

เทคนิคโมดูลาไรซ์สำหรับการประมาณค่าวิกฤตของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์



นายชลัมภ์ อุ่นอารีย์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

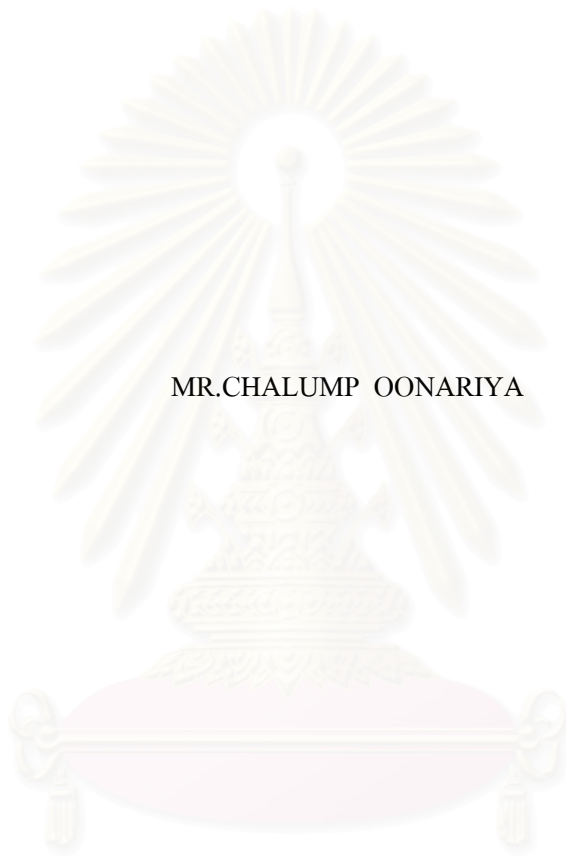
ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0397-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A MODULARIZING TECHNIQUE FOR APPROXIMATING CRITICALITY  
OF A NUCLEAR REACTOR

MR.CHALUMP OONARIYA



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Nuclear Technology

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-13-0397-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เทคนิคโมดูลาไรซ์สำหรับการประมาณค่าวิกฤตของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์
โดย	นายชลัมภ์ อุ่นอารีย์
ภาควิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.สัญญาชัย นิลสุวรรณโฆษิต

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์สมยศ ศรีสถิตย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร.สัญญาชัย นิลสุวรรณโฆษิต)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุพิชชา จันทโรยธา)

## บทคัดย่อวิทยานิพนธ์

นายชลัมภ์ อุ่นอารีย์ : เทคนิคโมดูลาไรซ์สำหรับการประมาณค่าวิกฤตของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์. (A Modularizing Technique for Approximating Criticality of a Nuclear Reactor) อ.ที่ปรึกษา : อ.ดร.ศัญชัย นิลสุวรรณโฆษิต, จำนวนหน้า 107 หน้า.  
ISBN 974-13-0397-1.

การประยุกต์เทคนิคโมดูลาร์ในแบบจำลองเพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับการประมาณค่าวิกฤตของแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ อาศัยสมการการแพร่สำหรับนิวตรอนพลังงานเดี่ยวแล้วประมาณด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่อง ชุดสมการที่วิเคราะห์ได้จากการประมาณค่าเชิงตัวเลข ถูกนำมาสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับประมาณค่าวิกฤตโดยใช้ชื่อว่า “MTAC” กระบวนการทดสอบโปรแกรมมี 3 ส่วน ประกอบด้วย ความสามารถในการคำนวณซ้ำ ความสามารถในการทำนายผลล่วงหน้าเทียบกับค่าทางทฤษฎีและเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองต่างๆที่กำหนดขึ้นกับวิธีมอนติคาร์โลโดยใช้โปรแกรม MCNP 4A

ผลการดำเนินงานพบว่า การคำนวณค่าวิกฤตจากโปรแกรม MTAC มีความเหมาะสมเป็นอย่างดีสำหรับแบบจำลองที่มีการปรับเปลี่ยนส่วนประกอบบ่อยครั้ง(ทั้งการปรับเปลี่ยนทางเรขาคณิตและทางวัสดุ) ทั้งนี้โดยให้ผลโดยรวมในระดับหนึ่งสอดคล้องกับผลจากโปรแกรม MCNP 4A

ข้อดีของโปรแกรม MTAC คือ สามารถเพิ่มหรือลดส่วนประกอบย่อย ตลอดจนการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบต่างๆในแบบจำลองที่พิจารณาได้ง่าย ข้อจำกัดของโปรแกรม MTAC ในการใช้งานส่วนหนึ่งเป็นผลโดยตรงมาจากสมการการแพร่กับพฤติกรรมของนิวตรอนในระบบ และวัสดุตัวกลางที่นิวตรอนเคลื่อนที่ผ่าน ขนาดของแบบจำลองแกนปฏิกรณ์ที่เหมาะสม และข้อจำกัดที่เกิดจากวิธีการคำนวณ ข้อจำกัดต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้การประมาณค่าวิกฤตมีความแม่นยำในระดับหนึ่งเท่านั้น

ภาควิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี	ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา	2543	

**AN ABSTRACT**

# # 4070244421 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORD: MODULARIZING TECHNIQUE/ CRITICALITY/ NUCLEAR REACTOR

CHALUMP OONARIYA: A MODULARIZING TECHNIQUE FOR APPROXIMATING CRITICALITY OF A NUCLEAR REACTOR.

THESIS ADVISER: DR.SUNCHAI NILSUWANKOSIT, Ph.D. ENG. 107 pp.

ISBN 974-13-0397-1.

The modularizing technique was applied in a model for developing a computer code for approximating the criticality of a nuclear reactor with the one-speed neutron diffusion equation and the approximation with the finite difference method. A set of the numerically approximating relations was used to produce the computer code for approximating the criticality named “MTAC”. To validate the code, three separate criterias were employed. They were the ability to repeat the result, the ability to predict the result as compared with the theoretical prediction and the comparison made with the prediction by the Monte-Carlo code called MCNP 4A

The study found that the criticality approximation with “MTAC” was suitable for the model where the composition (geometry or materials) was changed frequently. It also provided the over all result that agreed with MCNP 4A code.

“MTAC” code has an advantage in that the configuration of the system due to the addition or the removal of various part of the system can be easily adjusted in the model. The limitation of MTAC is directly due to the diffusion theory, the behavior of the neutrons in the system and the property of the medium. The size of the system and the limitation of the employed algorithm also effect the calculation. All this limitation allows the approximation to be accurate only up to a level.

Department	Nuclear Technology	Student’s signature.....
Field of study	Nuclear Technology	Advisor’s signature.....
Academic year	2000	

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร.สัญญาชัย นิลสุวรรณโฆมิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัยมาโดยตลอด ซึ่งเป็นผลให้งานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์สมยศ ศรีสฤติย์ รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพิชชา จันทโรยธา ที่ได้กรุณาตรวจสอบ แก้ไข และให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้รับเงินอุดหนุนงานวิจัยจากทางบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัยไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ และรุ่นน้องทุกๆ ท่านที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจมาโดยตลอด

ท้ายที่สุดผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดาที่ช่วยสนับสนุนทั้งทางกำลังทรัพย์ และกำลังใจอย่างเสมอมา ซึ่งเป็นอีกส่วนที่ช่วยให้วิทยานิพนธ์นี้ประสบความสำเร็จ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญภาพ .....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ .....	1
1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย .....	1
1.2. เทคนิคโมดูลาร์ .....	3
1.3. การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล .....	4
1.4. วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	6
1.5. ขอบเขตของการวิจัย .....	6
1.6. ขั้นตอนดำเนินการวิจัย .....	6
1.7. ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย .....	6
2. ทฤษฎี .....	7
2.1 ทฤษฎีการนำส่งนิวตรอน .....	7
2.2 กฎของฟิชและสมการการแพร่นิวตรอน .....	9
2.3 ค่าวิกฤตของแกนปฏิกรณ์ .....	14
2.4 การแก้สมการเชิงอนุพันธ์ด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม .....	15
2.5 การคำนวณค่าวิกฤตโดยกระบวนการเชิงตัวเลข .....	18
2.6 การคำนวณด้วยเมตริกซ์ .....	22
2.7 การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล .....	25
2.7.1 ตัวประมาณค่าวิกฤต( $k_{eff}$ Estimators)ใน MCNP .....	26
2.7.2 การรวมตัวประมาณค่าวิกฤตและการประมาณค่าความคลาดเคลื่อน .....	30
(Combined $k_{eff}$ Estimator and Error Estimation)ใน MCNP .....	
2.7.3 ช่วงความมั่นใจ(Confidence Interval)ใน MCNP .....	31

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
3. เทคนิคโมดูลาร์สำหรับการประมาณค่าวิกฤต $k_{eff}$ .....	32
3.1. การวิเคราะห์เชิงสมการ .....	33
3.2. การประมาณสมการเพื่อการคำนวณเชิงตัวเลข .....	34
3.3. การสร้างแบบจำลองของแกนปฏิกรณ์ .....	36
3.3.1. แบบจำลองแกนปฏิกรณ์แบบส่วนประกอบเดียว .....	36
3.3.2. แบบจำลองแกนปฏิกรณ์แบบหลายส่วนประกอบ .....	37
3.4. รูปแบบเพิ่มข้อมูลป้อนเข้าสำหรับโปรแกรม MTAC .....	40
3.5. รูปแบบเพิ่มข้อมูลป้อนเข้าสำหรับโปรแกรม MCNP 4A .....	43
4. แบบจำลองและผลการคำนวณค่าวิกฤต $k_{eff}$ .....	47
4.1 แบบจำลองแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์หนึ่งส่วนประกอบย่อย สำหรับส่วนประกอบ .....	47
เชื้อเพลิงเดี่ยว .....	
4.2 แบบจำลองแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์หนึ่งส่วนประกอบย่อย สำหรับส่วนประกอบ.....	53
เชื้อเพลิงผสม .....	
4.3 แบบจำลองแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์หลายส่วนประกอบย่อย สำหรับการจัดวางใน .....	59
แนวแกนเดียวกัน.....	
4.4 แบบจำลองสำหรับระบบจัดเก็บกากเชื้อเพลิง .....	64
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	69
5.2 สรุปและวิจารณ์ผลดำเนินการวิจัย .....	69
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา .....	70
รายการอ้างอิง .....	72
บรรณานุกรม .....	73
ภาคผนวก .....	74
ภาคผนวก ก - ค่าคงที่ และตัวแปรต่างๆ ที่อ้างอิง .....	75
ภาคผนวก ข - การคำนวณความหนาแน่นเชิงอะตอม .....	80
ภาคผนวก ค - ความหนาแน่นเชิงอะตอมของวัสดุต่างๆ ที่มีใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ ....	89



สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
ภาคผนวก ง - ตัวอย่างเพิ่มข้อมูลของคอมพิวเตอร์โปรแกรม .....	95
ตาราง แสดงคุณสมบัติและค่าภาคตัดขวางสำหรับเทอร์มาลนิวตรอนกับธาตุต่างๆ ..	103
ประวัติผู้วิจัย.....	107



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ สำหรับเทอร์มาลนิวตรอน .....	46
ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณค่าวิกฤต $k_{eff}$ ของแบบจำลองแกนปฏิกรณ์ที่กำหนดขึ้น โดยใช้พลูโตเนียม-239 เป็นเชื้อเพลิง .....	47
ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณค่าวิกฤต $k_{eff}$ ของแบบจำลองแกนปฏิกรณ์ที่กำหนดขึ้น โดยใช้ยูเรเนียมธรรมชาติ เป็นเชื้อเพลิง .....	47
ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณค่าวิกฤต $k_{eff}$ โดยแบ่งส่วนประกอบขนาดเท่า ๆ กัน ในแนวแกนเดียว .....	50
ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณสำหรับเทอร์มาลนิวตรอน .....	52
ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณค่าวิกฤต $k_{eff}$ สำหรับพลูโตเนียมผสมกับคาร์บอน .....	52
ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณค่าวิกฤต $k_{eff}$ สำหรับพลูโตเนียมผสมกับแมงกานีส .....	53
ตารางที่ 4.8 ผลการคำนวณค่าวิกฤต $k_{eff}$ สำหรับยูเรเนียมผสมกับซิลิคอน .....	53
ตารางที่ 4.9 ผลการคำนวณค่าวิกฤต $k_{eff}$ สำหรับยูเรเนียมผสมกับนิกเกิล .....	54
ตารางที่ 4.10 ค่าคงที่ต่าง ๆ ที่ใช้ในแบบจำลองแกนปฏิกรณ์ เพื่อคำนวณค่าวิกฤต $k_{eff}$ ในระบบ .....	59
ตารางที่ 4.11 ผลการคำนวณค่าวิกฤต $k_{eff}$ ของแบบจำลอง เมื่อระบบประกอบไปด้วย 3 ส่วนประกอบ และมีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนเชิงปริมาตรยูเรเนียม-235 ในส่วนผสม .....	59
ตารางที่ 4.12 ผลการคำนวณค่าวิกฤต $k_{eff}$ ที่ได้จากการเพิ่มส่วนประกอบย่อย จากแบบจำลองแกนปฏิกรณ์ตั้งต้น ที่ทำงานใกล้สภาวะวิกฤต .....	61
ตารางที่ 4.13 องค์ประกอบต่างๆ ในสารละลายพลูโตเนียมในเตรท .....	64
ตารางที่ 4.14 องค์ประกอบต่างๆ ของถังสแตนด์เลส สำหรับบรรจุสารละลาย .....	64
ตารางที่ 4.15 องค์ประกอบหลักในโบรอนคาร์ไบด์ ซึ่งเป็นวัสดุคูดกลืนนิวตรอน .....	64
ตารางที่ 4.16 ผลการคำนวณค่าวิกฤต $k_{eff}$ เมื่อความหนาแน่นเชิงอะตอมของพลูโตเนียม-239 จากถังทั้ง 2 ใบ มีการเปลี่ยนแปลง .....	65
ตารางที่ 4.17 ผลการคำนวณค่าวิกฤต $k_{eff}$ เมื่อความหนาแน่นเชิงอะตอมของพลูโตเนียม-239 จากถังใบที่ 2 มีการเปลี่ยนแปลง .....	66

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 รูปแสดงทิศทางของกระแสนิวตรอน .....	10
รูปที่ 2.2 เส้นกราฟแสดงการประมาณผลต่างสี่บเนื่อง $d\phi/dx _i$ .....	16
รูปที่ 2.3 แสดงแผนภาพขั้นตอนการคำนวณ โดยโปรแกรม MTAC .....	21
รูปที่ 2.4 แสดงเหตุการณ์แบบสุ่ม การเกิดอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับตัวกลางที่สามารถ เกิดปฏิกิริยาแตกตัวได้ .....	26
รูปที่ 3.1 ลักษณะการจัดสร้างส่วนประกอบย่อยสำหรับการประมาณค่าวิกฤต $k_{eff}$ .....	33
รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบย่อยหนึ่งส่วน และลักษณะการกระจายของนิวตรอนฟลักซ์ .....	35
โดยทฤษฎีการแพร่ .....	35
รูปที่ 3.3 ลักษณะการจัดวางส่วนประกอบย่อย 3 ส่วน เพื่อใช้ประมาณค่านิวตรอนฟลักซ์ .... และค่าวิกฤต $k_{eff}$ .....	37
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างเพิ่มข้อมูลป้อนเข้าของแกนปฏิกรณ์จำลอง สำหรับโปรแกรม MTAC .... ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ส่วนประกอบย่อย .....	41
รูปที่ 3.5 โครงสร้างหลักของเพิ่มข้อมูลป้อนเข้าสำหรับโปรแกรม MCNP .....	42
รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าวิกฤต $k_{eff}$ ที่ได้จากการคำนวณทั้ง 3 วิธี สำหรับพลูโตเนียม-239 ...	48
รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าวิกฤต $k_{eff}$ ที่ได้จากการคำนวณทั้ง 3 วิธี สำหรับยูเรเนียมธรรมชาติ	48
รูปที่ 4.3 มุมมองสำหรับการกระจายของนิวตรอนฟลักซ์ในส่วนประกอบ .....	49
รูปที่ 4.4 การแบ่งส่วนประกอบในแนวแกนเดียว และลักษณะการกระจายของ .....	50
นิวตรอนฟลักซ์ที่ประมาณได้ .....	50
รูปที่ 4.5 การแบ่งส่วนประกอบใน 3 แนวแกน ออกเป็น 8 ส่วนเท่า ๆ กัน และเปรียบเทียบ .. ค่าวิกฤต $k_{eff}$ ที่คำนวณได้ .....	50
รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบค่าวิกฤต $k_{eff}$ จากแกนปฏิกรณ์จำลองหนึ่งส่วนประกอบย่อย .... โดยเชื่อเพลิงเป็นวัสดุผสมระหว่างพลูโตเนียมกับคาร์บอน .....	55
รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบค่าวิกฤต $k_{eff}$ จากแกนปฏิกรณ์จำลองหนึ่งส่วนประกอบย่อย .... โดยเชื่อเพลิงเป็นวัสดุผสมระหว่างพลูโตเนียมกับแมงกานีส .....	55
รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบค่าวิกฤต $k_{eff}$ จากแกนปฏิกรณ์จำลองหนึ่งส่วนประกอบย่อย .... โดยเชื่อเพลิงเป็นวัสดุผสมระหว่างยูเรเนียมกับซิลิคอน .....	56
รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบค่าวิกฤต $k_{eff}$ จากแกนปฏิกรณ์จำลองหนึ่งส่วนประกอบย่อย .. โดยเชื่อเพลิงเป็นวัสดุผสมระหว่างยูเรเนียมกับนิกเกิล .....	56

## สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.10 ภาพแบบจำลองแกนปฏิกรณ์ตั้งต้น ก่อนเพิ่มส่วนประกอบ โดยมี 3 ส่วนประกอบ และจัดวางในแนวแกนเดียวกัน .....	58
รูปที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบค่าวิกฤต $k_{eff}$ จากการคำนวณทั้ง 2 วิธี เมื่อแบบจำลองตั้งต้น .. ประกอบด้วย 3 ส่วน วางในแนวแกนเดียวกัน .....	60
รูปที่ 4.12 ภาพแบบจำลองแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เมื่อเพิ่มส่วนประกอบอีก 2 ส่วนในแนว .. แกนเดียวกับแบบจำลองตั้งต้น .....	60
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าวิกฤต $k_{eff}$ จากการคำนวณทั้ง 2 วิธี เมื่อเพิ่ม .. ส่วนประกอบในแบบจำลองที่ทำงานใกล้สภาวะวิกฤต .....	61
รูปที่ 4.14 ระบบจัดเก็บกากเชื้อเพลิงจำลองถูกบรรจุในถังทรงสี่เหลี่ยม .....	63
รูปที่ 4.15 ภาพแสดงการกำหนดส่วนประกอบในแบบจำลองรวม 42 ส่วน ซึ่งเกิดจาก ..... การตัดกันของระนาบสมมุติจากทั้ง 3 แนวแกนในระบบพิกัดฉาก .....	65
รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงของค่าวิกฤต $k_{eff}$ จากตารางผลการคำนวณ เมื่อความหนาแน่น . เชิงอะตอมของพลูโตเนียม-239 ในถังบรรจุ มีการเปลี่ยนแปลง .....	66

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ถือได้ว่าเป็นส่วนสำคัญที่สุดส่วนหนึ่งของระบบนิวเคลียร์ กระบวนการต่างๆที่เกิดขึ้นในแกนปฏิกรณ์เป็นตัวกำหนดสภาวะการทำงานโดยรวมของระบบ กระบวนการหลักที่เกิดขึ้นในแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ คือ ปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบแตกตัว โดยเมื่อนิวตรอนเข้าชนนิวเคลียสของธาตุเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์ ทำให้นิวเคลียสของธาตุเชื้อเพลิงแตกตัวเกิดเป็นนิวเคลียสของธาตุใหม่พร้อมกับมีนิวตรอนใหม่เกิดขึ้น 2-3 ตัวต่อครั้ง นิวตรอนที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวนี้จะสามารถชนกับนิวเคลียสของธาตุเชื้อเพลิงได้อีกทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่อง เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่(chain reaction) แกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่สามารถคงสภาพปฏิกิริยาลูกโซ่ได้ในระยะเวลานานพอแก่การใช้งานนั้น สิ่งจำเป็นที่ต้องพิจารณา คือ ความสมดุลของนิวตรอนในแกนปฏิกรณ์ เมื่อพิจารณานิวตรอนหนึ่งๆที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ นิวตรอนที่เกิดขึ้นเหล่านี้ บางส่วนสามารถสูญหายไปจากแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เนื่องจากการรั่วไหล(leakage) บางส่วนถูกดูดกลืนโดยนิวเคลียสของธาตุตัวกลาง โดยไม่ก่อเกิดปฏิกิริยาแตกตัว(non-fissionable material) จึงมีนิวตรอนบางส่วนเท่านั้นที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แตกตัวต่อไป ดังนั้นการควบคุมแกนปฏิกรณ์เพื่อให้ทำงานต่อเนื่องในสภาวะปกติก็คือ การควบคุมจำนวนนิวตรอนที่เกิดขึ้นในระบบให้มีปริมาณเท่ากับจำนวนนิวตรอนที่สูญหายไปจากระบบ เรียกสภาวะดังกล่าวว่า “สภาวะวิกฤต(criticality)” หากพิจารณาจำนวนนิวตรอนที่เกิดใหม่กับจำนวนนิวตรอนที่มีอยู่เดิม เมื่อจำนวนนิวตรอนรุ่นใหม่มีน้อยกว่าจำนวนนิวตรอนในรุ่นเดิมแล้ว กระบวนการแตกตัวจะหยุดลงในที่สุด แกนปฏิกรณ์ก็จะไม่สามารถปฏิบัติงานต่อไปได้ อัตราส่วนระหว่างจำนวนนิวตรอนรุ่นใหม่ต่อจำนวนนิวตรอนในรุ่นเดิมนี้นี้เรียกว่า “องค์ประกอบการคูณ(multiplication factor)” ซึ่งเขียนแทนด้วย “ $k$ ” พิจารณาได้ดังต่อไปนี้

เมื่อ  $k$  มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่า เมื่อเกิดจำนวนนิวตรอนรุ่นใหม่มากกว่าจำนวนนิวตรอนในรุ่นปัจจุบัน ในแง่ของปฏิกิริยาการแตกตัวนั้น อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้นตลอดเวลา เรียกสภาวะนี้ว่า “สภาวะเหนือวิกฤต(Super-Critical Condition)”

เมื่อ  $k$  มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่า จำนวนนิวตรอนในรุ่นใหม่นี้เท่ากับจำนวนนิวตรอนในรุ่นปัจจุบัน ในแง่ของการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวนั้น อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าคงที่ เรียกสภาวะนี้ว่า “สภาวะวิกฤต(Critical Condition)”

เมื่อ  $k$  มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่า จำนวนนิวตรอนในรุ่นใหม่นี้มีน้อยกว่าจำนวนนิวตรอนในรุ่นปัจจุบัน ในแง่ของการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวนั้น อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าลดลงตลอดเวลา เรียกสภาวะนี้ว่า “สภาวะใต้วิกฤต(Sub-Critical Condition)”

พึงสังเกตว่า ในแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่มีขนาดจำกัด นิวตรอนสามารถรั่วไหลหรือหนีออกไปจากระบบได้ แต่สำหรับแกนปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่มากนั้น นิวตรอนมีโอกาสรั่วไหลออกจากระบบลดลง สำหรับแกนปฏิกรณ์ที่มีขนาดอนันต์นั้น ถือได้ว่าการรั่วไหลของนิวตรอนเป็นศูนย์ ดังนั้นการหาค่า  $k$  สำหรับแกนปฏิกรณ์ที่มีขนาดอนันต์จึงเป็นการพิจารณาเพียง อัตราการเกิดของนิวตรอนต่ออัตราที่นิวตรอนถูกดูดจับ ในขณะที่การหาค่า  $k$  สำหรับแกนปฏิกรณ์ขนาดจำกัด จะพิจารณาอัตราการเกิดของนิวตรอนต่ออัตราที่นิวตรอนถูกดูดจับและรั่วไหลออกไปจากแกนปฏิกรณ์

ปัญหาหนึ่งในการออกแบบแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ คือ การคำนวณขนาดและโครงสร้างของแกนปฏิกรณ์ตลอดจนส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับตัวหน่วงความเร็วของนิวตรอนเพื่อให้แกนปฏิกรณ์ทำงานในสภาวะวิกฤต ทฤษฎีหนึ่งที่ใช้ในการคำนวณ คือ ทฤษฎีการแพร่ของนิวตรอน (Neutrons Diffusion Theory) ในการคำนวณค่าวิกฤตของแกนปฏิกรณ์นั้นจำเป็นที่จะต้องทราบถึงค่าเฉพาะต่างๆภายในแกนปฏิกรณ์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะหรือคุณสมบัติเฉพาะต่างๆในแกนปฏิกรณ์ เช่น เชื้อเพลิง ตัวหน่วงความเร็ว ตัวควบคุมนิวตรอน ขนาดหรือรูปร่างของส่วนประกอบต่างๆ การคำนวณจำเป็นต้องดำเนินการใหม่ทั้งหมดนับแต่ต้น การคำนวณแต่ละครั้งใช้เวลาและทรัพยากรจำนวนมาก การดำเนินการใหม่แต่ต้นจึงเป็นการสิ้นเปลืองอย่างยิ่ง

ในส่วนของการวิจัยนี้ จึงได้เสนอแบบจำลองของแกนปฏิกรณ์เคลียร์ เพื่อใช้ในการคำนวณค่าวิกฤตแบบการประมาณค่า และเพื่อแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของกระบวนการในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการคำนวณค่าวิกฤตของแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ การวิจัยนี้จำกัดขอบเขตของการคำนวณโดยพิจารณานิวตรอนที่กลุ่มพลังงานเดียวเท่านั้น เช่น ในแกนปฏิกรณ์ที่ใช้เทอร์มอลนิวตรอน(thermal neutron) พิจารณานิวตรอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ ไม่ว่าจะถูกดูดกลืนหรือรั่วไหลออกจากระบบ เกิดขึ้นที่ระดับพลังงานความร้อนเท่านั้น โดยเมื่อนิวเคลียสของธาตุที่เป็นเชื้อเพลิงดูดจับเทอร์มอลนิวตรอนแล้ว เกิดปฏิกิริยาแตกตัวให้นิวตรอนเร็ว(fast neutron) จำนวนหนึ่ง พร้อมกับส่วนของนิวเคลียสเดิมที่แตกออก นิวตรอนเร็วจะเข้าชนกับนิวเคลียสของธาตุที่ใช้หน่วงความเร็ว นิวตรอน(neutron moderator) แล้วเกิดการกระเจิง(scattering) จากการชนกับนิวเคลียสอื่นๆ จนพลัง



งานลดลงสู่ระดับพลังงานต่ำ ในทางปฏิบัตินิวตรอนเร็วบางตัวอาจสูญหายไปจากระบบ ก่อนที่จะสามารถลดพลังงานลงสู่ระดับพลังงานของเทอร์มอลนิวตรอนได้ บางตัวอาจถูกดูดกลืนที่ระดับพลังงานเหนือกว่าที่ระดับพลังงานของเทอร์มอลนิวตรอน โดยนิวเคลียสของธาตุต่างๆ ที่เป็นส่วนผสมในแกนปฏิกรณ์ ขณะที่บางตัวอาจหนีหรือรั่วไหลออกไปจากระบบ

ความสำคัญประการหนึ่งของการวิจัยนี้ คือ การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์และเทคนิคโมดูลาร์สำหรับแบบจำลองแกนปฏิกรณ์ ที่ช่วยลดระยะเวลาในการคำนวณค่าวิกฤตของระบบที่ถูกกำหนดขึ้น เนื่องจากการคำนวณแบบการประมาณค่า เทคนิคที่ประยุกต์ใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำให้การสร้างแบบจำลองของแกนปฏิกรณ์จึงมีความยืดหยุ่นระดับหนึ่ง และสามารถใช้แก้ปัญหาที่ขาดความสมมาตร ทั้งยังมีความสามารถในการเพิ่มหรือลดส่วนประกอบย่อยจากแบบจำลองสำหรับปัญหาที่เคยศึกษามาก่อนหน้าที่สร้างขึ้น เพื่อศึกษาถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงโดยรวมที่เกิดขึ้น อันจะเป็นแนวทางในการสร้างระบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้น

## 1.2 เทคนิคโมดูลาร์

การสร้างแบบจำลองเพื่อช่วยในการคำนวณทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ทำให้การปฏิบัติงานต่างๆเกิดความสะดวกมากขึ้น ทั้งยังช่วยลดระยะเวลาตลอดจนข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากการปฏิบัติงานจริงได้ เนื่องจากการคำนวณในแบบจำลองที่สร้างขึ้นกระทำโดยคอมพิวเตอร์ ทำให้สามารถปรับเปลี่ยนเงื่อนไขต่างๆ ในแบบจำลองตามความต้องการได้ง่ายและยังสามารถรองรับงานที่มีความซับซ้อนมากๆ ได้อีกด้วย ตัวอย่างเช่น การใช้เทคนิคสร้างภาพสามมิติทางการแพทย์ ในการสร้างแบบจำลองอวัยวะภายในร่างกายมนุษย์หรือสิ่งมีชีวิตอื่นๆ เพื่อวางแผนการรักษาก่อนการปฏิบัติงานหรือใช้เพื่อการเรียนการสอนในสาขาวิชา การสร้างแบบจำลองโมเลกุลในงานด้านเคมี เพื่อช่วยในการศึกษาคูสมบัติต่างๆของสาร สำหรับงานทางด้านนิวเคลียร์วิศวกรรมเป็นอีกสาขาหนึ่งที่อาศัยการสร้างแบบจำลองเพื่อช่วยในการคำนวณค่าต่างๆ เช่น ค่าวิกฤต ค่านิวตรอนฟลักซ์ หรืออัตราการถ่ายโอนความร้อนภายในแกนปฏิกรณ์ โดยที่การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์นั้น จำเป็นต้องทราบถึงค่าเฉพาะต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 1.1 ดังนั้นในการวิจัยนี้ได้เห็นความสำคัญของการสร้างแบบจำลองเพื่อช่วยในการคำนวณค่าวิกฤตทางด้านวิศวกรรมนิวเคลียร์ สำหรับระบบที่ประกอบไปด้วยวัสดุอันอาจเป็นเชื้อเพลิงเนื่องจากกระบวนการฟิชชัน เช่น แกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์หรือในระบบจัดเก็บกากเชื้อเพลิง จึงได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์จากสมการทางทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และได้ประยุกต์เทคนิคที่พัฒนาขึ้นภายในงานด้วย

การวิจัยนี้ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อประยุกต์ในการสร้างแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ หรือระบบที่ประกอบด้วยวัสดุอันอาจเป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ โดยใช้เทคนิคโมดูลาร์เพื่อคำนวณค่าวิกฤตของระบบ เทคนิคโมดูลาร์มีหลักการ คือ โครงสร้างของแบบจำลองจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนประกอบย่อย โดยที่ส่วนประกอบย่อยแต่ละส่วนจะถูกกำหนดในระบบฟิสิกส์ที่มีค่าทางฟิสิกส์นิวเคลียร์เฉพาะสำหรับแต่ละส่วนประกอบ มีความสัมพันธ์กับส่วนประกอบอื่นๆ ผ่านทางพื้นผิวระหว่างส่วนประกอบที่อยู่ติดกัน ด้วยเทคนิคโมดูลาร์นี้ทำให้สามารถเพิ่มหรือลดส่วนประกอบจากแบบจำลองเดิมที่มีอยู่ได้ง่าย มีความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบทางวัสดุและขนาดของส่วนประกอบในแบบจำลองที่ได้สร้างขึ้นมาก่อนแล้ว นอกจากนั้นยังสามารถสร้างแบบจำลองที่ขาดสมมาตรเพื่อใช้ในการคำนวณได้อีกด้วย เนื่องจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเป็นการคำนวณเชิงตัวเลข วิธีการแก้ปัญหาส่วนใหญ่จึงมีพื้นฐานมาจากการคำนวณแบบประมาณค่า ซึ่งทำให้ความแม่นยำของผลการคำนวณที่ได้ลดลง การคำนวณมีลักษณะวงรอบ(looping) เพื่อขยับเข้าหาคำตอบ(iteration) โดยเริ่มจากค่าตั้งต้นค่าหนึ่ง แต่การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้แบบจำลองที่สร้างขึ้นอย่างเหมาะสม เช่น ขนาดและส่วนประกอบที่เลือกใช้ จะช่วยให้สามารถจำกัดความคลาดเคลื่อนของการคำนวณได้ในระดับหนึ่ง

### 1.3 การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล

การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลสำหรับการวิเคราะห์การเดินทางของอนุภาครังสี (Radiation Transport) คือการสร้างทางเดินสุ่ม(Random Path)ของอนุภาครังสี เพื่อเก็บข้อมูลจากทางเดินของแต่ละอนุภาคมาคำนวณค่าเฉลี่ยของเหตุการณ์ที่พิจารณา (อนุภาครังสีจะเคลื่อนที่แบบสุ่มผ่านตัวกลางภายในระบบทำให้เกิดอันตรกิริยากับอนุภาคของตัวกลาง ลักษณะการเคลื่อนที่และอันตรกิริยาของอนุภาคสามารถทำนายได้โดยทฤษฎีความน่าจะเป็นและกฎทางฟิสิกส์ในระดับอนุภาค จากนั้นทำการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของค่าดังกล่าวด้วยวิธีทางสถิติ) ค่าที่ได้คือความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ที่กำลังพิจารณาสำหรับแต่ละอนุภาค ในการประยุกต์วิธีมอนติคาร์โลเพื่อใช้ในการประมาณค่าวิกฤตของระบบนั้น วิธีดังกล่าวไม่ได้แก้ปัญหาโดยการแก้สมการโดยตรง ทว่าคำตอบที่ได้ เกิดจากการจำลองอนุภาคนิวตรอนแต่ละตัวขึ้นมาเพื่อศึกษาพฤติกรรมโดยเฉลี่ยต่างๆ ของอนุภาคเหล่านั้น ในกรณีระบบที่พิจารณามีลักษณะทางเรขาคณิตสามมิติและมีความซับซ้อน การใช้วิธีมอนติคาร์โลในการคำนวณจึงมีความสะดวกเป็นอย่างยิ่ง ส่วนหนึ่งของการวิจัยนี้ได้นำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีชื่อว่า Monte Carlo N-particles Transport Code (MCNP 4A) ของ Radiation Shielding Information Center, RSIC ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้ในการคำนวณทางวิศวกรรมนิวเคลียร์อย่างกว้างขวาง มาใช้ในการคำนวณค่าวิกฤตจากแบบจำลองที่สร้างขึ้น เพื่อเป็น



การเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น โดยใช้ชื่อว่า A Modularizing Technique for Approximating Criticality(MTAC)

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MCNP เวอร์ชัน 4A เป็นโปรแกรมที่ได้รับการพัฒนาจากศูนย์วิจัยทางนิวเคลียร์ Los Alamos National Laboratory ประเทศสหรัฐอเมริกา สามารถใช้แก้ปัญหาการเดินทางของอนุภาคโฟตอน อิเล็กตรอน และนิวตรอน หรือปัญหาที่มีการพิจารณาอนุภาครังสีเหล่านี้ควบคู่กัน นอกเหนือจากความสามารถในการคำนวณทางเดินสุ่มแบบสามมิติและวิธีการคำนวณแบบต่างๆ เพื่อลดค่าความแปรปรวน(Variance Reduction)ของผลลัพธ์ โปรแกรมนี้ยังประกอบด้วยเพิ่มข้อมูลของค่าภาคตัดขวาง(Cross-section Data Library) ของไอโซโทปต่างๆ ที่ผู้ใช้สามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับงานของตนได้ เพิ่มข้อมูลภาคตัดขวางเหล่านี้ได้รับการปรับปรุงเรื่อยมา พร้อมทั้งมีการศึกษาเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณกับการทดลอง เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของเพิ่มข้อมูลที่ปรับปรุงใหม่อย่างต่อเนื่องมาโดยตลอด

อย่างไรก็ตามการใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MCNP 4A นี้ ผู้ใช้งานนอกจากจะต้องมีความรู้ทางด้านทฤษฎีของปฏิกิริยานิวเคลียร์แล้ว การศึกษาเทคนิคต่างๆในการออกแบบเพิ่มข้อมูลเข้าสำหรับโปรแกรม MCNP ยังมีส่วนช่วยให้การใช้งานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และเกิดความถูกต้องสูงสุด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาเทคนิคโมดูลาร์สำหรับการประมาณค่าวิกฤตของแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์

#### 1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1. พัฒนาเทคนิคโมดูลาร์เพื่อใช้ในการคำนวณแบบประมาณค่า แทนการแก้สมการทางคณิตศาสตร์โดยตรง
2. พัฒนาโปรแกรมบนไมโครคอมพิวเตอร์ สำหรับการประมาณค่าวิกฤตของแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โดยใช้เทคนิคที่พัฒนาขึ้น
3. ศึกษาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MCNP 4A ในส่วนของปัญหาการคำนวณค่าวิกฤตของระบบ เพื่อการเปรียบเทียบกับเทคนิคที่พัฒนาขึ้น

#### 1.6 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. สร้างแบบจำลองโมดูลาร์ของแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เพื่อใช้ในการคำนวณ
3. พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ตามแบบจำลองที่สร้างไว้
4. ทดสอบโปรแกรม เพื่อดูความสามารถในการทำซ้ำ เปรียบเทียบกับการคำนวณด้วยโปรแกรม MCNP 4A ตลอดจนการทำนายผลล่วงหน้า ตามแบบจำลองที่สร้างขึ้น
5. สรุปผลและนำเสนอผลการวิจัย

#### 1.7 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

ได้เทคนิคโมดูลาร์สำหรับการประมาณค่าวิกฤตของแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เพื่อประโยชน์ในด้านการเรียนการสอน และเป็นพื้นฐานในการพัฒนาและประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมนิวเคลียร์

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 ทฤษฎีการนำส่งนิวตรอน<sup>[1,2]</sup>

ปัญหาสำคัญอย่างหนึ่งในทฤษฎีแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ คือ การคำนวณการกระจายตลอดจนการเปลี่ยนแปลงของนิวตรอนฟลักซ์ภายในแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ซึ่งการกระจายของนิวตรอนฟลักซ์จะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของแกนปฏิกรณ์ การศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของนิวตรอนฟลักซ์ดังกล่าว กระทำได้โดยอาศัยทฤษฎีการนำส่งนิวตรอน (Neutrons Transport Theory) เมื่อพิจารณาค่าแห่งใดๆ  $\vec{r}$  ในแกนปฏิกรณ์ สมการการนำส่งนิวตรอน (Neutron Transport Equation) ที่ไม่ขึ้นกับเวลาสำหรับกระแสนิวตรอน  $\vec{J}$  ที่พลังงาน  $E$  ในทิศทาง  $\Omega$  จำนวนนิวตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านปริมาตร  $dV$  สามารถเขียนได้ว่า

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J}(\vec{r}, \Omega, E) + \Sigma_T(\vec{r}, E)n(\vec{r}, \Omega, E)v(E) = \iint \Sigma_s(\vec{r}, E) f(\vec{r}; \Omega', E' \rightarrow \Omega, E) n(\vec{r}, \Omega', E') v(E') d\Omega' dE' + Q(\vec{r}, \Omega, E) \quad (2.1.1)$$

โดยที่  $\int f(\vec{r}; \Omega', E' \rightarrow \Omega, E) dE'$  คือ ค่าความน่าจะเป็นที่นิวตรอนระดับพลังงานใด ๆ  $E'$  โดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่  $\Omega'$  จะเคลื่อนที่ด้วยทิศทาง  $\Omega$  ด้วยพลังงาน  $E$  หลังเกิดการชน

