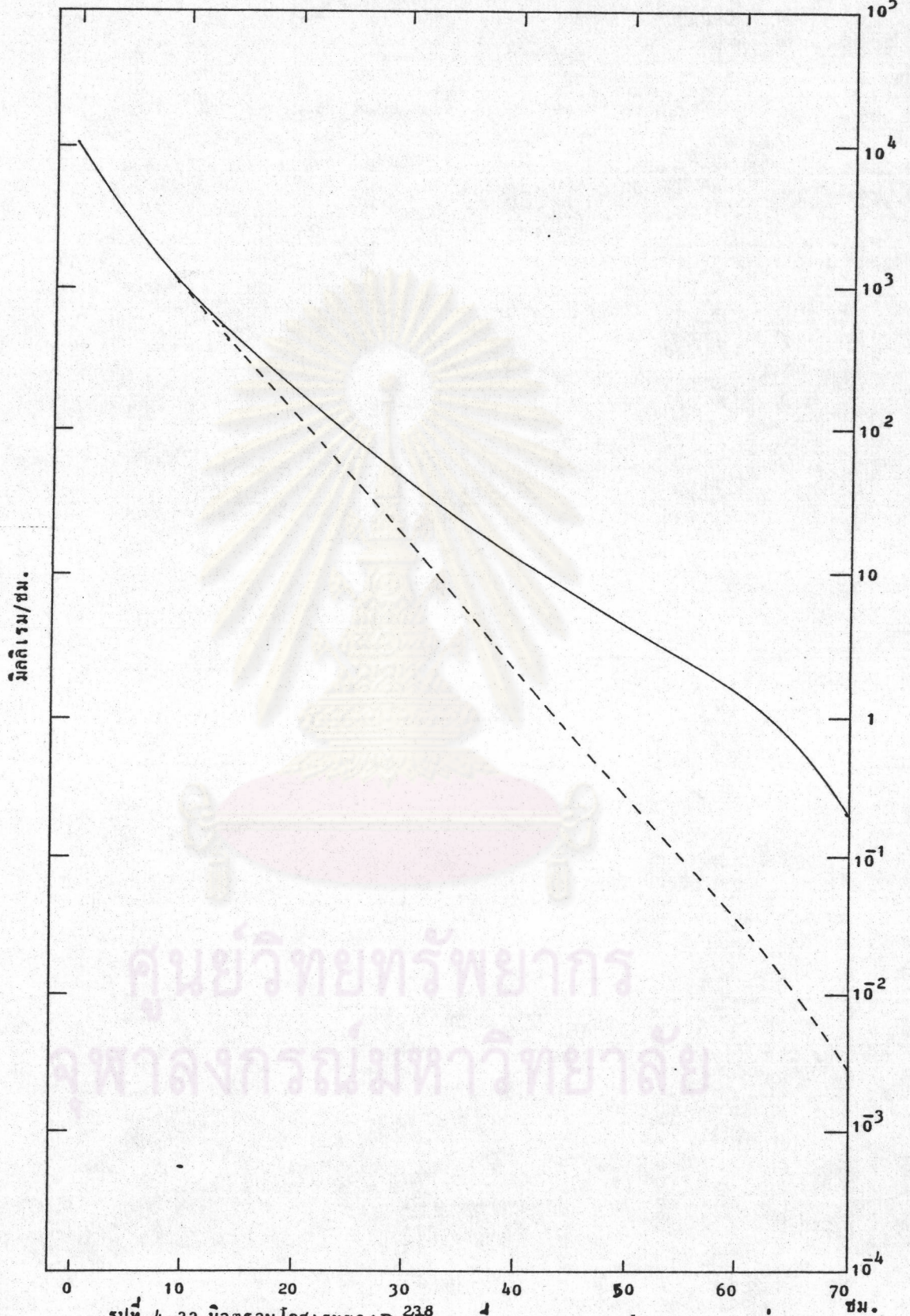


รูปที่ 4.20 นิวตรอนฟลักซ์กลุ่มที่ 1, 13 และ 26 ที่ได้จากการคำนวณเมื่อแหล่งกำเนิดเป็น Pu²³⁸ / Be ซม.

ศูนย์วิทยพัชรากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.21 นำตรอนหลักซ์ของ Pu^{238} ใน Be ผสมโบรอนในคอนกรีต 2 %



รูปที่ 4.22 นิวตรอนโคสเรทของ Pu^{238} และ Bi^{214} ——— ปนโบรอน, - - - ไมปนโบรอน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย