

การพัฒนาโปรแกรมเพื่อคำนวณการจัดการเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบสองมิติและสองกลุ่มพลังงาน

นายธนรรจน์ แสงจันทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL PROGRAM FOR FUEL MANAGEMENT IN A 2-D, TWO
ENERGY GROUPS NUCLEAR REACTOR CORE

Mr. Dhanaj Saengchantr

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

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

511763

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาโปรแกรมเพื่อคำนวณการจัดการเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์
นิวเคลียร์แบบสองมิติและสองกลุ่มพลังงาน

โดย

นาย ธนรรจน์ แสงจันทร์

สาขาวิชา

นิวเคลียร์เทคโนโลยี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. สัญชัย นิลสุวรรณโฆสิต

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์

คณะกรรมการศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพิชชา จันทร์โยธา)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. สัญชัย นิลสุวรรณโฆสิต)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)

กรรมการ

(ดร. ชนาธิป ทิพยกุล)

ธนรรจน์ แสงจันทร์ : การพัฒนาโปรแกรมเพื่อคำนวณการจัดการเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบสองมิติและสองกลุ่มพลังงาน. (DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL PROGRAM FOR FUEL MANAGEMENT IN A 2-D, TWO ENERGY GROUPS NUCLEAR REACTOR CORE) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร. ศัญชัย นิลสุวรรณโมฆิต, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : รศ. สมยศ ศรีสถิตย์, 99 หน้า.

ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับคำนวณการจัดการเชื้อเพลิงภายในแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โดยการใช้ทฤษฎีการแพร่ของนิวตรอนสองกลุ่มพลังงาน (two group neutron diffusion theory) คือนิวตรอนกลุ่มพลังงานก่อนความร้อน (fast neutron) และนิวตรอนกลุ่มพลังงานความร้อน (thermal neutron) ร่วมกับระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมและการแก้สมการเชิงเส้นด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล ทำการคำนวณในระบบพิกัดฉาก สองมิติ เพื่อประมาณค่าวิกฤต รูปแบบการกระจายนิวตรอนฟลักซ์ ค่าการเผาผลาญเชื้อเพลิง และการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบลักษณะการบรรจุเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์สามแบบ คือ 1. แบบเนื้อเดียว (uniform loading) 2. แบบบรรจุเชื้อเพลิงชนิดที่มีการเสริมสมรรถนะสูงกว่าไว้ภายนอก (out-in loading) และ 3. แบบกระจายชนิดเชื้อเพลิง (in-scatter loading)

ค่าคงที่กลุ่ม (group constant) ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม PIJ ซึ่งใช้ฐานข้อมูลของ JENDL-3.3 สำหรับการรวบรวมกลุ่มและสร้างค่าคงที่ภาคตัดขวางมหภาค ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่นิวตรอน และค่าองค์ประกอบต่าง ๆ ที่จำเป็น สำหรับการวิจัยนี้ได้สร้างค่าคงที่กลุ่มเป็นสองกลุ่ม สี่กลุ่ม และเจ็ดกลุ่ม

ผลการคำนวณพบว่าค่ากระจายกำลังในแกนปฏิกรณ์มีค่าสม่ำเสมอเมื่อบรรจุเชื้อเพลิงแบบ in-scatter loading ซึ่งดีที่สุด และรองลงมาเป็นการบรรจุเชื้อเพลิง แบบ out-in loading และ uniform loading ตามลำดับ

ภาควิชา...นิวเคลียร์เทคโนโลยี...ลายมือชื่อนิสิต...ธนรรจน์ แสงจันทร์
สาขาวิชา...นิวเคลียร์เทคโนโลยี...ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก...
ปีการศึกษา...2551...ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม...กิมพอล ศรีสถิตย์

4970338621: MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

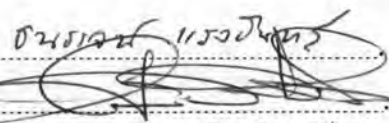
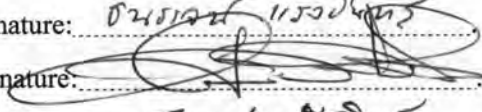
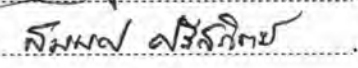
KEYWORDS: MULTIGROUP / DIFFUSION EQUATION / NUCLEAR REACTOR / FINITE DIFFERENCE / THAI RESEARCH REACTOR / SRAC

DHANAJ SAENGCHANTR: DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL PROGRAM FOR FUEL MANAGEMENT IN A 2-D, TWO ENERGY GROUPS NUCLEAR REACTOR CORE. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. SUNCHAI NILSUWANKOSIT, Ph.D., COADVISOR : ASSOC.PROF. SOMYOT SRISATIT, 99 pp.