การพิจารณาการอนุรักษ์นิวตรอน ในแกนปฏิกรณ์จะทำให้ทราบถึงลักษณะการกระจายของนิวตรอนโดยไม่ขึ้นกับทิศทางเคลื่อนที่ สำหรับการกระจายของนิวตรอนที่ไม่ขึ้นกับทิศทางในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลานั้น สมการการนำส่งนิวตรอนสามารถเขียนในรูปแบบที่ขึ้นกับเวลาได้ คือ

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{J} + \Sigma_T v n = \int \Sigma_s(\vec{r}; E' \rightarrow E) v' n' dE' + Q \quad (2.1.2)$$

โดยที่  $\Sigma_s(\vec{r}; E' \rightarrow E)$  คือ ภาคตัดขวางมหัพภาคของนิวตรอน ซึ่งเกิดการกระเจิงที่ตำแหน่ง  $\vec{r}$  เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนพลังงานของนิวตรอนจาก  $E'$  ไปเป็น  $E$

$Q \equiv Q(\vec{r}, E, t)$  คือ นิวตรอนจากแหล่งกำเนิดใดๆ ซึ่งเข้ามา ณ ตำแหน่ง  $\vec{r}$  ในระดับพลังงาน  $E$  ในช่วงเวลา  $t$

เมื่ออินทิเกรตสมการข้างต้น ตลอดทั้งปริมาตรและตลอดช่วงพลังงานที่กำหนด สมการการอนุรักษ์นิวตรอนในปริมาตร  $dV$  เขียนได้ว่า

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint n \, dVdE + \iint \vec{\nabla} \cdot \vec{J} \, dVdE + \iint \Sigma_T v n \, dVdE = \iint \Sigma_s(\vec{r}; E' \rightarrow E) v' n' \, dE' dVdE + \iint Q \, dVdE \quad (2.1.3)$$

ในแต่ละเทอมมีความสำคัญทางฟิสิกส์ของอนุภาค และสามารถอธิบายได้ว่า

- I.  $\frac{\partial}{\partial t} \iiint n \, dVdE$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดของนิวตรอนในช่วงพลังงาน  $dE$  และปริมาตร  $dV$
- II. พิจารณาโดยทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์  $\iint_V \vec{\nabla} \cdot \vec{J} \, dVdE = \iint_A \vec{J} \cdot \hat{n} \, dAdE$   
คือ จำนวนนิวตรอนในช่วงพลังงาน  $dE$  ที่ไหลออกจากปริมาตร  $dV$  ต่อหน่วยเวลา
- III.  $\iint \Sigma_T v n \, dVdE$  คือ อัตรานิวตรอนในระดับพลังงาน  $dE$  ที่เกิดอันตรกิริยาทางนิวเคลียร์ทั้งหมดในปริมาตร  $dV$
- IV.  $\iiint \Sigma_s(\vec{r}; E' \rightarrow E) v' n' \, dE' dVdE$  คือ อัตราการกระเจิงของนิวตรอนจากช่วงพลังงาน  $dE'$  เข้าสู่ช่วงพลังงาน  $dE$  ภายในปริมาตร  $dV$
- V.  $\iint Q \, dVdE$  คือ อัตราการเกิดของนิวตรอนภายในช่วงพลังงาน  $dE$  และปริมาตร  $dV$  จากแหล่งกำเนิดใดๆ

จะเห็นว่าเทอม  $IV - III$  คือ อัตราการดูดกลืนนิวตรอนในช่วงระดับพลังงานและปริมาตรที่กำหนดนั่นเอง ซึ่งสามารถจัดรูปสมการการอนุรักษ์นิวตรอนได้ใหม่ในลักษณะการเกิดขึ้นและสูญ

หายของนิวตรอน คือ  $I = (IV - III) + V - II$  หรือ

อัตราการเปลี่ยนแปลง ของนิวตรอนภายในช่วง พลังงานและปริมาตรที่ กำหนด	อัตราการดูดกลืน นิวตรอนภายในช่วงระดับ พลังงานและปริมาตรที่ กำหนด	อัตราการเพิ่มขึ้นของ นิวตรอนเนื่องจากต้น กำเนิดใด ๆ ภายใน ปริมาตรที่กำหนด	อัตราการรั่วไหลของ นิวตรอนออกจาก ปริมาตรที่กำหนด
---	---	--	--

การพิจารณาการอนุรักษ์นิวตรอนข้างต้นเป็นการพิจารณาภาวะสมดุลของจำนวนนิวตรอนภายในปริมาตรปิด  $dV$  ในระดับพลังงานที่กำหนด  $E$  ในช่วงเวลา  $dt$  ว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไรกับการไหลของกระแสนิวตรอนเข้าสู่และออกจากปริมาตรปิดนั้นๆ

หากพิจารณาว่าทุก ๆ นิวตรอนมีพลังงานเดียวกัน สมการการนำส่งนิวตรอนที่ไม่ขึ้นกับเวลาจะสามารถเขียนในรูปที่ไม่ขึ้นกับระดับพลังงานและทิศทางการเคลื่อนที่ได้เป็น

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J}(\vec{r}) + \Sigma_T(\vec{r})\phi(\vec{r}) = \Sigma_s(\vec{r})\phi(\vec{r}) + Q(\vec{r}) \quad (2.1.4)$$

เมื่อ  $\phi(\vec{r}) = n(\vec{r})v$  คือ นิวตรอนฟลักซ์

และ  $\Sigma_a = \Sigma_T - \Sigma_s$  โดยให้  $Q(\vec{r}) \equiv S(\vec{r})$

สามารถเขียนสมการในรูปใหม่ได้ว่า

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J}(\vec{r}) + \Sigma_a(\vec{r})\phi(\vec{r}) = S(\vec{r}) \quad (2.1.5)$$

สมการที่ได้นี้คือ รูปแบบทั่วไปของสมการการนำส่งนิวตรอนที่ไม่ขึ้นกับเวลา ทิศทางการเคลื่อนที่ และที่ระดับพลังงานเดียว(One-speed, Time-independent Transport Equation) ซึ่งจะนำมาประยุกต์เพื่อใช้ในการประมาณการกระจายของนิวตรอนในระบบ

## 2.2 กฎของฟิค และสมการการแพร่นิวตรอน<sup>[1,3]</sup>

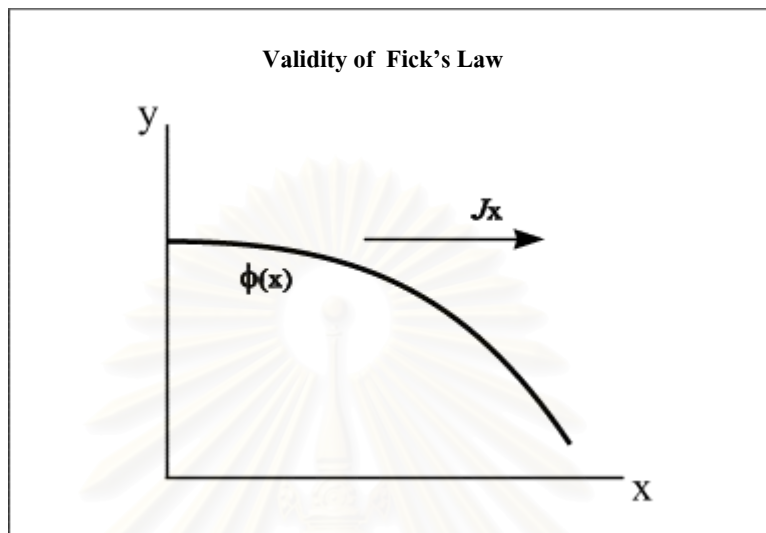
ภายใต้สมมติฐานการแพร่ของนิวตรอน กระแสนิวตรอนมีทิศทางจากบริเวณที่มีนิวตรอนฟลักซ์สูงไปสู่บริเวณที่มีนิวตรอนฟลักซ์ต่ำ อาศัยกฎของฟิค(Fick's law)สมมติฐานข้างต้นสามารถเขียนได้เป็น

$$\vec{J} = -D\vec{\nabla}\phi \quad (2.2.1)$$

โดยที่  $\vec{J}$  คือ กระแสนิวตรอน มีหน่วยเป็น จำนวนนิวตรอนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยเวลา ทั้งนี้  $\vec{J} = J_x\hat{i} + J_y\hat{j} + J_z\hat{k}$

และ  $J_x$  คือ ขนาดของกระแสนิวตรอนตามทิศทาง  $x$  และเป็นจำนวนนิวตรอนที่ไหลผ่านพื้นที่หนึ่ง ตร.หน่วยที่ตั้งได้จากกับทิศทาง  $x$  ด้านบวกในหนึ่งหน่วยเวลา

$D$  คือ สัมประสิทธิ์ของการแพร่ (diffusion coefficient) มีหน่วยเป็นระยะทาง  
และ  $\phi$  คือ นิวตรอนฟลักซ์ มีหน่วยเป็น จำนวนนิวตรอนต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา



รูปที่ 2.1 รูปแสดงทิศทางของกระแสนิวตรอน

เมื่อพิจารณาสมการตามแกน  $x$  จะสามารถค่า  $D$  ได้ โดยสมการ

$$D = \frac{1}{3\Sigma_t(1-\bar{\mu})(1-\frac{4\Sigma_a}{5\Sigma_t}+\dots)} \quad (2.2.2)$$

เพราะว่า  $\frac{\Sigma_a}{\Sigma_t} \ll 1$  ดังนั้น  $D = \frac{\lambda_{tr}}{3}$  (2.2.3)

โดยที่  $\lambda_{tr}$  เรียกว่า ทางเดินอิสระเฉลี่ยของการนำส่ง (Transport Mean Free Path) และเท่ากับ

$$\lambda_{tr} = \frac{1}{\Sigma_{tr}} = \frac{1}{\Sigma_s(1-\bar{\mu})} \quad (2.2.4)$$

ทั้งนี้เมื่อ  $\Sigma_a \ll \Sigma_s$  สำหรับสมการข้างต้น

$\Sigma_{tr}$  เรียกว่า ภาคตัดขวางมหัพภาคการนำส่ง (Macroscopic Transport Cross Section)

$\Sigma_a$  เรียกว่า ภาคตัดขวางมหัพภาคการดูดกลืน (Macroscopic Absorption Cross Section)

$\Sigma_s$  เรียกว่า ภาคตัดขวางมหัพภาคการกระเจิง (Macroscopic Scattering Cross Section)

โดยที่  $\bar{\mu}$  คือ ค่าเฉลี่ย cosine ของมุมกระเจิงของนิวตรอนภาคในดวงกลางหนึ่ง ๆ ใน Laboratory coordinate system และสามารถคำนวณได้

จากสมการ

$$\bar{\mu} = \frac{2}{3A} \quad (2.2.5)$$

โดยที่  $A$  คือมวลอะตอมของตัวกลาง

ทฤษฎีการแพร่มีข้อจำกัดที่สำคัญคือ การกระจายของนิวตรอนฟลักซ์จะต้องไม่ขึ้นอยู่กับทิศทางเฉพาะ และอัตราการกระเจิงของนิวตรอนจะต้องมีมากกว่าอัตราการดูดกลืนนิวตรอนมาก ๆ ดังนั้น ทฤษฎีการแพร่จึงไม่เหมาะสมกับตัวกลางที่มีการดูดกลืนนิวตรอนสูง หรือเมื่อบริเวณที่พิจารณาอยู่ใกล้ขอบของแกนปฏิกรณ์หรือต้นกำเนิดนิวตรอน และเมื่อการกระเจิงของนิวตรอนมีทิศทางเฉพาะ

เมื่อพิจารณาสมการการนำส่งนิวตรอน 2.1.5 ภายใต้กฎของฟิค 2.2.1 ซึ่งให้ความสัมพันธ์ของกระแสและนิวตรอนฟลักซ์ ทำให้ได้สมการการแพร่ของนิวตรอนสามารถเขียนได้เป็น

$$-\vec{\nabla} \cdot D\vec{\nabla}\phi + \Sigma_a\phi = S \quad (2.2.6)$$

สมการข้างต้น คือ สมการการแพร่ของนิวตรอนที่ไม่ขึ้นกับเวลาและพิจารณานิวตรอนระดับพลังงานเดียว ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ในการประมาณค่าวิกฤตของแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และหากพิจารณาว่า  $D$  มีค่าคงที่ จะสามารถเขียนสมการได้ว่า

$$D\nabla^2\phi - \Sigma_a\phi + S = 0 \quad (2.2.7)$$

จากสมการข้างต้น เมื่อหารสมการด้วย  $D$  สมการรูปใหม่คือ

$$\nabla^2\phi - \frac{1}{L^2}\phi + \frac{S}{D} = 0 \quad (2.2.8)$$

โดยที่  $L^2$  ถูกนิยามว่า

$$L^2 = \frac{D}{\Sigma_a} \quad (2.2.9)$$

ปริมาณ  $L$  เรียกว่า ความยาวการแพร่(Diffusion Length) มีหน่วยเป็นเซนติเมตร และ  $L^2$  เรียกว่า พื้นที่การแพร่(Diffusion Area) มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร



ขนาดของแกนปฏิกรณ์ที่อาจใช้สมการการแพร่ในการคำนวณเป็นอีกเรื่องหนึ่งที่สมควรนำมาพิจารณา โดยพิจารณาจากจุดกำเนิดนิวตรอนที่ปล่อยนิวตรอนพลังงานเดียวในอัตรา  $S$  นิวตรอนต่อวินาที ภายในตัวห่นวงนิวตรอนที่เป็นเนื้อเดียวกันแบบอนันต์ ขณะที่นิวตรอนเหล่านั้นแพร่ไปในตัวกลาง นิวตรอนจะมีลักษณะการเคลื่อนเฉพาะตัวที่ซับซ้อนมีเส้นทางเดินกลับไปกลับมาเนื่องจากมีการชนกันเกิดขึ้นหลายต่อหลายครั้ง อย่างไรก็ตามเนื่องจากตัวกลางมีขนาดอนันต์นิวตรอนทุกตัวจะถูกดูดกลืนในตัวกลาง ซึ่งไม่สามารถหนีออกมาได้และจะถูกดูดกลืนภายในตัวกลางในที่สุด

ทรงกลมรัศมี  $r$  จากจุดกำเนิด จำนวนนิวตรอน  $dn$  ซึ่งถูกดูดกลืนต่อวินาทีภายในชั้นทรงกลมของปริมาตร  $dV$  ณ ตำแหน่ง  $r$  และ  $r + dr$  ถูกกำหนดโดย

$$dn = \sum_a \phi(r) dV \quad (2.2.10)$$

โดยที่  $\phi(r)$  คือ นิวตรอนฟลักซ์เนื่องจากต้นกำเนิดนิวตรอน และ

$$dV = 4\pi r^2 dr \text{ คือ ปริมาตรระหว่างชั้นทรงกลมรัศมี } r \text{ และทรงกลมรัศมี } r + dr$$

จากสมการ 2.2.6 ค่านิวตรอนฟลักซ์สำหรับต้นกำเนิดนิวตรอนดังกล่าวคือ  $\phi(r) = \frac{S e^{-r/L}}{4\pi D r}$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$dn = \frac{S \sum_a r e^{-r/L} dr}{D} = \frac{S}{L^2} r e^{-r/L} dr \quad (2.2.11)$$

ความน่าจะเป็น  $p(r) dr$  ที่นิวตรอน จะถูกดูดกลืนในบริเวณระหว่างชั้นทรงกลมรัศมี  $dr$  และทรงกลมรัศมี  $r + dr$  จะเท่ากับอัตราส่วนของนิวตรอนที่ถูกดูดกลืนต่อจำนวนนิวตรอนที่ปลดปล่อยออกมาต่อวินาที  $\frac{dn}{S}$  นั่นคือ

$$p(r) dr = \frac{1}{L^2} r e^{-r/L} dr \quad (2.2.12)$$

เมื่อพิจารณา  $\overline{r^2}$  ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของกำลังสองของระยะทางที่นิวตรอนเคลื่อนที่ออกจากต้นกำเนิดจนถึงจุดที่ถูกดูดกลืน



ดังนั้น

$$\begin{aligned}\overline{r^2} &= \int_0^\infty r^2 p(r) dr \\ &= \frac{1}{L^2} \int_0^\infty r^3 e^{-r/L} dr = 6L^2\end{aligned}\tag{2.2.13}$$

นั่นคือ  $L^2 = \overline{r^2}/6$  หากพิจารณาว่า  $r' = \sqrt{r^2}$  ประมาณขนาดขั้นต่ำของแกนปฏิกรณ์ที่สมการการแพร่สามารถประยุกต์ใช้ ขนาดของแกนปฏิกรณ์ย่อมสมควรไม่น้อยกว่า  $r' = \sqrt{6}L$  การคำนวณด้วยสมการการแพร่จึงอาจประยุกต์ใช้ได้

ในการคำนวณค่าการกระจายของนิวตรอนฟลักซ์จำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่แน่นอน ด้วยเหตุที่ทฤษฎีการแพร่ของนิวตรอนไม่เหมาะสมกับบริเวณใกล้พื้นผิวอันเป็นขอบเขตของตัวกลาง ซึ่งจากการคำนวณโดยทฤษฎีการนำส่งนิวตรอนแสดงให้เห็นว่า นิวตรอนฟลักซ์ที่คำนวณจากสมการการแพร่อาจสมมติได้ว่ามีค่าเป็นศูนย์ที่ระยะขยายออก ( $d$ ) จากพื้นผิวของขอบเขต โดยอาศัยระยะขยายออก สมการการแพร่จึงสามารถประยุกต์ใช้คำนวณที่บริเวณขอบเขตได้ และมีค่าเท่ากับ

$$d = 0.7104\lambda_{tr}\tag{2.2.14ก}$$

ระยะขยายออก  $d$  คือ extrapolation distance และจากความสัมพันธ์  $\lambda_{tr} = 3D$  จะได้ว่า

$$d = 2.1312D\tag{2.2.14ข}$$

จากการทดลองวัดค่า  $d$  สำหรับตัวกลางซึ่งมีได้อยู่ในสถานะก๊าซ พบว่าโดยทั่วไปมีค่าน้อยกว่าหนึ่งเซนติเมตร ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดของแกนปฏิกรณ์ส่วนใหญ่ การประมาณคำตอบโดยอาศัยสมการการแพร่จึงสมมติว่าฟลักซ์มีค่าเป็นศูนย์ที่พื้นผิวขอบเขตของระบบ สำหรับที่รอยต่อระหว่างตัวกลางสองตัวกลางที่แตกต่างกันนั้น เงื่อนไขขอบเขตก็คือ ความต่อเนื่องของค่าฟลักซ์และกระแสนิวตรอนที่รอยต่อนั้นๆ

### 2.3 ค่าวิกฤตของแกนปฏิกรณ์<sup>[2,4]</sup>

สมการการแพร่ของนิวตรอนสามารถใช้คำนวณค่าการกระจายของนิวตรอนฟลักซ์ในแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์สำหรับสถานะที่ปฏิกิริยาถูกโซ่ของระบบอยู่ในสถานะคงตัว เรียกสภาวะดังกล่าวของแกนปฏิกรณ์ว่า สภาวะวิกฤต(critical) แล้วการคำนวณส่วนประกอบและขนาดของแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่จะให้ภาวะวิกฤตอันเป็นองค์ประกอบสำคัญอย่างยิ่ง ในการออกแบบแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์นั้นก็สามารกระทำได้โดยอาศัยสมการการแพร่ในทางปฏิบัติแล้วเมื่อพิจารณาสมการการแพร่

$$-\vec{\nabla} \cdot D\vec{\nabla}\phi + \Sigma_a\phi(\vec{r}) = v\Sigma_f\phi(\vec{r}) \quad (2.3.1)$$

มีเงื่อนไขขอบเขต คือ  $\phi(\vec{r}_s) = 0$  และ  $\vec{r}_s = r_s + d$

โดยที่  $r_s$  คือ ระยะขอบเขตจริง และ  $d$  คือ ระยะขยายออก

สมการข้างต้นนี้โดยทั่วไปไม่มีคำตอบที่อาจเป็นไปได้ในทางกายภาพ นอกจากว่าส่วนประกอบและลักษณะทางเรขาคณิตของแกนปฏิกรณ์ค่าเฉพาะหนึ่งๆเท่านั้น ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่เป็นจริงตามเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนด ความน่าจะเป็นที่จะสามารถเลือกค่าเฉพาะดังกล่าวสำหรับปัญหาหนึ่งๆได้พอดีนั้น มีความเป็นไปได้น้อยมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการคำนวณเชิงตัวเลข ทว่าหากเขียนสมการข้างต้นใหม่ โดยกำหนดพารามิเตอร์  $k$  ขึ้น ดังนี้

$$-\vec{\nabla} \cdot D\vec{\nabla}\phi + \Sigma_a\phi(\vec{r}) = \frac{1}{k}v\Sigma_f\phi(\vec{r}) \quad (2.3.2)$$

เป้าหมายของการคำนวณจะเปลี่ยนไป กล่าวคือสำหรับเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนด และสำหรับค่าคงที่ที่ให้กับสมการ การคำนวณมีเป้าหมายเพื่อคำนวณค่า  $k$  ที่เหมาะสมเท่านั้น ซึ่งพารามิเตอร์  $k$  นี้ก็คือ ค่าวิกฤต และก็คือตัวประกอบการคูณ(multiplication factor)นั่นเอง

ในการออกแบบแกนปฏิกรณ์ให้มีสภาวะวิกฤต โดยหลักการก็คือ การเลือกขนาดและส่วนประกอบของแกนปฏิกรณ์เพื่อหาค่า  $k$  ถ้าค่า  $k$  มีค่าเป็นหนึ่ง หมายความว่าขนาดและส่วนประกอบของแกนปฏิกรณ์ที่เลือกมีความเหมาะสมและเป็นผลให้แกนปฏิกรณ์ปฏิบัติการที่สภาวะวิกฤต ถ้าค่า  $k$  ไม่เท่ากับหนึ่งจะต้องเลือกขนาดและส่วนประกอบของแกนปฏิกรณ์ใหม่และทำการคำนวณซ้ำ เหตุผลทางฟิสิกส์ซึ่งอธิบายการมีอยู่ของคำตอบอันเป็นไปได้ทางกายภาพของสมการข้างต้นนี้อาจอธิบายได้ดังนี้

หากพิจารณาว่า  $v$  คือ จำนวนของนิวตรอนที่ถูกปลดปล่อยออกมา ในหนึ่งปฏิกิริยาฟิชชัน ดังนั้นจะมีค่า  $v_c$  ซึ่งทำให้

$$-\vec{\nabla} \cdot D\vec{\nabla}\phi + \Sigma_a\phi(\vec{r}) = v_c\Sigma_f\phi(\vec{r}) \quad (2.3.4)$$

มีคำตอบของสมการ ทั้งนี้โดยไม่คำนึงว่าส่วนประกอบและลักษณะทางเรขาคณิตของแกนปฏิกรณ์จะเป็นอย่างไร ดังนั้นหากคำนวณหา  $v_c$  นี้ได้แล้ว เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับรูปแบบก่อนหน้า ซึ่งใช้คำนวณค่า  $k$  จะเห็นว่า

$$k = v/v_c \quad (2.3.6)$$

สำหรับแกนปฏิกรณ์แบบเนื้อเดียว(Homogeneous) ซึ่งมีค่า  $v$ ,  $\Sigma_f$ ,  $\Sigma_a$  และ  $D$  เป็นค่าคงที่ ค่าวิกฤตของแกนปฏิกรณ์สามารถวิเคราะห์ได้จากสมการ 2.3.2 ดังนี้

$$k = \frac{v\Sigma_f}{\Sigma_a} \left( \frac{1}{1 + L^2 B^2} \right) \quad (2.3.7)$$

เมื่อ  $B^2$  คือค่า geometry buckling ซึ่งบ่งบอกผลกระทบอันเนื่องจากรูปร่างและขนาดของแกนปฏิกรณ์ ในขณะที่  $L^2$  เป็นผลกระทบโดยตรงจากส่วนประกอบทางวัสดุ

## 2.4 การแก้สมการเชิงอนุพันธ์ด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่อง<sup>[5]</sup>

สมการเชิงอนุพันธ์ซึ่งประกอบด้วยสัมประสิทธิ์ค่าคงตัว และมีเงื่อนไขขอบเขตที่ไม่ซับซ้อนอาจสามารถหาคำตอบเชิงวิเคราะห์(analytical solution)ได้ แต่สำหรับสมการเชิงอนุพันธ์ที่ขึ้นกับตัวแปรจำนวนมากและหรือสัมประสิทธิ์มีค่าไม่คงที่ การหาคำตอบของสมการจะมีความยุ่งยาก ซึ่งการแก้ปัญหาดังกล่าวอาจทำได้โดยกระบวนการเชิงตัวเลข ในกระบวนการดังกล่าวจะต้องเปลี่ยนรูปสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปของพีชคณิต วิธีการหนึ่งก็คือ การแทนสมการเชิงอนุพันธ์ในรูปแบบของสมการการประมาณด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่อง(finite difference method) เพื่อพิจารณาสมการเชิงอนุพันธ์ด้วยวิธีดังกล่าว หากกำหนดให้  $\phi$  เป็นฟังก์ชันที่ต้องทราบค่าเริ่มต้น และใช้ออนุกรมของเทย์เลอร์(Taylor's Series) เพื่อประมาณค่า  $\phi(x_{i+1})$  โดยที่  $x_{i+1} = x_i + \Delta x$  จะได้

$$\phi(x_{i+1}) = \phi(x_i + \Delta x) = \phi(x_i) + \Delta x \left. \frac{d\phi}{dx} \right|_{x=x_i} + O(\Delta x^2) \quad (2.4.1)$$

โดยที่  $O(\Delta x^2)$  คือความคลาดเคลื่อนของการประมาณ ซึ่งอยู่ในอันดับของ  $\Delta x^2$  นั่นคือ

$$\phi_{i+1} = \phi_i + \frac{\Delta x}{2} \left. \frac{d\phi}{dx} \right|_i + O(\Delta x^2) \quad (2.4.2)$$

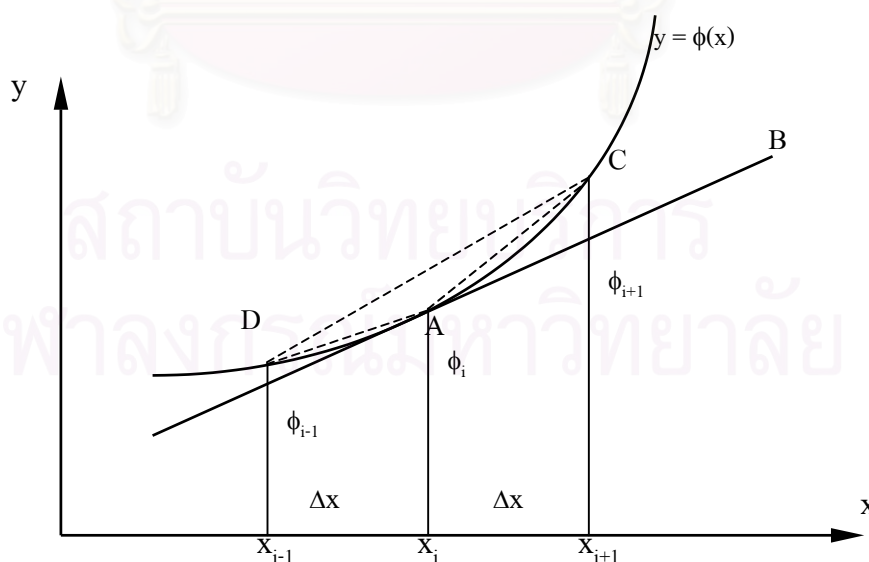
ดังนั้น

$$\left. \frac{d\phi}{dx} \right|_i = \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{\Delta x} - O(\Delta x^2) \quad (2.4.3)$$

รูปแบบข้างต้นเรียกว่า forward difference approximation ของอนุพันธ์อันดับแรกของฟังก์ชัน ซึ่งจะประมาณได้ว่า

$$\left. \frac{d\phi}{dx} \right|_i \approx \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{\Delta x} \quad (2.4.4)$$

ความคลาดเคลื่อนของการประมาณนี้ก็คือค่า  $O(\Delta x^2)$  ในรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นกราฟการประมาณค่าผลต่างสี่เหลี่ยม โดยที่อนุพันธ์อันดับแรกของ  $\phi(x)$  ที่  $x = x_i$  คือ ความชันของสามเหลี่ยมจากเส้นโค้ง  $y = \phi(x)$



รูปที่ 2.2 เส้นกราฟแสดงการประมาณผลต่างสี่เหลี่ยม  $d\phi/dx|_i$  โดยที่ forward difference คือ ความชัน AC backward difference คือ ความชัน DA และ central difference คือ ความชัน DC

ในลักษณะเดียวกันอนุกรมของเทย์เลอร์สามารถใช้ประมาณค่า  $\phi_{i+1}$  ดังนี้

$$\phi_{i+1} = \phi_i + \Delta x \left. \frac{d\phi}{dx} \right|_i + O(\Delta x^2) \quad (2.4.5)$$

นั่นคือ

$$\left. \frac{d\phi}{dx} \right|_i = \frac{\phi_i - \phi_{i-1}}{\Delta x} + O(\Delta x^2) \quad (2.4.6)$$

และสามารถสร้างการประมาณแบบ backward difference approximation ได้เป็น

$$\left. \frac{d\phi}{dx} \right|_i \approx \frac{\phi_i - \phi_{i-1}}{\Delta x} \quad (2.4.7)$$

จากกราฟ จะเห็นว่าการประมาณทั้งจาก forward difference และ backward difference มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นในลักษณะและในอันดับเดียวกัน อย่างไรก็ตามถ้าแทนส่วนขยายของสมการ 2.4.8ก และ 2.4.8ข ในรูป

$$\phi_{i+1} = \phi_i + \Delta x \left. \frac{d\phi}{dx} \right|_i + \frac{\Delta x^2}{2} \left. \frac{d^2\phi}{dx^2} \right|_i + O(\Delta x^3) \quad (2.4.8ก)$$

$$\phi_{i-1} = \phi_i - \Delta x \left. \frac{d\phi}{dx} \right|_i + \frac{\Delta x^2}{2} \left. \frac{d^2\phi}{dx^2} \right|_i - O(\Delta x^3) \quad (2.4.8ข)$$

แล้ว จะได้อนุพันธ์อันดับแรกจากการนำสมการ 2.4.8ข ลบจากสมการ 2.4.8ก ดังนี้

$$\phi_{i+1} - \phi_{i-1} = 2\Delta x \left. \frac{d\phi}{dx} \right|_i + O(\Delta x^3) \quad (2.4.9)$$

ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนของการประมาณยังอยู่ในอันดับของ  $O(\Delta x^3)$  จากสมการข้างต้น ทำให้ได้การประมาณแบบ central difference นั่นคือ

$$\left. \frac{d\phi}{dx} \right|_i \approx \frac{\phi_{i+1} - \phi_{i-1}}{2\Delta x} \quad (2.4.10)$$

ซึ่งจะมีความคลาดเคลื่อนของการประมาณอยู่ในอันดับ  $O(\Delta x^3)$  หากพิจารณาว่าอนุกรมของเทย์เลอร์ของ  $\phi$  ถูกรวบรวมแล้ว ลำดับของความคลาดเคลื่อน  $O$  ย่อมลดลงตามลำดับของ  $\Delta x$  ดังนั้นการประมาณแบบ central difference จึงมีลำดับของความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าการประมาณทั้งแบบ forward difference และ backward difference ในลักษณะเดียวกันนี้ เมื่อพิจารณาผลรวมของสมการข้างต้นทั้งสอง ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ว่า

$$\left. \frac{d^2\phi}{dx^2} \right|_i = \frac{\phi_{i+1} - 2\phi_i + \phi_{i-1}}{\Delta x^2} - O(\Delta x^3) \quad (2.4.11)$$

ดังนั้น สามารถประมาณอนุพันธ์อันดับ 2 ได้ว่า

$$\left. \frac{d^2\phi}{dx^2} \right|_i \approx \frac{\phi_{i+1} - 2\phi_i + \phi_{i-1}}{\Delta x^2} \quad (2.4.12)$$

โดยมีความคลาดเคลื่อนของการประมาณอยู่ในอันดับที่  $O(\Delta x^3)$

## 2.5 การคำนวณค่าวิกฤตโดยกระบวนการเชิงตัวเลข<sup>[2]</sup>

การคำนวณค่าวิกฤตสำหรับแกนปฏิกรณ์นั้น โดยกระบวนการเชิงตัวเลขนี้ จะใช้สมการการแพร่แบบกลุ่มเดียว(one-speed diffusion equation) โดยจะสามารถเขียนสมการของปัญหาเป็นสมการค่าไอเกนในรูปแบบของตัวดำเนินการ คือ

$$M\phi = \frac{1}{k}F\phi \quad (2.5.1)$$

โดยที่  $M \equiv -\vec{\nabla} \cdot D(r)\vec{\nabla} + \Sigma_a(r) \equiv \text{Destruction operator}$  (Leakage plus absorption)

$F \equiv \nu\Sigma_f(r) \equiv \text{Production operator}$  (Fission)

ในการหาคำตอบของสมการเชิงตัวเลขนั้น มีเทคนิคในการแก้ปัญหา เช่น วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม(Finite Difference) สามารถใช้แก้สมการการแพร่ของนิวตรอนเพื่อคำนวณค่า  $k$  หากกำหนดว่าทอมที่เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนคือ  $S$  ซึ่งคือ  $F\phi$  จากสมการข้างต้น จะได้สมการการแพร่สำหรับ

นิวตรอนฟลักซ์ ที่เป็นผลมาจากต้นกำเนิดคงที่ในตัวกลางที่ไม่มีการเพิ่มจำนวน โดยการประมาณค่าเริ่มต้นของนิวตรอนฟลักซ์และค่าวิกฤต จะได้

$$S(r) = S^{(0)}(r) = F\phi^{(0)} \quad (2.5.2)$$

$$\text{และ} \quad F\phi^{(0)} = v\Sigma_f\phi^{(0)} \quad \text{โดยที่} \quad k \cong k^{(0)}$$

เมื่อ  $S^{(0)}(r)$  และ  $k^{(0)}$  คือ ค่าประมาณเริ่มต้นของแหล่งกำเนิดนิวตรอน และค่าวิกฤต จากนั้นจะสามารถประมาณค่านิวตรอนฟลักซ์ในรุ่นถัดไป  $\phi^{(1)}$  อันเป็นผลมาจากต้นกำเนิดข้างต้น คือ

$$M\phi^{(1)} = -\vec{\nabla} \cdot D\vec{\nabla}\phi^{(1)} + \Sigma_a\phi^{(1)} = \frac{1}{k^{(0)}}S^{(0)} \quad (2.5.3)$$

เช่นเดียวกัน ต้นกำเนิดนิวตรอนซึ่งเป็นผลมาจากนิวตรอนฟลักซ์ในรุ่นที่คำนวณได้  $\phi^{(1)}$  นี้ คือ

$$S^{(1)} = F\phi^{(1)} = v\Sigma_f\phi^{(1)} \quad (2.5.4)$$

โดยการประมาณค่าต้นกำเนิดนิวตรอนใหม่ดังสมการข้างต้น สามารถประมาณค่านิวตรอนฟลักซ์ในรุ่นถัดไป  $\phi^{(2)}$  พร้อมกันนั้น จะสามารถประมาณค่าวิกฤตใหม่  $k^{(1)}$  โดยการคำนวณซ้ำและปรับปรุงค่าต้นกำเนิด  $S^{(n+1)}$  ทั้งนี้ด้วยการแก้สมการข้างล่างเพื่อหาค่า  $\phi^{(n)}$

$$M\phi^{(n)} = \frac{1}{k^{(n-1)}}S^{(n-1)} \quad (2.5.5)$$

จากค่า  $\phi^{(n)}$  ที่คำนวณได้ จะสามารถคำนวณ  $S^{(n+1)}$  ได้เป็น

$$S^{(n+1)} = F\phi^{(n)} \quad (2.5.6)$$

ในการคำนวณค่าวิกฤตใหม่  $k^{(n)}$  นั้น สามารถกระทำได้จากสมการข้างต้นนั่นเอง หากพิจารณาว่า

$$M\phi^{(n)} = \frac{1}{k^{(n)}}F\phi^{(n)} \quad (2.5.7)$$



เมื่ออินทิเกรตสมการข้างต้นตลอดทั้งระบบ จะได้การประมาณสำหรับค่า  $k^{(n)}$  คือ

$$k^{(n)} = \frac{\int F\phi^{(n)} dV}{\int M\phi^{(n)} dV} \quad (2.5.8)$$

สำหรับ  $M\phi^{(n)}$  อาจประมาณได้ด้วย  $S^{(n-1)}/k^{(n-1)}$  และค่าของ  $F\phi^{(n)}$  มีค่าโดยการประมาณข้างต้น เป็น  $S^{(n)}$  ดังนั้นจะได้ว่า

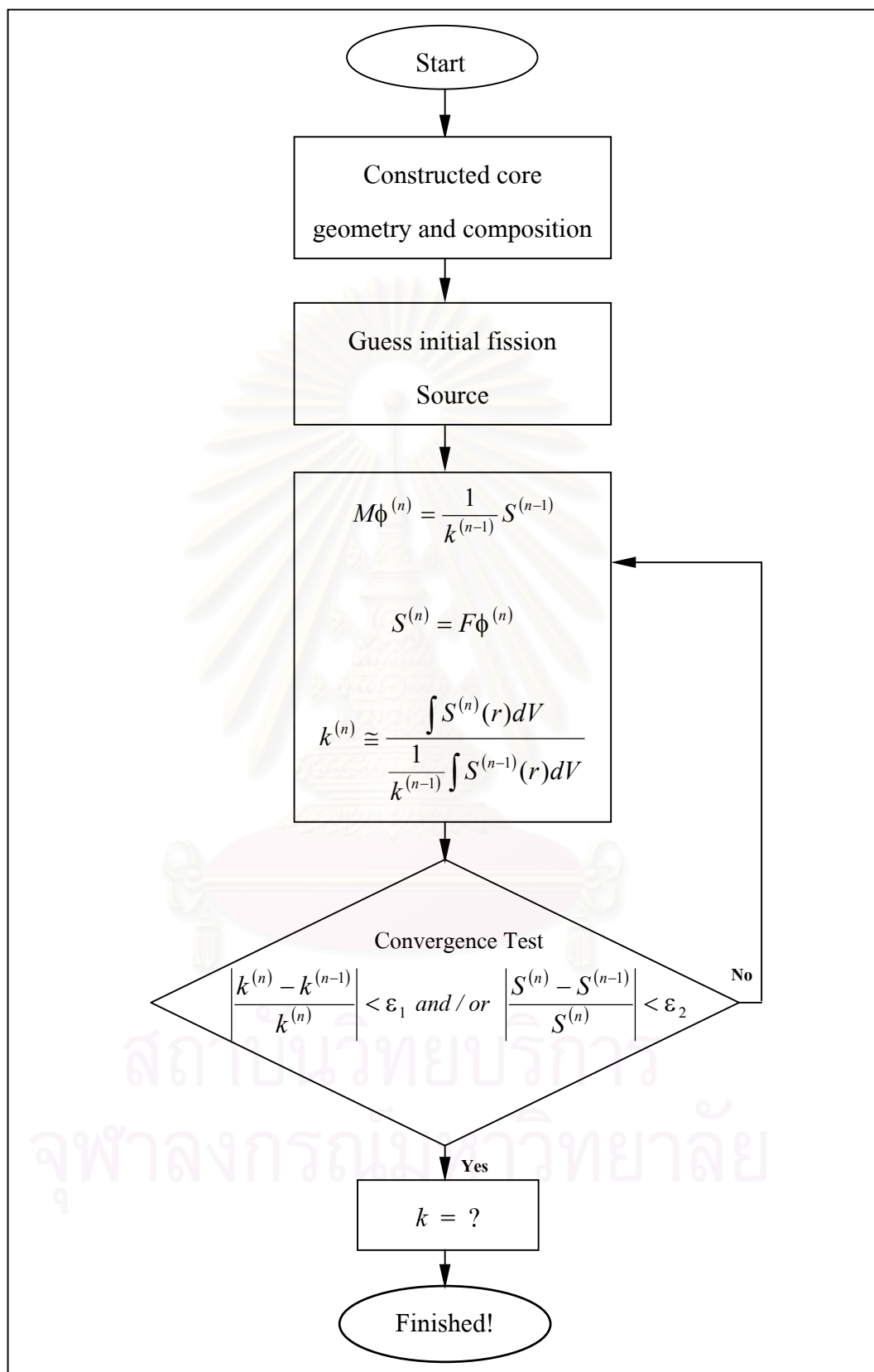
$$k^{(n)} \cong \frac{\int S^{(n)}(r) dV}{\frac{1}{k^{(n-1)}} \int S^{(n-1)}(r) dV} \quad (2.5.9)$$

