การศึกษาออกแบบแกน เครื่องปฏิกรณ์นิว เคลียร์แบบ เชื้อ เพลิง เป็นยู เร เนียม ธรรมชาติ และตัวหน่วงนิวตรอน เป็นน้ำชนิดหนัก

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นายสมยศ ศรีสถิตย์

วิทยานิพนธ์นี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชานิว เคลียร์ เทคโนโลยี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2527

ISBN 974-563-855-2

009451

i17761256

DESIGN INVESTIGATION OF NATURAL URANIUM-FUELLED HEAVY WATER-MODERATED REACTOR CORES.

Mr. Somyot Srisatit

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Nuclear Technology

Graduate School

Chulalongkorn University

1984

ISBN 974-563-855-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาออกแบบแกนเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบเชื้อเพลิงเป็นยูเรเนียมธรรมชาติ และตัวหน่วงนิวตรอนเป็นน้ำชนิดหนัก
โดย	นายสมยศ ศรีสถิตย์
ภาควิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ สุวรรณ์ แสงเพ็ชร์

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุประดิษฐ์ บุนนาค)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ วิชัย หโยดม)

..... กรรมการ

(ศาสตราจารย์ สุวรรณ์ แสงเพ็ชร์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาออกแบบแกนเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบเชื้อเพลิงเป็นยูเรเนียมธรรมชาติ และตัวหน่วงนิวตรอนเป็นน้ำชนิดหนัก

ชื่อนิสิต นายสมยศ ศรีสถิตย์

อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ สุวรรณ์ แสงเพ็ชร์

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี

ปีการศึกษา 2527

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

ได้ศึกษาการออกแบบแกนเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ใช้ยูเรเนียม-235 ความเข้มข้นตามธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง และตัวหน่วงนิวตรอนเป็นน้ำชนิดหนัก โดยออกแบบรูปร่างของเครื่องปฏิกรณ์เป็นแบบทรงกระบอก เชื้อเพลิงอาจอยู่ในรูปโลหะยูเรเนียมหรือยูเรเนียมไดออกไซด์ และมีวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิงเป็นอะลูมินัม หรือเป็นเซอร์โคเนียม กำหนดให้แท่งเชื้อเพลิงมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 2 ซม. ความหนาของวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 0.1 ซม. ซึ่งมีทั้ง 1, 3, 4, 6, 7, และ 12 แท่งในหนึ่งมัด ในการออกแบบอาจมีชั้นท่อความดันที่เป็นอะลูมินัมหรือเซอร์โคเนียม ซึ่งกำหนดให้หนาเท่ากับ 0.15 ซม. และจะเลือกออกแบบที่แกนเครื่องปฏิกรณ์เกิดกรณีวิกฤต ($k_{eff} = 1.0$) เท่านั้น ซึ่งเมื่อหุ้มด้วยตัวสะท้อนนิวตรอนแล้วก็จะคำนวณค่า k_{eff} ที่เพิ่มขึ้นจากกรณีวิกฤต

Thesis Title	DESIGN INVESTIGATION OF NATURAL URANIUM-FUELLED HEAVY WATER-MODERATED REACTOR CORES.
Name	Mr. Somyot Srisatit
Thesis Advisor	Professor Suwan Sangpetch
Department	Nuclear technology
Academic Year	1984

ABSTRACT

Neutronic calculation of a reactor core, using natural uranium as fuel and heavy water as moderator, has been performed. A cylindrical reactor core configuration was adopted. The fuel could be either metallic uranium or uranium dioxide cladded with Aluminum or Zirconium. The dimension of the fuel rod was taken to be 2 cm. in diameter and the thickness of cladding was 0.1 cm. Various number of fuel rods in a fuel assembly were considered, i.e., 1, 3, 4, 6, 7 and 12 rods per assembly. Aluminum or Zirconium pressure tubes, with thickness of 0.15 cm., could be placed in the reactor core. The calculations of the reactor core were performed for the cases when the core could reach criticality (k_{eff}= 1.0). When reflector was added to the reactor core the increase of the effective multiplication factor was calculated. The preliminary design of the reactor core was found to be satisfatory.