A computational program for in-core nuclear reactor fuel management was developed using two energy groups neutron diffusion theory in which neutrons are categorized into two energy level i.e. fast neutron energy group and thermal neutron energy group. A finite difference method and solving of linear equation using gauss-seidel were applied to calculate the diffusion equation in two dimension and Cartesian coordinate system. A criticality, neutron flux distribution and fuel burnup were calculated to compare advantage/disadvantages of three difference loading pattern i.e. 1. Uniform Loading, 2. Out-In loading and 3. In-Scatter loading.

The group constant parameters were calculated using PIJ software to read and collapse a nuclear data from JENDL-3.3 database and generate nuclear macroscopic cross section, diffusion coefficient, and other parameters in which necessary to be used in diffusion equation. Two, four and seven groups constant were generated for this research.

The calculation results showed that the best and adequate uniform power peaking distribution occurred when reactor core was In-Scatter loading pattern and was followed respectively by the Out-In loading and Uniform Loading

Department: Nuclear Technology Student's Signature: 
Field of Study: Nuclear Technology Advisor's Signature: 
Academic Year: 2008 Co-Advisor's Signature: 

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รศ.ดร.สัญญาชัย นิลสุวรรณโหมยิต ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยมาด้วยดีตลอด ขอขอบคุณ คุณยุทธพงศ์ บุษมมงคล และ ดร. ชนาธิป ทิพยกุล ที่ให้แนววิธีการคิดเพื่อนำมาปรับปรุง การวิจัย ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา รวมถึงกำลังใจจากเพื่อนในสถาบันฯ ทุกท่าน ขอขอบคุณ คุณอำไพ สุขบำเพ็ญ คุณ สิริพล เชื้ออินตะ ที่อนุญาตให้ข้าพเจ้าไปศึกษาและอนุญาตให้งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานที่ปฏิบัติ

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ คุณป้า พี่และน้อง ที่ช่วยเป็นกำลังใจตลอดมา

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3. ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5. วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2. แนวคิดและทฤษฎี.....	5
2.1. ทฤษฎีแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์.....	5
2.1.1 ทฤษฎีการแพร่ของนิวตรอนในหนึ่งกลุ่มพลังงาน.....	5
2.1.2 การลดพลังงานของนิวตรอน.....	6
2.1.3 สมการการแพร่หลายกลุ่มพลังงาน.....	10
2.1.4 การคำนวณค่าวิกฤต (Criticality : k).....	12
2.1.5 การคำนวณนิวตรอนพลักซ์.....	13
2.1.6 การวิเคราะห์การหมดไปของเชื้อเพลิง.....	14
2.1.7 การเปลี่ยนแปลงนิวเคลียสและการเกิดอันตรกิริยาของนิวตรอนภายใน แกนปฏิกรณ์.....	14
2.1.7.1 อนุกรมการเปลี่ยนแปลงของ ^{235}U	15
2.1.7.2 อนุกรมการเปลี่ยนแปลงของ ^{238}U	16
2.1.8 การเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากสารพิษที่มีค่ารีแอกติวิตีเป็นลบ.....	18
2.1.8.1 การเปลี่ยนแปลงของซีซอน - 135.....	18
2.1.8.2 การเปลี่ยนแปลงของซามาเรียม - 149.....	20