สมการข้างต้นตรงกับความหมายทางกายภาพของ  $k$  ซึ่งคือ สัดส่วนของนิวตรอนเนื่องจากฟิชชัน ในสองชั่วรุ่นติดต่อกัน สมการข้างต้นเป็นพื้นฐานของอัลกอริทึมแบบซ้ำ ดังรูปที่ 2.3 เพื่อคำนวณค่าทั้ง  $k$  และ  $\phi$  ความคาดหมายก็คือ  $\phi$  จะเข้าสู่ฟูฟังก์ชันไอเกนมูลฐานที่ตรงกับค่าไอเกน  $k_{eff}$  ในทางปฏิบัติแบบการทำซ้ำจะทำต่อเนื่องไปจนกระทั่ง การเปลี่ยนแปลงของ  $k$  และ/หรือ  $S$  น้อยลงต่ำกว่าค่าความคลาดเคลื่อน  $\epsilon$  ที่กำหนดให้ กล่าวคือ

$$\left| \frac{k^{(n)} - k^{(n-1)}}{k^{(n)}} \right| < \epsilon_1 \quad \text{และ/หรือ} \quad \left| \frac{S^{(n)} - S^{(n-1)}}{S^{(n)}} \right| < \epsilon_2 \quad (2.5.10)$$

ในกรณีที่จำนวนของการทำซ้ำมากขึ้น แต่  $k$  ยังคงไม่เข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง การปรับอัตราการเข้าสู่ของ  $k$  สามารถกระทำได้โดยการหารทอมที่เป็นต้นกำเนิดด้วย  $k^{(n)}$  ซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่านิวตรอนฟลักซ์  $\phi^{(n+1)}$  แผนภาพข้างล่างนี้ แสดงให้เห็นผังการคำนวณค่าวิกฤตของระบบ โดยวิธีการเชิงตัวเลข





รูปที่ 2.3 แสดงแผนภาพขั้นตอนการคำนวณโดยโปรแกรม MTAC

## 2.6 การคำนวณด้วยเมตริกซ์<sup>[5,6]</sup>

เมื่อปัญหาที่ต้องการคำนวณอยู่ในรูปของสมการหลายๆ สมการ เกิดเป็นระบบขึ้นเรียกว่า ระบบสมการ การหาคำตอบของสมการเหล่านี้ก็คือ การหาคำราคของระบบสมการนั้น สมมติว่าเรามีชุดของระบบสมการเชิงเส้นชุดหนึ่ง ที่สามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ว่า

$$\begin{aligned}
 a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \cdots + a_{1m}x_m &= b_1 \\
 a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \cdots + a_{2m}x_m &= b_2 \\
 a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + \cdots + a_{3m}x_m &= b_3 \\
 &\dots \quad \dots \\
 a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + a_{m3}x_3 + \cdots + a_{mm}x_m &= b_m
 \end{aligned} \tag{2.6.1}$$

ระบบสมการเชิงเส้นข้างต้นประกอบไปด้วยสมการ  $m$  สมการ และมีตัวไม่ทราบค่า(variable or unknown)  $m$  จำนวน แทนโดย  $x_j$  เมื่อ  $j = 1, 2, \dots, m$  โดยมี  $a_{ij}$  เป็นสัมประสิทธิ์ของระบบสมการเมื่อ  $i = 1, 2, \dots, m$  และ  $j = 1, 2, \dots, m$  ส่วน  $b_i$  จะเรียกว่าค่าคงตัว(constant)

ระบบสมการเชิงเส้นดังกล่าวสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ เพื่อแก้ปัญหาได้เป็น

$$A \cdot X = B \tag{2.6.2}$$

เมื่อ  $A$  คือเมตริกซ์ของสัมประสิทธิ์ มีขนาดเป็น  $m \times m$  และ  $X$  คือเมตริกซ์ของตัวไม่ทราบค่า ซึ่งมีขนาดเป็น  $m \times 1$  ส่วน  $B$  คือ เมตริกซ์ของค่าคงตัว ซึ่งมีขนาดเป็น  $m \times 1$  นั่นคือ

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix} \tag{2.6.3}$$

ในการแก้ปัญหาระบบสมการเชิงเส้นนั้น ถ้าสมมติว่าเราสามารถเขียนเมตริกซ์  $A$  เป็นผลของสองเมตริกซ์ คือ

$$L \cdot U = A \tag{2.6.4}$$

โดยที่  $L$  คือ lower triangular matrix (มีสมาชิกเฉพาะเส้นทแยงมุมจากมุมบนซ้ายสู่มุมล่างขวา และในส่วนที่ต่ำกว่าเส้นทแยงมุม) และ  $U$  คือ upper triangular matrix (มีสมาชิกเฉพาะเส้นทแยงมุมจากมุมบนซ้ายสู่มุมล่างขวา และในส่วนที่สูงกว่าเส้นทแยงมุม) เช่น ในกรณีของเมตริกซ์ขนาด  $4 \times 4$  สมการข้างต้น จะมีลักษณะนี้ คือ

$$\begin{bmatrix} \alpha_{11} & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & 0 & 0 \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & 0 \\ \alpha_{41} & \alpha_{42} & \alpha_{43} & \alpha_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \beta_{13} & \beta_{14} \\ 0 & \beta_{22} & \beta_{23} & \beta_{24} \\ 0 & 0 & \beta_{33} & \beta_{34} \\ 0 & 0 & 0 & \beta_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \quad (2.6.5)$$

เราสามารถทำการแยกส่วนประกอบสมการข้างต้น เพื่อแก้ปัญหาเชิงเส้นได้ คือ

$$A \cdot X = (L \cdot U) \cdot X = L \cdot (U \cdot X) = B \quad (2.6.6)$$

โดยในการแก้ปัญหาแรกพิจารณา สำหรับเวกเตอร์ โดยที่  $Y = U \cdot X$  คือ

$$L \cdot Y = B \quad (2.6.7)$$

เมื่อทราบค่า  $Y$  จะสามารถคำนวณค่า  $X$  ได้จากสมการ

$$U \cdot X = Y \quad (2.6.8)$$

สมการแรกสามารถแก้ปัญหาได้โดยการแทนค่าไปข้างหน้า (*forward substitution*) ซึ่งเป็นไปตามสมการดังนี้

$$y_1 = \frac{b_1}{\alpha_{11}} \quad (2.6.9)$$

$$y_i = \frac{1}{\alpha_{ii}} \left[ b_i - \sum_{j=1}^{i-1} \alpha_{ij} y_j \right] \quad i = 2, 3, \dots, m \quad (2.6.10)$$

ในขณะที่สมการที่สองสามารถแก้ปัญหาได้โดย การแทนค่ากลับ (*back substitution*) นั่นคือ

$$\mathbf{X}_m = \frac{Y_m}{\beta_{mm}} \quad (2.6.11)$$

$$x_i = \frac{1}{\beta_{ii}} \left[ y_i - \sum_{j=i+1}^m \beta_{ij} x_j \right] \quad i = m-1, m-2, \dots, 1 \quad (2.6.12)$$

เมื่อกำหนดค่าสมาชิกแต่ละตำแหน่งในเมทริกซ์  $\mathbf{L}$  และ  $\mathbf{U}$  จากสมการข้างต้นทั้งสองจะสามารถหาคำตอบของชุดสมการเชิงเส้นได้

การปรับปรุงการดำเนินการกับเมทริกซ์เพื่อใช้ในการประมาณค่าเชิงตัวเลข โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการคำนวณ ซึ่งถ้าจะมองว่าเมทริกซ์  $\mathbf{L}$  และ  $\mathbf{U}$  สามารถนำมารวมกันเป็นเมทริกซ์ใหม่ทางขวามือได้ รูปแบบเมทริกซ์ใหม่ที่ประยุกต์ขึ้นดังกล่าวจะช่วยลดบางขั้นตอนในการแยกส่วนประกอบเมทริกซ์  $A$  เป็นเมทริกซ์  $\mathbf{L}$  และ  $\mathbf{U}$  ทั้งเป็นการประหยัดหน่วยความจำในการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ นั่นคือ

$$\begin{bmatrix} \alpha_{11} & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & 0 & 0 \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & 0 \\ \alpha_{41} & \alpha_{42} & \alpha_{43} & \alpha_{44} \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \beta_{13} & \beta_{14} \\ 0 & \beta_{22} & \beta_{23} & \beta_{24} \\ 0 & 0 & \beta_{33} & \beta_{34} \\ 0 & 0 & 0 & \beta_{44} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \beta_{13} & \beta_{14} \\ \alpha_{21} & \beta_{22} & \beta_{23} & \beta_{24} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \beta_{33} & \beta_{34} \\ \alpha_{41} & \alpha_{42} & \alpha_{43} & \beta_{44} \end{bmatrix} \quad (2.6.13)$$

การรวมส่วนประกอบของเมทริกซ์ข้างต้นพิจารณาจากการคำนวณค่า  $\alpha_{ij}$  และ  $\beta_{ij}$  ซึ่งกระทำได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

$$\sum_{k=1}^m \alpha_{ik} \beta_{kj} = a_{ij} \quad (2.6.14)$$

ลักษณะความสัมพันธ์ข้างต้น จะให้สมการที่ต้องแก้ทั้งสิ้น  $m^2$  สมการ สำหรับตัวไม่ทราบค่า  $m^2 + m$  ของ  $\alpha$  และ  $\beta$  เนื่องจากจำนวนของตัวแปรมากกว่าจำนวนสมการ จึงจำเป็นต้องเพิ่มสมการเงื่อนไขเพื่อความสะดวกจะใช้สมการเงื่อนไขข้างล่างนี้

$$a_{ii} = 1 \quad \text{สำหรับ } i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (2.6.15)$$

สำหรับแต่ละ  $j=1,2,3,\dots,m$  มี 2 ขั้นตอน นั่นคือ ขั้นแรกสำหรับ  $i=1,2,3,\dots,j$  ใช้สมการข้างต้นเพื่อแก้ปัญหาสำหรับ  $\beta_{ij}$  จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \beta_{ij} &= 0 && \text{เมื่อ } j < i \\ \text{และ } \beta_{ij} &= a_{ij} - \sum_{k \neq i} \alpha_{ik} \beta_{kj} && \text{เมื่อ } j = i \end{aligned} \quad (2.6.16)$$

ขั้นที่สอง สำหรับ  $i=j+1, j+2, \dots, N$  เพื่อหาคำตอบสำหรับ  $\alpha_{ij}$  จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \alpha_{ij} &= 1 && \text{เมื่อ } j = i \\ \text{และ } \alpha_{ij} &= 0 && \text{เมื่อ } j > i \end{aligned} \quad (2.6.17)$$

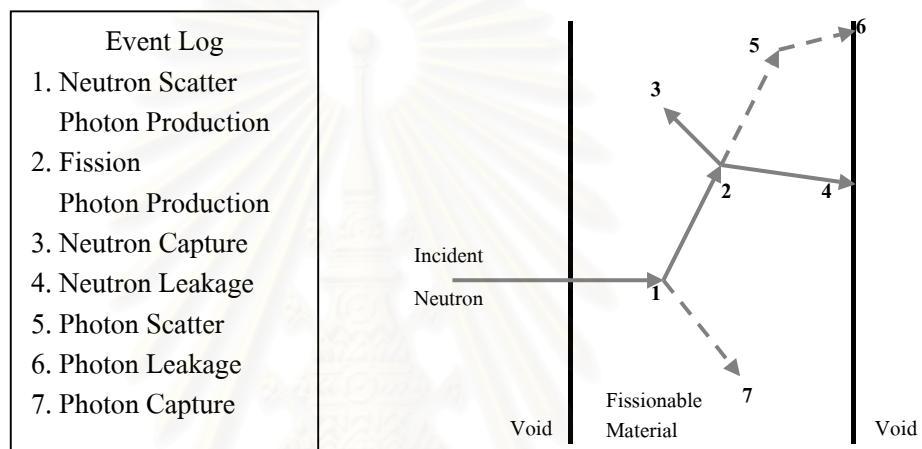
สำหรับ  $\beta_{ij}$  เมื่อ  $j > i$  และ  $\alpha_{ij}$  เมื่อ  $i < j$  นั้น สามารถคำนวณได้โดยอาศัยการลดรูปเมตริกซ์ และต้องดำเนินการทั้งสองขั้นตอนข้างต้น ก่อนที่จะดำเนินการกับค่า  $j$  ถัดไป

ถ้าเรดำเนินการกับขั้นตอนข้างต้นซ้ำประมาณ 2-3 ครั้ง จะเห็นได้ว่าการคำนวณค่าของ  $\alpha_{ij}$  และ  $\beta_{ij}$  ที่เกิดขึ้นทางขวามือของสมการนั้นจะใช้คำตอบในตำแหน่ง  $a_{ij}$  เพียงครั้งเดียว และจะไม่ถูกใช้อีก หมายความว่าส่วนของ  $\alpha_{ij}$  หรือ  $\beta_{ij}$  สามารถถูกเก็บไว้ในตำแหน่งซึ่ง  $a_{ij}$  ใช้เนื้อที่อยู่ได้ กล่าวโดยสรุปก็คือ ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการรวมเมตริกซ์ของ  $\alpha$  และ  $\beta$  โดยมีคอลัมน์จากซ้ายไปขวา และในแต่ละคอลัมน์จากบนลงล่าง

## 2.7 การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล<sup>[7,8,9,10]</sup>

การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลด้านการนำส่งอนุภาคนิวตรอน(Neutrons Transport) ก็คือการสร้างทางเดินแบบสุ่ม(Random Path)ของอนุภาคนิวตรอน เพื่อเก็บข้อมูลของทางเดินจากแต่ละอนุภาคมาคำนวณค่าเฉลี่ยสำหรับเหตุการณ์ที่สนใจ พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของค่าดังกล่าวโดยใช้วิธีทางสถิติภายใต้สมมติฐานที่ว่า อนุภาคเคลื่อนที่แบบสุ่มผ่านตัวกลางของระบบที่พิจารณาและเกิดอันตรกิริยากับนิวเคลียสของตัวกลางนั้น พฤติกรรมการเคลื่อนที่และอันตรกิริยาสามารถทำนายได้โดยการใช้ทฤษฎีความน่าจะเป็นและกฎทางฟิสิกส์ระดับอนุภาค ค่าที่ได้จะเป็นค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ที่พิจารณาของอนุภาคหนึ่งๆ จากต้นกำเนิดจนกระทั่งสิ้นสุดช่วงชีวิตของอนุภาคนั้น กรณีระบบที่พิจารณามีลักษณะทางเรขาคณิตสามมิติและมีความซับซ้อน

การใช้วิธีมอนติคาร์โลในการคำนวณ(Monte Carlo Calculation Method) จะช่วยให้การคำนวณทำได้โดยสะดวกและเป็นไปตามหลักเกณฑ์ทางทฤษฎีฟิสิกส์ของอนุภาครังสี ถือได้ว่าเป็นการทำการทดลองเชิงตัวเลขโดยการสุ่มทางเดินของอนุภาคนั้นๆ ในการประยุกต์วิธีมอนติคาร์โลเพื่อใช้ในการคำนวณค่าวิกฤตทางนิวเคลียร์นั้น จะใช้หลักสถิติเข้ามาช่วยเพื่อคำนวณค่าวิกฤตในช่วงที่น่าจะเป็นวิธีดังกล่าวไม่ได้เกิดจากการแก้ปัญหาจากสมการโดยตรง หากแต่คำตอบที่ได้เกิดจากการจำลองอนุภาคนิวตรอนแต่ละตัวขึ้นมา เพื่อศึกษาพฤติกรรมโดยเฉลี่ยของอนุภาคเหล่านั้น



รูปที่ 2.4 แสดงเหตุการณ์แบบสุ่ม การเกิดอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับตัวกลางที่สามารถเกิดปฏิกิริยาแตกตัวได้

การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลเป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาทางฟิสิกส์โดยเฉพาะอย่างยิ่งการคำนวณการนำส่งรังสี(Radiation Transport)ในลักษณะอนุภาค เช่น โฟตอน อิเล็กตรอน และนิวตรอน เนื่องจากการทำอันตรกิริยาของอนุภาคเหล่านี้กับวัตถุอันเป็นตัวกลางเป็นลักษณะสุ่ม(random) โดยอาศัยกฎเกณฑ์ทางฟิสิกส์จะสามารถสร้างทางเดินสุ่มของแต่ละอนุภาค และจำลองอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นกับอนุภาคเหล่านี้

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Monte Carlo N-particles Transport Code(MCNP) เป็นโปรแกรมหนึ่งที่ใช้วิธีการคำนวณแบบมอนติคาร์โล ซึ่งเป็นที่ยอมรับและถูกใช้ในการคำนวณด้านนิวเคลียร์วิศวกรรมอย่างกว้างขวาง สำหรับการวิจัยนี้ได้นำส่วนของการคำนวณค่าวิกฤตมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณค่าวิกฤตจากแบบจำลองที่กำหนดขึ้น เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลที่ได้กับการคำนวณโดยโปรแกรม MTAC ที่พัฒนาขึ้น

การคำนวณด้วยโปรแกรม MCNP อาจแบ่งได้ตามลักษณะปัญหา คือ ปัญหาการคำนวณอนุภาคโฟตอน ปัญหาการคำนวณอนุภาคนิวตรอน และปัญหาการคำนวณค่าวิกฤต(Criticality Calculation) สำหรับการคำนวณค่าวิกฤตโดยใช้โปรแกรม MCNP ค่าที่ได้ไม่ใช่เกิดจากการประมาณเพียงจุดใดจุดหนึ่ง แต่เป็นการประมาณช่วงของค่าวิกฤตที่น่าจะเป็น ช่วงดังกล่าวนี้เรียกว่า "ช่วงความมั่นใจ"(Confidence Interval) โดยที่การประมาณค่าวิกฤตที่ดีจะมีช่วงความมั่นใจที่แคบ โปรแกรม MCNP จะแบ่งการคำนวณค่าวิกฤตออกเป็น 3 ส่วน โดยใช้ตัวประมาณค่า(Estimators) ต่างๆ ได้แก่ ตัวประมาณค่าการชน(Collision Estimator) ตัวประมาณค่าการดูดกลืน(Absorption Estimator) และตัวประมาณค่าความยาวทางเดิน(Track Length Estimator)อนุภาคนิวตรอน โดยพิจารณาจากอัตราส่วนของจำนวนนิวตรอนในรุ่นหนึ่งกับจำนวนนิวตรอนในรุ่นก่อนหน้า ภายในระบบที่มีตัวกลางที่สามารถเกิดปฏิกิริยาแตกตัว(fissionable)ได้ ตัวประมาณค่าทั้ง 3 จะถูกนำมารวมกัน และใช้การวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อให้ผลลัพธ์ของค่าวิกฤตที่เกิดจากการประมาณ เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด และถือได้ว่าเป็นค่าไอเกน(Eigenvalue)ที่สำคัญของสมการการนำส่งนิวตรอน(Neutron Transport Equation) เพื่อใช้ในการอธิบายระดับของค่าวิกฤตของระบบ

### 2.7.1 ตัวประมาณค่าวิกฤต( $k_{eff}$ Estimators)ในโปรแกรม MCNP

โปรแกรม MCNP มีตัวประมาณค่า 3 ตัวที่ใช้ในการประมาณค่าวิกฤต ได้แก่ ตัวประมาณค่าการชน ตัวประมาณค่าการดูดกลืน และตัวประมาณค่าความยาวทางเดินของนิวตรอน ตัวประมาณการดูดกลืนจะมี 2 ลักษณะ คือ analog absorption และ implicit absorption สำหรับสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในตัวประมาณค่าแต่ละแบบ เป็นดังนี้

#### 2.7.1.1 ตัวประมาณค่าการชน(Collision Estimator)

การประมาณการชนสำหรับ  $k_{eff}$  คือ การคำนวณหาค่าคาดหวังของความน่าจะเป็นของจำนวนนิวตรอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการแตกตัว ซึ่งเป็นผลมาจากการชนของอนุภาคนิวตรอนกับตัวกลาง รูปสมการ คือ

$$k_{eff}^C = \frac{1}{N} \sum_i W_i \left\{ \frac{\sum_k f_k \bar{v}_k \sigma_{Fk}}{\sum_k f_k \sigma_{Tk}} \right\} \quad (2.7.1)$$

โดยที่  $k_{eff}^C$  คือ ค่าคาดหวังความน่าจะเป็นของจำนวนนิวตรอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการแตกตัวต่อหนึ่งรอบการคำนวณ เนื่องมาจากอนุภาคนิวตรอนชนกับตัวกลาง

$\sum_i$  คือ ผลรวมการชนที่เกิดขึ้นในหนึ่งรอบการคำนวณที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาแตกตัว



- $\sum_k$  คือ ผลรวมนิวเคลียสของไอโซโทปทั้งหมดของตัวกลางที่เกี่ยวข้องกับการชนครั้งที่  $i$
- $\sigma_{T_k}$  คือ ภาคตัดขวางจุลภาครวมสำหรับนิวเคลียสของไอโซโทป  $k$
- $\sigma_{F_k}$  คือ ภาคตัดขวางจุลภาคสำหรับการแตกตัวสำหรับนิวเคลียสของไอโซโทป  $k$
- $\bar{v}_k$  คือ ค่าคาดหมายของนิวตรอนทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาแตกตัวโดยชนกับนิวเคลียสของไอโซโทป
- $f_k$  คือ เศษส่วนเชิงอะตอมสำหรับนิวเคลียสของไอโซโทป  $k$
- $N$  คือ ขนาดของต้นกำเนิดสำหรับรอบการคำนวณ
- $W_i$  คือ จำนวนของอนุภาคนิวตรอนที่เข้าชนครั้งที่  $i$

และ  $W_i \left\{ \frac{\sum_k f_k \bar{v}_k \sigma_{F_k}}{\sum_k f_k \sigma_{T_k}} \right\}$  คือ ค่าคาดหมายของจำนวนนิวตรอนที่ถูกสร้างขึ้นสำหรับทุกๆ ปฏิกิริยาการแตกตัวจากการชนที่เกิดขึ้นครั้งที่  $i$

### 2.7.1.2 ตัวประมาณค่าการดูดกลืน(Absorption Estimator)

ตัวประมาณค่าการดูดกลืนสำหรับ  $k_{eff}$  สำหรับรอบการคำนวณหนึ่งๆ คือ การคำนวณค่าคาดหมายของจำนวนนิวตรอนในการเกิดอันตรกิริยากับนิวเคลียสของไอโซโทปของตัวกลางที่สามารถเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวได้ โดยที่การประมาณค่าการดูดกลืนนี้จะแตกต่างจากการประมาณค่าการชน ตรงที่การประมาณค่าการชนจะขึ้นกับค่าความน่าจะเป็นในการชนแต่ละครั้งที่เกิดขึ้น ในขณะที่การประมาณค่าการดูดกลืนจะขึ้นกับเหตุการณ์ที่แท้จริงที่เกิดการชน ตัวประมาณค่าการดูดกลืนแบ่งเป็น 2 ลักษณะ

#### 2.7.1.2 ก. Analog Capture

รูปสมการ คือ

$$k_{eff}^{AA} = \frac{1}{N} \sum_i W_i \frac{\bar{v}_k \sigma_{F_k}}{\sigma_{A_k} + \sigma_{F_k}} \quad (2.7.2)$$

โดยที่  $k_{eff}^{AA}$  คือ ค่าคาดหมายของจำนวนนิวตรอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการดูดกลืนแบบ Analog Capture ต่อรอบการคำนวณ

$\sum_i$  คือ ผลรวมของปฏิกิริยาการดูดกลืนแบบ Analog Capture ในหนึ่งรอบการคำนวณ สำหรับนิวเคลียสของไอโซโทป  $k$

$\sigma_{A_k}$  คือ ภาคตัดขวางจุลภาคสำหรับการดูดกลืนของนิวเคลียสของไอโซโทป  $k$  โดยไม่รวมปฏิกิริยาการแตกตัว



### 2.7.1.2 ข. Implicit Capture

รูปสมการ คือ

$$k_{eff}^{IA} = \frac{1}{N} \sum_i W_i \left( \frac{\sigma_{A_k} + \sigma_{F_k}}{\sigma_{T_k}} \right) \frac{\bar{v}_k \sigma_{F_k}}{\sigma_{A_k} + \sigma_{F_k}} \quad (2.7.3)$$

โดยที่  $k_{eff}^{IA}$  คือ ค่าคาดหมายของจำนวนนิวตรอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการดูดกลืนแบบ Implicit Capture ต่อรอบการคำนวณ

$\sum_i$  คือ ผลรวมของปฏิกิริยาการดูดกลืนแบบ Implicit Capture ในหนึ่งรอบการคำนวณสำหรับนิวเคลียสของไอโซโทป  $k$

$\sigma_{T_k}$  คือ ภาคตัดขวางจุลภาครวมสำหรับนิวเคลียสของไอโซโทป  $k$

เทอม  $\frac{\sigma_{A_k} + \sigma_{F_k}}{\sigma_{T_k}}$  คือ อัตราการเกิด Analog Capture ในการชนแต่ละครั้ง

### 2.7.1.3 ตัวประมาณค่าความยาวทางเดิน(Track Length Estimator)

ตัวประมาณค่าวิกฤตแบบนี้จะสะสมค่าขึ้นเรื่อยๆ ในทุกครั้งที่อนุภาคนิวตรอนเดินทางด้วยระยะทาง  $d$  ภายในตัวกลางที่สามารถเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวได้ ตัวประมาณค่านี้จะแสดงค่าความปรวนแปรที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าภาคตัดขวางสูงมาก

รูปสมการ คือ

$$k_{eff}^{TL} = \frac{1}{N} \sum_i W_i p d \sum_k f_k \bar{v}_k \sigma_{F_k} \quad (2.7.4)$$

โดยที่  $k_{eff}^{TL}$  คือ ค่าคาดหมายของจำนวนนิวตรอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการแตกตัวในหนึ่งรอบการคำนวณ ต่อการเกิดของนิวตรอนจากแหล่งกำเนิด

$\sum_i$  คือ ผลรวมทั้งหมดของทางเดินนิวตรอน

$p$  คือ ความหนาแน่นเชิงอะตอมของนิวเคลียสในตัวกลาง

$d$  คือ ความยาวทางเดินของนิวตรอนจากเหตุการณ์ท้ายสุดที่เกิดขึ้น

และ  $p d \sum_k f_k \bar{v}_k \sigma_{F_k}$  คือ ค่าคาดหมายของจำนวนนิวตรอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการแตกตัวตามเส้นทางเดิน  $d$

ในการคำนวณแต่ละรอบ ตัวประมาณค่าแต่ละตัวให้ผลการประมาณค่าวิกฤตที่อาจแตกต่างกันไป การเฉลี่ยค่าทั้งหมดจะทำให้ได้ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ย ซึ่งใช้ในการสร้างช่วงความมั่นใจสำหรับค่าวิกฤตที่ประมาณได้

## 2.7.2 การรวมตัวประมาณค่าวิกฤตและการประมาณค่าความคลาดเคลื่อน(Combined $k_{eff}$ Estimator and Error Estimation)ในโปรแกรม MCNP

โปรแกรม MCNP เริ่มสะสมค่าการประมาณของ  $k_{eff}$  โดยประมาณเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นรอบก่อนหน้า ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์  $R$  ของแต่ละปริมาณถูกประมาณโดย

$$R = \frac{1}{x} \sqrt{\frac{x^2 - \bar{x}^2}{M-1}} \quad (2.7.5)$$

โดยที่  $M$  คือ จำนวนรอบการคำนวณของเหตุการณ์

$$x = \frac{1}{M} \sum_m x_m \quad \text{และ} \quad \bar{x}^2 = \frac{1}{M} \sum_m x_m^2 \quad (2.7.6)$$

ขณะที่  $x_m$  คือ ปริมาณหนึ่ง ๆ เช่น ตัวประมาณค่าการชน  $k_{eff}^C$  จากรอบการคำนวณที่  $m$  โดยจะสมมติว่า การประมาณค่าของตัวประมาณค่า  $k_{eff}$  แต่ละตัวในรอบการคำนวณครั้งก่อนต่อรอบการคำนวณครั้งปัจจุบันจะไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน

การรวมตัวประมาณค่าทั้ง 3 เกิดจากความน่าจะเป็นของทุก ๆ เหตุการณ์รวมกับการกำหนดค่าความแปรปรวน(covariance)และค่าความสัมพันธ์(correlation) ตัวอย่างง่าย ๆ เช่น การหาค่าเฉลี่ยของตัวประมาณค่า 2 ตัว คือ  $x^{ij} = \frac{1}{2}(x^i + x^j)$  โดยที่  $x^i$  อาจเป็นตัวประมาณค่าการชน  $k_{eff}^C$  และ  $x^j$  อาจเป็นตัวประมาณค่าการดูดกลืน  $k_{eff}^A$  การเฉลี่ยตัวประมาณค่าทั้งสองจะถูกให้ความสำคัญโดยค่าความแปรปรวน นั่นคือ

$$x^{ij} = x^i - \frac{(x^i - x^j)(C_{ii} - C_{ij})}{(C_{ii} + C_{jj} - 2C_{ij})} = \frac{(C_{jj} - C_{ij})x^i + (C_{ii} - C_{ij})x^j}{(C_{ii} + C_{jj} - 2C_{ij})} \quad (2.7.7)$$

โดยที่ ค่าความแปรปรวน  $C_{ij}$  คือ

$$C_{ij} = \frac{1}{M} \sum_m x_m^i x_m^j - \left( \frac{1}{M} \sum_m x_m^i \right) \left( \frac{1}{M} \sum_m x_m^j \right) \quad (2.7.8)$$

และ ค่าความแปรปรวน  $C_{ii} = \overline{x^2} - \bar{x}^2$  สำหรับตัวประมาณค่า  $i$

สำหรับค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวประมาณค่า 2 ตัวจะเป็นฟังก์ชันของค่าความแปรปรวน และถูกกำหนดโดย

$$\text{correlation} = \frac{C_{ij}}{\sqrt{|C_{ii} C_{jj}|}} \quad (2.7.9)$$

ค่าความสัมพันธ์(correlation)จะมีค่าอยู่ระหว่าง +1 ถึง -1 ถ้ามีค่าเป็น +1 หมายความว่า ตัวประมาณค่าตัวที่ 2 ไม่ให้ข้อมูลใหม่หรือเกิดการเปลี่ยนแปลง ถ้ามีค่าเป็นศูนย์ หมายความว่า ตัวประมาณค่าทั้งสองขึ้นอยู่กับค่าทางสถิติและการรวมส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีความสำคัญน้อยกว่า ถ้ามีค่าเป็น -1 หมายความว่า จะมีข้อมูลใหม่เกิดขึ้นจากตัวประมาณค่าตัวที่ 2 เนื่องจากมีแนวโน้มการลดลงสัมพันธ์กับค่าคาดหวัง(expected value) เมื่อตัวประมาณค่าตัวที่ 1 มีแนวโน้มการสูงขึ้น การปรับปรุงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในการรวมตัวประมาณค่าทั้ง 3 จะขึ้นกับขนาดและเครื่องหมายของค่าความสัมพันธ์

### 2.7.3 ช่วงความมั่นใจ(Confidence Interval) ในโปรแกรม MCNP

ผลลัพธ์ของการคำนวณค่าวิกฤตด้วยมอนติคาร์โล คือ ช่วงความมั่นใจ โดยมีความหมายว่า ผลลัพธ์ที่ได้ไม่ใช่ค่า  $k_{eff}$  ที่แท้จริงเพียงค่าเดียว แต่เป็นค่าประมาณของ  $k_{eff}$  บวกและลบด้วยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจำนวนหนึ่งที่เกิดขึ้น โปรแกรม MCNP ใช้ตัวประมาณค่าที่แตกต่างกันทั้ง 3 แบบอย่างที่กำลังกล่าวมาแล้ว เพื่อประมาณค่าวิกฤต  $k_{eff}$  ข้อดีของตัวประมาณค่าแต่ละตัว คือ จะแปรผันไปตามปัญหาที่เกิดขึ้น เนื่องจากไม่มีตัวประมาณค่าวิกฤตตัวใดที่ดีที่สุดสำหรับทุกปัญหา ดังนั้น ช่วงความมั่นใจที่ได้เกิดจากการรวมตัวประมาณค่าวิกฤตทั้ง 3 เข้าด้วยกันโดยใช้วิธีทางสถิติ เพื่อให้ได้ตัวประมาณค่าวิกฤตท้ายสุดที่มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าตัวประมาณค่าทั้ง 3 ซึ่งหมายถึงว่าช่วงความมั่นใจแคบลง และค่าที่ประมาณได้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3

#### เทคนิคโมดูลาร์สำหรับการประมาณค่าวิกฤต

สมการการแพร่ของนิวตรอนถูกนำมาใช้ในการศึกษาลักษณะการกระจายฟลักซ์ภายในตัวกลางต่างๆในแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และความเป็นไปได้ของการเกิดอันตรกิริยากับนิวเคลียสของตัวกลางเหล่านั้น เช่น การกระเจิง การดูดกลืน รวมถึงการรั่วไหลของนิวตรอนฟลักซ์ออกจากแกนปฏิกรณ์ ในการวิจัยนี้ได้พิจารณาการกระจายของนิวตรอนฟลักซ์ในมุมมองอย่างกว้าง โดยพิจารณาเฉพาะค่าเฉลี่ยของนิวตรอนฟลักซ์ภายในปริมาตรหนึ่งที่กำหนด โดยมีเป้าหมายหลักเพื่อประมาณค่าวิกฤตของระบบที่กำหนดขึ้น

สำหรับโปรแกรม MTAC แกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์จะถูกกำหนดขึ้นตามโครงสร้างของแบบจำลองที่ได้วางไว้คือ การพิจารณาแกนปฏิกรณ์ในรูปแบบของส่วนประกอบย่อย(modularized unit) ที่มีสมบัติเฉพาะและมีค่านิวตรอนฟลักซ์ซึ่งแทนด้วยค่าเฉลี่ยค่าหนึ่ง แม้ว่าแต่ละส่วนประกอบย่อยจะมีสมบัติครบถ้วนในตัวเอง ทว่าค่านิวตรอนฟลักซ์เฉลี่ยจะแปรเปลี่ยนไปตามลักษณะการเชื่อมต่อกับส่วนประกอบย่อยอื่นๆ ซึ่งส่วนประกอบย่อยที่มีพื้นผิวสัมผัสกันนั้นจะมีความต่อเนื่องของนิวตรอนฟลักซ์ที่บริเวณรอยต่อของพื้นผิว ขณะที่แต่ละส่วนประกอบย่อยจะมีสมบัติทางนิวตรอนฟิสิกส์เฉพาะ เพื่อความสะดวกในการออกแบบและการอ้างอิงตำแหน่งเพื่อการแก้ปัญหา ส่วนประกอบแต่ละส่วนในแบบจำลองจะใช้แกนอ้างอิงในระบบพิกัดฉาก เหล่านี้คือเงื่อนไขและกลไกพื้นฐานของการคำนวณค่าวิกฤตโดยใช้เทคนิคโมดูลาร์ ข้อได้เปรียบของเทคนิคโมดูลาร์ คือ ความยืดหยุ่นในการสร้างแบบจำลองสำหรับการคำนวณ อันเป็นการประหยัดเวลาและทรัพยากรเป็นอย่างยิ่ง ข้อเสียเปรียบของเทคนิคนี้ ก็คือ ค่าที่คำนวณได้ขาดความแม่นยำเมื่อเทียบกับการคำนวณจากสมการการแพร่โดยตรง อย่างไรก็ตามเนื่องจากค่าวิกฤตเป็นค่าที่ได้จากการพิจารณาทั้งระบบ ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเนื่องจากการใช้ค่าเฉลี่ยเฉพาะสำหรับปริมาณหนึ่งๆ นั้น เมื่อพิจารณาโดยรวมทั้งระบบแล้ว แม้จะมีผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนกับค่าที่คำนวณได้ ค่าดังกล่าวยังคงเทียบเคียงได้ในระดับหนึ่งกับค่าที่ได้รับจากการคำนวณสมการการแพร่ และยังคงลักษณะการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงในระบบ โดยเหตุที่เทคนิคโมดูลาร์มีความยืดหยุ่นมากกว่า การพิจารณาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงหนึ่งๆ ในระบบจึงกระทำได้ง่ายมากกว่า แม้ว่า จะมีความแม่นยำลดลงก็ตาม

### 3.1 การวิเคราะห์เชิงสมการ

การคำนวณค่าวิกฤตในระบบนั้นจำเป็นต้องรู้ค่านิวตรอนฟลักซ์ ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการการแพร่ของนิวตรอน กรณีนี้จะพิจารณาว่ามีเพียงเทอร์มอลนิวตรอนเท่านั้นที่มีผลต่อค่าวิกฤต จากสมการการแพร่ของนิวตรอนดังแสดงไว้ในบทที่ 2 สมการการแพร่เพื่อใช้คำนวณค่าวิกฤตกรณีค่าคงที่  $D$  เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง คือ

$$\vec{\nabla} \cdot D \vec{\nabla} \phi + \left( \frac{1}{k} \nu \Sigma_f - \Sigma_a \right) \phi = 0 \quad (3.1.1)$$

จากการอินทิเกรตสมการข้างต้นตลอดทั้งปริมาตรปิด  $dV$  ของแต่ละส่วนประกอบย่อยเราจะได้

$$\int_V \vec{\nabla} \cdot D \vec{\nabla} \phi \, dV = \int_V \left[ \frac{1}{k} \nu \Sigma_f - \Sigma_a \right] \phi \, dV \quad (3.1.2)$$

พิจารณาจากทฤษฎีบทของไดเวอร์เจนซ์ จะได้ว่า

$$\oint_V \vec{\nabla} \cdot D \vec{\nabla} \phi \, dV = \oint_A D \vec{\nabla} \phi \cdot \hat{n} \, dA \quad (3.1.3)$$

ดังนั้น

$$\oint_A D \vec{\nabla} \phi \cdot \hat{n} \, dA = \bar{S} \bar{\phi} \Delta V \quad (3.1.4)$$

โดยที่  $A$  คือ พื้นที่ผิวของปริมาตรปิดนั้น ๆ

$\hat{n}$  คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยซึ่งตั้งฉากและออกจากพื้นที่เล็ก ๆ  $dA$

$\bar{\phi}$  คือ ค่าคาดหมายของนิวตรอนฟลักซ์ของส่วนประกอบนั้น ๆ

และมีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{\Delta V} \int_{\Delta V} \phi \, dV$

$\bar{S}$  คือ ค่าเฉลี่ยของภาคตัดขวาง

และมีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{\phi \Delta V} \int \left( \frac{1}{k} \nu \Sigma_f - \Sigma_a \right) \phi \, dV$