ห้องสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ สุวรรณ์ แสงเพ็ชร์ ที่ให้ความกรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา และให้คำแนะนำจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ วิชัย หโยดม และผู้ช่วยศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว ที่ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะในการทำวิทยานิพนธ์พร้อมทั้งเป็นกำลังใจมาตลอด

ขอขอบคุณอาจารย์ สุพพิชา จันทร์โยธา ที่กรุณาให้คำปรึกษาในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นประโยชน์มากในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอขอบคุณ คุณอาภรณ์ เนื้อนวล ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการจัดพิมพ์เป็นรูปเล่ม

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ช

สารบัญภาพ ..... ฌ

บทที่

1. บทนำ 1

1.1 แนวเหตุผลทฤษฎีที่สำคัญหรือสมมติฐาน 1

1.2 วัตถุประสงค์ 2

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย 2

2. ทฤษฎีของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ 5

2.1 การสมดุลย์ของนิวตรอน 5

2.2 ระยะทางเฉลี่ยที่นิวตรอนเคลื่อนที่ตั้งแต่ออกจากต้นกำเนิด จนกระทั่งถูกดูดกลืน 6

2.3 ทฤษฎีการฟุ้งกระจายของนิวตรอน 8

2.4 การคำนวณหาจำนวนนิวตรอนที่รั่วออกไปจากระบบ 9

2.5 ความยาวของการฟุ้งกระจาย 11

2.6 สมการการฟุ้งกระจาย 12

2.7 เงื่อนไขขอบเขตสำหรับสมการการฟุ้งกระจายของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ 13

2.8 การลดพลังงานของนิวตรอนในตัวกลางอนันต์โดยไม่ถูกดูดกลืน 14

2.9 การลดพลังงานของนิวตรอนในตัวกลางอนันต์โดยมีการดูดกลืน 16

หน้า

3. เงื่อนไขในการทำให้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เกิดการวิกฤต 18

3.1 มัลติพลิเคชัน แฟกเตอร์ (multiplication factor) ... 18

3.2 สูตรสี่แฟกเตอร์ (four factor formula) 20

3.3 สมการวิกฤตของนิวตรอนหนึ่งพวก 24

3.4 สมการวิกฤตของนิวตรอนสองพวก 25

3.5 การฟุ้งกระจายแบบเอจ 27

3.6 ขนาดวิกฤต 29

3.7 นันลีเกจ พรอบบาบิลิตี้ (non leakage probability) .. 33

3.8 เอฟเฟคทีฟ มัลติพลิเคชัน แฟกเตอร์ (effective multiplication factor) 34

3.9 บัคคลิงทรงเรขาคณิต 36

4. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบวิวิธพันธ์ 43

4.1 การคำนวณค่าเทอร์มัลยูติไลเซชัน 45

4.2 การคำนวณค่ารีโซแนนซ์ เอสเคป พรอบบาบิลิตี้ 53

4.3 การคำนวณค่าฟาสต์ ฟิชชัน แฟกเตอร์ (ε) 62

4.4 การคำนวณค่า η 68

5. ตัวสะท้อนนิวตรอน 69

5.1 ผลจากตัวสะท้อนนิวตรอน 69

5.2 วิธีหนึ่งพวก (one group method) 71

5.3 รีเฟลคเตอร์ เซฟวิง (reflector saving) 73

5.4 วิธีสองพวก (two group method) 74

5.5 รีแอคติวิตี้ (reactivity) 87

6. วิธีการและผลการคำนวณ 88

6.1 การคำนวณโดยใช้โลหะยูเรเนียมเป็นเชื้อเพลิงน้ำชนิดหนักเป็นตัวหน่วงนิวตรอน และอะลูมินัมเป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิง 95

หน้า

6.1.1 จำนวนแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 1 แท่ง 95

6.1.2 จำนวนแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 4 แท่งต่อหนึ่งมัด 103

6.2 การคำนวณโดยใช้ยูเรเนียมไดออกไซด์เป็นเชื้อเพลิงน้ำชนิดหนักเป็นตัวหน่วงนิวตรอน และอะลูมินัมเป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิง 121

6.3 การคำนวณโดยใช้ยูเรเนียมไดออกไซด์เป็นเชื้อเพลิงน้ำชนิดหนักเป็นตัวหน่วงนิวตรอน และอะลูมินัมเป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิง โดยมีชั้นของท่อความดันเป็นอะลูมินัม 128