2.2.	ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข.....	21
2.2.1	กระบวนวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม.....	22
2.2.2	การหาผลเฉลยระบบสมการเชิงเส้นด้วยวิธีเกาส์ – ไชเดล.....	22
2.3.	องค์ประกอบที่ใช้พิจารณาในการคำนวณแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์.....	24
2.3.1	สัญลักษณ์ที่ใช้แทนการบรรจุเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์.....	24
2.3.2	ค่าคงที่กลุ่ม.....	24
2.4.	รูปแบบการบรรจุเชื้อเพลิง.....	25
3.	วิธีดำเนินการวิจัย.....	27
3.1.	การออกแบบโปรแกรมและแผนผังการดำเนินการ.....	27
3.1.1.	โครงสร้างอินพุตไฟล์.....	29
3.1.2.	โครงสร้างไฟล์ค่าคงที่กลุ่ม.....	31
3.1.3.	โครงสร้างเอาต์พุตไฟล์.....	32
3.1.4.	การคำนวณค่าวิกฤต.....	32
3.1.5.	การปรับสารเคมีควบคุม (Chemical Shim Control).....	33
3.1.6.	การคำนวณการกระจายนิวตรอนพลักซ์.....	34
3.1.7.	การคำนวณการกระจายความหนาแน่นกำลัง (Peak Power Factor).....	35
3.1.8.	การคำนวณการเผาผลาญเชื้อเพลิง.....	35
3.2.	การคำนวณด้วยกระบวนวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม.....	36
3.3.	การสร้างค่าคงที่กลุ่ม.....	38
4.	ผลการคำนวณ.....	40
4.1.	เปรียบเทียบผลการคำนวณกับทฤษฎีและ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ SRAC.....	40
4.1.1.	ผลการคำนวณทางทฤษฎี.....	40
4.1.2.	การบรรจุเชื้อเพลิง.....	40
4.2.	เปรียบเทียบผลการคำนวณทางทฤษฎี กับ ผลการคำนวณด้วย โปรแกรมที่พัฒนา และ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ SRAC.....	42
4.2.1.	ผลคำนวณทางทฤษฎี.....	42
4.2.2.	เปรียบเทียบผลการคำนวณ.....	44
4.3.	เปรียบเทียบค่าวิกฤตจากการคำนวณสองมิติ หนึ่งกลุ่มพลังงานและ สองกลุ่มพลังงาน.....	45

4.4. เปรียบเทียบค่าพีคกำลัง (Peak Power Factor : PPF) ในการบรรจุเชื้อเพลิง รูปแบบต่าง ๆ	47
4.5. การคำนวณค่าการเผาผลาญเชื้อเพลิง (Fuel Burnup)	47
4.5.1. การคำนวณและเปรียบเทียบค่าวิกฤตเมื่อไม่มีสารเคมีควบคุม	48
4.5.2. ผลการคำนวณค่าพีคกำลัง (Peak Power Factor) จากการปรับ ค่าสารเคมีควบคุม	50
4.6. การคำนวณค่าการเผาผลาญเชื้อเพลิงต่อการบรรจุเชื้อเพลิงในแต่ละวงรอบ (cycle)	57
4.7. การคำนวณสมการการแพร่สองกลุ่มพลังงาน สามมิติ	59
4.7.1. เปรียบเทียบผลการคำนวณทางทฤษฎีกับผลการคำนวณด้วย โปรแกรมที่พัฒนาและ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ SRAC ในแบบสามมิติ	59
4.7.2. เปรียบเทียบผลการคำนวณค่าวิกฤตเมื่อแบ่งแกน z ในจำนวน โหนดต่างกัน	61
4.7.3. ค่าพีคกำลังเมื่อคำนวณในแบบสามมิติ	63
4.8. เปรียบเทียบผลการคำนวณการจัดแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว-1/1 จากโปรแกรม SRAC และ DENUMG	63
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	66
5.1. สรุปผลการวิจัย	66
5.1.1. ผลการคำนวณค่าวิกฤต	66
5.1.2. การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าวิกฤตจากสมการการแพร่สำหรับ หนึ่งกลุ่มพลังงานและสองกลุ่มพลังงาน	67
5.1.3. ผลการคำนวณค่าพีคกำลัง เมื่อบรรจุเชื้อเพลิงในรูปแบบต่าง ๆ	67
5.1.4. การคำนวณค่าการเผาผลาญเชื้อเพลิง	67
5.1.5. การปรับค่าภาคตัดขวางมหภาคการดูดกลืนของสารเคมีควบคุม	68
5.1.6. เปรียบเทียบการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแบบวงรอบ	68
5.1.7. การคำนวณสมการการแพร่ในระบบพิกัดฉากสามมิติ สองกลุ่มพลังงาน	68
5.1.8. ระยะเวลาในการคำนวณหาผลเฉลย	69
5.2. ข้อเสนอแนะ	70
รายการอ้างอิง	72
ภาคผนวก	74
ภาคผนวก ก ข้อมูลของแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ PWR	75