หาก  $\nu \Sigma_f$  และ  $\Sigma_a$  มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงสำหรับส่วนประกอบนั้น ๆ แล้ว  $\bar{S}$  ย่อมมีค่าเท่ากับ

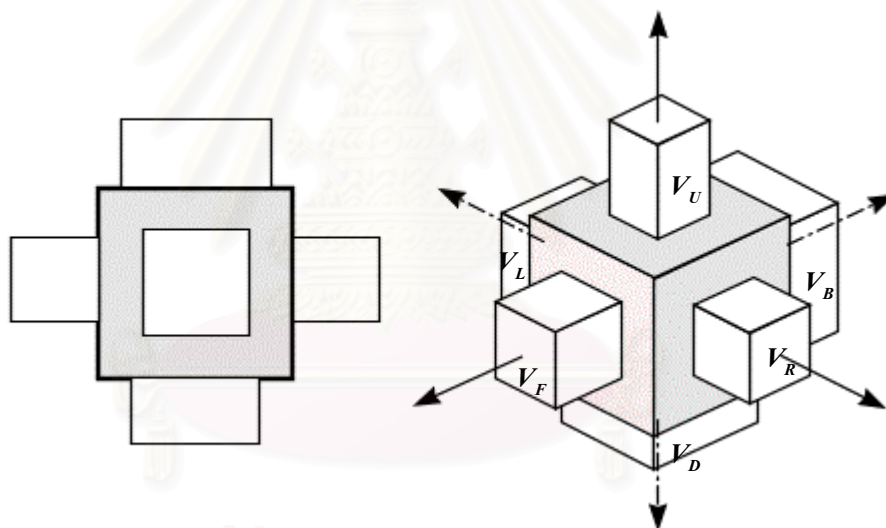
$$\frac{1}{k} \nu \Sigma_f - \Sigma_a$$

### 3.2 การประมาณสมการเพื่อการคำนวณเชิงตัวเลข

สำหรับส่วนประกอบย่อยของแบบจำลองนั้นจะถูกกำหนดให้อยู่ในระบบพิกัดฉาก ซึ่งทำให้ส่วนประกอบย่อยแต่ละส่วนมีรูปทรงปริมาตรเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉาก ดังนั้นในแต่ละส่วนจะมีพื้นผิวอยู่ 6 ด้าน ซึ่งจะมี 2 ด้านที่มีพื้นผิวเท่ากันในแต่ละแกน ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว สมการข้างต้นอาจประมาณได้ดังนี้

$$\sum_{i=1}^6 (D \vec{\nabla} \phi)_i \cdot \hat{n}_i \cdot A_i = \bar{S} \bar{\phi} \Delta V \quad (3.2.1)$$

จากสมการข้างต้น สามารถพิจารณาจากรูปประกอบได้ว่า ค่านิวตรอนฟลักซ์ที่เราพิจารณาในส่วนประกอบย่อย ใด ๆ  $V_O$  จะมีความสัมพันธ์กับส่วนประกอบย่อยอื่น ๆ ผ่านทางพื้นผิวที่แต่ละส่วนสัมผัสกันอยู่



รูปที่ 3.1 ลักษณะการจัดสร้างส่วนประกอบย่อยสำหรับการประมาณค่าวิกฤต  $k_{eff}$

สมการ 3.3.1 ข้างต้นสามารถเขียนในรูปผลต่างสี่เหลี่ยมได้เป็น

$$\left[ \begin{aligned} & \left( \frac{D_{OF} A_{OF}}{\Delta x_{OF}} (\bar{\phi}_F - \bar{\phi}_O) - \frac{D'_{OF} A'_{OF}}{\Delta x'_{OF}} (\bar{\phi}_O) \right) + \left( \frac{D_{OB} A_{OB}}{\Delta x_{OB}} (\bar{\phi}_B - \bar{\phi}_O) - \frac{D'_{OB} A'_{OB}}{\Delta x'_{OB}} (\bar{\phi}_O) \right) \\ & + \left( \frac{D_{OR} A_{OR}}{\Delta y_{OR}} (\bar{\phi}_R - \bar{\phi}_O) - \frac{D'_{OR} A'_{OR}}{\Delta y'_{OR}} (\bar{\phi}_O) \right) + \left( \frac{D_{OL} A_{OL}}{\Delta y_{OL}} (\bar{\phi}_L - \bar{\phi}_O) - \frac{D'_{OL} A'_{OL}}{\Delta y'_{OL}} (\bar{\phi}_O) \right) \\ & + \left( \frac{D_{OU} A_{OU}}{\Delta z_{OU}} (\bar{\phi}_U - \bar{\phi}_O) - \frac{D'_{OU} A'_{OU}}{\Delta z'_{OU}} (\bar{\phi}_O) \right) + \left( \frac{D_{OD} A_{OD}}{\Delta z_{OD}} (\bar{\phi}_D - \bar{\phi}_O) - \frac{D'_{OD} A'_{OD}}{\Delta z'_{OD}} (\bar{\phi}_O) \right) \end{aligned} \right]$$



$$= \frac{1}{k_0} v_o \Sigma_{f_o} V_o \bar{\phi}_o - \Sigma_{a_o} V_o \bar{\phi}_o \quad (3.2.2)$$

- โดยที่  $i$  คือ ดัชนีสำหรับส่วนประกอบ และเมื่อ  $i$  ถูกแทนโดย
- $F$  เมื่อส่วนประกอบอยู่ในแนวแกน  $x$  ทางบวก
  - $B$  เมื่อส่วนประกอบอยู่ในแนวแกน  $x$  ทางลบ
  - $R$  เมื่อส่วนประกอบอยู่ในแนวแกน  $y$  ทางบวก
  - $L$  เมื่อส่วนประกอบอยู่ในแนวแกน  $y$  ทางลบ
  - $U$  เมื่อส่วนประกอบอยู่ในแนวแกน  $z$  ทางบวก
  - $D$  เมื่อส่วนประกอบอยู่ในแนวแกน  $z$  ทางลบ
- และ  $O$  เมื่อส่วนประกอบนั้นเป็นส่วนประกอบที่ใช้อ้างอิงโดยส่วนประกอบอื่นๆ
- $\bar{\phi}_i$  คือ ค่านิวตรอนฟลักซ์เฉลี่ยที่พิจารณา ของส่วนประกอบ  $i$
- $D_{O_i}$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของนิวตรอนระหว่างส่วนประกอบที่พิจารณากับส่วนประกอบ  $i$
- $D'_{O_i}$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของนิวตรอนจากส่วนประกอบที่พิจารณาไปขอบเขตที่ว่าง
- ด้าน  $i$  ซึ่งก็คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของส่วนประกอบนั้น นั่นเอง
- $A_{O_i}$  คือ พื้นที่สัมผัสระหว่างส่วนประกอบที่พิจารณากับส่วนประกอบ  $i$  ที่อยู่ติดกัน
- $A'_{O_i}$  คือ พื้นที่ที่เป็นที่ว่างระหว่างส่วนประกอบที่พิจารณากับส่วนประกอบ  $i$  ที่อยู่ติดกัน ซึ่งเป็นผลมาจากส่วนประกอบที่พิจารณามีพื้นที่ด้าน ที่อยู่ติดกับส่วนประกอบ  $i$  มากกว่าพื้นที่ด้านของส่วนประกอบ  $i$
- $\Delta x_{O_i}$  คือ ระยะจากจุดกึ่งกลางของส่วนประกอบที่พิจารณา ถึงจุดกึ่งกลางของส่วนประกอบ  $i$  ที่อยู่ติดกันในแนวแกน  $x$
- $\Delta x'_{O_i}$  คือ ระยะจากจุดกึ่งกลางของส่วนประกอบที่พิจารณาถึงขอบเขตของส่วนประกอบ  $i$  ในแนวแกน  $x$
- โดยที่  $\Delta y_{O_i}, \Delta y'_{O_i}, \Delta z_{O_i}, \Delta z'_{O_i}$  ถูกนิยามในลักษณะเดียวกับ  $\Delta x_{O_i}$  และ  $\Delta x'_{O_i}$

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของนิวตรอน  $D_{O_i}$  สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$D_{O_i} = (D_o \Delta I_o + D_i \Delta I_i) / (\Delta I_o + \Delta I_i) \quad (3.2.3)$$

โดยที่  $\Delta I_i$  ถูกแทนโดย  $\Delta x_i, \Delta y_i$  และ  $\Delta z_i$  ขึ้นอยู่กับว่าส่วนประกอบ  $i$  อยู่ในแนวแกนใด เมื่อเทียบกับส่วนประกอบ  $O$

ดังนั้น

$$\left[ \begin{aligned} \Sigma_a V_o - \left( \frac{D_{OF} A_{OF}}{\Delta x_{OF}} + \frac{D_{OB} A_{OB}}{\Delta x_{OB}} + \frac{D_{OR} A_{OR}}{\Delta y_{OR}} + \frac{D_{OL} A_{OL}}{\Delta y_{OL}} + \frac{D_{OU} A_{OU}}{\Delta z_{OU}} + \frac{D_{OD} A_{OD}}{\Delta z_{OD}} \right) \\ + \left( \frac{D'_{OF} A'_{OF}}{\Delta x'_{OF}} + \frac{D'_{OB} A'_{OB}}{\Delta x'_{OB}} + \frac{D'_{OR} A'_{OR}}{\Delta y'_{OR}} + \frac{D'_{OL} A'_{OL}}{\Delta y'_{OL}} + \frac{D'_{OU} A'_{OU}}{\Delta z'_{OU}} + \frac{D'_{OD} A'_{OD}}{\Delta z'_{OD}} \right) \end{aligned} \right] \bar{\phi}_o +$$

$$\frac{D_{OF} A_{OF}}{\Delta x_{OF}} \bar{\phi}_F + \frac{D_{OB} A_{OB}}{\Delta x_{OB}} \bar{\phi}_B + \frac{D_{OR} A_{OR}}{\Delta y_{OR}} \bar{\phi}_R + \frac{D_{OL} A_{OL}}{\Delta y_{OL}} \bar{\phi}_L + \frac{D_{OU} A_{OU}}{\Delta z_{OU}} \bar{\phi}_U + \frac{D_{OD} A_{OD}}{\Delta z_{OD}} \bar{\phi}_D$$

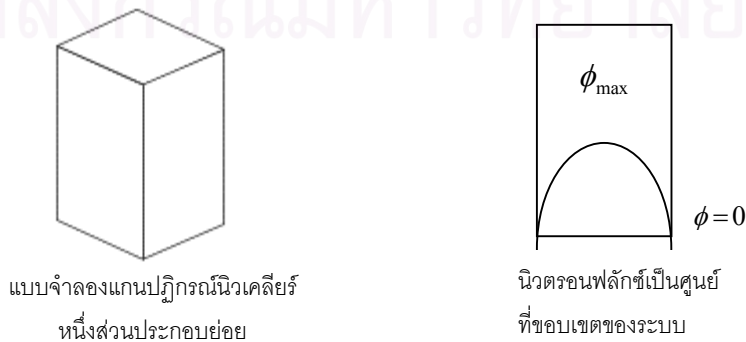
$$= \frac{1}{k_o} v_o \Sigma_{f_o} V_o \bar{\phi}_o \tag{3.2.4}$$

สมการข้างต้นเป็นการจัดรูปใหม่ของสมการเพื่อประมาณการแพร่ของนิวตรอน จะสังเกตเห็นว่าทางซ้ายมือของสมการ ตัวแปรต่างๆจะถูกจัดตามค่านิวตรอนฟลักซ์เฉลี่ยของแต่ละส่วนประกอบ และเทอมทางขวามือถือเป็นต้นกำเนิดนิวตรอนจากส่วนประกอบที่กำลังพิจารณา และจะมีค่าเป็นศูนย์ถ้าส่วนประกอบที่พิจารณาไม่มีส่วนของวัสดุเชื้อเพลิงเป็นองค์ประกอบ

### 3.3 การสร้างแบบจำลองของแกนปฏิกรณ์

#### 3.3.1 แบบจำลองแกนปฏิกรณ์แบบส่วนประกอบเดียว

พิจารณาตัวอย่างแกนปฏิกรณ์จำลองที่ประกอบไปด้วยหนึ่งส่วนประกอบ จากสมการ 3.2.4 เมื่อแทนค่าคงที่ต่างๆ อันเป็นองค์ประกอบของส่วนประกอบนั้นในสมการ โดยส่วนประกอบที่พิจารณามีเพียง  $\bar{\phi}_o$  ที่ต้องคำนวณค่า จะเห็นว่าเทอมที่เป็นผลคูณกับนิวตรอนฟลักซ์เฉลี่ยของส่วนประกอบอื่นมีค่าเป็นศูนย์ เหลือเพียงเทอมที่อยู่ในวงเล็บใหญ่เท่านั้น และเทอมที่เกี่ยวข้องกับที่ว่าง อันเกิดจากส่วนประกอบอื่นไม่มี จึงทำให้เทอมที่เป็นเสมือนส่วนเติมเต็ม (complement unit ( $i'$ )) ของด้านต่างๆ อันเกิดจากส่วนประกอบที่อยู่ติดกันมีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 3.2 แบบจำลองหนึ่งส่วนประกอบ และลักษณะการกระจายของนิวตรอนฟลักซ์

ดังนั้นสมการการประมาณค่าวิกฤต สำหรับแบบจำลองที่มีส่วนประกอบเดียว สามารถเขียนได้ว่า

$$\left( \sum_a V_o - \left( \frac{D_{OF} A_{OF}}{\Delta x_{OF}} + \frac{D_{OB} A_{OB}}{\Delta x_{OB}} + \frac{D_{OR} A_{OR}}{\Delta y_{OR}} + \frac{D_{OL} A_{OL}}{\Delta y_{OL}} + \frac{D_{OU} A_{OU}}{\Delta z_{OU}} + \frac{D_{OD} A_{OD}}{\Delta z_{OD}} \right) \right) \bar{\phi}_o$$

$$= \frac{1}{k_o} v_o \sum_{f_o} V_o \bar{\phi}_o \quad (3.3.1)$$

สมการข้างต้นเป็น สมการเชิงเส้นตัวแปรเดียวที่มี  $\bar{\phi}_o$  เป็นตัวไม่ทราบค่า พิจารณาทางขวามือของสมการจะเห็นว่า มีตัวแปรที่ต้องสมมุติค่าเริ่มต้น(initial guess) 2 ตัวแปรคือ  $k_o$  และ  $\bar{\phi}_o$  เพื่อคำนวณหา คำตอบของสมการ  $\bar{\phi}_o$  ทางซ้ายมือ และนำกลับมาคำนวณหาค่าวิกฤต  $k_o$  ที่แท้จริงของระบบ จะสังเกตเห็นได้ว่าถ้าส่วนประกอบที่พิจารณาไม่สามารถให้กำเนิดนิวตรอนใหม่เนื่องจากกระบวนการแตกตัว นั่นคือ  $\sum_{f_o}$  เป็นศูนย์ เทอมทางขวามือของสมการข้างต้นจะมีค่าเป็นศูนย์ มีผลทำให้คำนวณนิวตรอนพลักซ์ที่พิจารณาโดยทั่วไปมีค่าเป็นศูนย์เช่นกัน

### 3.3.2 แบบจำลองแกนปฏิกรณ์แบบหลายส่วนประกอบ

สำหรับกรณีแบบจำลองมีหลายส่วนประกอบย่อย สามารถจัดสมการ 3.2.4 ให้อยู่ในรูปที่ง่าย สำหรับส่วนประกอบย่อยที่พิจารณาเป็น

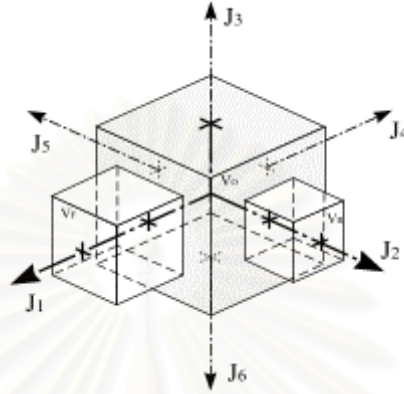
$$\left[ \sum_a V_o - \sum_{i=1}^6 (X_i - X'_i) \right] \bar{\phi}_o + \sum_{i=1}^6 X_i \bar{\phi}_i = \frac{1}{k_o} v_o \sum_{f_o} V_o \bar{\phi}_o \quad (3.3.2)$$

โดยที่  $i = 1, 2, \dots, 6$  แทนโดย  $F, B, R, L, U,$  และ  $D$

$X_i$  แทนโดย  $\frac{D_{oi} A_{oi}}{\Delta x_{oi}}$  หรือ  $\frac{D_{oi} A_{oi}}{\Delta y_{oi}}$  หรือ  $\frac{D_{oi} A_{oi}}{\Delta z_{oi}}$  ในทิศทางนั้นๆ  
และผ่านไปยังส่วนประกอบที่อยู่ติดกัน

และ  $X'_i$  แทนโดย  $\frac{D'_{ij} A'_{ij}}{\Delta x'_{ij}}$  หรือ  $\frac{D'_{ij} A'_{ij}}{\Delta y'_{ij}}$  หรือ  $\frac{D'_{ij} A'_{ij}}{\Delta z'_{ij}}$  ในทิศทางนั้นๆ  
และผ่านไปยังบริเวณที่เป็นที่ว่าง

ตัวอย่างต่อไปนี้แสดงลักษณะสมการที่ได้ เมื่อแกนปฏิกรณ์ที่พิจารณาประกอบไปด้วย 3 ส่วนประกอบย่อย โดยค่านิวตรอนฟลักซ์ที่พิจารณาเริ่มจากปริมาตร  $V_o$  และถูกกำหนดให้เป็นส่วนประกอบต้นกำเนิดนิวตรอน



รูปที่ 3.3 ลักษณะการจัดวางส่วนประกอบย่อย 3 ส่วน เพื่อใช้ประมาณค่านิวตรอนฟลักซ์และค่าวิกฤต  $k_{eff}$

เขียนการกระจายของสมการ สำหรับส่วนประกอบ  $V_o$  ได้ว่า

$$\left[ \Sigma_a V_o - \left( \frac{D_{OF} A_{OF}}{\Delta x_{OF}} + \frac{D_{OB} A_{OB}}{\Delta x_{OB}} + \frac{D_{OR} A_{OR}}{\Delta y_{OR}} + \frac{D_{OL} A_{OL}}{\Delta y_{OL}} + \frac{D_{OU} A_{OU}}{\Delta z_{OU}} + \frac{D_{OD} A_{OD}}{\Delta z_{OD}} \right) \right] \bar{\phi}_o +$$

$$\left( \frac{D'_{OF} A'_{OF}}{\Delta x'_{OF}} + \frac{D'_{OR} A'_{OR}}{\Delta y'_{OR}} \right) \bar{\phi}_o + \frac{D_{FO} A_{FO}}{\Delta x_{FO}} \bar{\phi}_f + \frac{D_{RO} A_{RO}}{\Delta y_{RO}} \bar{\phi}_r = \frac{1}{k_o} \nu_o \Sigma_{f_o} V_o \bar{\phi}_o \quad (3.3.3ก)$$

เมื่อพิจารณาค่านิวตรอนฟลักซ์ของส่วนประกอบ  $V_f$  และ  $V_r$  จะมีการกระจายสมการในลักษณะเดียวกัน นั่นคือ

สำหรับส่วนประกอบ  $V_f$

$$\left[ \Sigma_a V_f - \left( \frac{D_{FF} A_{FF}}{\Delta x_{FF}} + \frac{D_{FB} A_{FB}}{\Delta x_{FB}} + \frac{D_{FR} A_{FR}}{\Delta y_{FR}} + \frac{D_{FL} A_{FL}}{\Delta y_{FL}} + \frac{D_{FU} A_{FU}}{\Delta z_{FU}} + \frac{D_{FD} A_{FD}}{\Delta z_{FD}} \right) \right] \bar{\phi}_f +$$

$$\frac{D_{OF} A_{OF}}{\Delta x_{OF}} \bar{\phi}_o = \frac{1}{k_f} \nu_f \Sigma_{f_f} V_f \bar{\phi}_f \quad (3.3.3ข)$$

สำหรับส่วนประกอบ  $V_R$

$$\left[ \Sigma_a V_R - \left( \frac{D_{RF} A_{RF}}{\Delta x_{RF}} + \frac{D_{RB} A_{RB}}{\Delta x_{RB}} + \frac{D_{RR} A_{RR}}{\Delta y_{RR}} + \frac{D_{RL} A_{RL}}{\Delta y_{RL}} + \frac{D_{RU} A_{RU}}{\Delta z_{RU}} + \frac{D_{RD} A_{RD}}{\Delta z_{RD}} \right) \right] \bar{\phi}_R + \frac{D_{OR} A_{OR}}{\Delta y_{OR}} \bar{\phi}_O = \frac{1}{k_R} v_R \Sigma_{fR} V_R \bar{\phi}_R \quad (3.3.3ค)$$

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้ค่านิวตรอนฟลักซ์เป็นศูนย์บริเวณขอบเขตที่ติดกับที่ว่าง เพื่อให้ได้ค่าจากการประมาณเหมาะสมมากขึ้น

ในกรณีการแบ่งส่วนประกอบย่อยออกเป็น 3 ส่วน จะเกิดตัวแปรไม่ทราบค่า 3 ตัว ซึ่งก็คือค่านิวตรอนฟลักซ์เฉลี่ยของแต่ละส่วนประกอบ ก่อนการคำนวณจะต้องกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปรที่อยู่ทางขวามือของแต่ละสมการ นั่นคือ ค่า  $k$  และ  $\bar{\phi}$  สังเกตเห็นได้ว่าส่วนประกอบใดที่ไม่มีมีองค์ประกอบของวัสดุที่เกิดการแตกตัวได้ มีผลทำให้เทอมทางขวามือมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องมาจากค่า  $\Sigma_f$  มีค่าเท่ากับศูนย์ จากตัวอย่างนี้ข้างต้นเสมือนเป็นการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับส่วนประกอบแรกเท่านั้น ดังนั้นสมการที่เกิดขึ้นทั้งหมดมี 3 สมการ จะใช้การแก้สมการในรูปเมทริกซ์ แล้วทำการคำนวณซ้ำเพื่อหาคำตอบของสมการที่แท้จริง นั่นก็คือ ค่าวิกฤตของแบบจำลองของแกนปฏิกรณ์ ซึ่งบอกถึงสภาวะที่เป็นไปขณะนั้นของระบบ อนึ่งเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาในการแยกแวกเตอร์ของกระแสนิวตรอนเมื่อด้านของส่วนประกอบที่อยู่ติดกันมีขนาดไม่เท่ากัน จะพิจารณากระแสนิวตรอนจากส่วนประกอบหนึ่งไปยังอีกส่วนประกอบหนึ่ง โดยมีเงื่อนไขว่าแต่ละส่วนประกอบย่อยนั้นจะอยู่ในแนวเส้นกึ่งกลางปริมาตรซึ่งกันและกันของส่วนประกอบที่อยู่ติดกัน

สำหรับผลการคำนวณจากโปรแกรม MTAC ยังให้ค่าคลาดเคลื่อนอยู่(รายละเอียดของแบบจำลองจะกล่าวถึงในบทที่ 4) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณจากโปรแกรม MCNP ซึ่งถือว่าเป็นโปรแกรมที่ได้รับการยอมรับโปรแกรมหนึ่งสำหรับการคำนวณค่าวิกฤตของแกนปฏิกรณ์ ทั้งนี้เนื่องจากวิธีที่ใช้เป็นการประมาณเพื่อสังเกตค่าโดยรวมของระบบ ซึ่งก็คือ ลักษณะการกระจายของนิวตรอนฟลักซ์เฉลี่ยของแต่ละส่วนประกอบย่อย เพื่อใช้ในการคำนวณค่าวิกฤตของระบบ และจากข้อจำกัดบางประการของสมการที่ใช้คำนวณ เช่น พิจารณาสมการการแพร่ของนิวตรอนที่ระดับพลังงานเดียว แต่กระนั้นถ้าสร้างแบบจำลองโดยให้มีส่วนประกอบย่อยที่ละเอียดมากขึ้นรวม ทั้งการเลือกใช้อ่งค์ประกอบทางวัสดุอย่างเหมาะสม ก็อาจได้ค่าการประมาณใกล้เคียงกับค่าจริงมากยิ่งขึ้น

จากตัวอย่างที่ผ่านมาเห็นได้ว่าเมื่อมีส่วนประกอบมากขึ้น สมการที่ต้องแก้ก็มีมากขึ้นไปด้วยรวมทั้งมีขั้นตอนการคำนวณที่ซับซ้อนขึ้น เนื่องจากในขั้นตอนการคำนวณจะต้องมีการคำนวณซ้ำเพื่อให้คำตอบของสมการดูเข้าค่าจริงมากที่สุด ถ้าทำการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของวัสดุภายในส่วนประกอบ หรือขนาดของส่วนประกอบที่เป็นอยู่ ก็ต้องทำการคำนวณค่าใหม่ทั้งหมด ดังนั้นในส่วนของงานที่ต้องการนำเสนอจึงถูกประยุกต์เข้ามาเพื่อช่วยในการแก้ปัญหา และลดขั้นตอนรวมทั้งระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณ นั่นคือ การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณตามกระบวนการทั้งหลายที่กล่าวมาแล้ว การวิจัยนี้ได้เลือกภาษาซีเป็นภาษาที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรม และเป็นไปตามสถาบันมาตรฐานแห่งชาติอเมริกัน(American National Standards Institute หรือ ANSI C) เนื่องจากความคล่องตัวในตัวภาษาเองจึงสามารถเขียนโปรแกรมจากระบบปฏิบัติการหนึ่งให้สามารถแปรและทำงานในอีกระบบปฏิบัติการหนึ่งได้โดยไม่ยุ่งยาก

### 3.4 รูปแบบเพิ่มข้อมูลป้อนเข้าสำหรับโปรแกรม MTAC

เพิ่มข้อมูลป้อนเข้าสำหรับโปรแกรม MTAC ประกอบไปด้วยข้อมูลเฉพาะต่างๆของแบบจำลองแกนปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้น โดยในบรรทัดแรกของการเพิ่มข้อมูลจะเป็นส่วนหัวเรื่องของแบบจำลองมีความยาวไม่เกิน 80 อักขระ และอาจใช้การเว้นบรรทัดเพื่อแยกจากส่วนข้อมูลหลัก ดังตัวอย่างเพิ่มข้อมูลป้อนเข้ารูปที่ 3.4 ภายในเพิ่มข้อมูลจะใช้การเว้นช่องว่าง เพื่อแยกส่วนของข้อมูลต่างๆ ออกจากกัน ส่วนถัดมา คือ การกำหนดส่วนประกอบทั้งหมดที่ใช้ในแบบจำลอง ซึ่งจะกำหนดเป็นตัวเลขจำนวนเต็มหลังเครื่องหมายเท่ากับ เช่น  $Modules = 3$  หมายถึง มีส่วนประกอบทั้งหมดในการคำนวณ เท่ากับ 3 ส่วนประกอบ ข้อมูลหลังจากส่วนนี้จะเป็นการกำหนดลักษณะเฉพาะของแต่ละส่วนประกอบ และอาจแยกพิจารณาได้ เป็น 3 ส่วนตามลำดับ คือ

- **มิติของส่วนประกอบ** ได้แก่ การกำหนดตำแหน่งของส่วนประกอบนั้นๆ เพื่อใช้ในการอ้างอิง ลักษณะข้อมูลประกอบด้วยเลขหมายสำหรับส่วนประกอบ ขนาดของส่วนประกอบในระบบพิกัดฉาก ได้แก่ความยาวของด้านทั้ง 3 คือ ความยาวตามแนวแกน  $x$   $y$  และ  $z$  ข้อมูลส่วนสุดท้ายประกอบไปด้วยตัวเลข 6 จำนวน ซึ่งบอกความสัมพันธ์ของด้านทั้ง 6 กับส่วนประกอบอื่นในระบบ โดยจะกำหนดความสัมพันธ์เรียงตามแนวแกน  $x$  ทางบวกและลบ ตามแนวแกน  $y$  ทางบวกและลบ และ  $z$  ทางบวกและลบตามลำดับ สำหรับตัวอย่างเพิ่มข้อมูลในรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าในส่วนประกอบที่ 1 มีชุดตัวเลข 2 3 0 0 0 0 เพื่อบ่งชี้ว่า มีส่วนประกอบที่ 2 อยู่ติดทางด้าน  $x$  บวก และส่วนประกอบที่ 3 อยู่ติดทางด้าน  $x$  ลบ ส่วนทางด้าน  $y$  และ  $z$  ไม่มีส่วนประกอบอื่นใด ซึ่งการกำหนดค่าบ่งชี้ให้เป็น 0 หมายความว่า ส่วนประกอบมีด้านที่อยู่ติดกับที่ว่าง



- **องค์ประกอบของส่วนประกอบ** ถัดจากข้อมูลแสดงมิติของส่วนประกอบ คือ ข้อมูลกำหนดจำนวนวัสดุและแสดงสมบัติทางนิวตรอนฟิสิกส์ของวัสดุแต่ละตัวที่ผสมเป็นส่วนประกอบนั้นๆ ข้อมูลเริ่มด้วยจำนวนวัสดุที่มีในส่วนประกอบที่พิจารณา ตามด้วยการกำหนดค่า  $v$  สำหรับส่วนประกอบที่เป็นเชื้อเพลิง ข้อมูลสุดท้ายเป็นการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่นิวตรอน ถ้าไม่ทราบให้ใส่ตัวเลข 0.0 ในส่วนนี้ ซึ่งโปรแกรมจะทำการประมาณค่าให้ จากรูป 3.4 สำหรับส่วนประกอบที่ 1 จะเห็นว่า ข้อมูลส่วนนี้คือ 2 2.43 0.0 หมายความว่า ส่วนประกอบนี้ ใช้วัสดุ 2 ชนิดผสมกัน และส่วนประกอบนี้มีวัสดุเชื้อเพลิงเป็นองค์ประกอบโดยมีค่า  $v$  เท่ากับ 2.43 และต้องการให้โปรแกรมประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่นิวตรอน กรณีซึ่งส่วนประกอบส่วนนี้มีสมบัติเหมือนกับส่วนประกอบอื่นที่กำหนดมาก่อนหน้า อาจให้โปรแกรมนำค่าดังกล่าวมาใช้ โดยกำหนดค่าตัวเลขจำนวนแรกในส่วนนี้เป็น 0 จากนั้น อังถึงส่วนประกอบที่ต้องการกำหนดค่าซ้ำ และส่วนของสัดส่วนเชิงปริมาตร สำหรับวัสดุเชื้อเพลิง เช่น 0 1 0.8 หมายถึง การกำหนดให้ส่วนประกอบนี้มีค่าของส่วนผสมซ้ำกับส่วนประกอบที่หนึ่ง แต่ให้สัดส่วนเชิงปริมาตรของเชื้อเพลิงมีค่าเพียง 0.8 ของส่วนประกอบดังกล่าว สำหรับการกำหนดค่าซ้ำในส่วนประกอบที่ไม่มีเชื้อเพลิงผสมอยู่ ค่าส่วนนี้จะถูกกำหนดเป็น 1.0

- **ข้อมูลทางวัสดุของส่วนประกอบ** ได้แก่ การกำหนดค่าคงที่เฉพาะต่าง ๆ ของวัสดุแต่ละชนิดที่เป็นส่วนผสมในส่วนประกอบ โดยตัวเลข 3 จำนวนแรก เป็นการกำหนดค่าภาคตัดขวางจุลภาคทั้ง 3 ของวัสดุ สำหรับเทอร์มาลนิวตรอน คือ ภาคตัดขวางการดูดกลืน ( $\sigma_a$ ) ภาคตัดขวางการเกิดปฏิกิริยาแบบแตกตัว ( $\sigma_f$ ) และภาคตัดขวางการกระเจิง ( $\sigma_s$ ) จากนั้นเป็นการกำหนดค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของวัสดุนั้นในส่วนประกอบที่พิจารณา และใช้การเว้นช่องว่างเพื่อแยกข้อมูลแต่ละค่าออกจากกัน จากนั้นเป็นการกำหนดค่าความหนาแน่นของวัสดุชนิดนั้น และ ค่ามวลอะตอม ถ้าในส่วนประกอบมีวัสดุหลายชนิด ก็ต้องกำหนดค่าต่างๆ ที่กล่าวมาแล้ว ตามจำนวนวัสดุที่มีอยู่ในแต่ละส่วนประกอบ เช่นในรูปที่ 3.4 พิจารณาในส่วนประกอบที่หนึ่ง จะเห็นว่าประกอบไปด้วยวัสดุ 2 ชนิด และต้องกำหนดค่าคงที่ต่างๆ เป็น 2 ชุด แต่ถ้าในกรณีที่มีการกำหนดค่าซ้ำกับส่วนประกอบอื่นจากหัวข้อที่ 2 ข้อมูลส่วนนี้ก็ไม่ต้องกำหนดซ้ำ เนื่องจากโปรแกรมจะอ่านค่าจากส่วนประกอบอื่นที่อ้างอิงเอง

ข้อมูลส่วนอื่นๆคือ การกำหนดค่าเริ่มต้นของ  $k$  และนิวตรอนพลักซ์เฉลี่ยให้กับระบบ จากรูปที่ 3.4 ได้แก่ค่า 1.0 1.0 ซึ่งจะกำหนดไว้ส่วนท้ายสุด หลังจากกำหนดข้อมูลลักษณะเฉพาะทั้งหมดของส่วนประกอบแล้ว ส่วนสุดท้ายของแฟ้มข้อมูลป้อนเข้าคือ ส่วนหมายเหตุหรือส่วนของคำแนะนำสำหรับแบบจำลองที่สร้างขึ้น และสามารถบันทึกข้อความได้มากตามต้องการ

Model 3A. Uranium-235+Nickel was sandwiched with Fe+C and Cd

Modules = 3

1	100	100	200	2	3	0	0	0	0
2	2.43	0							
	687.5	580.2	17.6	0.1	18.9	235.04			
	4.43	0.0	17.3	0.9	8.9	58.71			

ข้อมูลทั้งหมดในหนึ่งส่วนประกอบ

เลขบ่งชี้ ในส่วนข้อมูลมิติ

ตำแหน่งและขนาด ในส่วนข้อมูลมิติ

2	40	100	200	0	1	0	0	0	0
2	0.0	0.0							
	2.55	0.0	10.9	0.95	7.87	55.847			
	0.0034	0.0	4.75	0.05	1.6	12.011			

ค่าภาคตัดขวาง ในส่วนข้อมูลวัสดุ

3	20	100	200	1	0	0	0	0	0
1	0.0	0.0							
	2450.0	0.0	5.6	1.0	8.65	112.40			

ค่า  $k$  และ  $\phi$  เริ่มต้น

1.0 1.0

# The sizes for each module :

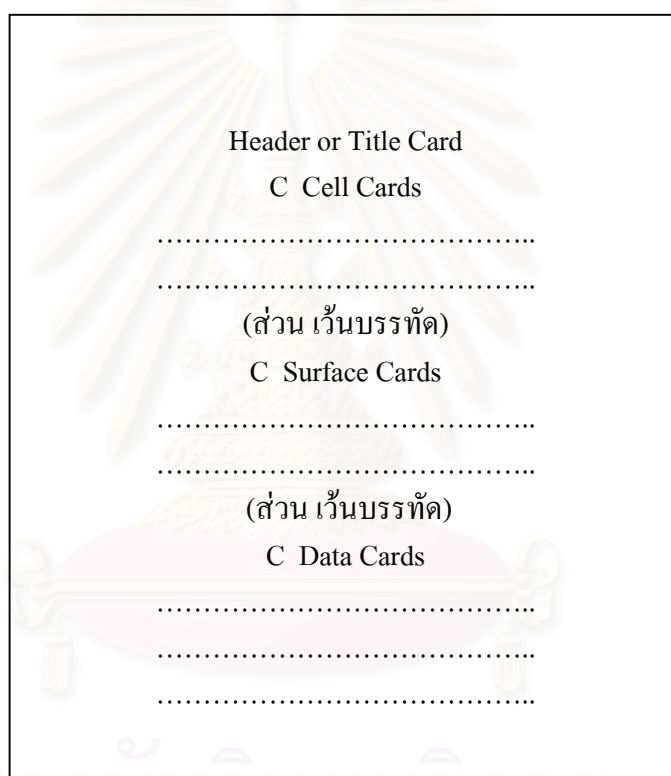
- 100 x 100 x 200 cm<sup>3</sup>. for module1 (U-235+Ni),
- 40 x 100 x 200 cm<sup>3</sup>. for module2 (Fe+C)
- 20 x 100 x 200 cm<sup>3</sup>. for module3 (Pure Cd).