6.4 การคำนวณโดยใช้โลหะยูเรเนียมเป็นเชื้อเพลิงน้ำชนิดหนักเป็นตัวหน่วงนิวตรอน มีอะลูมินัมเป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิงและท่อความดัน 143

6.5 การคำนวณกรณีที่มีตัวสะท้อนนิวตรอน 160

7. สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ 184

7.1 ข้อสรุปผลการคำนวณ 184

7.2 ข้อวิจารณ์ผลการคำนวณ 190

7.3 ข้อเสนอแนะ 192

เอกสารอ้างอิง 206

ภาคผนวก 207

ก. ค่าคงที่ของธาตุต่าง ๆ และค่าภาคตัดขวางสำหรับเทอร์มัลนิวตรอน . 208

ข. ค่าคงที่ต่าง ๆ ของตัวหน่วงนิวตรอน 211

ค. ค่าคงที่ในการพุ่งกระจายของตัวหน่วงนิวตรอนสำหรับเทอร์มัลนิวตรอน 212

ง. ค่าเบสเสล 213

จ. รูปแสดงค่า k_{eff} ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาของตัวสะท้อนนิวตรอนซึ่งเป็นน้ำชนิดหนัก 236

ประวัติ 237

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 แสดงจำนวนนิวตรอนเฉลี่ยที่เกิดต่อจำนวนนิวตรอนที่ถูกจับในเชื้อเพลิง. 21

3.2 แสดงจำนวนนิวตรอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกริยาฟิชชันของนิวตรอนแต่ละครั้ง. 22

3.3 แสดงค่าบัคคลิงและการกระจายของฟลักซ์ในแกนเครื่องปฏิกรณ์ 31

4.1 แสดงค่าคงที่ a และ b ของเชื้อเพลิงยูเรเนียมธรรมชาติ 57

4.2 แสดงค่า k_o ของเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ ต่อรีโซแนนซ์นิวตรอน 61

4.3 แสดงค่า k_1 ของตัวหน่วงนิวตรอนชนิดต่าง ๆ ต่อรีโซแนนซ์นิวตรอน. 62

4.4 แสดงค่าคงที่ของยูเรเนียมธรรมชาติ 65

4.5 แสดงค่าคงที่ต่าง ๆ ของนิวเคลียสบางชนิด 68

6.1 แสดงผลการคำนวณโดยมีโลหะยูเรเนียมเป็นเชื้อเพลิงน้ำชนิดหนักเป็นตัวหน่วงนิวตรอน อะลูมินัมเป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิง เมื่อ

(ก) จำนวนแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 1 แท่ง 110

(ข) จำนวนแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 3 แท่งต่อหนึ่งมัด 111

(ค) จำนวนแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 4 แท่งต่อหนึ่งมัด 112

(ง) จำนวนแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 6 แท่งต่อหนึ่งมัด 113

(จ) จำนวนแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 7 แท่งต่อหนึ่งมัด 114

(ฉ) จำนวนแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 12 แท่งต่อหนึ่งมัด 115

6.2 แสดงผลการคำนวณโดยมียูเรเนียมไดออกไซด์เป็นเชื้อเพลิงน้ำชนิดหนักเป็นตัวหน่วงนิวตรอน อะลูมินัมเป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิงและท่อความดัน เมื่อ

(ก) จำนวนแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 1 แท่ง 137

(ข) จำนวนแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 3 แท่งต่อหนึ่งมัด 138

(ค) จำนวนแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 4 แท่งต่อหนึ่งมัด 139

(ง) จำนวนแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 6 แท่งต่อหนึ่งมัด 140

(จ) จำนวนแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 7 แท่งต่อหนึ่งมัด 141

(ฉ) จำนวนแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 12 แท่งต่อหนึ่งมัด 142

หน้า

6.3 โลหะยูเรเนียม เป็นเชื้อเพลิง น้ำชนิดหนัก เป็นตัวหน่วงนิวตรอน อะลูมินัม เป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิง 149

6.4 ยูเรเนียมไดออกไซด์ เป็นเชื้อเพลิง น้ำชนิดหนัก เป็นตัวหน่วงนิวตรอน อะลูมินัม เป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิง 150