	ญ หน้า
ภาคผนวก ข SRAC COMPUTER CODE.....	76
ภาคผนวก ค ตัวอย่างอินพุตไฟล์.....	77
ภาคผนวก ง ตัวอย่างไฟล์ค่าคงที่กลุ่ม.....	80
ภาคผนวก จ ตัวอย่างเอาต์ไฟล์.....	81
ภาคผนวก ฉ SOURCE CODE.....	83
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	99

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ตารางค่าสัดส่วนในการแตกตัวและค่าคงที่การสลายตัว.....	18
4.1 ข้อมูลค่าคงที่กลุ่มของเชื้อเพลิงเสริมสมรรถนะ 2.1%.....	43
4.2 ข้อมูลค่าคงที่กลุ่มของเชื้อเพลิงเสริมสมรรถนะ 2.6%.....	43
4.3 ข้อมูลค่าคงที่กลุ่มของเชื้อเพลิงเสริมสมรรถนะ 3.2%.....	44
4.4 เปรียบเทียบผลการคำนวณค่าวิกฤตในระบบสองมิติเมื่อบรรจุเชื้อเพลิงที่เสริมสมรรถนะเดียวกันทั้งแกน.....	44
4.5 เปรียบเทียบผลการคำนวณค่าวิกฤต 1 และ 2 กลุ่มพลังงาน.....	45
4.6 เปรียบเทียบค่าวิกฤตและค่าพิคกำลังภายในแกนปฏิกรณ์เมื่อบรรจุเชื้อเพลิงแบบต่างกัน.....	47
4.7 ค่าวิกฤตจากการบรรจุเชื้อเพลิงแบบต่าง ๆ เมื่อเวลาเปลี่ยนไป.....	48
4.8 การคำนวณค่าพิคกำลัง (Pmax/Pavg) ภายในแกนปฏิกรณ์.....	51
4.9 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าภาคตัดขวางมหภาคการดูดกลืนของสารเคมีควบคุม.....	53
4.10 การแบ่งโหนดตามแกน x y และ z และจำนวนโหนดตามภาคตัดขวาง.....	60
4.11 เปรียบเทียบผลการคำนวณค่าวิกฤตในแบบสามมิติ เมื่อบรรจุเชื้อเพลิงที่เสริมสมรรถนะเดียวกันทั้งแกน.....	60
4.12 เปรียบเทียบค่าวิกฤตเมื่อแบ่งจำนวนโหนดตามแกน z ต่างกัน.....	61
4.13 เปรียบเทียบค่าวิกฤตและค่าพิคกำลังภายในแกนปฏิกรณ์เมื่อบรรจุเชื้อเพลิงแบบต่างกัน.....	63
4.14 ผลการคำนวณแกนปฏิกรณ์ 1/2 ด้วยโปรแกรม SRAC และ DENUMG ในระบบสองมิติ.....	65
4.15 ผลการคำนวณแกนปฏิกรณ์ 1/2 ด้วยโปรแกรม SRAC และ DENUMG ในระบบสามมิติ.....	65
5.1 ตารางสรุปข้อดีและข้อเสียของการบรรจุเชื้อเพลิงในแบบต่าง ๆ.....	71