# Initial value : multiplication factor is 1.0 and neutrons flux is 1.0

รูปที่ 3.4 ตัวอย่างเพิ่มข้อมูลป้อนเข้าของแกนปฏิกรณ์จำลอง สำหรับโปรแกรม MTAC ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ส่วนประกอบย่อย

### 3.5 รูปแบบเพิ่มข้อมูลป้อนเข้าสำหรับ MCNP 4A

เพิ่มข้อมูลป้อนเข้าของโปรแกรม MCNP สำหรับคำนวณค่าวิกฤต ประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญ คือ บัตรกำหนดเซลล์(Cell Cards) บัตรกำหนดพื้นผิว(Surface Cards) และบัตรกำหนดข้อมูล(Data Cards) ในบรรทัดแรกของเพิ่มข้อมูลป้อนเข้าจะมีส่วนของหัวเรื่องหรือบัตรกำหนดหัวเรื่อง (Title cards) เป็นส่วนแรกและจึงตามด้วยบัตรกำหนดส่วนอื่นๆ บัตรกำหนดหนึ่งๆ อาจประกอบไปด้วยหนึ่งคำสั่ง หรือมากกว่า รูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างเพิ่มข้อมูลป้อนเข้า



รูปที่ 3.5 โครงสร้างหลักของเพิ่มข้อมูลป้อนเข้าสำหรับโปรแกรม MCNP

เนื่องจากเพิ่มข้อมูลป้อนเข้าของแบบจำลองที่ใช้ในการวิจัยอาจมีคำสั่งนิยามที่ต่างออกไปจากตัวอย่างที่จะกล่าวถึง เช่น จำนวนเซลล์ในคำสั่งนิยามเซลล์ หรือ จำนวนพื้นผิวที่ใช้นิยามเซลล์ จึงขออธิบายโครงสร้างของเพิ่มข้อมูลโดยภาพรวมไม่ขึ้นกับชนิดของแบบจำลอง

โครงสร้างของเพิ่มข้อมูลป้อนเข้า(Input Files)ของคอมพิวเตอร์โค้ด MCNP 4A เป็นเพิ่มข้อมูลแบบอักขระ (Text Files) โดยข้อความในหนึ่งบรรทัดจะบรรจุตัวอักษรได้ 80 ตัว ซึ่งแต่ละ

บรรทัดจะบรรจุคำสั่ง และค่าพารามิเตอร์ต่างกันไป โดยใช้ส่วนของการเว้นบรรทัดเพื่อแบ่ง 3 ส่วน สำคัญออกจากกัน รูปแบบทั่วไปของคำสั่งนิยาม(Cards)ต่างๆ จะมีลักษณะคล้ายกัน ในแฟ้มข้อมูล ป้อนเข้าการกำหนด หมายเลขเซลล์ หมายเลขพื้นผิว หรือการกำหนดชื่อในคำสั่งนิยามข้อมูลจะต้อง ระบุอยู่ภายใน 5 คอลัมน์แรก และจะแบ่งด้วย 1 ช่องว่างจากตัวข้อมูล ซึ่งแบ่งตามประเภทได้ดังนี้

- **บัตรกำหนดหัวเรื่อง (Title Card)**

บรรทัดแรกของแฟ้มข้อมูลจะเป็นบรรทัดที่ใช้สำหรับเขียนคำอธิบายอย่างย่อๆ ถึงแบบจำลองที่สร้างขึ้น และข้อมูลส่วนนี้จะแสดงให้เห็นในแฟ้มข้อมูลออก

- **บัตรกำหนดเซลล์ (Cell Cards)**

บรรทัดที่ 2 ในส่วนของบัตรกำหนดเซลล์ ตัวอักษรที่ต่อจากบรรทัดที่มีตัวอักษรซึ่งพิมพ์ว่า “C Cell Cards” แต่ละบรรทัดจะใช้นิยามแต่ละเซลล์ตามหมายเลขที่กำกับอยู่ในคอลัมน์แรกของ บรรทัด คำว่าเซลล์นั้น หมายถึงปริมาตรที่ห่อหุ้มด้วยพื้นผิวปิด ข้อมูลตัวเลขในหลักแรกคือ หมายเลขของวัสดุ (Material Number) ตรงกับค่าในคอลัมน์แรกของบรรทัดที่ใช้นิยามวัสดุ(Material Cards) ข้อมูลตัวเลขหลักถัดมา ถ้าเป็นบวกจะเป็นความหนาแน่นเชิงอะตอมในหน่วย 10 อะตอมต่อ บาร์น-เซนติเมตร สำหรับค่าที่เป็นลบจะเป็นค่าความหนาแน่นเชิงมวลในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร ชุดตัวเลขที่ถัดจากค่าความหนาแน่นของวัสดุคือ พื้นผิวที่ประกอบกับขึ้นเป็นเซลล์ จะมี ค่าได้ทั้งบวกและลบ ซึ่งหมายถึงการเลือกใช้ด้านที่เป็นบวกหรือลบของพื้นผิวหนึ่งๆ เพื่อนำมา ประกอบเป็นเซลล์ ด้วยการใช้ตัวปฏิบัติการของเซต เช่น อินเตอร์เซกชัน ซึ่งใช้การเว้นวรรค และยูเนียนซึ่งใช้เครื่องหมายมหัพภาคคู่ ตัวอย่างของบรรทัดที่ใช้นิยามเซลล์เป็นดังนี้

C Cell Cards

1 -1.0 1 -2 -3 imp:n=1

โดยที่ imp:n=1 เป็นคำสั่งเพื่อกำหนดให้เซลล์ที่ 1 มีค่าความสำคัญของอนุภาคนิวตรอนเท่ากับหนึ่ง เซลล์นี้เกิดจากการอินเตอร์เซกชันของด้านบวกของพื้นผิวที่หนึ่งกับด้านลบของพื้นผิวที่สอง และ ด้านลบของพื้นผิวที่สาม เซลล์ที่ 1 นี้ประกอบขึ้นด้วยวัสดุหมายเลข 1 ซึ่งมีความหนาแน่นเท่ากับ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

- **บัตรกำหนดพื้นผิว (Surface Card)**

พื้นผิวของ MCNP นั้นนิยามโดยใช้สมการคณิตศาสตร์ โดยใช้คำสั่งย่อในการกำหนดชนิดของพื้นผิว ตัวอย่างการกำหนดคำสั่งนิยามนี้ เช่น

## C Surface Cards

1 cz 20.0 \$ infinite z cylinder

จำนวนของพื้นผิวนี้มีค่าเป็น 1 และตัวอักษร cz หมายถึง รูปทรงกระบอกขนานอนันต์ มีจุดศูนย์กลางอยู่บนแกน z และมีรัศมี 20.0 เซนติเมตร สัญลักษณ์ \$ มีเพื่อให้คำอธิบายต่าง ๆ หลัง \$ เป็นการบอกรายละเอียดต่างๆ ของคำสั่งที่ถูกกำหนดในบรรทัดนั้น

### • บัตรกำหนดข้อมูล(Data Cards)

รูปแบบทั่วไปในส่วนของคำสั่งนิยามข้อมูล(Data Cards) จะเหมือนกับในส่วนของคำสั่งนิยามเซลล์(Cell Cards) และคำสั่งนิยามพื้นผิว(Surface Cards) ส่วนหลักๆ ของการกำหนดคำสั่งนิยามในส่วนนี้เป็นการระบุทั้งการคำนวณค่าวิกฤตและคำสั่งนิยามวัสดุ(Material Cards) เป็นสิ่งสำคัญอย่างมากสำหรับการวิเคราะห์ค่าวิกฤต นอกจากนั้นในการคำนวณค่าวิกฤตทุกๆ ครั้งจะมีส่วนของคำสั่งนิยามการคำนวณค่าวิกฤต(kcode card) ตัวอย่างการกำหนดรูปแบบคำสั่งนิยามนี้ เช่น

kcode 1000 1.0 15 115

คำสั่งในตัวอย่างนี้ เป็นการกำหนดให้ปัญหาที่ต้องการคำนวณพิจารณา 1,000 นิวตรอนต่อหนึ่งรอบการคำนวณ และกำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับค่าวิกฤตยังผล(keff) มีค่าเท่ากับ 1.0 โดยที่ภายใน 15 รอบแรกของการคำนวณจะถูกข้ามไป ก่อนที่จะเริ่มส่วนของการสะสมข้อมูลค่าวิกฤตยังผล และจำนวนรอบทั้งหมดที่ใช้ในการคำนวณเป็น 115 รอบ

ปัญหาสำหรับค่าวิกฤตจะใช้คำสั่งนิยามต้นกำเนิดรังสี(ksrc card) เพื่อระบุตำแหน่งเริ่มต้นของการกระจายต้นกำเนิดรังสี ซึ่งจะต้องมีอย่างน้อยหนึ่งตำแหน่งหรือมากกว่าภายในบริเวณวัสดุ เชื้อเพลิงสำหรับการคำนวณค่าวิกฤต ตัวอย่างการกำหนดรูปแบบของคำสั่งนิยามต้นกำเนิดรังสี (ksrc card) เช่น

ksrc 10 5 25 15 10 20

ตัวอย่างดังกล่าวประกอบไปด้วยต้นกำเนิดนิวตรอนสองตำแหน่ง ตำแหน่งแรกอยู่ที่พิกัด(10,5,25) และตำแหน่งที่สองอยู่ที่พิกัด(15,10,20)

อีกส่วนหนึ่งในคำสั่งนิยามข้อมูลที่จะขาดไม่ได้ คือ ส่วนของคำสั่งกำหนดชนิดของวัสดุ (Material Cards) ต่างๆ ที่ได้เลือกใช้เป็นส่วนประกอบของแบบจำลอง ตัวอย่างการกำหนดรูปแบบคำสั่งนิยามวัสดุ ดังเช่น ตัวอย่างที่แสดงให้เห็นต่อไปนี้

#### C Data Cards

```
m1 94239 2.442e-2 94240 1.673e-1 $ Plutonium
m2 1000 2 8000 1 $ Water
```

ข้อมูลในส่วนแรกหมายถึงวัสดุชนิดที่ 1(m1) ประกอบไปด้วย 2 ไอโซโทปของพลูโตเนียม คือ พลูโตเนียม-239(94239) มีความหนาแน่นเชิงอะตอม  $2.442 \times 10^{-2}$  อะตอมต่อบาร์น-เซนติเมตร และยังประกอบไปด้วยพลูโตเนียม-240(94240) มีความหนาแน่นเชิงอะตอม  $1.673 \times 10^{-3}$  อะตอมต่อบาร์น-เซนติเมตร ข้อมูลต่อมาคือวัสดุชนิดที่ 2(m2) เป็นน้ำ มีส่วนประกอบโดยโมล คือ ไฮโดรเจน(1000) 2 อะตอม ต่อ ออกซิเจน(8000) 1 อะตอม



## บทที่ 4

### แบบจำลองและผลการคำนวณค่าวิกฤต $k_{eff}$

#### 4.1 แบบจำลองแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์หนึ่งส่วนประกอบย่อย สำหรับส่วนประกอบเชื้อเพลิง

แกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์จำลองมีส่วนประกอบของวัสดุเชื้อเพลิง คือ พลูโตเนียม-239 รูปทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากหนึ่งส่วนประกอบและไม่มีตัวหน่วงนิวตรอน การคำนวณสำหรับแบบจำลองนี้คือการเปลี่ยนแปลงขนาดแกนปฏิกรณ์ในหลาย ๆ ขนาด เพื่อวิเคราะห์ผลจากความสัมพันธ์ของค่าวิกฤตที่คำนวณได้ทั้ง 3 วิธีการ คือ จากสมการทางทฤษฎี โปรแกรม MTAC และ โปรแกรม MCNP 4A ของ *Los Alamos National Laboratory* ทั้งยังหาขนาดที่เหมาะสมกับโปรแกรม MTAC เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขของการกำหนดแบบจำลอง

ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ สำหรับเทอร์มอลนิวตรอน

ธาตุเชื้อเพลิง	มวลอะตอม	ความหนาแน่น( $g/cm^3$ )	$\sigma_a$ (barns)	$\sigma_s$ (barns)
พลูโตเนียม-239	239.05	15.80	$\sigma_a = 1011.3$	7.7 Isotropic scattering
			$\sigma_f = 742.5$	
ยูเรเนียม-235	235.04	18.90	$\sigma_a = 678.5$	17.6 Isotropic scattering
			$\sigma_f = 580.2$	
ยูเรเนียม-238	238.03	19.10	$\sigma_a = 2.7$	~10.0 Isotropic scattering
			$\sigma_f = 0.0$	

การคำนวณค่าวิกฤตจากแกนปฏิกรณ์จำลองที่กำหนดขึ้นหนึ่งส่วนประกอบย่อย กระทำได้โดยการคำนวณจากสมการ

$$k = \frac{v\Sigma_f}{\Sigma_a(1+B^2L^2)} \quad (4.1)$$

โดยที่  $B^2 = \left(\frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{c}\right)^2$  เมื่อ  $a$   $b$   $c$  คือ ด้านกว้าง ยาว และสูงของ

ส่วนประกอบที่กำหนดขึ้นในแบบจำลอง

และ  $L^2 = \frac{D}{\Sigma_a}$

เมื่อ  $L^2$  คือ พื้นที่การแพร่

การคำนวณค่าวิกฤตอีก 2 วิธี ใช้การประมาณเชิงตัวเลข คือ จากโปรแกรม MTAC และ โปรแกรม MCNP เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่าวิกฤต ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดของแกนปฏิกรณ์ที่เปลี่ยนไป และผลการคำนวณค่าวิกฤตโดยทั้ง 3 วิธี สำหรับพลูโตเนียม-239 แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณค่าวิกฤต  $k_{eff}$  ของแบบจำลองแกนปฏิกรณ์ที่กำหนดขึ้น โดยใช้พลูโตเนียม-239 เป็นเชื้อเพลิง

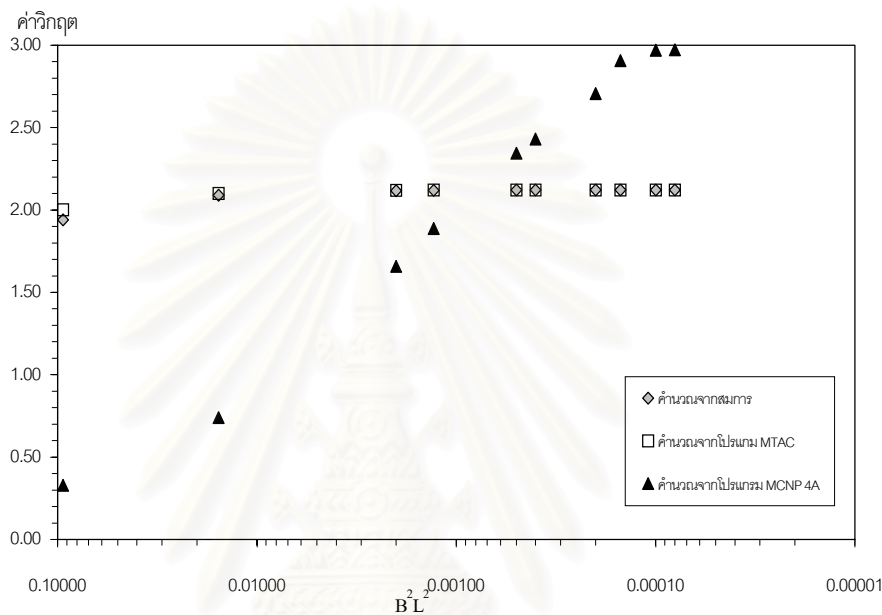
แบบที่	$B^2L^2$	ขนาด(ซม.) กว้างxยาวxสูง	คำนวณจาก สมการที่ 4.1	โปรแกรม MTAC	โปรแกรม MCNP
1	0.0938	2x2x5	1.9398	2.0005	0.3281
2	0.0156	5x5x10	2.0892	2.1014	0.7403
3	0.0020	15x15x20	2.1177	2.1201	1.6570
4	0.0013	15x20x35	2.1190	2.1207	1.8872
5	0.0005	30x30x40	2.1208	2.1212	2.3444
6	0.0004	30x30x80	2.1210	2.1215	2.4311
7	0.0002	50x50x90	2.1215	2.1217	2.7069
8	< 0.0002	100x100x200	2.1218	2.1218	2.9082
9	< 0.0001	250x250x300	2.1218	2.1218	2.9708
10	< 0.0001	ขนาดอนันต์	2.1218	2.1218	2.9727

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณค่าวิกฤต  $k_{eff}$  ของแบบจำลองแกนปฏิกรณ์ที่กำหนดขึ้น โดยใช้ยูเรเนียมธรรมชาติ เป็นเชื้อเพลิง

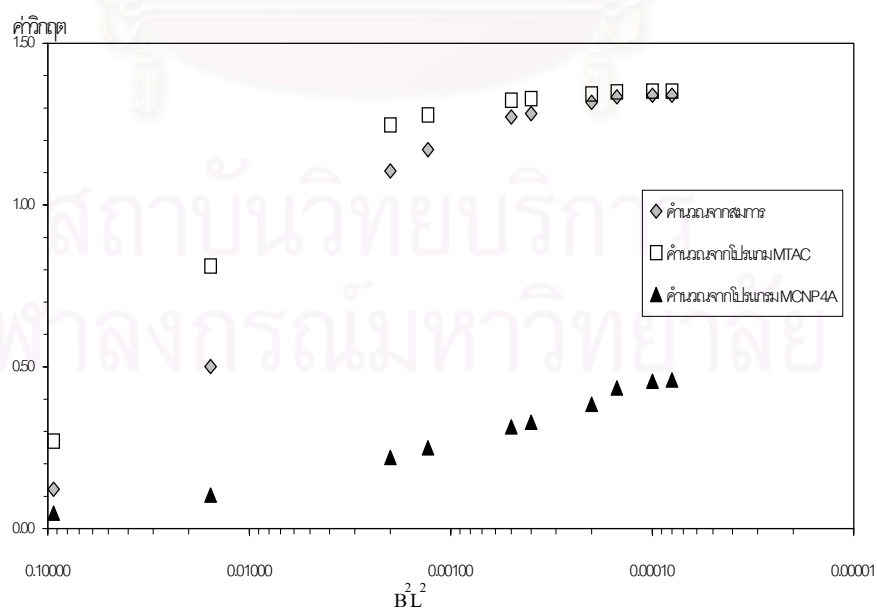
แบบที่	$B^2L^2$	ขนาด(ซม.) กว้างxยาวxสูง	คำนวณจาก สมการที่ 4.1	โปรแกรม MTAC	โปรแกรม MCNP
1	0.0938	2x2x5	0.1211	0.2705	0.0481
2	0.0156	5x5x10	0.5004	0.8115	0.1037
3	0.0020	15x15x20	1.1054	1.2473	0.2202
4	0.0013	15x20x35	1.1707	1.2789	0.2502
5	0.0005	30x30x40	1.2725	1.3246	0.3144
6	0.0004	30x30x80	1.2831	1.3291	0.3292
7	0.0002	50x50x90	1.3173	1.3383	0.3839
8	< 0.0002	100x100x200	1.3344	1.3467	0.4348
9	< 0.0001	250x250x300	1.3390	1.3521	0.4553
10	< 0.0001	ขนาดอนันต์	1.3398	1.3524	0.4589

ตารางที่ 4.3 คือ แบบจำลองที่กำหนดให้เชื่อเพลิงเป็นยูเรเนียมธรรมชาติ ประกอบด้วยยูเรเนียม-238 มีสัดส่วนเชิงปริมาตร 99.27% และยูเรเนียม-235 มีสัดส่วนเชิงปริมาตร 0.73% ผลการคำนวณค่าวิกฤต ดำเนินการเช่นเดียวกับกรณีของพลูโตเนียม-239

กราฟความสัมพันธ์ของค่าวิกฤตจากการคำนวณทั้ง 3 วิธี โดยรูปที่ 4.1 มีองค์ประกอบเป็นพลูโตเนียม-239 และรูปที่ 4.2 มีองค์ประกอบเป็น ยูเรเนียมธรรมชาติ



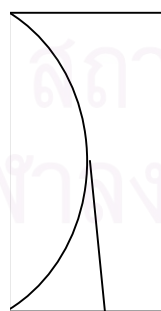
รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าวิกฤต  $k_{eff}$  ที่ได้จากการคำนวณทั้ง 3 วิธี สำหรับพลูโตเนียม-239



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าวิกฤต  $k_{eff}$  ที่ได้จากการคำนวณทั้ง 3 วิธี สำหรับยูเรเนียมธรรมชาติ

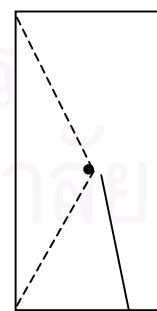
ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่า ค่าวิกฤตที่คำนวณได้จากสมการและจากโปรแกรม MTAC เปรียบเทียบกันได้โดยตลอด โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบที่มีขนาดใหญ่ ( $B^2L^2 \ll 1$ ) และเมื่อเปรียบเทียบผลกับโปรแกรม MCNP 4A ค่าที่คำนวณได้แตกต่างกันมาก แต่ยังคงให้แนวโน้มของผลลัพธ์สอดคล้องกัน เมื่อดูจากกราฟรูปที่ 4.1 และ 4.2 ค่าวิกฤตที่คำนวณได้เพิ่มขึ้นตามขนาดของส่วนประกอบที่เพิ่มขึ้น ขนาดของแบบจำลองซึ่งอยู่ในช่วงค่า  $B^2L^2 > 0.0013$  มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าวิกฤตมาก เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของแบบจำลองในช่วงที่  $B^2L^2 < 0.0013$  ค่าวิกฤตจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า ซึ่งตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงนี้ก็คือ ขนาดของแบบจำลองที่กำหนดขึ้นควรกำหนดให้มีขนาดใหญ่มากพอที่จะทำให้นิวตรอนที่เกิดจากกระบวนการแตกตัว เกิดการกระเจิงกับตัวกลางของระบบก่อนที่จะถูกดูดกลืนหรือรั่วไหลออกจากระบบ การกำหนดขนาดที่เล็กเกินไปมีผลทำให้นิวตรอนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่รั่วไหลออกจากระบบ ก่อนเกิดอันตรกิริยากับตัวกลาง กราฟทั้ง 2 แสดงให้เห็นว่าขนาดของแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับโปรแกรม MTAC อยู่ในช่วง  $B^2L^2 < 0.0013$  ซึ่งควรกำหนดให้มีขนาด  $30 \times 30 \times 80$  ซม.<sup>3</sup> เป็นอย่างน้อย

เมื่อพิจารณาผลการคำนวณที่ได้ในทางทฤษฎีและจากโปรแกรม MTAC ในตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 ค่าที่ได้แตกต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากโปรแกรม MTAC มีพื้นฐานมาจากการประมาณสมการการแพร่ ดังนั้นค่าที่ได้จากโปรแกรม MTAC จึงเป็นค่าประมาณของการคำนวณจากสมการ ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงให้เห็นได้โดยเลือกขนาดแบบจำลองที่เหมาะสมคือ  $50 \times 50 \times 90$  ซม.<sup>3</sup> ซึ่งมีค่า  $B^2L^2 \approx 0.0002$  และค่าวิกฤตที่คำนวณได้จากตารางที่ 4.3 โดยสมการในทางทฤษฎีมีค่าเท่ากับ 1.3173 และโปรแกรม MTAC มีค่าเท่ากับ 1.3383 และรูปที่ 4.3 คือ การเปรียบเทียบรูปแบบการกระจายของนิวตรอนฟลักซ์โดยโปรแกรม MTAC ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่จุดกึ่งกลางของส่วนประกอบ และในทางทฤษฎีจะเป็นค่าต่อเนื่อง



นิวตรอนฟลักซ์ต่อเนื่อง

ก. โดยสมการทางทฤษฎี

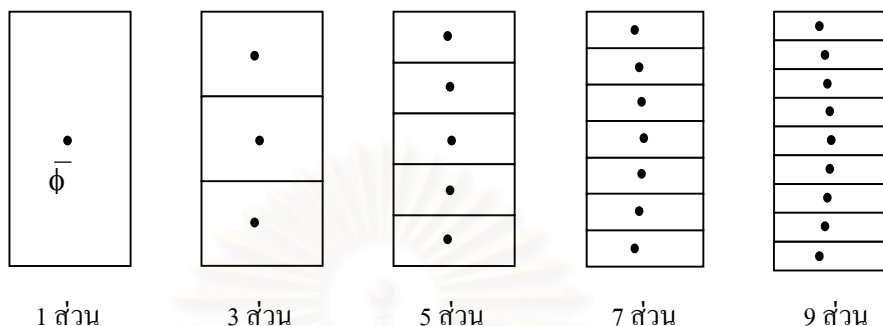


นิวตรอนฟลักซ์ประมาณเชิงตัวเลข

ข. โดยโปรแกรม MTAC

รูปที่ 4.3 มุมมองสำหรับการกระจายของนิวตรอนฟลักซ์ในส่วนประกอบ

โดยการแบ่งส่วนประกอบขนาด  $50 \times 50 \times 90$  ซม.<sup>3</sup> ในแนวแกน z ออกเป็นส่วนเท่า ๆ กัน ดังรูปที่ 4.4 และตารางผลการคำนวณค่าวิกฤตที่ 4.4 เห็นได้ว่าเมื่อแบ่งส่วนประกอบเพิ่มขึ้น ค่าที่ได้มีแนวโน้มจะเข้าสู่ค่าที่คำนวณได้จากสมการมากยิ่งขึ้น

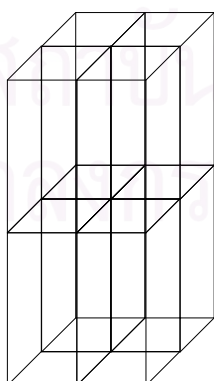


รูปที่ 4.4 การแบ่งส่วนประกอบในแนวแกนเดียว และลักษณะการกระจายของนิวตรอนฟลักซ์ที่ประมาณได้

ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณค่าวิกฤต  $k_{eff}$  โดยแบ่งส่วนประกอบขนาดเท่า ๆ กันในแนวแกนเดียว

จากสมการ	MTAC 1 ส่วน	MTAC 3 ส่วน	MTAC 5 ส่วน	MTAC 7 ส่วน	MTAC 9 ส่วน
1.3173	1.3383	1.3348	1.3324	1.3301	1.3292

กรณีการแบ่งส่วนประกอบออกในหลายแนวแกน ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งเกิดจากการแบ่งออกใน 3 แนวแกน และแต่ละส่วนมีขนาดเท่ากัน ผลที่คำนวณได้มีแนวโน้มจะเข้าสู่ค่าจากสมการมากกว่าในกรณีของการแบ่งในแนวแกนเดียว เมื่อเปรียบเทียบจากจำนวนส่วนประกอบที่ถูกแบ่งออกในจำนวนใกล้เคียงกันหรือเท่า ๆ กัน



แต่ละส่วนมีขนาด  $25 \times 25 \times 45$  ซม.<sup>3</sup>

ค่าวิกฤต  $k_{eff}$  ของแบบจำลอง

จากสมการ	1.3173
MTAC 1 ส่วน	1.3383
MTAC 9 ส่วนแนวแกนเดียว	1.3292
MTAC 8 ส่วนหลายแนวแกน	1.3281

รูปที่ 4.5 การแบ่งส่วนประกอบใน 3 แนวแกน ออกเป็น 8 ส่วนเท่า ๆ กัน

และเปรียบเทียบค่าวิกฤต  $k_{eff}$  ที่คำนวณได้

ถ้าจะกล่าวถึงนัยสำคัญของการเปลี่ยนแปลง จากการแบ่งส่วนประกอบออกเป็นส่วนย่อย ๆ เพื่อให้คำตอบเข้าสู่ค่าจากสมการ ในทางปฏิบัติการแบ่งย่อยดังกล่าว อาจไม่สามารถปรับปรุงค่าที่คำนวณได้มากอย่างที่ต้องการ เนื่องมาจากกระบวนการคำนวณที่เกิดขึ้นในโปรแกรม MTAC เป็นการประมาณค่าอยู่แล้ว การแบ่งส่วนประกอบเพิ่มขึ้นสำหรับส่วนประกอบย่อยหนึ่งๆ ในแบบจำลอง จะมีขั้นตอนและระยะเวลาที่ต้องใช้มากขึ้น ทั้งจากการสร้างเพิ่มข้อมูลป้อนเข้าและจากกระบวนการคำนวณโดยโปรแกรม

สำหรับกรณีของค่าวิกฤตที่ได้ระหว่างโปรแกรม MTAC และโปรแกรม MCNP 4A ยังให้ผลลัพธ์ที่ต่างกันมาก เป็นเพราะการเลือกใช้วัสดุในแบบจำลองสำหรับโปรแกรม MTAC ยังไม่เหมาะสม เนื่องจากทฤษฎีการแพร่ไม่เหมาะสมสำหรับการคำนวณในตัวกลางที่มีอัตราการดูดกลืนนิวตรอนสูง แต่จะมีความเหมาะสมมากกว่ากับตัวกลางที่มีอัตราการกระเจิงมากกว่าอัตราการดูดกลืนนิวตรอนมากๆ เมื่อพิจารณาค่าจากตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าค่าวิกฤตที่คำนวณจากโปรแกรม MTAC และจากโปรแกรม MCNP 4A จะให้ค่าที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก และโดยเฉพาะช่วงที่ขนาดของแกนปฏิกรณ์มีขนาดเล็กมาก ๆ

การดำเนินการและผลการคำนวณค่าวิกฤตสำหรับแบบจำลองที่ 4.1 อาจกล่าวโดยสรุปได้ว่า โปรแกรม MTAC มีความคล่องตัวมากสำหรับแบบจำลองที่มีการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบต่างๆ อยู่บ่อยครั้ง(ทั้งขนาดและส่วนประกอบทางวัสดุก็สามารถกระทำได้สะดวก) ผลที่คำนวณได้ด้วยวิธีการประมาณนี้สามารถเปรียบเทียบได้กับผลที่คำนวณจากสมการในทางทฤษฎี ถึงแม้ว่าการเปรียบเทียบผลที่ได้กับโปรแกรม MCNP 4A อาจยังให้ข้อสรุปไม่ดีพอ จากแบบจำลองนี้ทำให้ทราบถึงข้อจำกัดหลายประการที่เกิดขึ้นในการคำนวณค่าวิกฤตด้วยโปรแกรม MTAC กับโปรแกรม MCNP 4A ทั้งในเรื่องข้อจำกัดซึ่งเกิดจากการประยุกต์สมการการแพร่ของนิวตรอนระดับพลังงานเดียวภายในโปรแกรม เห็นได้จาก เมื่อตัวกลางของแบบจำลองประกอบด้วยวัสดุที่มีการดูดกลืนนิวตรอนสูง ข้อจำกัดจากขนาดแบบจำลอง เนื่องมาจากนิวตรอนที่เกิดขึ้น อาจรั่วไหลออกจากระบบก่อนเกิดอันตรกิริยากับตัวกลาง สำหรับแบบจำลองที่มีขนาดเล็กเกินไป(ค่า  $B^2L^2 > 0.0013$ ) ดังนั้นในการเลือกใช้วัสดุตัวกลางและการกำหนดขนาดที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลอง ถือเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการคำนวณโดยโปรแกรม MTAC



#### 4.2 แบบจำลองแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์หนึ่งส่วนประกอบย่อย สำหรับส่วนประกอบเชื้อเพลิงผสม

แบบจำลองแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ มุ่งเป้าประกอบทางวัสดุเป็นวัสดุผสมหนึ่งส่วนประกอบ แบบการคำนวณจะใช้การปรับเปลี่ยนสัดส่วนเชิงปริมาตรของวัสดุเชื้อเพลิงในส่วนประกอบ และการเลือกใช้วัสดุผสมที่ทำให้แบบจำลองมีองค์ประกอบทางวัสดุเหมาะสม กล่าวคือ ให้วัสดุตัวกลางมีอัตราการกระเจิงมากกว่าอัตราการดูดกลืนนิวตรอน แล้วคำนวณค่าวิกฤตด้วยวิธีทั้ง 3 เหมือนกับในแบบจำลองที่ 4.1 และเพื่อหลีกเลี่ยงข้อจำกัดของขนาดแบบจำลอง โดยเลือกใช้ขนาด 50x50x90 ซม<sup>3</sup> แล้ววิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าวิกฤตที่เกิดขึ้น ทั้งจากการปรับเปลี่ยนสัดส่วนเชิงปริมาตรของวัสดุเชื้อเพลิง และจากวัสดุผสมต่างชนิดกัน ข้อมูลต่างๆที่ใช้ในแบบจำลอง ดูจากตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณสำหรับเทอร์มอลนิวตรอน

วัสดุ	มวลอะตอม	ความหนาแน่น(g/cm <sup>3</sup> )	$\sigma_a$ (barns)	$\sigma_s$ (barns)
พลูโตเนียม	239.052	15.80	$\sigma_a = 1011.3$	7.70
			$\sigma_f = 742.5$	
ยูเรเนียม	235.04	18.90	$\sigma_a = 678.5$	17.60
			$\sigma_f = 580.2$	
นิกเกิล	58.71	8.90	4.43	17.30
คาร์บอน	12.011	1.60	0.0034	4.75
ซิลิคอน	28.086	2.33	0.16	2.20
แมงกานีส	54.938	7.43	13.30	2.10

4.2.1 แบบจำลองสำหรับวัสดุผสมระหว่างพลูโตเนียม-239 กับ คาร์บอน :

ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณค่าวิกฤต  $k_{eff}$  สำหรับพลูโตเนียมผสมกับคาร์บอน

แบบจำลอง	ปริมาตรพลูโตเนียม	จากสมการ	โปรแกรม MTAC	โปรแกรม MCNP
1	80.0%	2.2035	2.1215	2.4566
2	50.0%	2.1714	2.1210	2.4219
3	20.0%	2.1227	2.1178	2.1734
4	10.0%	2.1019	2.1107	1.5364
5	5.0%	1.9854	2.0937	1.1411
6	2.0%	1.8606	2.0396	0.5854
7	0.2%	1.2957	1.4528	0.4565
8	0.02%	0.3268	0.3741	0.3685

4.2.2 แบบจำลองสำหรับวัสดุผสมระหว่างพลาโตเนียม-239 กับ แมงกานีส :

ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณค่าวิกฤต  $k_{eff}$  สำหรับพลาโตเนียมผสมกับแมงกานีส

แบบจำลอง	ปริมาณพลาโตเนียม	จากสมการ	โปรแกรม MTAC	โปรแกรม MCNP
1	80.0%	2.1104	2.4964	2.0850
2	50.0%	2.0768	2.3040	2.0008
3	20.0%	1.9524	1.8593	1.7203
4	10.0%	1.7752	1.6968	1.5959
5	5.0%	1.5026	1.3444	1.3942
6	2.0%	1.0286	0.9720	1.0110
7	0.2%	0.1794	0.0667	0.0712
8	0.02%	0.0194	0.0068	0.0073

4.2.3 แบบจำลองสำหรับวัสดุผสมระหว่างยูเรเนียม-235 กับ ซิลิคอน :

ตารางที่ 4.8 ผลการคำนวณค่าวิกฤต  $k_{eff}$  สำหรับยูเรเนียมผสมกับซิลิคอน

แบบจำลอง	ปริมาณยูเรเนียม	จากสมการ	โปรแกรม MTAC	โปรแกรม MCNP
1	80.0%	2.0779	2.0494	1.9388
2	50.0%	2.0262	2.0453	1.6892
3	20.0%	1.9685	2.025	1.0869
4	10.0%	1.8488	1.9853	0.6686
5	5.0%	1.6212	1.9026	0.4975
6	2.0%	1.3607	1.681	0.2771
7	0.2%	0.5147	0.6038	0.1243
8	0.02%	0.0607	0.0814	0.0185

## 4.2.4 แบบจำลองสำหรับวัสดุผสมระหว่างยูเรเนียม-235 กับ นิกเกิล :

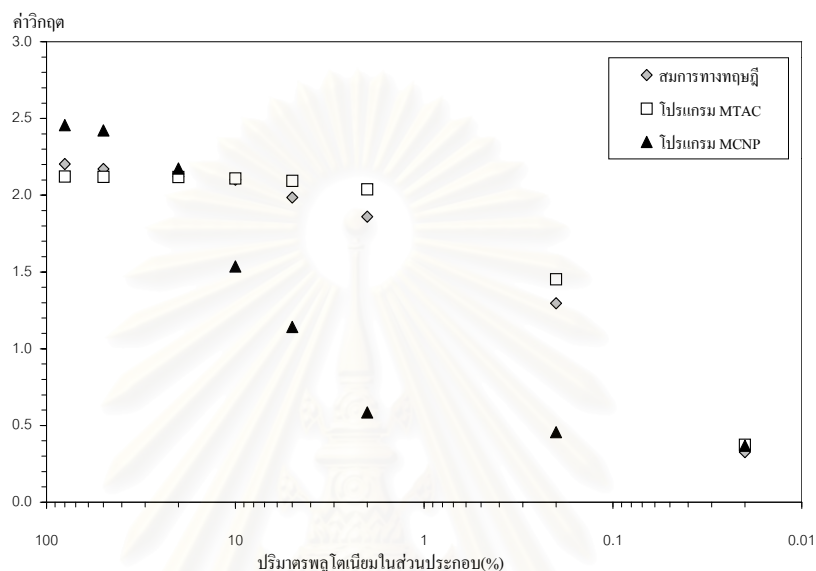
ตารางที่ 4.9 ผลการคำนวณค่าวิกฤต  $k_{eff}$  สำหรับยูเรเนียมผสมกับนิกเกิล

แบบจำลอง	ปริมาตรยูเรเนียม	จากสมการ	โปรแกรม MTAC	โปรแกรม MCNP
1	80.0%	2.0716	2.0850	2.4964
2	50.0%	2.0526	2.0760	2.4721
3	20.0%	1.9802	2.0008	2.3040
4	10.0%	1.8703	1.7203	1.8593
5	5.0%	1.2834	1.0110	0.9720
6	2.0%	0.7518	0.5541	0.5323
7	0.2%	0.1904	0.0712	0.0667
8	0.02%	0.0332	0.0073	0.0068

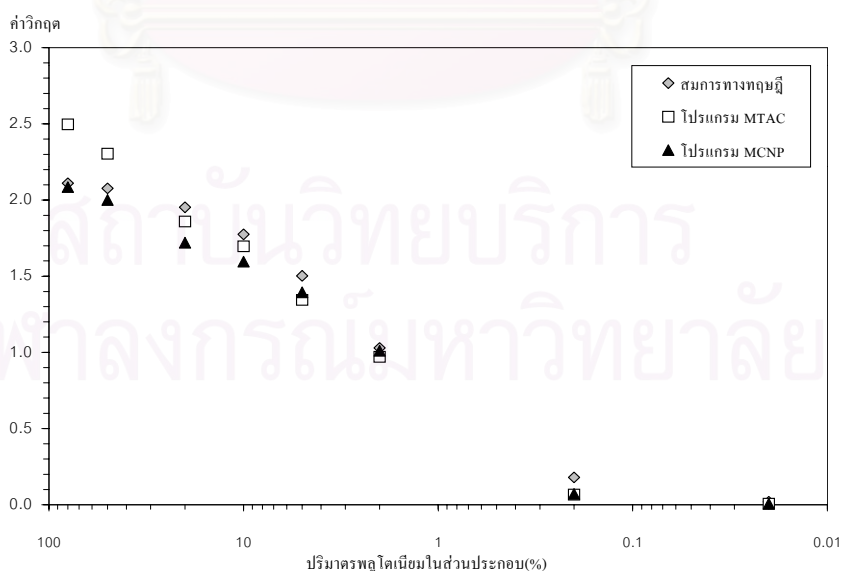
ผลการคำนวณจากตารางที่ 4.6 4.7 4.8 และ 4.9 แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากสมการและจากโปรแกรม MTAC ให้ผลสอดคล้องกันเป็นอย่างดี และยังให้ผลสอดคล้องกับโปรแกรม MCNP เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับในแบบจำลองที่ 4.1 ตัวกลางชนิดต่าง ๆ ข้างต้นมีอัตราการกระเจิงต่อการดูดกลืนนิวตรอนต่างกัน เมื่อพิจารณาจากกราฟรูปที่ 4.2 ถึง 4.5 ในช่วงที่สัดส่วนเชิงปริมาตรของวัสดุเชื้อเพลิงลดลงต่ำกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ ค่าวิกฤตที่คำนวณได้จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและจะมีค่าความคลาดเคลื่อนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากวัสดุเชื้อเพลิงถือเป็นส่วนความสำคัญในการคำนวณ ดังนั้นการปรับลดลงจนถึงอัตราดังกล่าวอาจอยู่ในช่วงเข้าใกล้สภาวะวิกฤต ซึ่งค่าที่คำนวณได้จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงรวดเร็วและในแต่ละวิธีการคำนวณช่วงที่เข้าสู่สภาวะดังกล่าวอาจแตกต่างกันเล็กน้อย แต่ในช่วงที่ค่าวิกฤตมีค่าต่ำมาก ๆ ค่าที่ได้มีความเชื่อถือได้ลดลง เนื่องจากองค์ประกอบเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาแตกตัวจำนวนลดลง ส่วนเบี่ยงเบนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ค่าวิกฤตที่ได้มีความน่าเชื่อถือลดลง อย่างไรก็ตามการเลือกองค์ประกอบทางวัสดุที่เหมาะสมทำให้แนวโน้มของผลที่ได้จากทั้ง 3 วิธี สอดคล้องกันมากขึ้น

เมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนที่แตกต่างกัน ในแต่ละแบบจำลอง จะสังเกตเห็นว่าเมื่ออัตราการดูดกลืนต่ออัตราการกระเจิงในวัสดุผสมต่างกัน 1 อันดับ จะมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นน้อยโดยเปรียบเทียบทั้ง 3 วิธี แต่ในกรณีเมื่อคาร์บอนเป็นส่วนผสม จากตารางที่ 4.6 และกราฟรูปที่ 4.3 มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นมาก เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณระหว่างโปรแกรม MTAC และ MCNP 4A ซึ่งคาร์บอนถือว่าเป็นตัวหน่วงนิวตรอนที่ตีมากชนิดหนึ่ง และมีค่าภาคตัดขวางการดูด