6.5 โลหะยูเรเนียม เป็นเชื้อเพลิง น้ำชนิดหนัก เป็นตัวหน่วงนิวตรอน เซอร์โคเนียม เป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิง 151

6.6 ยูเรเนียมไดออกไซด์ เป็นเชื้อเพลิง น้ำชนิดหนัก เป็นตัวหน่วงนิวตรอน เซอร์โคเนียม เป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิง 152

6.7 โลหะยูเรเนียม เป็นเชื้อเพลิง น้ำชนิดหนัก เป็นตัวหน่วงนิวตรอน อะลูมินัม เป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิงและท่อความดัน 154

6.8 ยูเรเนียมไดออกไซด์ เป็นเชื้อเพลิงน้ำชนิดหนัก เป็นตัวหน่วงนิวตรอน อะลูมินัม เป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิงและท่อความดัน 155

6.9 โลหะยูเรเนียม เป็นเชื้อเพลิง น้ำชนิดหนัก เป็นตัวหน่วงนิวตรอน เซอร์โคเนียม เป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิงและท่อความดัน 156

6.10 ยูเรเนียมไดออกไซด์ เป็นเชื้อเพลิงน้ำชนิดหนัก เป็นตัวหน่วงนิวตรอน เซอร์โคเนียม เป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิงและท่อความดัน 157

6.11 โลหะยูเรเนียม เป็นเชื้อเพลิงน้ำชนิดหนัก เป็นตัวหน่วงนิวตรอน เซอร์-โคเนียม เป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิง อะลูมินัม เป็นท่อความดัน 158

6.12 ยูเรเนียมไดออกไซด์ เป็นเชื้อเพลิงน้ำชนิดหนัก เป็นตัวหน่วงนิวตรอน เซอร์โคเนียม เป็นวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิง อะลูมินัม เป็นท่อความดัน ... 159

7.1 แสดงผลการคำนวณเลียนแบบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบ MZFR 194

7.2 แสดงผลการคำนวณเลียนแบบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบ FR-2 195

7.3 แสดงผลการคำนวณโดยเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบ FR-2 ... 197

7.4 แสดงผลการคำนวณโดยเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบ MZFR เมื่อใช้ Al หุ้มแท่งเชื้อเพลิงและท่อความดัน 200

7.5 แสดงผลการคำนวณโดยเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบ MZFR เมื่อใช้ Zr หุ้มแท่งเชื้อเพลิงและท่อความดัน 203

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงการชนแบบยืดหยุ่นซึ่งเกิดจากนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของตัวกลางที่เป็นของแข็ง	7
2.2	แสดงการไหลของนิวตรอนในปริมาตรสี่เหลี่ยมเล็ก ๆ	10
2.3	แสดงการลดพลังงานของนิวตรอน	15
3.1	แสดงจำนวนนิวตรอน $n_t(t)$ กับเวลา (time)	19
3.2	แสดงรูปทรงต่าง ๆ ของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์	32
3.3	แสดงวัฏจักรของเทอร์มัลนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์	35
3.4	แสดงการกระจายของฟลักซ์ในเครื่องปฏิกรณ์รูปทรงกระบอก	37
3.5	แสดงค่าเบสเสลฟังก์ชันลำดับศูนย์	40
4.1	แสดงการกระจายของฟลักซ์ของเทอร์มัลนิวตรอนในเชื้อเพลิงและตัวหน่วงนิวตรอน	44
4.2	แสดงการจัดเรียงแท่งเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์แบบวิวิธพันธ์ ...	47
4.3	แสดงภาคตัดขวางของแท่งเชื้อเพลิง	51
4.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P กับ $N_o\sigma_t R_o$	66
4.5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ε กับรัศมีของแท่งเชื้อเพลิง	67
5.1	แสดงการกระจายของเทอร์มัลฟักซ์ในเครื่องปฏิกรณ์เมื่อมีและไม่มีตัวสะท้อนนิวตรอน	70
5.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของตัวสะท้อนนิวตรอนกับรีเฟลคเตอร์เซฟวิง	75
5.3	แสดงเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์รูปทรงกระบอกที่มีตัวสะท้อนนิวตรอนหุ้มด้านข้าง	84
5.4	แสดงเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์รูปทรงกระบอกที่มีตัวสะท้อนนิวตรอนหุ้มทั้งบนและล่าง	86