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 การแบ่งพลังงานนิวตรอนเป็น G กลุ่มพลังงาน.....	7
2.2 การกระเจิงของนิวตรอนในรูปแบบต่าง ๆ	8
2.3 การแบ่งพลังงานนิวตรอนเป็นสองกลุ่มพลังงาน.....	9
2.4 สมดุลของนิวตรอนที่อยู่ในระบบ.....	10
2.5 Isotope chains การหมดไปของเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์ที่ใช้ยูเรเนียมเป็นเชื้อเพลิง.....	15
2.6 อนุกรมการเปลี่ยนแปลงของ ^{235}U	16
2.7 อนุกรมการเปลี่ยนแปลงของ ^{238}U	16
2.8 แผนผังการสลายตัวอย่างง่ายของ ^{135}Xe	19
2.9 แผนผังแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงอย่างง่ายของ ^{149}Sm	20
2.10 ตัวอย่างการบรรจุเชื้อเพลิงชนิด 2.1% รูปแบบเนื้อเดียว (Uniform Loading).....	25
2.11 ตัวอย่างการบรรจุเชื้อเพลิง รูปแบบ Out-In Loading.....	25
2.12 ตัวอย่างการบรรจุเชื้อเพลิงรูปแบบ In-Scatter Loading.....	26
3.1. แผนผังการดำเนินการ.....	28
3.2. แผนผังการคำนวณค่าวิกฤต.....	33
3.3. แผนผังการคำนวณการปรับค่าภาคตัดขวางมหภาคการดูดกลืนแทนสารเคมีควบคุม.....	34
3.4. การอ้างอิงตำแหน่งของฟลักซ์ที่ใช้กระบวนวิธีผลต่างสี่บเนื่อง.....	37
3.5. โมเดลของเชื้อเพลิงที่นำมาหาค่าภาคตัดขวางมหภาค.....	39
3.6. โมเดลของเชื้อเพลิง 17 x 17 ที่ใช้ในการคำนวณ.....	39
4.1. การบรรจุเชื้อเพลิงชนิด 2.1% รูปแบบเนื้อเดียว (Uniform Loading).....	41
4.2. การบรรจุเชื้อเพลิง รูปแบบ Out-In Loading.....	41
4.3. การบรรจุเชื้อเพลิงรูปแบบ In-Scatter Loading.....	42
4.4. กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณ.....	45
4.5. กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าวิกฤตระหว่าง 1 และ 2 กลุ่มพลังงาน.....	46
4.6. การเปลี่ยนแปลงค่าวิกฤตเมื่อเวลาเปลี่ยนไป.....	50
4.7. เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกำลังเมื่อเวลาเปลี่ยนไป.....	52
4.8. ค่าภาคตัดขวางมหภาคการดูดกลืนที่เพิ่มในระบบ.....	54
4.9. การกระจายค่าพิกกำลังในแกนปฏิกรณ์ฯ เมื่อบรรจุเชื้อเพลิงแบบเนื้อเดียวที่เวลา 0 วัน.....	54
4.10. การกระจายค่าพิกกำลังในแกนปฏิกรณ์ฯ เมื่อบรรจุเชื้อเพลิงแบบเนื้อเดียวที่เวลา 400 วัน.....	55

ภาพประกอบ	หน้า
4.11. การกระจายค่าพิกกำลังในแกนปฏิกรณ์ฯ เมื่อบรรจุเชื้อเพลิงแบบ Out-in ที่เวลา 0 วัน.....	55
4.12. การกระจายค่าพิกกำลังในแกนปฏิกรณ์ฯ เมื่อบรรจุเชื้อเพลิงแบบ Out-in ที่เวลา 400 วัน....	56
4.13. การกระจายค่าพิกกำลังในแกนปฏิกรณ์ฯ เมื่อบรรจุเชื้อเพลิงแบบ In-Scatter ที่เวลา 0 วัน.....	56
4.14. การกระจายค่าพิกกำลังในแกนปฏิกรณ์ฯ เมื่อบรรจุเชื้อเพลิงแบบ In-Scatter ที่เวลา 400 วัน.....	57
4.15. หมายเลขประจำตำแหน่งที่สมมูลกับการบรรจุเชื้อเพลิงเมื่อพิจารณาการแบ่ง แกนปฏิกรณ์ออกเป็น 15 x 15.....	58
4.16. หมายเลขประจำตำแหน่งภายหลังการสลับตำแหน่งและบรรจุเชื้อเพลิงเพิ่ม.....	58
4.17. เปรียบเทียบผลคำนวณการเผาผลาญเชื้อเพลิงในหน่วยเมกะวัตต์วันต่อ กิโลกรัมยูเรเนียม.....	59
4.18. กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณ.....	61
4.19. การลู่เข้าของค่าวิกฤตเมื่อแบ่งแกน Z จำนวน โหนดต่างๆ.....	62
4.20. ระยะเวลาในการคำนวณเมื่อแบ่งจำนวน โหนดตามแกน z ต่างกัน.....	63
4.21. การจัดวางเชื้อเพลิงภายในแกนปฏิกรณ์ ปปว -1/1 และคำนวณด้วย โปรแกรม SRAC.....	64
4.22. การจัดวางเชื้อเพลิงที่สมมูลกับแกนปฏิกรณ์ ปปว-1/1 และ คำนวณด้วย โปรแกรม DENUMG.....	64