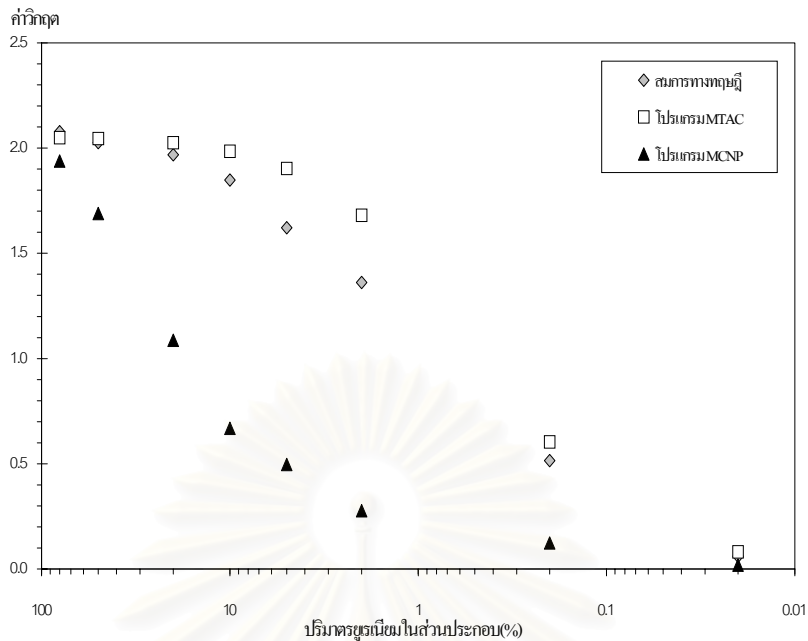
กลืนมากกว่าค่าภาคตัดขวางการกระเจิงอยู่ถึง 3 อันดับ ความคลาดเคลื่อนที่ต่างกันมากนี้อาจเป็นเพราะโปรแกรม MTAC ไม่สามารถพิจารณาผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนพลังงานของนิวตรอนจากการกระเจิง แต่สำหรับโปรแกรม MCNP จะมีส่วนการคำนวณที่ดูแลวัสดุที่เป็นตัวหน่วงนิวตรอนโดยเฉพาะ เช่น น้ำ และคาร์บอน ซึ่งอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ผลที่ได้แตกต่างกันมาก



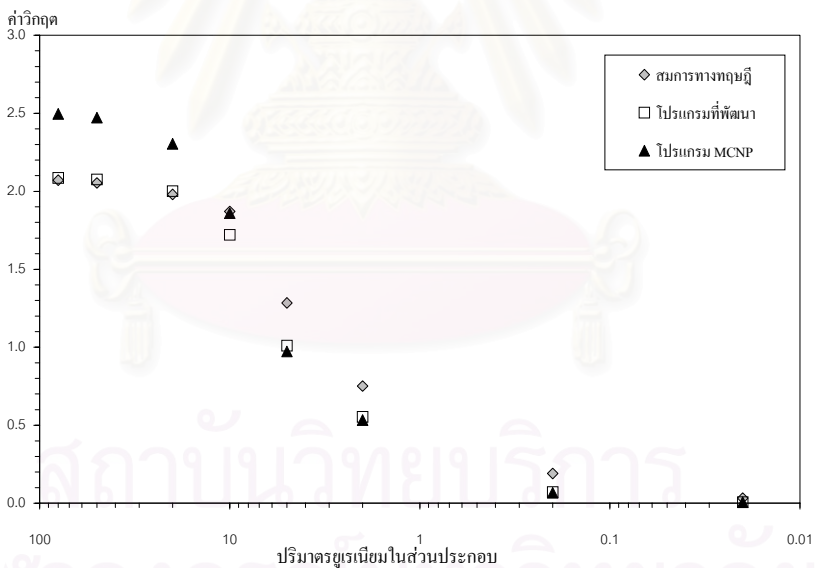
รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบค่าวิกฤต  $k_{eff}$  จากแกนปฏิกรณ์จำลองหนึ่งส่วนประกอบย่อย โดยเชื่อเพลิงเป็นวัสดุผสมระหว่างพลูโตเนียมกับคาร์บอน



รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบค่าวิกฤต  $k_{eff}$  จากแกนปฏิกรณ์จำลองหนึ่งส่วนประกอบย่อย โดยเชื่อเพลิงเป็นวัสดุผสมระหว่างพลูโตเนียมกับแมงกานีส



รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบค่าวิกฤต  $k_{eff}$  จากแกนปฏิกรณ์จำลองหนึ่งส่วนประกอบย่อย โดยเชื้อเพลิงเป็นวัสดุผสมระหว่างยูเรเนียมกับซีลิคอน



รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบค่าวิกฤต  $k_{eff}$  จากแกนปฏิกรณ์จำลองหนึ่งส่วนประกอบย่อย โดยเชื้อเพลิงเป็นวัสดุผสมระหว่างยูเรเนียมกับนิกเกิล

จากผลการคำนวณข้างต้นอาจกล่าวโดยสรุปได้ว่า แบบจำลองที่ 4.2 ได้เลือกวัสดุตัวกลาง และขนาดที่เหมาะสมมากขึ้น ทำให้ผลการคำนวณจากทั้ง 3 วิธี สอดคล้องกันเป็นอย่างดี ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับที่คงที่ เว้นแต่ช่วงที่สัดส่วนของวัสดุเชื้อเพลิงมีจำนวนลดลง

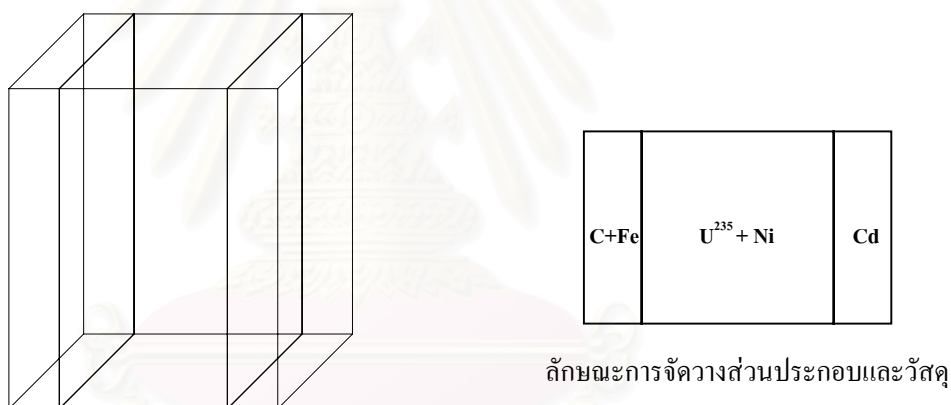
ต่ำกว่า 2-5% โดยอาจเป็นช่วงวิกฤตของระบบ ซึ่งการคำนวณแต่ละวิธีอาจเข้าสู่ช่วงดังกล่าวไม่ตรงกัน ประกอบกับในช่วงวิกฤตจะมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างสูง อาจเป็นสาเหตุทำให้มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นมากกว่าในช่วงอื่น วัสดุผสมที่เลือกใช้ส่วนใหญ่มีสัดส่วนระหว่างการดูดกลืนและการกระเจิงต่างกันประมาณ 1 อันดับ ยกเว้นในส่วนของคาร์บอนต่างกันประมาณ 3 อันดับ ที่อาจเป็นเหตุให้ผลที่ได้มีความแตกต่างกับวัสดุผสมชนิดอื่นค่อนข้างมาก

ผลการคำนวณจากแบบจำลองข้างต้น ทำให้พบข้อจำกัดอีกประการหนึ่งคือ ในการเลือกใช้วัสดุ เช่น ในกรณีของวัสดุที่เป็นตัวหน่วงนิวตรอน จากตารางที่ 4.6 และกราฟรูปที่ 4.3 ที่เลือกใช้คาร์บอนเป็นส่วนผสมซึ่งค่าที่คำนวณได้บางช่วงมีความแตกต่างกันมากระหว่างโปรแกรม MTAC และ โปรแกรม MCNP เมื่อศึกษาการใช้งานโปรแกรม MCNP พบว่าต้องเพิ่มคำสั่งพิเศษสำหรับวัสดุที่เป็นตัวหน่วงนิวตรอนเช่น น้ำ หรือ คาร์บอน เพื่อดูแลในการคำนวณส่วนดังกล่าว จากข้อจำกัดดังกล่าวอาจทำให้เกิดแนวทางในการพัฒนาโปรแกรม MTAC เพื่อเพิ่มกระบวนการคำนวณสำหรับวัสดุต่าง ๆ ที่มีคุณสมบัติทางนิวเคลียร์ในลักษณะต่าง ๆ กัน



#### 4.3 แบบจำลองแกนปฏิกรณ์หลายส่วนประกอบย่อย สำหรับการจัดวางในแนวแกนเดียวกัน

แบบจำลองแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ 3 ส่วนประกอบย่อย ประกอบด้วยส่วนของเชื้อเพลิงมีมืองค์ประกอบเป็นยูเรเนียม-235 ผสมกับนิกเกิล ส่วนที่ 2 มีองค์ประกอบเป็นแคดเมียม และส่วนที่ 3 มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนผสมกับเหล็ก ทั้งสามส่วนประกอบถูกจัดวางดังรูปที่ 4.10 โดยกำหนดให้แบบจำลองจากรูปที่ 4.10 เป็นแบบจำลองตั้งต้น และคำนวณค่าวิกฤตโดยโปรแกรม MTAC และโปรแกรม MCNP 4A โดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนเชิงปริมาตรของยูเรเนียมต่อนิกเกิล เพื่อให้แบบจำลองมีองค์ประกอบอยู่ในสภาวะวิกฤต แล้วเปรียบเทียบค่าที่ได้จากโปรแกรมทั้ง 2 และเพิ่มส่วนประกอบโดยให้อยู่ในแนวแกนเดียวกับทั้ง 3 ส่วนประกอบของแบบจำลองตั้งต้น และคำนวณค่าวิกฤตของระบบใหม่โดยกำหนดค่าเริ่มต้นของ  $k$  จากการคำนวณครั้งก่อนที่สภาวะวิกฤต ค่าคงที่ต่าง ๆ ของวัสดุที่เลือกใช้ดูจากตารางที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ภาพแบบจำลองแกนปฏิกรณ์ตั้งต้น ก่อนเพิ่มส่วนประกอบ โดยมี 3 ส่วนประกอบ และจัดวางในแนวแกนเดียวกัน

การจัดวางแบบจำลองตั้งต้นดังรูปที่ 4.10 แต่ละส่วนมีข้อมูลดังนี้ ส่วนที่หนึ่งประกอบด้วยเหล็กผสมกับคาร์บอนมีสัดส่วนเชิงปริมาตร 50 ต่อ 50 เปอร์เซ็นต์ ขนาด 20x100x200 ซม<sup>3</sup> ส่วนที่สองเป็นวัสดุเชื้อเพลิงประกอบด้วย ยูเรเนียม-235 ผสมกับนิกเกิล ขนาด 100x100x200 ซม<sup>3</sup> โดยจะปรับเปลี่ยนสัดส่วนของเชื้อเพลิงเพื่อให้แบบจำลองแกนปฏิกรณ์สามารถทำงานที่สภาวะวิกฤต และส่วนที่สามประกอบด้วยแคดเมียม ขนาด 20x100x200 ซม<sup>3</sup> แล้วคำนวณค่าวิกฤตจากสัดส่วนเชิงปริมาตรของเชื้อเพลิงที่เปลี่ยนไป ทั้งจากโปรแกรม MTAC และโปรแกรม MCNP พร้อมทั้งหาความคลาดเคลื่อนจากผลการคำนวณทั้ง 2 วิธี

ตารางที่ 4.10 ค่าคงที่ต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลองแกนปฏิกรณ์ เพื่อคำนวณค่าวิกฤต  $k_{eff}$  ในระบบ

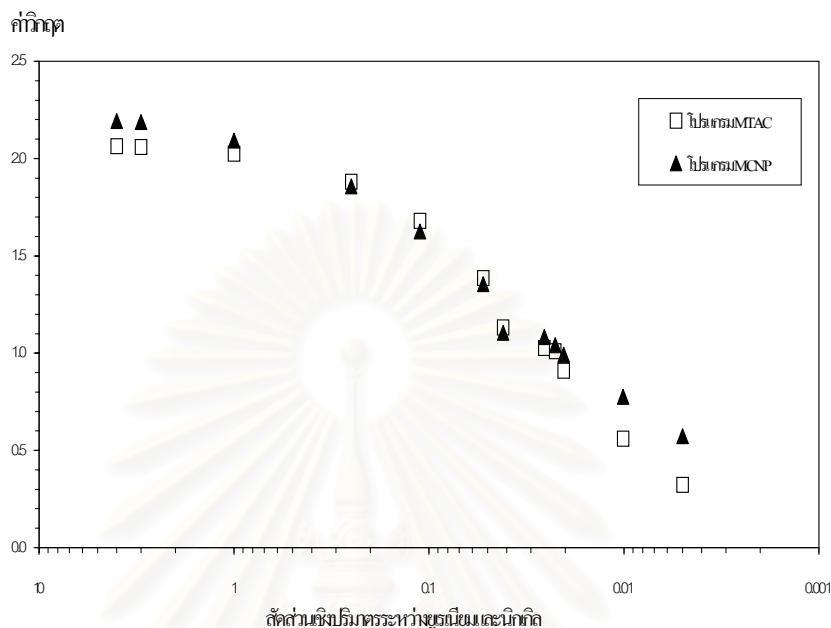
วัสดุ	มวลอะตอม(g)	ความหนาแน่น( $g/cm^3$ )	$\sigma_a$ (barns)	$\sigma_s$ (barns)
ยูเรเนียม	235.04	18.90	$\sigma_a = 687.5$ $\sigma_f = 5802$	17.60
นิกเกิล	58.710	8.90	4.43	17.30
เหล็ก	55.847	7.87	2.55	10.90
โซเดียม	22.989	0.97	0.53	3.20
คาร์บอน	12.011	1.60	0.0034	4.75
แคดเมียม	112.401	8.65	2450.0	5.60
แมงกานีส	54.938	7.43	13.30	2.10
อลูมิเนียม	26.982	2.69	0.23	1.49

ผลการคำนวณในตารางที่ 4.11 เห็นได้ว่า ค่าวิกฤตที่คำนวณจากโปรแกรมทั้ง 2 ให้ค่าที่สอดคล้องกันเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ 1 และความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นค่อนข้างสม่ำเสมอเกือบทุกช่วง เนื่องมาจากการเลือกองค์ประกอบทางวัสดุสำหรับส่วนประกอบมีความเหมาะสมมากขึ้น

ตารางที่ 4.11 ผลการคำนวณค่าวิกฤต  $k_{eff}$  ของแบบจำลอง เมื่อระบบประกอบไปด้วย 3 ส่วนประกอบ และมีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนเชิงปริมาตรยูเรเนียม-235 ในส่วนผสม

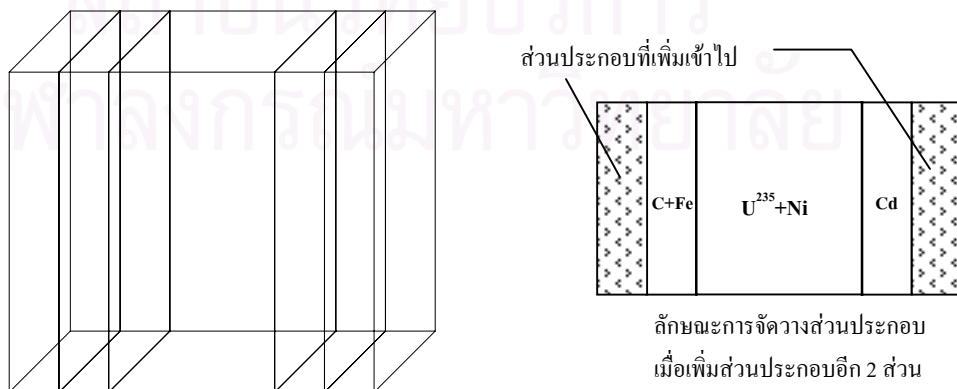
แบบที่	ยูเรเนียม / นิกเกิล (ปริมาตร)	โปรแกรม MTAC	โปรแกรม MCNP	ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์
1	4.0000	2.0643	2.1925	0.1282
2	3.0000	2.0598	2.1886	0.1288
3	1.0000	2.0247	2.0934	0.0687
4	0.2500	1.8804	1.8566	0.0238
5	0.1111	1.6808	1.6260	0.0548
6	0.0526	1.3864	1.3556	0.0308
7	0.0417	1.1327	1.1054	0.0241
8	0.0256	1.0267	1.0826	0.0559
9	0.0225	1.0103	1.0418	0.0312
10	0.0204	0.9088	0.9912	0.0824
11	0.0101	0.5609	0.7770	0.2161
12	0.0050	0.3228	0.5726	0.2498

จากรูปที่ 4.8 สามารถเห็นความสอดคล้องของค่าที่คำนวณได้มากยิ่งขึ้น โดยในช่วงที่สัดส่วนเชิงปริมาตรของยูเรเนียมมีจำนวนลดลงมาก ๆ ค่าความคลาดเคลื่อนกลับมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบค่าวิกฤต  $k_{eff}$  จากการคำนวณทั้ง 2 วิธี เมื่อแบบจำลองตั้งต้นประกอบด้วย 3 ส่วน วางในแนวแกนเดียวกัน

ขนาดของแบบจำลองที่เลือกใช้ มีขนาดใหญ่มากพอที่นิวตรอนพลังงานสูงที่เกิดขึ้นอาจเกิดอันตรกิริยาภายในตัวกลางทั้งหมด(กระเจิงและถูกดูดกลืน) โดยไม่สามารถรั่วไหลออกจากระบบได้ สำหรับการเพิ่มส่วนประกอบย่อยเข้าไปในแบบจำลองเดิมโดยเลือกใช้ขนาด 20x100x200 ซม<sup>3</sup> จากรูปที่ 4.12 และการเลือกใช้วัสดุต่างชนิดกันในตารางที่ 4.12 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าวิกฤตชุดใหม่ที่คำนวณได้กับค่าเดิม

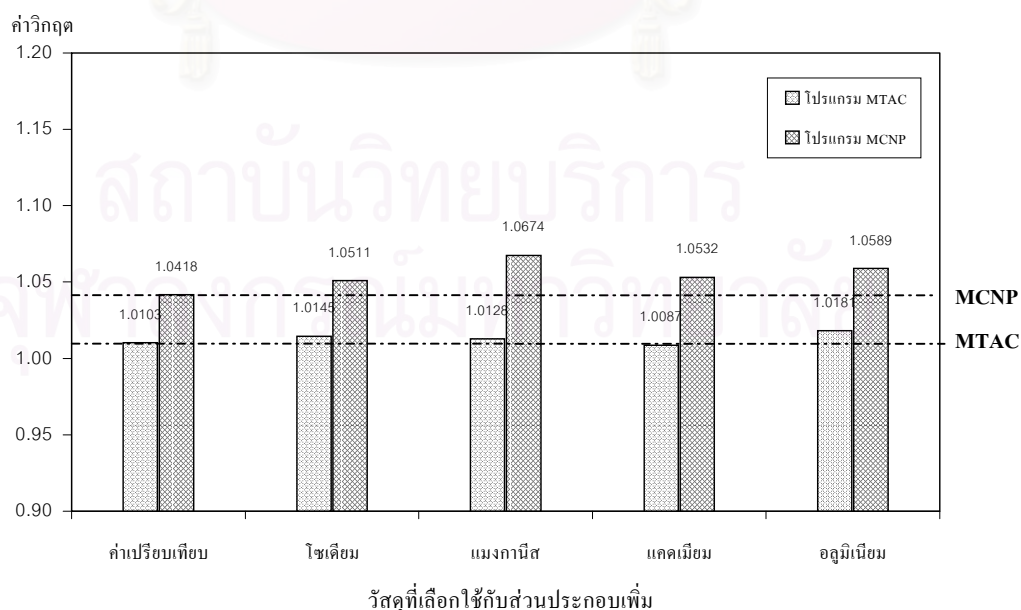


รูปที่ 4.12 ภาพแบบจำลองแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เมื่อเพิ่มส่วนประกอบอีก 2 ส่วนในแนวแกนเดียวกับแบบจำลองตั้งต้น

ตารางที่ 4.12 ผลการคำนวณค่าวิกฤต  $k_{eff}$  ที่ได้จากการเพิ่มส่วนประกอบย่อย จากแบบจำลองแกนปฏิกรณ์ตั้งต้น ที่ทำงานใกล้สภาวะวิกฤต (เมื่อสัดส่วนในส่วนประกอบเชื้อเพลิง คือ ยูเรเนียม/นิกเกิล = 0.0225 โดยปริมาตร)

ส่วนประกอบ เพิ่มเติม	โปรแกรม MTAC		โปรแกรม MCNP		ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ MTAC : MCNP
	ค่าวิกฤต	ผลต่าง	ค่าวิกฤต	ผลต่าง	
ค่าเปรียบเทียบ	1.0103	-	1.0418	-	0.0312
โซเดียม	1.0145	0.0042	1.0511	0.0093	0.0361
แมงกานีส	1.0128	0.0025	1.0674	0.0256	0.0539
แคดเมียม	1.0087	0.0016	1.0532	0.0114	0.0441
อลูมิเนียม	1.0181	0.0078	1.0589	0.0171	0.0401

ผลการคำนวณจากตารางที่ 4.12 เห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มส่วนประกอบย่อยที่มีองค์ประกอบทางวัสดุแตกต่างในแบบจำลองเดิม ค่าวิกฤตชุดใหม่ที่มีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งจากโปรแกรม MTAC และโปรแกรม MCNP แต่จากโปรแกรม MCNP จะมีความเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นมากกว่า ผลที่เกิดขึ้นอาจเป็นเพราะการกระเจิงกลับของนิวตรอนกับวัสดุตัวกลางของส่วนประกอบย่อยที่เพิ่มเข้าไป ซึ่งแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงมีความสอดคล้องกัน(กราฟรูป 4.13) ยกเว้นกรณีของส่วนประกอบที่มีองค์ประกอบเป็นแคดเมียม ค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรม MTAC กลับมีค่าลดลง อาจเป็นผลจากข้อจำกัดของโปรแกรม กรณีในตัวกลางที่มีอัตราการผลิตนิวตรอนสูงกว่าอัตราการกระเจิงมาก



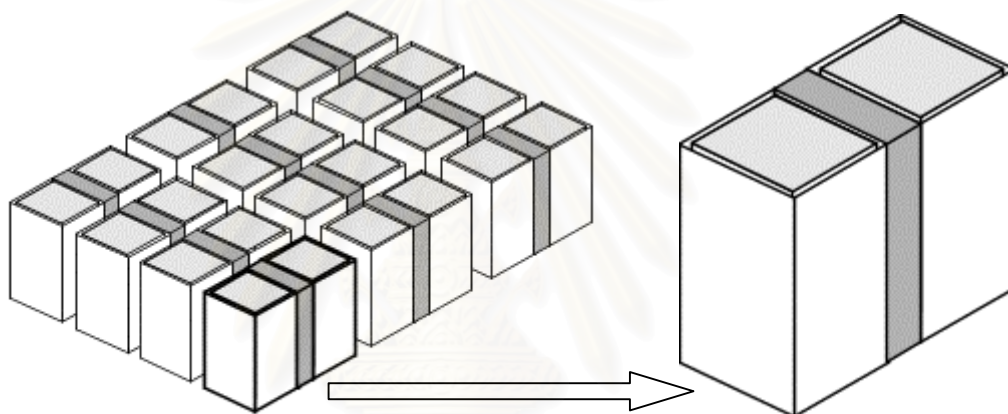
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าวิกฤต  $k_{eff}$  จากการคำนวณทั้ง 2 วิธี เมื่อเพิ่มส่วนประกอบในแบบจำลองที่ทำงานใกล้สภาวะวิกฤต

จากกราฟรูปที่ 4.13 ระดับวิกฤตที่เลือกใช้เป็นแบบตั้งต้นในการเพิ่มส่วนก่อนข้างแตกต่างกัน แต่จากผลการคำนวณที่ผ่านมามีการปรับแก้ค่าได้ว่า เมื่อไม่มีการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบเชื้อเพลิง แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงจากการเพิ่มส่วนประกอบใดๆ ที่ไม่เป็นส่วนประกอบเชื้อเพลิงแล้ว คำนวณค่าวิกฤตใหม่ น่าจะอยู่ในช่วงแคบๆ ซึ่งจากผลการคำนวณก็สอดคล้องด้วยดี ค่าที่คำนวณได้ทั้งจากโปรแกรม MTAC และโปรแกรม MCNP ก็มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงแคบ ๆ และยังคงอยู่ในระดับเดียวกับค่าวิกฤตเดิม

จากแบบจำลองที่ 4.3 ในช่วงต้น เมื่อมีส่วนประกอบย่อยมากขึ้น ผลการคำนวณยังคงให้แนวโน้มสอดคล้องกับโปรแกรม MCNP เป็นอย่างดี แม้ว่าในบางกรณีจะมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นมาก ซึ่งเป็นผลมาจากข้อจำกัดต่าง ๆ ของโปรแกรม MTAC อย่างที่เคยกล่าวไว้แล้ว แต่สำหรับแบบจำลองนี้ทำให้พบข้อจำกัดใหม่อีกประการหนึ่ง สำหรับวัสดุที่เลือกใช้ อย่างในกรณีวัสดุที่เป็นตัวหน่วงนิวตรอนจากข้อจำกัดดังกล่าว อาจเป็นแนวทางให้เกิดการพัฒนาความสามารถของโปรแกรมต่อไป สำหรับความคล่องตัวในการเพิ่มเติมส่วนประกอบย่อย รวมทั้งการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบต่าง ๆ สามารถกระทำได้ง่าย ถึงแม้ว่าความแม่นยำยังเป็นข้อด้อย แต่ความยืดหยุ่นในการจำลองระบบเมื่อเทียบกับผลการคำนวณโดยรวมแล้วน่าจะชดเชยข้อด้อยดังกล่าวได้ในระดับหนึ่ง

#### 4.4 แบบจำลองสำหรับระบบจัดเก็บกากเชื้อเพลิง

แบบจำลองของระบบจัดเก็บกากเชื้อเพลิงประกอบด้วย สารละลายพลูโตเนียมในเตรบรจ ในถังสแตนเลสสี่เหลี่ยมไม่มีฝาปิด ลักษณะการจัดวางดังรูปที่ 4.14 แบบการคำนวณนี้พิจารณาถึง บรจกากเชื้อเพลิง 2 ถัง ระหว่างถังทั้งสองกั้นด้วยแท่งโบรอนคาร์ไบด์ ถังมีขนาด  $60 \times 60 \times 85$  ซม.<sup>3</sup> และหนา 1.0 ซม. แท่งโบรอนคาร์ไบด์มีขนาด  $10 \times 60 \times 85$  ซม.<sup>3</sup> แบบจำลองมีความซับซ้อนในการกำหนดส่วนประกอบมากขึ้น เนื่องจากประกอบไปด้วยส่วนประกอบย่อย 42 ส่วน(รูปที่ 4.15 แสดง การกำหนดส่วนประกอบย่อยในแบบจำลอง ) และได้คำนวณด้วยโปรแกรม MTAC เพียงวิธีเดียว



ก. รูปอาร์เรย์ของถังเก็บกากเชื้อเพลิง

ข. ส่วนหนึ่งของอาร์เรย์ที่นำมาพิจารณา

รูปที่ 4.14 ระบบจัดเก็บกากเชื้อเพลิงจำลองถูกรบรจในถังทรงสี่เหลี่ยม

ส่วนประกอบย่อยภายในแบบจำลองที่กำหนดขึ้น ถูกแบ่งตามลักษณะองค์ประกอบทาง วัสดุ สามารถแบ่งได้ 3 กลุ่ม คือ

กลุ่มที่ 1 สารละลายพลูโตเนียมในเตรบรจประกอบด้วยไอโซโทปของพลูโตเนียม ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน มีความหนาแน่น  $1.74 \text{ g/cc}$  โดยสมมุติว่าสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน เศษส่วนเชิงน้ำหนักของธาตุต่างๆ ดูจากตารางที่ 4.13

กลุ่มที่ 2 คือ ถังสแตนเลส ประกอบด้วย เหล็ก โครเมียมและนิกเกิล มีความหนาแน่น  $7.93 \text{ g/cc}$  เศษส่วนเชิงน้ำหนักของธาตุต่างๆ ดูจากตารางที่ 4.14

กลุ่มที่ 3 คือ แท่งโบรอนคาร์ไบด์ ประกอบด้วยโบรอนและคาร์บอน มีความหนาแน่น  $2.51 \text{ g/cc}$  เศษส่วนเชิงน้ำหนักของธาตุ ดูจากตารางที่ 4.15



ตารางที่ 4.13 องค์ประกอบต่างๆ ในสารละลายพลูโตเนียมในเตรท

ความหนาแน่นเท่ากับ  $1.74 \text{ g/cc}$

ธาตุ	เศษส่วนเชิงน้ำหนัก	ความหนาแน่นเชิงอะตอม
พลูโตเนียม-239	0.063238	2.7682E-4
พลูโตเนียม-240	0.002802	1.2214E-5
พลูโตเนียม-241	0.000192	8.3390E-7
พลูโตเนียม-242	1.06e-05	4.5800E-8
ไฮโดรเจน	0.057862	6.0070E-2
ออกซิเจน	0.558679	3.6540E-2
ไนโตรเจน	0.317216	2.3699E-3

ตารางที่ 4.14 องค์ประกอบต่างๆ ของถังสแตนเลส สำหรับบรรจุสารละลาย

ความหนาแน่นเท่ากับ  $7.93 \text{ g/cc}$

ธาตุ	เศษส่วนเชิงน้ำหนัก	ความหนาแน่นเชิงอะตอม
เหล็ก	0.7402	6.3310E-2
โครเมียม	0.1799	1.6540E-2
นิกเกิล	0.0799	6.5100E-3

ตารางที่ 4.15 องค์ประกอบหลักในโบรอนคาร์ไบด์ ซึ่งเป็นวัสดุฉนวนนิวตรอน

ความหนาแน่นเท่ากับ  $2.51 \text{ g/cc}$

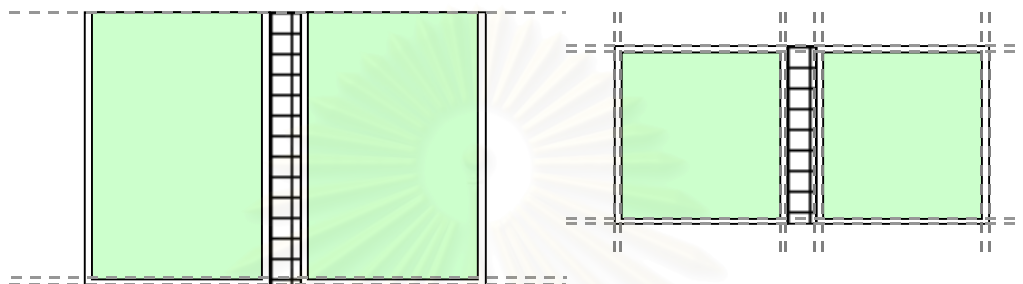
ธาตุ	เศษส่วนเชิงน้ำหนัก	ความหนาแน่นเชิงอะตอม
โบรอน	0.7826	0.10941
คาร์บอน	0.2174	0.02735

\*\*\* นำข้อมูลมาจาก Criticality Calculation with MCNP: A Primer. Los Alamos National Laboratory, August 1994. \*\*\*

(ความหนาแน่นเชิงอะตอมถูกกำหนดในหน่วย  $\text{atoms/b-cm}$ )

การกำหนดโครงสร้างสำหรับส่วนประกอบย่อยในแบบจำลอง เกิดจากการสร้างระนาบสมมุติจากแนวแกนทั้ง 3 ในระบบพิกัดฉาก เพื่อกำหนดขอบเขตสำหรับบริเวณที่มีองค์ประกอบทางวัสดุชนิดเดียวกัน จากรูปที่ 4.15 ก.แสดงภาคตัดขวางด้านข้างของแบบจำลอง โดยใช้ระนาบ 3 ระนาบตามแนวแกน z สำหรับการกำหนดขอบเขตของส่วนประกอบย่อย คือ ระนาบที่ปากถัง และสมมุติให้ระดับของสารละลายอยู่ที่ระนาบนี้พอดี และระนาบที่ก้นถัง 2 ระนาบ คือ การกำหนด

ขอบเขตระหว่างสารละลายพลูโตเนียมในเตรทกับสแตนเลสที่กั้นถึงด้านใน และอีกระนาบเป็นการกำหนดขอบเขตระหว่างกันถึงด้านนอกกับที่ว่าง แล้วกำหนดระนาบสมมุติในแนวแกน x และแนวแกน y โดยใช้หลักการเดียวกัน สำหรับในแบบจำลองนี้ แนวแกน x ใช้ระนาบ 8 ระนาบ และแนวแกน y ใช้ระนาบ 4 ระนาบ เพื่อกำหนดขอบเขตสำหรับบริเวณที่มีองค์ประกอบทางวัสดุชนิดเดียวกัน ดูจากรูปที่ 4.15 ข. สำหรับแนวแกน x และแนวแกน y



ก. การแบ่งส่วนประกอบในแนวแกน z ด้วยระนาบสมมุติที่ปากถัง 1 ระนาบ และกั้นถึง 2 ระนาบ เพื่อสร้างขอบเขตสำหรับบริเวณที่มีส่วนประกอบทางวัสดุเหมือนกัน

ข. การแบ่งส่วนประกอบในแนวแกน x และ y ด้วยระนาบสมมุติ ในแบบจำลองนี้ แนวแกน x ใช้ระนาบ 8 ระนาบ และแนวแกน y ใช้ระนาบ 4 ระนาบ

รูปที่ 4.15 ภาพแสดงการกำหนดส่วนประกอบในแบบจำลองรวม 42 ส่วน ซึ่งเกิดจากการตัดกันของระนาบสมมุติจากทั้ง 3 แนวแกนในระบบพิกัดฉาก

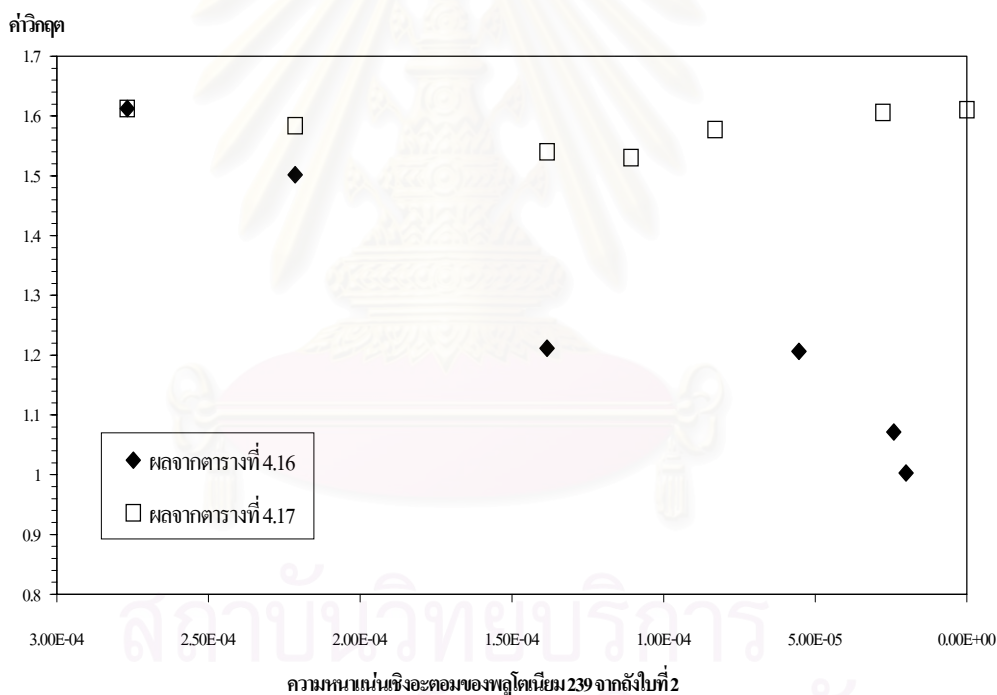
การตัดกันของระนาบสมมุติจากทั้ง 3 แนวแกน ทำให้เกิดส่วนประกอบย่อยทั้งหมด 42 ส่วนและจะต้องกำหนดตำแหน่งให้กับส่วนประกอบย่อยทุกส่วนประกอบ เพื่อใช้อ้างอิงสำหรับเขียนเพิ่มข้อมูลป้อนเข้า แบบการคำนวณและผลการคำนวณ ดูจากตารางที่ 4.16 และ 4.17

ตารางที่ 4.16 ผลการคำนวณค่าวิกฤต  $k_{eff}$  เมื่อความหนาแน่นเชิงอะตอมของพลูโตเนียม-239 จากถังทั้ง 2 ใบ มีการเปลี่ยนแปลง

ความหนาแน่นเชิงอะตอมสำหรับถังบรรจุใบที่ 1.	ความหนาแน่นเชิงอะตอมสำหรับถังบรรจุใบที่ 2.	ค่าวิกฤตทั้งระบบจากโปรแกรม MTAC
2.7682E-4	2.7682E-4	1.6126
2.2146E-4	2.2146E-4	1.5017
1.3841E-4	1.3841E-4	1.2114
5.5364E-5	5.5364E-5	1.2065
2.4107E-5	2.4107E-5	1.0712
2.0107E-5	2.0107E-5	1.0031

ตารางที่ 4.17 ผลการคำนวณค่าวิกฤต  $k_{eff}$  เมื่อความหนาแน่นเชิงอะตอมของพลูโตเนียม-239 จากถังใบที่ 2 มีการเปลี่ยนแปลง

ความหนาแน่นเชิงอะตอมสำหรับถังบรรจุใบที่ 1.	ความหนาแน่นเชิงอะตอมสำหรับถังบรรจุใบที่ 2.	ค่าวิกฤตทั้งระบบจากโปรแกรม MTAC
2.7682E-4	2.7682E-04	1.6126
2.7682E-4	2.2146E-04	1.5837
2.7682E-4	1.3841E-04	1.5404
2.7682E-4	1.1073E-04	1.5306
2.7682E-4	8.3046E-05	1.5772
2.7682E-4	2.7682E-05	1.6063
2.7682E-4	0	1.6104



รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงของค่าวิกฤต  $k_{eff}$  จากตารางผลการคำนวณเมื่อความหนาแน่นเชิงอะตอมของพลูโตเนียม-239 ในถังบรรจุ มีการเปลี่ยนแปลง

ผลการคำนวณจากตาราง 4.16 เมื่อกำหนดให้ความหนาแน่นของพลูโตเนียม-239 ภายในถังทั้ง 2 ใบมีค่าลดลงสอดคล้องกัน จากกราฟรูปที่ 4.16 จะสังเกตเห็นลักษณะการลดลงของค่าวิกฤตโดยอาจพิจารณาและแบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือ ตั้งแต่ช่วงความหนาแน่นของพลูโตเนียม-239 มากกว่า  $1.5 \times 10^{-4} \text{ atoms/b-cm}$  ช่วงความหนาแน่นระหว่าง  $5.5 \times 10^{-5}$  ถึง  $1.5 \times 10^{-4} \text{ atoms/b-cm}$  และช่วงความหนาแน่นน้อยกว่า  $5 \times 10^{-5} \text{ atoms/b-cm}$  ลักษณะการลดลงของค่าวิกฤตในช่วงความ

หนาแน่นของพลูโตเนียม-239 มากกว่า  $1.5 \times 10^{-4} \text{ atoms/b-cm}$  เกิดจากอัตราการรั่วไหลของนิวตรอนออกจากระบบ ทั้งนี้เพราะความหนาแน่นของพลูโตเนียม-239 ที่สูงกว่ามีผลให้ค่าฟลักซ์ที่ไหลออกจากระบบมีค่าสูงขึ้น ในทางกลับกัน การลดลงของค่าวิกฤตในช่วงที่น้อยกว่า  $5 \times 10^{-5} \text{ atoms/b-cm}$  เกิดจากการดูดกลืนนิวตรอนโดยตัวดูดกลืน ทั้งนี้เพราะเมื่อความหนาแน่นของพลูโตเนียม-239 ลดลง การสูญเสียนิวตรอนเนื่องจากการดูดกลืนย่อมมีความสำคัญสูงขึ้น สำหรับในช่วง  $5.5 \times 10^{-5}$  ถึง  $1.5 \times 10^{-4} \text{ atoms/b-cm}$  นั้น เป็นช่วงที่แสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่ลดลงจากการรั่วไหลของนิวตรอน ในขณะที่ผลจากการดูดกลืนเริ่มมีค่าสูงขึ้น