หน้า

6.1 (ก) จำนวนแท่งเชื้อเพลิง 1 แท่ง ไม่มีท่อความดัน 89

(ข) จำนวนแท่งเชื้อเพลิง 3 แท่งต่อหนึ่งมัด ไม่มีท่อความดัน 89

(ค) จำนวนแท่งเชื้อเพลิง 4 แท่งต่อหนึ่งมัด ไม่มีท่อความดัน 90

(ง) จำนวนแท่งเชื้อเพลิง 6 แท่งต่อหนึ่งมัด ไม่มีท่อความดัน 90

(จ) จำนวนแท่งเชื้อเพลิง 7 แท่งต่อหนึ่งมัด ไม่มีท่อความดัน 91

(ฉ) จำนวนแท่งเชื้อเพลิง 12 แท่งต่อหนึ่งมัด ไม่มีท่อความดัน 91

6.2 (ก) จำนวนแท่งเชื้อเพลิง 1 แท่ง มีท่อความดัน 92

(ข) จำนวนแท่งเชื้อเพลิง 3 แท่งต่อหนึ่งมัด มีท่อความดัน 92

(ค) จำนวนแท่งเชื้อเพลิง 4 แท่งต่อหนึ่งมัด มีท่อความดัน 93

(ง) จำนวนแท่งเชื้อเพลิง 6 แท่งต่อหนึ่งมัด มีท่อความดัน 93

(จ) จำนวนแท่งเชื้อเพลิง 7 แท่งต่อหนึ่งมัด มีท่อความดัน 94

(ฉ) จำนวนแท่งเชื้อเพลิง 12 แท่งต่อหนึ่งมัด มีท่อความดัน 94

6.3 (ก) แสดงจำนวนแท่งเชื้อเพลิง 4 แท่งต่อหนึ่งมัด โดยไม่มีท่อ
ความดัน ซึ่งเรียงมัดเชื้อเพลิงแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส 104

(ข) แสดงแนวคิดคำนวณ โดยรวม 4 แท่งเป็นแท่งเดียว 104

6.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของมัดเชื้อเพลิงกับค่า f
ซึ่งแต่ละเส้นจะหมายถึงจำนวนแท่งเชื้อเพลิงต่อหนึ่งมัด 117

6.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของมัดเชื้อเพลิงกับค่า p
ซึ่งแต่ละเส้นจะหมายถึงจำนวนแท่งเชื้อเพลิงต่อหนึ่งมัด 118

6.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของมัดเชื้อเพลิงกับค่า k_∞
ซึ่งแต่ละเส้นจะหมายถึงจำนวนแท่งเชื้อเพลิงต่อหนึ่งมัด 119

6.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของมัดเชื้อเพลิงกับค่า B^2
ซึ่งแต่ละเส้นจะหมายถึงจำนวนแท่งเชื้อเพลิงต่อหนึ่งมัด 120

6.8 (ก) แสดงจำนวนแท่งเชื้อเพลิง 4 แท่งต่อหนึ่งมัด โดยมีท่อความดัน. 129

(ข) แสดงแนวการคิดคำนวณโดยรวมเอา 4 แท่งเป็นแท่งเดียว ... 129

หน้า

6.9 แสดงเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์รูปทรงกระบอกที่หุ้มด้วยตัวสะท้อนนิวตรอน 161

6.10 แสดงวิธีการหาค่า k_{∞} ที่ทำให้เครื่องปฏิกรณ์ที่หุ้มด้วยตัวสะท้อนนิวตรอนเกิดกรณีวิกฤต เมื่อค่า k_{eff} มากกว่า 1 173

6.11 แสดงวิธีการหาค่า k_{∞} ที่ทำให้เครื่องปฏิกรณ์ที่หุ้มด้วยตัวสะท้อนนิวตรอนเกิดกรณีวิกฤต เมื่อ k_{eff} เท่ากับ 1 182

7.1 แสดงโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาเบสิค เมื่อยังไม่มีท่อความดัน . 185

7.2 แสดงโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาเบสิค เมื่อมีชั้นท่อความดัน ... 186

7.3 แสดงการจัดเรียงแท่งเชื้อเพลิงแบบรูปหกเหลี่ยมด้านเท่า 188