สำหรับผลจากตารางที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่า เมื่อสารละลายพลูโตเนียมในเตรทจากถังใบที่ 2 มีความหนาแน่นเชิงอะตอมของพลูโตเนียม-239 ลดลง ค่าวิกฤตที่คำนวณได้จะมีค่าลดลง จนเมื่อความหนาแน่นเชิงอะตอมลดลงถึงค่าหนึ่ง (สัดส่วนเชิงปริมาตรประมาณ 0.3 เท่าของถังใบที่ 1) ทำให้ค่าวิกฤตกลับมีค่าเพิ่มขึ้น จะพิจารณาได้ว่าขณะที่ถังทั้ง 2 ใบมีความหนาแน่นเชิงอะตอมของพลูโตเนียม-239 สูง ค่านิวตรอนฟลักซ์อันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวย่อมมีค่าสูง เป็นผลให้การรั่วไหลออกจากระบบมีมาก ประกอบกับค่านิวตรอนฟลักซ์จะมีค่าสูงสุดใกล้กับตำแหน่งของตัวดูดกลืนที่วางแทรกกระหว่างถัง ทำให้มีอัตราการดูดกลืนจากตัวดูดกลืนดังกล่าวมีค่าสูง ในทางกลับกันเมื่อค่าความหนาแน่นของพลูโตเนียม-239 ในถังหนึ่งลดลงถึงระดับหนึ่ง ถึงดังกล่าวเปลี่ยนเป็นเสมือนตัวสะท้อนนิวตรอน เป็นผลให้มีอัตราการรั่วไหลของนิวตรอนออกจากระบบลดลง พร้อมกันนั้นก็ลดขนาดของนิวตรอนฟลักซ์ใกล้ตัวดูดกลืน เป็นผลให้อัตราการดูดกลืนลดลง การพิจารณาดังกล่าวเป็นไปได้ว่า ค่าวิกฤตที่คำนวณได้กลับมีค่าสูงขึ้นเมื่อความหนาแน่นของพลูโตเนียม-239 ในถังใบที่ 2 ลดลง ค่าดังกล่าวไม่ได้เป็นผลมาจากอัตราการเกิดของนิวตรอนที่เพิ่มขึ้น แต่อาจเป็นผลมาจากอัตราการสูญเสียของนิวตรอนที่ลดลงนั่นเอง

แบบจำลองนี้ แสดงให้เห็นถึงการประยุกต์โปรแกรม MTAC เพื่อใช้ในการคำนวณค่าวิกฤตไม่เฉพาะกับแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์เท่านั้น แต่ยังรวมถึงระบบใด ๆ ที่ประกอบไปด้วยตัวกลางที่อาจเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์กับนิวตรอนเกิดการแตกตัวได้ แบบจำลองที่ 4.4 ถือได้ว่าเป็นการประยุกต์ใช้โปรแกรมในอีกลักษณะหนึ่ง เนื่องจากระบบที่กำหนดขึ้นมีส่วนประกอบที่ต้องพิจารณาเป็นจำนวนมาก ทั้งองค์ประกอบทางวัสดุอยู่ในรูปของสารละลายและการเลือกใช้วัสดุหลายชนิด รวมถึงการกำหนดตำแหน่ง การอ้างอิงตำแหน่งให้กับแต่ละส่วนประกอบย่อย ตลอดจนการเตรียมค่าคงที่ต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้ ทำให้การสร้างแฟ้มข้อมูลป้อนเข้าค่อนข้างซับซ้อน ประกอบกับการคำนวณเป็นแบบประมาณค่า ทำให้ค่าที่คำนวณได้เป็นเพียงภาพโดยรวมของระบบ

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปและวิจารณ์ผลดำเนินการวิจัย

ผลการคำนวณจากแบบจำลองที่กำหนดขึ้นในบทที่ 4 แสดงให้เห็นว่า ค่าวิกฤตที่คำนวณจากสมการทางทฤษฎีให้ผลเทียบเคียงได้กับค่าได้จากโปรแกรม MTAC และกับโปรแกรม MCNP สำหรับแบบจำลองที่มีองค์ประกอบทางวัสดุสำหรับชุดคลื่นนิวตรอนและกระเจิงนิวตรอนในระดับต่าง ๆ อย่างไรก็ตามในแบบจำลองที่มีองค์ประกอบของการดูดกลืนนิวตรอนสูง ดังในตารางผลการคำนวณที่ 4.2 และ 4.3 ผลจากโปรแกรม MTAC เมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรม MCNP แสดงให้เห็นความแตกต่างที่ค่อนข้างชัดเจนของค่าที่คำนวณได้ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากข้อจำกัดหลาย ๆ ประการ เช่น จากสมการการแพร่ที่ประยุกต์ใช้ ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานของโปรแกรม MTAC และการประมาณค่าโดยวิธีผลต่างสืบเนื่อง ข้อจำกัดของวัสดุที่เลือกใช้สำหรับแบบจำลองจึงเป็นสิ่งที่ควรระมัดระวังอย่างยิ่ง และควรเลือกใช้ให้เหมาะสม ทั้งนี้เนื่องจากทฤษฎีการแพร่ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้คำนวณในตัวกลางที่มีอัตราการดูดกลืนนิวตรอนสูง แต่มีความเหมาะสมมากกว่ากับตัวกลางที่มีอัตราการกระเจิงมากกว่าอัตราการดูดกลืนนิวตรอนมากๆ และยังรวมถึงขนาดของแบบจำลองที่มีขนาดเหมาะสม สำหรับนิวตรอนพลังงานสูงที่เกิดขึ้นจะเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางภายในแบบจำลอง โดยการกระเจิงแล้วถูกดูดกลืนหรือหนีออกจากระบบ ซึ่งการกำหนดขนาดของแบบจำลองที่เล็กเกินไป อาจมีผลทำให้นิวตรอนที่เกิดขึ้นหนีออกจากระบบก่อนที่จะเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางของระบบ โดยดูจากแบบจำลองที่ 4.1 และ 4.2 จะเห็นว่าค่าวิกฤตที่คำนวณ จากโปรแกรม MTAC และโปรแกรม MCNP จะให้ค่าที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก และโดยเฉพาะช่วงที่ขนาดของแกนปฏิกรณ์มีขนาดเล็กมาก ๆ และส่วนประกอบทางวัสดุที่มีผลต่อค่าวิกฤตที่คำนวณได้ ในแบบจำลองที่ 4.3 และแบบจำลองที่ 4.4 ถือได้ว่าเป็นหลักการของเทคนิคโมดูลาร์ที่ประยุกต์ใช้ในโปรแกรม MTAC เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่แสดงให้เห็นถึงกระบวนการเพิ่มและลดส่วนประกอบตลอดจนการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบทางวัสดุ เพื่อคำนวณค่าวิกฤตใหม่ ก็สามารถกระทำได้สะดวก และผลที่ได้ให้แนวโน้มที่สอดคล้องกับการคำนวณด้วยโปรแกรม MCNP สำหรับแบบจำลองที่ 4.4 แสดงให้เห็นระบบจำลองที่ต่างออกไป เนื่องจากการคำนวณค่าวิกฤตที่ไม่ใช่แบบจำลองแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ แต่เป็นระบบหนึ่ง ๆ ที่มีตัวกลางซึ่งอาจเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบแตกตัว ซึ่งโปรแกรม MTAC ก็สามารถประยุกต์ใช้ได้



จากกระบวนการดำเนินการต่างๆและผลที่ได้รับจากแบบจำลองในบทที่ 4 อาจกล่าวโดยสรุปได้ว่า โปรแกรม MTAC มีความคล่องตัวอย่างมากสำหรับการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้การคำนวณ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบต่างๆอยู่บ่อยครั้งก็สามารถทำได้สะดวก แบบจำลองต่างๆที่กำหนดขึ้นทำให้ทราบถึงข้อจำกัดหลายประการจากการคำนวณค่าวิกฤตด้วย โปรแกรม MTAC ทั้งในเรื่องข้อจำกัดซึ่งเกิดจากการประยุกต์สมการการแพร่ของนิวตรอนภายในโปรแกรม ข้อจำกัดของขนาดแกนปฏิกรณ์จำลองที่กำหนดขึ้น การเลือกวัสดุตัวกลางให้เหมาะสมสำหรับแบบจำลองและพื้นฐานมาจากพฤติกรรมการณ์เคลื่อนที่ของนิวตรอนผ่านตัวกลางใดๆ ตลอดจนข้อจำกัดของซึ่งกระบวนการที่ใช้ในการออกแบบโปรแกรม

แบบจำลองต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้ว แสดงให้เห็นถึง การประยุกต์โปรแกรม MTAC เพื่อใช้ในการคำนวณค่าวิกฤตไม่เพียงเฉพาะกับแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์เท่านั้น แต่ยังรวมถึงระบบใด ๆ ที่ประกอบไปด้วยตัวกลางที่อาจเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบแตกตัวได้ ซึ่งค่าที่ได้ก็ยังคงเป็นไปตามหลักการคำนวณของโปรแกรมที่มีพื้นฐานมาจากสมการการแพร่ของนิวตรอน อย่างไรก็ตามเนื่องจากการคำนวณเป็นแบบประมาณค่า ค่าที่คำนวณได้จึงแสดงลักษณะโดยรวมของระบบเท่านั้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

โปรแกรม MTAC ถือได้ว่าเป็นการพัฒนาโปรแกรมขั้นพื้นฐาน เพื่อใช้ในการคำนวณค่าวิกฤตของแบบจำลองแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ หรือระบบใด ๆ ที่ประกอบไปด้วยตัวกลางซึ่งอาจเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์กับนิวตรอน และสมการที่ถูกประยุกต์ในโปรแกรม อันได้แก่ สมการการแพร่ของนิวตรอนที่ระดับพลังงานเดียวและการประมาณด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่อง ยังคงให้ผลการคำนวณค่าวิกฤตโดยรวมเท่านั้น ประกอบกับกระบวนการส่วนใหญ่เป็นการคำนวณเชิงตัวเลข ทำให้ผลการคำนวณที่ได้ยังอยู่ในระดับของการประมาณอย่างคร่าวๆ ซึ่งทำให้ระดับของความน่าเชื่อถือของค่าวิกฤตที่คำนวณได้ อยู่ในระดับเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น

ลักษณะการออกแบบโปรแกรมโดยเทคนิคโมดูลาร์ยังถือว่าเป็นหลักการที่เป็นไปได้สำหรับการพัฒนาต่อไปในอนาคต เนื่องจากยังคงความเหมาะสมในระบบที่มีการปรับเปลี่ยนหรือแก้ไของค์ประกอบต่างๆในระบบบ่อยครั้ง ทั้งทางเรขาคณิตหรือทางวัสดุ ระบบพิกัดฉากที่ใช้โปรแกรมก็ยังเป็นข้อจำกัดอยู่บ้างสำหรับการจำลองรูปทรงที่มีลักษณะโค้ง เช่น ทรงกระบอก แต่ก็สามารถกระทำได้ สำหรับการทำความเข้าใจในการใช้งานยังถือว่าเป็นจุดด้อยของโปรแกรมอยู่ เนื่องจาก



ความยากลำบากในการสร้างเพิ่มข้อมูลป้อนเข้าสำหรับแบบจำลองที่จำเป็นต้องทราบและกำหนดค่าคงที่ต่างๆขึ้นเองทำให้อาจเกิดความผิดพลาดได้ และโครงสร้างของโปรแกรมเองก็ยังไม่มีส่วนการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้น

ดังนั้นข้อเสนอแนะและแนวทางต่างๆที่ควรพัฒนาเพิ่มเติม อันได้แก่ สมการการแพร่ของนิวตรอนสำหรับนิวตรอนหลายกลุ่มพลังงาน การเพิ่มขึ้นตอนการวิเคราะห์ห้วงสุดท้ายที่เลือกใช้ ตลอดจนการพัฒนาวิธีการประมาณให้เหมาะสมยิ่งขึ้น การประยุกต์วิธีคำนวณเชิงตัวเลขที่มีขีดความสามารถมากขึ้น และควรประยุกต์วิธีการทางสถิติเข้าไปด้วย เพื่อเพิ่มขีดความสามารถและความน่าเชื่อถือของผลที่ได้ ในส่วนของโปรแกรม MTAC เพื่อความสะดวกในการกำหนดค่าคงที่ต่างๆจากตัวกลางที่เลือกใช้เป็นองค์ประกอบในแบบจำลอง โดยการสร้างระบบฐานข้อมูลที่เก็บค่าที่จำเป็นต่างๆ เพื่อใช้ในการอ้างอิง และระบบการตรวจสอบความผิดพลาดต่างๆที่อาจเกิดขึ้น ทั้งจากกระบวนการคำนวณหรือจากการสร้างแบบจำลอง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

1. George, I. Bell, and Samuel, Glasstone. Nuclear Reactor Theory. 3<sup>rd</sup> edition. Florida: Robert E. Krieger Publishing Company, 1985.
2. James J. Duderstadt and Louis J. Hamilton. Nuclear Reactor Analysis. 2<sup>nd</sup> edition. New York: John Wiley & Sons, 1974.
3. John, R. Lamarsh. Introduction to Nuclear Engineering. 2<sup>nd</sup> edition. New York: Addison-Wesley Publishing Company, 1975.
4. Paul, F. Zweifel. Reactor Physics. 2<sup>nd</sup> edition. New York: McGraw-Hill, 1974.
5. William, H. Press, Brain, P. Flannery, Saul, A. Teukolsky, and William, T. Vetterling. Numerical Recipes. 2<sup>nd</sup> edition. New York: Cambridge University Press, 1994.
6. Boas, M. L. Mathematical Methods in the Physical Science. 2<sup>nd</sup> edition. New York: Wiley & Sons, 1983.
7. Briesmeister, Judith F. MCNP A General Monte Carlo N-Particle Transport Code version 4A Manual. Oak Ridge: Radiation Shielding Information Center, 1993.
8. Harmon, Charless D., II, and others. Criticality Calculation with MCNP: A Primer. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, August 1994.
9. John C. Wagner, James E. Sisolak, Gregg W. McKinney. MCNP: Criticality Safety Benchmark Problems. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, December 1993.
10. Todd, J. Urbatsch, R., Arthur Forster, Richard, E. Preal, and Richard, J. Beckman. Estimation and Interpretation of  $k_{eff}$  Confidence Intervals in MCNP. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, November 1995.
11. Whalen, D. J., Cardcm, D. A., Uhle, J. L., and Hendricks, John S. MCNP: Neutron Benchmark Problems. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, November 1991.

## บรรณานุกรม

### ภาษาไทย

ทรงศักดิ์ องค์กรวัฒนกุล. การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลเพื่อหาความแรงรังสีของสารรังสีติดตาม  
สำหรับฉีดเข้าไปในระบบของเหลว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชานิวเคลียร์  
เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

### ภาษาอังกฤษ

B., L. Willis, and C., V. M. Van Der Mee. Journal Math. Phys. 27(6), June 1986. :  
American Institute of Physics, 1986.

Booth, Thomas E. A Sample Problem for Variance Reduction in MCNP. Los Alamos:  
Los Alamos National Laboratory, 1985.

G., K. Robinson. J. Austral. Math. Soc. Ser B 30(1988), 1-23. : Australian Mathematical  
Society, 1988.

F., Rahnama, and G., C. Pomraning. Journal Math. Phys. 24(3), March 1983. : American  
Institute of Physics, 1983.

Stephanie C. Frankle. Criticality Benchmark Results Using Various MCNP Data Libraries.  
Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 1999.

Stephanie C. Frankle. Benchmarking the Monte Carlo Simulation Code MCNP. Los Alamos:  
Los Alamos National Laboratory, 1999.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### ความหมายของสัญลักษณ์

- $d$  *Extrapolation distance* หมายถึง ระยะขยายออกจากขอบเขตของระบบที่พิจารณา ซึ่งนิวตรอนฟลักซ์อาจกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์
- $k$  *Multiplication factor* หมายถึง องค์ประกอบตัวคูณ
- $B^2$  บัคคิง(*Buckling*) ใช้หาขนาดและส่วนผสมของแกนปฏิกรณ์เมื่ออยู่ในสภาวะวิกฤต
- $B_g^2$  คือ บัคคิงซึ่งขึ้นกับลักษณะทางเรขาคณิตของแกนปฏิกรณ์
- $B_m^2$  คือ บัคคิงซึ่งขึ้นกับส่วนผสมของเชื้อเพลิงภายในแกนปฏิกรณ์
- $B_g^2 = B_m^2$  หมายถึง แกนปฏิกรณ์ ทำงานในสภาวะวิกฤต
- $D$  *Diffusion coefficients* คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ เป็นค่าคงที่สำหรับตัวกลางที่มีการแพร่ หน่วยเป็นระยะทาง
- $F$  *Production operator* (Fission) คือ ตัวดำเนินการสำหรับการเกิดขึ้นของนิวตรอนในระบบ
- $\bar{J}$  *Neutron current* คือ กระแสนิวตรอน มีหน่วยเป็นจำนวนนิวตรอนต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา
- $L$  ความยาวการแพร่ คือ ระยะทางที่นิวตรอนแพร่ไปในตัวกลาง
- $L^2$  พื้นที่การแพร่ คือ พื้นที่ที่นิวตรอนแพร่ไปในตัวกลาง
- $M$  *Destruction operator* (Leakage plus absorption) คือ ตัวดำเนินการสำหรับการสูญหายของนิวตรอนจากระบบ
- $S$  ต้นกำเนิดอนุภาคนิวตรอน
- $\bar{S}$  ค่าเฉลี่ยภาคตัดขวาง ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{\phi_{\Delta V}} \int (\frac{1}{k} v \Sigma_f - \Sigma_a) \phi dV$
- $V_i$  ปริมาตรของส่วนประกอบย่อย  $i$  ในแบบจำลองที่กำหนดขึ้น
- $\phi$  นิวตรอนฟลักซ์ มีหน่วยเป็นจำนวนนิวตรอนต่อพื้นที่หนึ่งตารางหน่วยต่อหนึ่งหน่วยเวลา

### ความหมายของสัญลักษณ์(ต่อ)

- σ *Microscopic cross-section* คือ ภาคตัดขวางจุลภาค เป็นปริมาณที่แสดงให้เห็นถึงความน่าจะเป็นเมื่ออนุภาคตกกระทบนิวเคลียสของธาตุแล้วเกิดปฏิกิริยา มีหน่วยเป็นพื้นที่ ซึ่งขึ้นกับพลังงานของอนุภาคที่ตกกระทบ ชนิดของธาตุที่อนุภาคเข้าชน และชนิดของปฏิกิริยา
- σ<sub>t</sub> ภาคตัดขวางจุลภาคสำหรับปฏิกิริยาทั้งหมด โดย  $\sigma_t = \sigma_a + \sigma_s$
- σ<sub>a</sub> ภาคตัดขวางจุลภาคสำหรับการดูดกลืน
- σ<sub>f</sub> ภาคตัดขวางจุลภาคสำหรับการแบ่งแยกตัว
- σ<sub>s</sub> ภาคตัดขวางจุลภาคสำหรับการกระเจิง
- Σ ภาคตัดขวางมหัพภาคสำหรับปฏิกิริยา มีหน่วยเป็น ซม.<sup>-1</sup> โดย  $\Sigma = N\sigma$
- Σ<sub>T</sub> ภาคตัดขวางมหัพภาคสำหรับปฏิกิริยาทั้งหมด
- Σ<sub>a</sub> ภาคตัดขวางมหัพภาคสำหรับการดูดกลืน
- Σ<sub>f</sub> ภาคตัดขวางมหัพภาคสำหรับการแบ่งแยกตัว
- Σ<sub>s</sub> ภาคตัดขวางมหัพภาคสำหรับการกระเจิง
- Σ<sub>tr</sub> ภาคตัดขวางมหัพภาคสำหรับการนำส่ง
- v จำนวนนิวตรอนพลังงานสูงที่ส่งออกมา จากนิวตรอนที่พลังงานความร้อนหนึ่งตัวที่ถูกจับ แล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาแบ่งแยกตัว



## ความหมายของคำ

ระบบวิกฤต	ระบบซึ่งมีอัตราการเกิดขึ้นของนิวตรอนภายในระบบเท่ากับอัตราการสูญหายของนิวตรอนออกจากระบบ กล่าวคือมีค่า $k$ เท่ากับ 1
การอนุรักษ์นิวตรอน	<i>Neutron conservation</i> คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงที่ทำให้เกิดสภาวะความสมดุลนิวตรอนในระบบที่พิจารณา ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดขึ้นและหายไปของนิวตรอน
ฟาสนิวตรอน	<i>Fast neutron</i> คือ นิวตรอนที่มีพลังงานสูงกว่า 1 MeV
เทอร์มอลนิวตรอน	<i>Thermal neutron</i> คือ นิวตรอนที่มีพลังงาน 0.0253 eV ที่อุณหภูมิ 20 °C
กฎของฟิค	กฎที่ใช้ประยุกต์กับการแพร่ของนิวตรอนในตัวกลาง โดยกล่าวว่า นิวตรอนจะไหลจากบริเวณที่มีความหนาแน่นของฟลักซ์สูงกว่า ไปสู่บริเวณที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า
กระแสนิวตรอน	จำนวนนิวตรอนที่วิ่งในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ผ่านพื้นที่ 1 ตารางหน่วย ใน 1 หน่วยเวลา มีหน่วยเป็น นิวตรอน/หน่วยพื้นที่/หน่วยเวลา
นิวตรอนฟลักซ์	คือ ปริมาณของนิวตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ 1 ตารางหน่วยจากทุกทิศทางใน 1 หน่วยเวลา
ทางเดินเฉลี่ย	เป็นระยะทางเดินเฉลี่ยที่นิวตรอนเคลื่อนที่ไปก่อนที่จะเข้าชน เพื่อเกิดปฏิกิริยากับนิวเคลียส ใช้สัญลักษณ์ $\lambda$ ( <i>Mean Free Path</i> )
องค์ประกอบตัวคูณ	ตัวเลขบ่งชี้ ที่แสดงให้เห็นว่า เครื่องปฏิกรณ์ทำงานในระบบวิกฤตหรือไม่ ซึ่งใช้สัญลักษณ์ $k$ ( <i>Multiplication factor</i> )
สมการการนำส่ง	ศึกษาพฤติกรรมของอนุภาคเฉพาะตัว เมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางสำหรับการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับตัวกลาง ภายใต้เงื่อนไขขอบเขต
สมการการแพร่	ศึกษาพฤติกรรมของอนุภาคอย่างเป็นกลุ่ม ในลักษณะการแพร่อย่างก้ำข เมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสม
เทคนิคโมดูลาร์	วิธีพิจารณาระบบออกเป็นส่วนประกอบย่อยๆ ทำให้การปรับเปลี่ยนระบบที่มีอยู่เดิมสะดวกมากขึ้น ทั้งการเพิ่มและลดส่วนประกอบย่อย
วิธีมอนติคาร์โล	กระบวนการคำนวณเชิงตัวเลข ซึ่งมีพื้นฐานบนทฤษฎีทางสถิติ(ความน่าจะเป็น) โดยการสร้างเหตุการณ์สุ่มสำหรับอนุภาคนิวตรอนแต่ละตัว และทำการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของเหตุการณ์ที่พิจารณา

## สมการที่อ้างอิงในวิทยานิพนธ์

กฎของฟิสิก  $\vec{J} = -D\vec{\nabla}\phi$

สมการการนำส่งนิวตรอน  $\vec{\nabla} \cdot \vec{J}(\vec{r}) + \Sigma_a(\vec{r})\phi(\vec{r}) = S(\vec{r})$

ทางเดินอิสระเฉลี่ยการนำส่ง  $\lambda_{tr} = \frac{1}{\Sigma_{tr}} = \frac{1}{\Sigma_s(1-\bar{\mu})}$

เมื่อ  $\Sigma_{tr}$  คือ ค่าภาคตัดขวางมหัพภาคของการนำส่ง

และ  $\bar{\mu}$  คือ ค่าเฉลี่ย cosine ของมุมกระเจิงนิวตรอน

สมการการแพร่นิวตรอน  $-\vec{\nabla} \cdot D\vec{\nabla}\phi + \Sigma_a\phi = S$

สมการการคำนวณค่าวิกฤต  $-\vec{\nabla} \cdot D\vec{\nabla}\phi + \Sigma_a\phi(\vec{r}) = \frac{1}{k}v\Sigma_f\phi(\vec{r})$

ค่าวิกฤตจากทฤษฎีการแพร่นิวตรอน  $k = (v\Sigma_f/\Sigma_a)/(1 + L^2B^2)$

ทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์  $\int_V \vec{\nabla} \cdot \vec{F} dV = \int_A \vec{F} \cdot \hat{n} dA$

การคำนวณค่าวิกฤตเชิงตัวเลข  $M\phi = \frac{1}{k}F\phi$

เมื่อ  $M \equiv -\vec{\nabla} \cdot D(r)\vec{\nabla} + \Sigma_a(r)$  คือ ตัวดำเนินการ สำหรับการสูญเสียนิวตรอน  
ไปจากระบบ

เมื่อ  $F \equiv v\Sigma_f(r)$  คือ ตัวดำเนินการ สำหรับการเกิดของนิวตรอนในระบบ

อนุกรมของเทย์เลอร์  $f(x) = f(a) + (x-a)f'(a) + \frac{(x-a)^2}{2!}f''(a) + \dots +$

สมการการประมาณค่าวิกฤต สำหรับส่วนประกอบ  $O$  ที่พิจารณา

$$\left[ \Sigma_a V_o - \sum_{i=1}^6 (X_i - X'_i) \right] \bar{\phi}_o + \sum_{i=1}^6 X_i \bar{\phi}_i = \frac{1}{k_o} v_o \Sigma_{fo} V_o \bar{\phi}_o$$

## ตารางค่าคงตัวที่สำคัญ

สำหรับวัสดุที่เกี่ยวข้องในงานวิศวกรรมนิวเคลียร์

สารประกอบ	มวลโมเลกุล	ความหนาแน่น ( $g/cm^3$ )	$\sigma_a$	$\sigma_s$
<b>H<sub>2</sub>O</b>	18.016	1.000	0.660	103.0
<b>D<sub>2</sub>O</b>	20.030	1.100	0.001	13.6
<b>BeO</b>	25.021	3.025	0.010	6.8
<b>Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	348.70	7.430	11,200	22.6
<b>Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	352.00	7.420	8,600	30.2
<b>Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	372.92	7.81	2,200	214
<b>UO<sub>2</sub></b>	270.70	10.00	7.7	16.7

### Thermal Neutron Cross-Sections of Fuel Atoms (in Barns)

*Taken from Atomic Energy Review (IAEA), 1969, Vol 7, No 4, p.3*

	$\sigma_f$	$\sigma_{n,f}$	$\sigma_a$	$\sigma_s$	$\nu$	$\sigma_f/\sigma_a$ (%)
<b>U-233</b>	530.6	47.0	577.6	10.7	2.487	92
<b>U-235</b>	580.2	98.3	678.5	17.6	2.430	86
<b>U-238</b>	0	2.71	2.71	~10	0	
<b>Nat. U</b>	4.18	3.40	7.58	~10	2.430	55
<b>Pu-239</b>	741.6	271.3	1012.9	8.5	2.890	73
<b>Pu-241</b>	1007.3	368.1	1375.4	12.0	2.931	73

## ภาคผนวก ข

## การคำนวณความหนาแน่นเชิงอะตอม

1. วัสดุเดี่ยวเนื้อเดียว (*Homogeneous Single type Material*) รู้ค่าความหนาแน่นเชิงมวล

ตัวอย่าง เช่น การคำนวณความหนาแน่นเชิงอะตอมของยูเรเนียม-238 ที่มีความหนาแน่นเชิงมวลเท่ากับ  $19.1 \text{ g/cm}^3$

สมการพื้นฐานสำหรับความหนาแน่นเชิงอะตอม คือ  $n = \frac{\rho N_a}{A}$

โดยที่

$n$	=	ความหนาแน่นเชิงอะตอม ( $atoms/cm^3$ )
$\rho$	=	ความหนาแน่นเชิงของวัสดุ ( $g/cm^3$ )
$N_a$	=	Avogadro's number = $0.6022 \times 10^{24}$
$A$	=	น้ำหนักอะตอมของไอโซโทป ( $g/mole$ )

สำหรับตัวอย่างนี้ คือ

$$\rho = 19.1 \frac{g}{cm^3} \quad N_a = 0.6022 \times 10^{24} \frac{atoms}{mole} \quad A = 238.05 \frac{grams}{mole}$$

$$n = 4.832 \times 10^{22} \frac{atoms}{cm^3}$$

ความหนาแน่นเชิงอะตอมของยูเรเนียม-238 ในตัวอย่าง คือ  $4.832 \times 10^{22} \text{ atoms/cm}^3$  หน่วยที่ใช้ี้มีความเหมาะสมสำหรับคอมพิวเตอร์โค้ดบางแบบเท่านั้น แต่ในแบบอื่นๆ ต้องการหน่วยที่ใช้เป็น  $atoms/b-cm$  เพราะว่า ค่าภาคตัดขวางโดยทั่วไปมีหน่วยเป็นบาร์น เราสามารถเปลี่ยนหน่วยผลลัพธ์ให้เหมาะสมกว่า โดยค่าความหนาแน่นของยูเรเนียม-238 คือ  $4.832 \times 10^{22} \text{ atoms/b-cm}$  เมื่อ 1 บาร์น มีค่าเท่ากับ  $10^{-24} \text{ cm}^2$  ใดๆก็ตาม ในขั้นตอนการคำนวณนั้น หน่วย Avogadro's number ก็ควรเขียนให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมเช่นกัน คือ  $0.6022 \text{ atoms-cm}^2 / mole-barn$

## 2. วัสดุผสมสองชนิดเนื้อเดียว(Homogeneous Binary Mixture Materials)

### 2.1 รู้ค่าเศษส่วนเชิงน้ำหนักและความหนาแน่นของผสม

เมื่อวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุผสม ซึ่งรู้ค่าความหนาแน่นและเศษส่วนเชิงน้ำหนัก สมการความหนาแน่นเชิงอะตอม คือ

$$N_i = \frac{\rho_{mix} \times wf_i \times N_a}{A_i}$$

โดยที่	$N_i$	=	ความหนาแน่นเชิงอะตอมของวัสดุ $i$
	$\rho_{mix}$	=	ความหนาแน่นเชิงมวลของวัสดุผสม
	$wf_i$	=	เศษส่วนเชิงน้ำหนักของวัสดุ $i$
	$A_i$	=	น้ำหนักเชิงอะตอมของวัสดุ $i$

ตัวอย่าง คือ การคำนวณความหนาแน่นเชิงอะตอมของ  $U^{235}$  และ  $U^{238}$  เมื่อความหนาแน่นของยูเรเนียม คือ  $18.9 \text{ g/cm}^3$

$$N_{U^{235}} := \frac{(18.9 \text{ g/cm}^3) \cdot (0.03) \cdot 0.6022 \frac{\text{atoms-cm}^3}{\text{mole-b}}}{235.04 \text{ g/mole}} \quad N_{U^{238}} := \frac{(18.9 \text{ g/cm}^3) \cdot (0.97) \cdot 0.6022 \frac{\text{atoms-cm}^3}{\text{mole-b}}}{238.05 \text{ g/mole}}$$

$$N_{U^{235}} = 0.0014527 \cdot \frac{\text{atoms}}{\text{b} \cdot \text{cm}} \quad N_{U^{238}} = 0.0463774 \cdot \frac{\text{atoms}}{\text{b} \cdot \text{cm}}$$

เศษส่วนเชิงอะตอม คือ

$$\text{Atom fraction } U - 235 = \frac{(1.45 \times 10^{-3})}{(1.45 \times 10^{-3}) + (4.64 \times 10^{-2})} = 0.0303$$

$$\text{Atom fraction } U - 238 = \frac{(4.64 \times 10^{-2})}{(1.45 \times 10^{-3}) + (4.64 \times 10^{-2})} = 0.09697$$

น้ำหนักเชิงอะตอมของไอโซโทปทั้งสอง เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์จะมีความแตกต่างกันน้อยมาก ระหว่างเศษส่วนเชิงน้ำหนัก (weight fractions) และเศษส่วนเชิงอะตอม (atomic fractions) อย่างไรก็ตามความแตกต่างทั้งสองที่เกิดขึ้น ยังมีความจำเป็นสำหรับวัสดุอีกหลาย ๆ ชนิด

## 2.2 รู้ค่าเศษส่วนเชิงน้ำหนักและความหนาแน่นวัสดุแต่ละชนิด

เมื่อรู้ค่าเศษส่วนเชิงน้ำหนักและความหนาแน่นของวัสดุแต่ละชนิด ความหนาแน่นของวัสดุผสมนั้นหาได้จาก

$$\frac{1}{\rho_{mix}} = \frac{wf_1}{\rho_1} + \frac{wf_2}{\rho_2} + \dots + \frac{wf_i}{\rho_i}$$

สมมติว่าความหนาแน่นของ  $U^{235}$  คือ  $18.6 \text{ g/cm}^3$  และ  $U^{238}$  คือ  $18.9 \text{ g/cm}^3$  แล้ว

$$\frac{1}{\rho_{mix}} = \frac{0.03}{18.6} + \frac{0.97}{18.9} \quad \rho_{mix} = 18.89 \cdot \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

หลังจากได้ความหนาแน่นของวัสดุผสมแล้ว ความหนาแน่นเชิงอะตอมสามารถคำนวณโดยใช้สมการในหัวข้อ 2.1 นั่นคือ

$$N_i = \frac{\rho_{mix} \times wf_i \times N_a}{A_i}$$

## 2.3 รู้ค่าเศษส่วนเชิงอะตอมและความหนาแน่นเชิงอะตอมของวัสดุผสม

แม้ว่ารูปแบบเศษส่วนเชิงน้ำหนักจะเป็นรูปแบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่รูปแบบอย่างอื่น เช่น เศษส่วนเชิงอะตอม ก็เป็นอีกรูปแบบหนึ่งที่ถูกตีพิมพ์ในคู่มือทั้งทางเคมีและฟิสิกส์สำคัญๆ หลายฉบับ เมื่อจำเป็นต้องใช้ค่าเศษส่วนเชิงอะตอมและน้ำหนักเชิงอะตอมเฉลี่ย (*average atomic weight*) ซึ่งสามารถทำได้โดย

$$\bar{A} = af_1 \times A_1 + af_2 \times A_2 + \dots + af_i \times A_i$$

น้ำหนักเชิงอะตอมเฉลี่ยถูกใช้ในการคำนวณ ความหนาแน่นเชิงอะตอมของวัสดุผสม

$$N_{mix} = \frac{\rho_{mix} \times N_a}{\bar{A}}$$



ความหนาแน่นเชิงอะตอม ของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบแต่ละชนิดคำนวณโดย

$$N_i = af_i \times N_{mix}$$

ตัวอย่าง คือ โบรอนในธรรมชาติมีความหนาแน่น  $2.34 \text{ g/cm}^3$  เศษส่วนเชิงอะตอมเป็น 0.199 สำหรับ โบรอน-10 และ 0.801 สำหรับ โบรอน-11

$$\bar{A} = 0.199 \times 10.01 + 0.801 \times 11.01 = 10.81 \text{ g} \frac{B_{nat}}{\text{mole}}$$

$$\begin{aligned} N_{mix} = N_{B_{nat}} &= \frac{(2.34 \text{ g} B_{nat} / \text{cm}^3) \times (0.6022 \text{ atoms} - \text{cm}^2 / \text{mole} - b)}{10.81 \text{ g} B_{nat} / \text{mole}} \\ &= 1.304 \times 10^{-1} \frac{\text{atoms}_{B_{nat}}}{b - cm} \end{aligned}$$

ผลข้างต้น สามารถคำนวณความหนาแน่นเชิงอะตอมของโบรอน-10 จากโบรอนธรรมชาติ

$$\begin{aligned} N_{B-10} &= 0.199 \frac{\text{atom}_{B-10}}{\text{atom}_{B_{nat}}} \times 1.304 \times 10^{-1} \frac{\text{atom}_{B_{nat}}}{b - cm} \\ &= 2.59 \times 10^{-2} \frac{\text{atom}_{B-10}}{b - cm} \end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกัน สำหรับโบรอน-11

$$\begin{aligned} N_{B-11} &= 0.801 \frac{\text{atom}_{B-11}}{\text{atom}_{B_{nat}}} \times 1.304 \times 10^{-1} \frac{\text{atom}_{B_{nat}}}{b - cm} \\ &= 1.045 \times 10^{-1} \frac{\text{atom}_{B-11}}{b - cm} \end{aligned}$$

นั่นคือ

$$N_{B10} + N_{B11} = N_{B_{nat}}$$

### 3. การคำนวณเศษส่วนเชิงน้ำหนัก เศษส่วนเชิงอะตอม และน้ำหนักเชิงอะตอมเฉลี่ย

ถ้าเราทราบค่า เศษส่วนเชิงน้ำหนัก (*weight fractions*) แล้วสมการที่ใช้ในการคำนวณน้ำหนักเชิงอะตอมเฉลี่ย (*average atomic weight*)

$$\bar{A} = \left[ \frac{wf_1}{A_1} + \frac{wf_2}{A_2} + \dots + \frac{wf_i}{A_i} \right]^{-1}$$

นอกจากนั้น เราสามารถคำนวณเศษส่วนเชิงอะตอม จากเศษส่วนเชิงน้ำหนักและน้ำหนักเชิงอะตอมเฉลี่ย ด้วย

$$af_i = wf_i \times \frac{\bar{A}}{A_i}$$

หรือ ถ้าเราทราบเศษส่วนเชิงอะตอม สามารถคำนวณเศษส่วนเชิงน้ำหนักได้โดย

$$wf_i = af_i \times \frac{A_i}{\bar{A}}$$

ตัวอย่าง คือ การคำนวณเศษส่วนเชิงน้ำหนักของโบรอนธรรมชาติ

$$wf_{B-10} = 0.199 \times \frac{10.01}{10.81} = 0.184$$

$$wf_{B-11} = 0.801 \times \frac{11.01}{10.81} = 0.816$$

### 4. โมเลกุล(Molecules) รู้โครงสร้างทางเคมีและความหนาแน่นเชิงมวล

การหาความหนาแน่นเชิงอะตอมสำหรับองค์ประกอบของโมเลกุล เมื่อเราทราบเศษส่วนเชิงอะตอม การคำนวณในกรณีนี้ค่าเศษส่วนเชิงอะตอมจะมากกว่าหนึ่งเสมอ และถูกกำหนดโดยจำนวนของอะตอมของโมเลกุล

ตัวอย่าง คือ การหาความหนาแน่นเชิงอะตอมของไฮโดรเจนและออกซิเจนในน้ำ ที่มีความหนาแน่นเป็น  $1.0 \text{ g/cm}^3$

$$N_{H_2O} = \frac{(1.0 \text{ g/cm}^3)(0.6022 \text{ atoms} - \text{cm}^2 / \text{mole} - b)}{18 \text{ g/mole}} = 3.34 \times 10^{-2} \frac{\text{molecules}_{H_2O}}{b - \text{cm}}$$

ในน้ำ 1 โมเลกุลจะมีอะตอมของไฮโดรเจน 2 อะตอมและของออกซิเจน 1 อะตอม โดยที่เราสมมติว่าอะตอมของไฮโดรเจนทุกตัวเป็น H-1 และอะตอมของออกซิเจนทุกตัวเป็น O-16

$$N_H = 2 \times N_{H_2O} = 6.68 \times 10^{-2} \frac{\text{atoms}_H}{b - \text{cm}} \quad N_O = 1 \times N_{H_2O} = 3.34 \times 10^{-2} \frac{\text{atoms}_O}{b - \text{cm}}$$

### 5. โมเลกุลของสารผสมที่มีหลายไอโซโทป

วัสดุหลายๆ ชนิดที่มีไอโซโทปของธาตุต่างๆ ประกอบเป็นวัสดุชนิดนั้นและมีความสำคัญต่อสภาวะวิกฤตของเครื่องปฏิกรณ์ (เช่น โบรอนและยูเรเนียม)

ตัวอย่าง คือ การหาความหนาแน่นเชิงอะตอมของโบรอน-10 โบรอน-11 และ คาร์บอนในสารประกอบโบรอนคาร์ไบด์ ( $B_4C$ ) โดยการสมมติว่าโบรอนเป็นโบรอนที่มีในธรรมชาติ และความหนาแน่นของสารประกอบนี้คือ  $2.54 \text{ g/cm}^3$

$$A_{B_4C} = \frac{4 \text{ moles}_{B_{nat}}}{\text{mole}_{B_4C}} \times \frac{10.81 \text{ g}}{\text{mole}_{B_{nat}}} + \frac{1 \text{ mole}_C}{\text{mole}_{B_4C}} \times \frac{12.00 \text{ g}}{\text{mole}_C} \quad A_{B_4C} = 55.24 \text{ g/mole}$$

$$N_{B_4C} = \frac{(2.54 \text{ g/cm}^3)(0.6022 \text{ molecules} - \text{cm}^2 / \text{mole} - b)}{55.24 \text{ g/mole}}$$

$$N_{B_4C} = 2.77 \times 10^{-2} \frac{\text{molecules}_{B_4C}}{b - \text{cm}}$$

และมีอะตอมของโบรอน 4 อะตอมต่อหนึ่งโมเลกุลของโบรอนคาร์ไบด์ ( $B_4C$ )

$$N_{B_{nat}} = 4 \times N_{B_4C} = 1.108 \times 10^{-1} \frac{\text{atoms}_{B_{nat}}}{b - \text{cm}}$$

จากตัวอย่างก่อนเศษส่วนเชิงอะตอมของโบรอน-10 และโบรอน-11 ในโบรอนธรรมชาติมีค่าเป็น 0.199 และ 0.801 ตามลำดับ จะได้ว่า

$$N_{B_{10}} = af_{B_{10}} \times N_{B_{nat}} = 0.199 \times 1.108 \times 10^{-1} = 2.205 \times 10^{-2} \frac{atoms_{B_{10}}}{b - cm}$$

$$N_{B_{11}} = af_{B_{11}} \times N_{B_{nat}} = 0.801 \times 1.108 \times 10^{-1} = 8.875 \times 10^{-2} \frac{atoms_{B_{11}}}{b - cm}$$

สามารถคำนวณความหนาแน่นเชิงอะตอมของคาร์บอนในโบรอนคาร์ไบด์ ได้โดย

$$N_C = 1 \times N_{B_4C} = 2.77 \times 10^{-2} \frac{atoms_C}{b - cm}$$

## 6. ระบบสารละลาย (Solution system)

เนื่องจากว่าในสารละลายมีพารามิเตอร์ต่างๆ จำนวนมาก การคำนวณความหนาแน่นเชิงอะตอมในสารละลายจึงมีความซับซ้อนมากกว่าในสารที่เป็นของแข็ง ถ้ารู้ความหนาแน่นของสารละลายแล้ว เราก็สามารถคำนวณความหนาแน่นเชิงอะตอมโดยใช้วิธีต่างๆ ที่กล่าวผ่านมาแล้ว

**ตัวอย่าง เช่น H/X ratio, fissile component density, and with chemical formula.**

โดยสัดส่วน H/X ถูกใช้ในการศึกษาสภาวะวิกฤต ที่เป็นตัวบอกจำนวนของการหน่วงนิวตรอนในระบบ เมื่อความหนาแน่นเชิงมวลของวัสดุฟิสไซล์กำหนดภายใต้อัตราส่วน H/X การคำนวณความหนาแน่นเชิงอะตอมของสารทั้งหมดสามารถทำได้ สมมติว่ามีสารละลาย  $U(4.89)O_2F_2$  ในน้ำโดยสัดส่วน H/X=524 ความหนาแน่นเชิงอะตอมของ  $U^{235}$  คือ  $0.0425 \text{ g}U_{235} / \text{cc}$ . (สัดส่วน H/X คืออัตราส่วนของอะตอมไฮโดรเจนต่ออะตอมของธาตุที่ทำให้เกิดการแตกตัว)

ขั้นแรก คำนวณความหนาแน่นเชิงอะตอมของวัสดุฟิสไซล์

$$N_{U_{235}} = \frac{\rho_{U_{235}} \times N_{AV}}{A_{235}} = \frac{(0.0425 \text{ g}U_{235} / \text{cm}^3)(0.6022 \text{ atoms} - \text{cm}^2 / \text{mole} - b)}{235.04 \text{ g} / \text{mole}}$$

$$N_{U_{235}} = 1.0889 \times 10^{-4} \frac{atoms_{U_{235}}}{b - cm}$$

เมื่อรู้ค่าเศษส่วนเชิงน้ำหนักของ  $U^{235}$  และ  $U^{238}$  แต่สิ่งที่ต้องการรู้ คือ ค่าเศษส่วนเชิงอะตอม โดยจะใช้สมการในหัวข้อที่ 4 เพื่อคำนวณค่าน้ำหนักเชิงอะตอมเฉลี่ยของวัสดุผสม ( $U^{235}$  และ  $U^{238}$ )

นั่นคือ

$$\bar{A} = \left[ \frac{0.0489}{235.04} + \frac{0.9511}{238.05} \right]^{-1} = 237.90 \frac{gU(4.89)}{cm^3}$$

เมื่อ  $wf_{U^{235}} = 0.0489$        $wf_{U^{238}} = (1 - 0.0489) = 0.9511$

และคำนวณค่าเศษส่วนเชิงอะตอม โดย

$$af_{235} = wf_{235} \times \frac{\bar{A}}{A_{235}} = 0.0489 \times \frac{237.90}{235.04} = 0.0495 \frac{atoms_{U^{235}}}{atoms_U}$$

$$af_{238} = wf_{238} \times \frac{\bar{A}}{A_{238}} = 0.9511 \times \frac{237.90}{238.05} = 0.9505 \frac{atoms_{U^{238}}}{atoms_U}$$

ความหนาแน่นเชิงอะตอมของยูเรเนียม หาได้โดยการหารความหนาแน่นเชิงอะตอมของ  $U^{235}$  ด้วยเศษส่วนเชิงอะตอมของ  $U^{235}$  นั่นคือ

$$N_U = \frac{N_{235}}{af_{235}} = \frac{1.0889 \times 10^{-4} atoms_{U^{235}} / b - cm}{0.0495 atoms_{U^{235}} / atoms_U} = 2.1998 \times 10^{-3} \frac{atoms_U}{b - cm}$$

ดังนั้น

$$N_{U^{238}} = af_{238} \times N_U = 0.9505 \frac{atoms_{U^{238}}}{atoms_U} \times 2.1998 \times 10^{-3} \frac{atoms_U}{b - cm} = 2.0909 \times 10^{-3} \frac{atoms_{U^{238}}}{b - cm}$$

คำนวณความหนาแน่น  $O_2$  และ  $F_2$  จากความหนาแน่นเชิงอะตอมของยูเรเนียม

$$N_O = 2 \times N_U = 4.3996 \times 10^{-3} \frac{atoms_O}{b - cm}$$

$$N_F = 2 \times N_U = 4.3996 \times 10^{-3} \frac{atoms_F}{b - cm}$$

สารละลาย  $UO_2F_2$  ประกอบด้วยน้ำเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งความหนาแน่นเชิงอะตอมของ ไฮโดรเจน และ ออกซิเจน หาได้จากอัตราส่วน H/X นั่นคือ

$$N_H = H / X \times N_{U_{235}} = 524 \times 1.0889 \times 10^{-4} = 5.7058 \times 10^{-2} \frac{\text{atoms}_H}{b - cm}$$

$$N_O = N_H \times \frac{1 \text{ atom}_O}{2 \text{ atoms}_H} = 2.8529 \times 10^{-2} \frac{\text{atoms}_O}{b - cm} \quad (\text{ในน้ำ})$$

ความหนาแน่นเชิงอะตอมรวมของออกซิเจน เป็นผลรวมของความหนาแน่นเชิงอะตอมของ ออกซิเจนในสารละลาย  $UO_2F_2$  และในน้ำ ดังนั้น

$$N_O = 2.8529 \times 10^{-2} \frac{\text{atoms}_O}{b - cm} + 4.3996 \times 10^{-3} \frac{\text{atoms}_O}{b - cm} = 3.2929 \times 10^{-2} \frac{\text{atoms}_O}{b - cm}$$

น้ำหนักเชิงอะตอมทั้งหมดของสารต่างๆ ในสารละลาย  $UO_2F_2$  ที่คำนวณได้ ( $\text{atom} / b - cm$ ) คือ

$$N_{235} = 1.0889 \times 10^{-4}$$

$$N_{238} = 2.0909 \times 10^{-3}$$

$$N_H = 5.7058 \times 10^{-2}$$

$$N_O = 3.2929 \times 10^{-2}$$

$$N_F = 4.3996 \times 10^{-3}$$

$$N_{total} = 9.6586 \times 10^{-2}$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ก

## ความหนาแน่นเชิงอะตอมของวัสดุต่างๆ ที่มีใช้ในเครื่องปฏิกรณ์

(R.D. O'Dell Criticality Safety Group, *Los Alamos National Laboratory, April 1994*)

ส่วนประกอบของวัสดุและค่าเฉพาะต่างๆ ตลอดจนความหนาแน่นเชิงอะตอมนี้ เป็นการ จัดเตรียมขึ้นเพื่อความสะดวกในการใช้งาน สำหรับคอมพิวเตอร์โค้ดในการวิเคราะห์ทางนิวเคลียร์ ซึ่งค่าต่างๆที่ได้จากการคำนวณ มีความน่าเชื่อถือและความถูกต้องแน่นอนในระดับหนึ่ง

ค่า *atomic weight* ที่ใช้นามาจากเอกสารอ้างอิง “*Nuclides and Isotopes, Fourteenth Edition,*” *General Electric Company, San Jose, California.*

**Bisco modified NS-4 with 4.5% Boron**

Los Alamos National Laboratory

Density = 1.19 g / cc

Nuclide	Weight Fraction	Atom Density
C	0.4771	0.02677
N	0.0356	0.00171
H	0.787	0.05262
Si	0.0018	0.00004
Na	0.0494	0.00145
B(nat)	0.0455	0.00284
O	0.3119	0.01314

**Boron Carbide (Natural Boron): B<sub>4</sub>C**

Density = 2.51 g / cc    A = 55.2570

Nuclide	Weight Fraction	Atom Density
B(nat)	0.7826	0.10941
C	0.2174	0.027359

**Concrete (Keno Regular Concrete Standard Mix)**

Density = 2.3 g / cc

Nuclide	Weight Fraction	Atom Density
H	0.010	0.01374
O	0.532	0.04606
Si	0.337	0.01662
Al	0.034	0.00175
Na	0.029	0.00175
Ca	0.044	0.00152
Fe	0.014	0.00035

**Concrete [Los Alamos (MCNP) Mix]**

Density = 2.25 g / cc

Nuclide	Weight Fraction	Atom Density
H	0.00453	0.006094
O	0.51260	0.043421
Si	0.36036	0.017390
Al	0.03555	0.001786
Na	0.01527	0.000900
Ca	0.05791	0.001958
Fe	0.01378	0.000334

**Gypsum (Calcium Sulfur): CaSO<sub>4</sub> • 2H<sub>2</sub>O**

Density = 2.32 g / cc    A = 172.17

Nuclide	Weight Fraction	Atom Density
Ca		0.008115
S		0.008115
O		0.048689
H		0.032460

**Inconel (Keno Standard Mix)**

Density = 8.3 g / cc

Nuclide	Weight Fraction	Atom Density
Si	0.025	0.00445
Ti	0.025	0.00261
Cr	0.150	0.01442
Fe	0.070	0.00626
Ni	0.730	0.06217

**Kynar: C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>F<sub>2</sub>,**

Density = 1.76 g / cc    A = 64.0347

Nuclide	Weight Fraction	Atom Density
C	0.3751	0.0331
H	0.0315	0.0331
F	0.5934	0.0331

**Lexan: C<sub>16</sub>H<sub>14</sub>O<sub>3</sub>**

Los Alamos National Laboratory Analysis

Density = 1.20 g / cc    A = 254.2855

Nuclide	Weight Fraction	Atom Density
C	0.755749	0.045471
H	0.055494	0.039787
O	0.188757	0.008527

**Magnesium Oxide: MgO**

Density = 3.22 g / cc    A = 40.3044

Nuclide	Weight Fraction	Atom Density
Mg	0.6030	0.4811
O	0.3970	0.4811

**Nylon: C<sub>12</sub>H<sub>22</sub>N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**

Density = 1.14 g / cc    A = 226.319

Nuclide	Weight Fraction	Atom Density
C	0.63685	0.036401
H	0.09798	0.066737
N	0.12378	0.006067
O	0.14139	0.006067

**Paraffin: C<sub>25</sub>H<sub>52</sub>**

Density = 0.93 g / cc    A = 352.688

Nuclide	Weight Fraction	Atom Density
C	0.8514	0.03970
H	0.1486	0.08257

**Plexiglas & Lucite: C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>O<sub>2</sub>**

Density = 1.18 g / cc    A = 100.117

Nuclide	Weight Fraction	Atom Density
C	0.59985	0.03549
H	0.08054	0.05678
O	0.31961	0.01420

**Polyurethane Form**

Los Alamos National Laboratory Analysis

Density = 0.021 g / cc

Nuclide	Weight Fraction	Atom Density
H	0.041	5.144e-4
C	0.544	5.728e-4
N	0.121	10.925e-4
O	0.294	2.324e-4

**Polyethylene: CH<sub>2</sub>**

Density = 0.92 g / cc    A = 14.0269

Nuclide	Weight Fraction	Atom Density
C	0.85628	0.03950
H	0.14372	0.07899

**Polyvinyl Chloride (PVC): C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>Cl**

Density = 1.65 g / cc

Nuclide	Weight Fraction	Atom Density
C	0.3844	0.03180
H	0.0484	0.04771
Cl	0.5672	0.01590

**Pyrex [Borated Glass] (Keno Standard Mix)**

Density = 2.23 g / cc

Nuclide	Weight Fraction	Atom Density
NatB	0.037	0.00460
Al	0.010	0.00050
Na	0.041	0.00240
O	0.535	0.04491
Si	0.377	0.01803

**Silicon Rubber (G.E. RTV12A)**

(Weight Fractions below provided by G.E. Silicon Products Div.)

Density = 1.0185 g / cc

Nuclide	Weight Fraction	Atom Density
C	0.3211	0.01640
Si	0.3745	0.00818
O	0.2235	0.00857
H	0.0807	0.04911

**Stainless Steel 304**

Density = 7.92 g / cc

Nuclide	Weight Fraction	Atom Density
Fe	0.695	0.05936
Cr	0.190	0.01743
Ni	0.095	0.00772
Mn	0.020	0.00174

**Stainless Steel 316**

Density = 7.92 g / cc

Nuclide	Weight Fraction	Atom Density
Fe	0.655	0.05594
Cr	0.170	0.01559
Ni	0.120	0.00975
Mo	0.025	0.00124
Mn	0.020	0.00174
Si	0.010	0.00170

**Steel, Carbon**

Density = 7.82 g / cc

Nuclide	Weight Fraction	Atom Density
C	0.005	0.00196
Fe	0.995	0.08390

**Teflon: CF<sub>2</sub>**

Los Alamos National Laboratory Analysis

Density = 2.15 – 2.20 g / cc

Nuclide	Weight Fraction	Atom Density
C	0.2402	0.02650
F	0.7598	0.05298



**ภาคผนวก ง**  
**ตัวอย่างเพิ่มข้อมูลป้อนเข้า**

**ตัวอย่างที่ 1.** เพิ่มข้อมูลป้อนเข้าของแบบจำลองหนึ่งส่วนประกอบ ขนาด 50x50x90 ซม.<sup>3</sup> มีส่วนประกอบเป็นยูเรเนียมธรรมชาติ(ยูเรเนียม 235 = 0.73 % และยูเรเนียม 238 = 99.27 %)

**เพิ่มข้อมูลป้อนเข้าสำหรับโปรแกรม MCNP**

Sample 1A. Natural Uranium Rectangular-Parallelepiped (50 x 50 x 90 cm<sup>3</sup>.)

C Cell Cards

```
1 1 -18.9 1 -2 3 -4 5 -6 imp:n=1
2 0 -1:2:-3:4:-5:6 imp:n=0
```

C Surface Cards

```
1 px 0
2 px 50
3 py 0
4 py 50
5 pz 0
6 pz 90
```

C Data Cards

```
m1 92235 0.0073 92238 0.9927
kcode 1000 1.0 15 115
ksrc 25 25 45
```

**เพิ่มข้อมูลป้อนเข้าสำหรับโปรแกรม MTAC**

Model 1A. Natural Uranium Rectangular-Parallelepiped (50 x 50 x 90 cm<sup>3</sup>.)

Module = 1

```
1 50 50 90 0 0 0 0 0
2 2.43 0.0
678.50 580.20 17.6 0.0073 18.9 235.04
2.71 0.0 10.0 0.9927 19.1 238.03
1.0 1.0
```

# Initial value of k is 1.0 and neutrons flux is 1.0 for every module.

**ตัวอย่างที่ 2.** เพิ่มข้อมูลป้อนเข้าของแบบจำลองหนึ่งส่วนประกอบ ขนาด 50x50x80 ซม.<sup>3</sup> มีส่วนประกอบเป็น พลูโตเนียม 239 และ น้ำ

### เพิ่มข้อมูลเข้าสำหรับโปรแกรม MCNP

Sample 2A. Plutonium-239+H<sub>2</sub>O Rectangular-Parallelepiped(50 x 50 x 80 cm<sup>3</sup>.)

C Cell Cards

```
1 1 -10.3 1 -2 3 -4 5 -6 imp:n=1
2 0 -1:-2:-3:4:-5:6 imp:n=0
```

C Surface Cards

```
1 px 0
2 px 50
3 py 0
4 py 50
5 pz 0
6 pz 80
```

C Data Cards

```
m1 94239 0.50 1001 0.34 8016 0.16
mt1 lwtr
kcode 1000 1.0 15 115
ksrc 25 25 40
```

### เพิ่มข้อมูลเข้าสำหรับโปรแกรม MTAC

Model 2A. Plutonium-239 + H<sub>2</sub>O Rectangular-Parallelepiped (50 x 50 x 80 cm<sup>3</sup>.)

Module = 1

```
1 50 50 80 0 0 0 0 0
2 2.90 0.0
1011.30 742.5 7.7 0.2 15.80 239.05 (Pu-239)
0.664 0.0 103.0 0.8 1.00 18.015 (H2O)
1.0 1.0
```

# The compositions of a module are Pu-239 20% and H<sub>2</sub>O 80%

**ตัวอย่างที่ 3.** เพิ่มข้อมูลป้อนเข้าสำหรับแบบจำลอง 3 ส่วนประกอบ วางในแนวแกนเดียวกัน โดย  
 ส่วนประกอบเชื้อเพลิงวางอยู่ตำแหน่งตรงกลาง(เพื่อใช้อ้างอิง) แบบจำลองประกอบไปด้วย  
 ส่วนที่ 1 คือ ยูเรเนียม-235 ผสมนิกเกิล สัดส่วนมีการเปลี่ยนแปลง ขนาด 100x100x200 ซม.<sup>3</sup>  
 ส่วนที่ 2 คือ เหล็กผสมคาร์บอน สัดส่วนเชิงปริมาตร(Fe=95% C=5%)ขนาด 40x100x200 ซม.<sup>3</sup>  
 ส่วนที่ 3 คือ แกลดเมียมชนิดเดียว ขนาด 20x100x200 ซม.<sup>3</sup>

### เพิ่มข้อมูลเข้าสำหรับโปรแกรม MCNP

Sample 3A.Uranium-235+Ni Absorbers = Fe+C and Cd.

C Cell Cards

1 1 -8.95 2 -3 5 -6 7 -8 imp:n=1  
 2 2 -4.74 1 -2 5 -6 7 -8 imp:n=1  
 3 3 -8.65 3 -4 5 -6 7 -8 imp:n=1  
 4 0 -1:4:-5:6:-7:8 imp:n=0

C Surface Cards

1 px 0  
 2 px 40  
 3 px 140  
 4 px 160  
 5 py 0  
 6 py 100  
 7 pz 0  
 8 pz 200

C Data Cards

m1 92235 0.1 28000 0.9 \$ U-235+Ni  
 m2 6000 0.05 26000 0.95 \$ C-5% + Fe-95%  
 m3 48000 1.0 \$ Pure Cd  
 kcode 1000 1.0 15 115  
 ksrc 90 50 100

### เพิ่มข้อมูลเข้าสำหรับโปรแกรม MTAC

Model 3A. Uranium-235+Nickel was sandwiched by Fe+C and Cd module.

Modules = 3

1 100 100 200 2 3 0 0 0 0

2 2.43 0

687.5 580.2 17.6 0.1 18.9 235.04

4.43 0.0 17.3 0.9 8.9 58.71

2 40 100 200 0 1 0 0 0 0

2 0.0 0.0

2.55 0.0 10.9 0.95 7.87 55.847

0.0034 0.0 4.75 0.05 1.6 12.011

3 20 100 200 1 0 0 0 0 0

1 0.0 0.0

2540 0.0 5.6 1.0 8.65 112.4

1.0 1.0

# The sizes of modules are  $100 \times 100 \times 200 \text{ cm}^3$  for Module1 (U-235+Ni),  
 $40 \times 100 \times 200 \text{ cm}^3$  for Module2 (Fe+C),  
 $20 \times 100 \times 200 \text{ cm}^3$  for Module3 (Cd).

# Initial value for  $k$  is 1.0 and neutrons flux is 1.0

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตัวอย่างที่ 4.** เพิ่มข้อมูลป้อนเข้าสำหรับแบบจำลอง 5 ส่วนประกอบ ซึ่งวางในหลายแนวแกน โดยกำหนดให้ส่วนประกอบเชื้อเพลิงเป็นตำแหน่งอ้างอิง แบบจำลองประกอบไปด้วย

ส่วนที่ 1 คือ ยูเรเนียม 235 ผสมกับนิกเกิล ขนาด 100x100x200 ซม.<sup>3</sup>

ส่วนที่ 2 คือ เหล็ก ผสมกับ คาร์บอน ขนาด 40x100x200 ซม.<sup>3</sup>

ส่วนที่ 3 คือ แคลเมียมชนิดเดียว ขนาด 20x100x200 ซม.<sup>3</sup>

ส่วนที่ 4 และส่วนที่ 5 คือ วัสดุอื่น ๆ ขนาด 20x100x200 ซม.<sup>3</sup>

### เพิ่มข้อมูลเข้าสำหรับโปรแกรม MCNP

Sample 4A. Fuel: Uranium-235+Ni, Moderators: Fe+C and Al, Absorber: 2-arbitrary materials.

C Cell Cards

```
1 1 -8.95 2 -3 7 -8 9 -10 imp:n=1
2 2 -4.74 1 -2 7 -8 9 -10 imp:n=1
3 3 -2.70 3 -4 7 -8 9 -10 imp:n=1
4 4 -8.65 6 -1 7 -8 9 -10 imp:n=1
5 4 -8.65 4 -5 7 -8 9 -10 imp:n=1
6 0 -6:5:-7:8:-9:10 imp:n=0
```

C Surface Cards

```
1 px 0
2 px 40
3 px 140
4 px 160
5 px 180
6 px -20
7 py 0
8 py 100
9 pz 0
10 pz 200
```

C Data Cards

```
m1 92235 0.1 28000 0.9 $ U-235+Ni
m2 6000 0.05 26000 0.95 $ C-5% + Fe-95%
m3 48000 1.0 $ Pure Cd
m4 arbitrary materials $ Al, Mn, Na, Cd
kcode 1000 1.0 15 115
ksrc 90 50 100
```

### เพิ่มข้อมูลเข้าสำหรับโปรแกรม MTAC

Model 4A. Uranium-235+ Nickel was connected by Fe+C, Cd and two of arbitrary materials.

Modules = 5

```

1 100 100 200 2 3 4 5 0 0
2 2.43 0
687.6 580.2 17.6 0.1 18.9 235.04
  4.43 0.0 17.3 0.9 8.9 58.71
2 40 100 200 0 1 0 0 0 0
2 0.0 0.0
2.55 0.0 10.9 0.95 7.87 55.847
0.0034 0.0 4.75 0.05 1.6 12.011
3 20 100 200 1 0 0 0 0 0
1 0.0 0.0
0.23 0.0 1.49 1.0 2.70 26.98
4 80 20 200 0 0 0 1 0 0
1 0.0 0.0
0.17 0.0 11.4 1.0 11.34 207.19
5 100 20 200 0 0 1 0 0 0
0 4 1.0
1.0 1.0

```

# The compositions of each module are :

Module1. Weight fraction of Uranium-235 is 0.1 and Nickel is 0.9

Module2. Weight fraction of Iron is 0.95 and Carbon is 0.05

Module3. Only Cadmium

Module4 and Module5. Arbitrary materials

# Initial value for k is 1.0 and neutrons flux is 1.0

# Uranium-235+ Nickel was connected by Fe+C Module (right side), Cd Module (left side) and Arbitrary materials module (front side and back side).



**ตัวอย่างที่ 5.** เพิ่มข้อมูลป้อนเข้าแบบจำลองระบบจัดเก็บกากเชื้อเพลิง ประกอบไปด้วยสารละลายพลูโตเนียมไนเตรท บรรจุในถังสเตนเลส 2 ถังแบบไม่มีฝาปิด และใช้โบรอนคาร์ไบด์กั้นถังทั้ง 2 แบบจำลองมีส่วนประกอบทั้งหมด 42 ส่วน เกิดจากการตัดกันของระนาบในแนวตั้งและแนวนอน

สารละลายพลูโตเนียมไนเตรทประกอบด้วยไอโซโทปของ Pu-239 Pu-240 Pu-241 Pu-242 ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน และถังสเตนเลสประกอบด้วย เหล็ก นิกเกิลและโครเมียม ส่วนโบรอนคาร์ไบด์ประกอบไปด้วย โบรอนและคาร์บอน

### เพิ่มข้อมูลเข้าสำหรับโปรแกรม MTAC

Model 5C. Plutonium Nitrate solution in two stainless tanks were barred via a Boron Carbide.

Modules = 42

1 1 1 85 0 2 8 0 0 22 3 0 0.0

2.55 0.0 10.9 0.7402 7.93 55.84

3.10 0.0 3.8 0.1799 7.93 51.99

4.43 0.0 17.3 0.0799 7.93 58.71

2 60 1 85 1 3 9 0 0 23 0 1 1.0

3 1 1 85 2 4 10 0 0 24 0 1 1.0

4 10 1 85 3 5 11 0 0 25 2 0 0.0

759 0.0 3.6 0.7826 2.51 10.811

0.0034 0.0 4.75 0.2174 2.51 12.011

5 1 1 85 4 6 12 0 0 26 0 1 1.0

6 60 1 85 5 7 13 0 0 27 0 1 1.0

7 1 1 85 6 0 14 0 0 28 0 1 1.0

8 1 60 85 0 9 15 1 0 29 0 1 1.0

9 60 60 85 8 10 16 2 0 30 4 2.9 0.0

1101.3 742.5 7.7 0.0662 1.74 239.04

0.332 0.0 0.01 0.0578 1.74 1.0079

0.00027 0.0 3.76 0.5587 1.74 15.9994

1.85 0.0 10.6 0.3172 1.74 14.0067

10 1 60 85 9 11 17 3 0 31 0 1 1.0

11 10 60 85 10 12 18 4 0 32 0 4 1.0

12 1 60 85 11 13 19 5 0 33 0 1 1.0

13 60 60 85 12 14 20 6 0 34 0 9 0.8

14 1 60 85 13 0 21 7 0 35	0 1 1.0
15 1 1 85 0 16 0 8 0 36	0 1 1.0
16 60 1 85 15 17 0 9 0 37	0 1 1.0
17 1 1 85 16 18 0 10 0 38	0 1 1.0
18 10 1 85 17 19 0 11 0 39	0 4 1.0
19 1 1 85 18 20 0 12 0 40	0 1 1.0
20 60 1 85 19 21 0 13 0 41	0 1 1.0
21 1 1 85 20 0 0 14 0 42	0 1 1.0
22 1 1 1 0 23 29 0 1 0	0 1 1.0
23 60 1 1 22 24 30 0 2 0	0 1 1.0
24 1 1 1 23 25 31 0 3 0	0 1 1.0
25 10 1 1 24 26 32 0 4 0	0 4 1.0
26 1 1 1 25 27 33 0 5 0	0 1 1.0
27 60 1 1 26 28 34 0 6 0	0 1 1.0
28 1 1 1 27 0 35 0 7 0	0 1 1.0
29 1 60 1 0 30 36 22 8 0	0 1 1.0
30 60 60 1 29 31 37 23 9 0	0 1 1.0
31 1 60 1 30 32 38 24 10 0	0 1 1.0
32 10 60 1 31 33 39 25 11 0	0 4 1.0
33 1 60 1 32 34 40 26 12 0	0 1 1.0
34 60 60 1 33 35 41 27 13 0	0 1 1.0
35 1 60 1 34 0 42 28 14 0	0 1 1.0
36 1 1 1 0 37 0 29 15 0	0 1 1.0
37 60 1 1 36 38 0 30 16 0	0 1 1.0
38 1 1 1 37 39 0 31 17 0	0 1 1.0
39 10 1 1 38 40 0 32 18 0	0 4 1.0
40 1 1 1 39 41 0 33 19 0	0 1 1.0
41 60 1 1 40 42 0 34 20 0	0 1 1.0
42 1 1 1 41 0 0 35 21 0	0 1 1.0
1.0 1.0	

# The dimension of a stainless steel tank is  $60 \times 60 \times 80 \text{ cm.}^3$  and 1 cm. of thickness.

# Boron Carbide has dim.  $10 \times 60 \times 86 \text{ cm.}^3$

# This model repeated the composite modules to the same.

ตารางคุณสมบัติและค่าภาคตัดขวางสำหรับเทอร์มาลนิวตรอนกับธาตุต่างๆ

Element or molecule	Symbol	Atomic number	Atomic or molecular weight	Nominal density(g/cm <sup>3</sup> )	Atomic or molecules/cm <sup>3</sup>	$\sigma_a$ barns	$\sigma_s$ barns	$\Sigma_a$ cm <sup>-1</sup>	$\Sigma_s$ cm <sup>-1</sup>
Actinium	Ac	89	227			515			
Aluminum	Al	13	26.9815	2.699	0.06024	0.23	1.49	0.01386	0.08976
Antimony	Sb	51	121.75	6.62	0.03275	5.4	4.2	0.1769	0.1376
Argon	Ar	18	39.948	Gas		0.678	0.664		
Arsenic	As	33	74.9216	5.73	0.04606	4.3	7	0.1981	0.3224
Barium	Ba	56	137.34	3.5	0.01535	1.2		0.01842	
Beryllium	Be	4	9.0122	1.85	0.12360	0.0092	6.14	0.001137	0.7589
Bismuth	Bi	83	208.98	9.8	0.02824	0.033		0.0009319	
Boron	B	5	10.811	2.3	0.12810	759	3.6	97.23	0.4612
Bromine	Br	35	79.909	3.12	0.02351	6.8	6.1	0.1599	0.1434
Cadmium	Cd	48	112.4	8.65	0.04635	2450	5.6	113.56	0.2596
Calium	Ca	20	40.08	1.55	0.02329	0.43		0.01001	
Carbon(Graphite)	C	6	12.01115	1.6	0.08023	0.0034	4.75	0.0002728	0.3811
Cerium	Ce	58	140.12	6.78	0.02914	0.63	4.7	0.01836	0.137
Cesium	Cs	55	132.905	1.9	0.00861	29		0.2497	
Chlorine	Cl	17	35.453	Gas		33.2			
Chromium	Cr	24	51.996	7.19	0.08328	3.1	3.8	0.2582	0.3165
Cobalt	Co	27	58.9332	8.8	0.08993	37.2	6.7	3.345	0.6025
Copper	Cu	29	63.54	8.96	0.08493	3.79	7.9	0.3219	0.6709
Deuterium	D	1	2.0141	Gas		0.00053			
Dysprosium	Dy	66	162.5	8.56	0.03172	930	100	29.5	3.172
Erbium	Er	68	167.26	9.16	0.03203	162	11	5.189	0.3523
Europium	Eu	63	151.96	5.22	0.02069	4600	8	95.17	0.1655

Element or molecule	Symbol	Atomic number	Atomic or molecular weight	Nominal density(g/cm <sup>3</sup> )	Atomic or molecules/cm <sup>3</sup>	$\sigma_a$ barns	$\sigma_s$ barns	$\Sigma_a$ cm <sup>3</sup>	$\Sigma_s$ cm <sup>-1</sup>
Fluorine	Fe	9	18.9984	Gas		0.0095	4		
Gadolinium	Gd	64	157.25	7.95	0.03045	49000		1492	
Gallium	Ga	31	69.72	5.91	0.05105	2.9	6.5	0.148	0.3318
Germanium	Ge	32	72.59	5.36	0.04447	2.3	7.5	0.1023	0.3335
Gold	Au	79	196.967	19.32	0.05907	98.8		5.836	
Hafnium	Hf	72	178.49	13.36	0.04508	102	8	4.598	0.3606
Heavy water	D <sub>2</sub> O		20.0276	1.105	0.03323	0.00133	13.6	4.420x10e-5	0.4519
Helium	He	2	4.0026	Gas		<0.05			
Holmium	Ho	67	164.93	8.76	0.03199	66.5	9.4	2.127	0.3007
Hydrogen	H	1	1.00797	Gas		0.332			
Indium	In	49	114.82	7.31	0.03834	193.5		7.419	
Iodine	I	53	126.9044	4.93	0.02340	6.2		0.1451	
Iridium	Ir	77	192.2	22.5	0.07050	426	14	30.03	0.987
Iron	Fe	26	55.847	7.87	0.08487	2.55	10.9	0.2164	0.9251
Krypton	Kr	36	83.8	Gas		25	7.5		
Lanthanum	La	57	138.91	6.19	0.02684	9	9.3	0.2416	0.2496
Lead	Pb	82	207.19	11.34	0.03296	0.17	11.4	0.005603	0.3757
Lithium	Li	3	6.939	0.53	0.04600	70.7		3.252	
Lutetium	Lu	71	174.97	9.74	0.03353	77	8	2.581	0.2682
Magnesium	Mg	12	24.312	1.74	0.04310	0.063	3.42	0.002751	0.1474
Manganese	Mn	25	54.938	7.43	0.08145	13.3	2.1	1.083	0.171
Mercury	Hg	80	200.59	13.55	0.04068	375		15.26	
Molybdenum	Mo	42	95.94	10.2	0.06403	2.65	5.8	0.1697	0.3714
Neodymium	Nd	60	144.24	6.98	0.02914	50.5	16	1.472	0.4662

Element or molecule	Symbol	Atomic number	Atomic or molecular weight	Nominal density(g/cm <sup>3</sup> )	Atomic or molecules/cm <sup>3</sup>	$\sigma_a$ barns	$\sigma_s$ barns	$\Sigma_a$ cm <sup>3</sup>	$\Sigma_s$ cm <sup>-1</sup>
Neon	Ne	10	20.183	Gas		0.038	2.42		
Nickel	Ni	28	58.71	8.9	0.09130	4.43	17.3	0.4045	1.579
Niobium	Nb	41	92.906	8.57	0.05555	1.15		0.06388	
Nitrogen	N	7	14.0067	Gas		1.85	10.6		
Osmium	Os	76	190.2	22.5	0.07124	15.3		1.09	
Oxygen	O	8	15.9994	Gas		0.00027	3.76		
Palladium	Pd	46	106.4	12	0.06792	6.9	5	0.4686	0.3396
Phosphorus(yellow)	P	15	30.9738	1.82	0.03539	0.18		0.00637	
Platinum	Pt	78	195.09	21.45	0.06622	10	11.2	0.6622	0.7167
Plutonium	Pu	94	239.0522	19.6	0.04938	$\sigma_a=1011.3$ $\sigma_f=742.5$	7.7	49.93	0.3802
Polonium	Po	84	210	9.51	0.02727			36.66	
Potassium	K	19	39.102	0.86	0.01325	2.1	1.5	0.02783	0.01988
Praseodymium	Pr	59	140.907	6.78	0.02898	11.5	3.3	0.3333	0.09563
Promethium	Pm	61							
Protactinium	Pa	91	231.0359			210			
Radium	Ra	88	226.0254	5	0.01332	11.5		0.1532	
Rhenium	Re	75	186.2	20	0.06596	88	11.3	5.804	0.7453
Rhodium	Rh	45	102.905	12.41	0.07263	150		10.89	
Rubidium	Rb	37	85.47	1.53	0.01078	0.37	6.2	0.003989	0.06684
Ruthenium	Ru	44	101.07	12.2	0.07270	2.56		0.1861	
Samarium	Sm	62	150.35	6.93	0.02776	5800		161	
Scandium	Sc	21	44.956	2.5	0.03349	26.5	24	0.8875	0.8038
Selenium	Se	34	78.96	4.81	0.03669	11.7	9.7	0.4293	0.3559

Element or molecule	Symbol	Atomic number	Atomic or molecular weight	Nominal density(g/cm <sup>3</sup> )	Atomic or molecules/cm <sup>3</sup>	$\sigma_a$ barns	$\sigma_s$ barns	$\Sigma_a$ cm <sup>3</sup>	$\Sigma_s$ cm <sup>-1</sup>
Silicon	Si	14	28.086	2.33	0.04996	0.16	2.2	0.007994	0.1099
Silver	Ag	47	107.87	10.49	0.05857	63.6		3.725	
Sodium	Na	11	22.9898	0.97	0.02541	0.53	3.2	0.01347	0.08131
Strontium	Sr	38	87.62	2.6	0.01787	1.21	10	0.02162	0.1787
Sulfur(yellow)	S	16	32.064	2.07	0.03888	0.52	0.975	0.02022	0.03791
Tantalum	Ta	73	180.984	16.6	0.05525	21	62	1.16	0.3426
Technetium	Tc	43	99			19			
Tellurium	Te	52	127.6	6.24	0.02945	4.7		0.1384	
Terbium	Tb	65	158.925	8.33	0.03157	25.5	20	0.805	0.6314
Thallium	Tl	81	204.37	11.85	0.03492	3.4	9.7	0.1187	0.3387
Thorium	Th	90	232.038	11.71	0.03039	7.4	12.67	0.2249	0.385
Thulium	Tm	69	168.934	9.35	0.03314	103	12	3.413	0.3977
Tin	Sn	50	118.69	7.298	0.03703	0.63		0.02333	
Titanium	Ti	22	47.9	4.51	0.05670	6.1	4	0.3459	0.2268
Tungsten	W	74	183.85	19.2	0.06289	18.5		1.163	
Uranium	U	92	238.03	19.1	0.04833	$\sigma_a=7.59$ $\sigma_f=4.19$	8.9	0.3668 0.2025	0.4301
Vanadium	V	23	50.942	61	0.07212	5.04	4.39	0.3635	0.3556
Water	H O		18.0153	1	0.03343	0.664	103	0.0222	3.443
Xenon	Xe	54	131.3	Gas		24.5	4.3		
Ytterbium	Yb	70	173.04	7.01	0.02440	36.6	25	0.893	0.61
Yttrium	Y	39	88.906	5.51	0.03733	1.28	7.6	0.04778	0.2837
Zinc	Zn	30	65.37	7.133	0.06572	1.1	4.2	0.0723	0.276
Zirconium	Zr	40	91.22	6.5	0.04291	0.185	6.4	0.007938	0.2746



## ประวัติผู้เขียน

นายชลัมภ์ อุ่นอารีย์ เกิดวันที่ 3 กันยายน พ.ศ. 2515 กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง ในปี พ.ศ. 2539 จากนั้นเข้าศึกษาต่อที่ ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2540



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย