บทที่ 4

ผลการศึกษาและการคำนวณ

ในการตรวจสอบชุดโปรแกรม VPI ที่ปรับปรุงใหม่ให้ใช้ได้กับเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ไอบีเอ็มพีซี ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกจะเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของชุดโปรแกรม VPI เมื่อประมวลผลด้วยเครื่องไอบีเอ็มพีซี และส่วนที่สองจะเป็นการใช้ชุดโปรแกรมทำการคำนวณปัญหาแบบต่างๆ

4.1 <u>การตรวจสอบความถูกต้องของชุดโปรแกรม VPI</u>

เป็นการตรวจสอบความถูกต้องของชุดโปรแกรม VPI เมื่อประมวลผลด้วยเครื่องไอบีเอ็มพีซีโดยเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้เมื่อประมวลผลด้วยเครื่องซีดีซีรุ่นไซเบอร์-73 (CDC CYBER-73) ซึ่งเป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดกลาง

4.1.1 การตรวจสอบความถูกต้องของมอดูล FARCON

FARCON เป็นมอดูลที่ใช้ในการคำนวณค่าคงที่ต่างๆ ของกลุ่มนิวตรอนเร็วและเรโซแนนซ์ ข้อมูลที่ให้กับมอดูลเป็นข้อมูลเดียวกันกับที่ใช้เมื่อประมวลผลด้วยเครื่องซีดีซี รายละเอียดของข้อมูลอินพุทเมื่อเขียนตามรูปแบบที่ใช้กับเครื่องไอบีเอ็มพีซี

```
number density (atom/barn-cm) of ZIRCALOY-2     = .55871E-2
number density (atom/barn-cm) of HYDROGEN       = .28248E-1
number density (atom/barn-cm) of OXYGEN         = .27470E-1
number density (atom/barn-cm) of BERYLLIUM      = 0
number density (atom/barn-cm) of BORON-10       = 0
number density (atom/barn-cm) of CARBON         = 0
number density (atom/barn-cm) of SS-304         = 0
number density (atom/barn-cm) of URANIUM-235    = .24023E-3
number density (atom/barn-cm) of URANIUM-236    = 0
number density (atom/barn-cm) of URANIUM-238    = .64192E-2
number density (atom/barn-cm) of PLUTONIUM-239 = 0
number density (atom/barn-cm) of PLUTONIUM-240 = 0
number density (atom/barn-cm) of PLUTONIUM-241 = 0
number density (atom/barn-cm) of PLUTONIUM-242 = 0
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

fuel volume fraction in the cell	= .30144
clad volume fraction in the cell	= .13648
moderator volume fraction in the cell	= .56208
fuel enrichment (fraction of U-235)	= .036
fuel surface temperature (K)	= 563
fuel element center temperature (K)	= 1126
fuel element radius (cm)	= .455
type of cell geometry	= hexagonal
uranium dioxide density (g/cm**3)	= 9.9245
res. escape prob. for group 33	= 1
buckling (1/cm**2)	=.00331

ผลการคำนวณที่ได้จากไอบีเอ็มพีซี พบว่าเหมือนกันทุกประการกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยเครื่องซีดีซี เวลาที่ใช้ในการประมวลผลด้วยเครื่องไอบีเอ็มพีซีเท่ากับ 53.5 วินาที ส่วนเครื่องซีดีซีใช้เวลาเพียง 1.479 วินาที (8) ผลลัพธ์จากการคำนวณบางส่วน แสดงอยู่ในตาราง 4.1 รายละเอียดของผลลัพธ์ทั้งหมดแสดงอยู่ในภาคผนวก ค

ตาราง 4.1 ผลการคำนวณมอดูล FARCON เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากไอบีเอ็มพีซีกับซีดีซี

ผลลัพธ์	ไอบีเอ็มพีซี		ซีดีซี (8)	
	fast	resonance	fast	resonance
สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (ซม.)	1.663	.820	1.663	.820
ภาคตัดขวางของการดูดกลืน (ซม.$^{-1}$)	.27162E-2	.20660E-1	.27162E-2	.20660E-1
ภาคตัดขวางริมูแวล (ซม.$^{-1}$)	.39044E-1	.52146E-1	.39044E-1	.52146E-1
ν*ภาคตัดขวางของฟิชชัน (ซม.$^{-1}$)	.32450E-2	.11801E-1	.32450E-2	.11801E-1
K*ภาคตัดขวางของฟิชชัน	.37112E-13	.15152E-12	.37112E-13	.15152E-12

หมายเหตุ : K พลังงานเฉลี่ยในหน่วย วัตต์-วินาที/ฟิชชัน

ผลลัพธ์ของมอดูล FARCON ประกอบด้วย

- ฟลักซ์นิวตรอนและค่าเรโซแนนซ์เอสเคปพรอบาบิลิตีสำหรับ 33 กลุ่มพลังงาน

- ค่าคงที่มหภาคได้แก่ สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย ภาคตัดขวางของการดูดกลืน ภาคตัดขวางรีมูแวลชนิดยืดหยุ่น ค่าฟลักซ์ของกลุ่มใหญ่ ค่านิวคูณภาคตัดขวางการเกิดฟิชชัน ($\nu\Sigma_f$) ค่าแคปปาคูณภาคตัดขวางของการเกิดฟิชชัน ($K\Sigma_f$) สำหรับกลุ่มนิวตรอนเร็วและเรโซแนนซ์ ค่าพลังงานที่ปล่อยออกมาต่อฟิชชันที่ใช้คำนวณในมอดูล FARCON แสดงอยู่ในตาราง 4.2

ตาราง 4.2 พลังงานที่ปล่อยออกมาต่อฟิชชัน (8)

isotope	energy value (j)
U-235	3.12E-11
U-236	3.12E-11
U-238	3.09E-11
Pu-239	3.24E-11
Pu-240	3.12E-11
Pu-241	3.27E-11
Pu-242	3.12E-11

4.1.2 การตรวจสอบความถูกต้องของมอดูล SLOCON

SLOCON เป็นมอดูลที่ใช้ในการคำนวณค่าคงที่ต่างๆ ของกลุ่มนิวตรอนเทอร์มัล ข้อมูลอินพุทสำหรับปัญหาทดสอบ มีรายละเอียดดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

radius of homogenized basic reactor cell (cm) = .687567

buckling (1/cm**2) = .00331

moderator temperature (K) = 550

energy increment (eV) = .01

element	mass density (g/cm**3)	number of atom / molecule	volume fraction
HYDROGEN	.75091	2	.562083

OXYGEN	1.0	1	.04560
FP Pu-239	0	0	0
CARBON	0	0	0
PLUTONIUM-240	0	0	0
URANIUM-238	9.92453	1	.29059
PLUTONIUM-242	0	0	0
URANIUM-235	9.92453	1	.01085
URANIUM-236	0	0	0
PLUTONIUM-239	0	0	0
PLUTONIUM-241	0	0	0
XENON-135	0	0	0
SAMARIUM-149	0	0	0
ZIRCALOY-2	6.5	1	.13648
SS-304	0	0	0
BORON-10	0	0	0
FP U-235	0	0	0

ผลการคำนวณเปรียบเทียบระหว่างไอบีเอ็มพีซีกับเครื่องซีดีซี พบว่าใกล้เคียงกันมากคือมีความแตกต่างกันไม่เกิน 5.8×10^{-5}% เวลาที่ใช้ในการประมวลผลด้วยเครื่องไอบีเอ็มพีซีเท่ากับ 8 นาที 45 วินาที ส่วนเครื่องซีดีซีใช้เวลา 1.38 วินาที (8) ผลลัพธ์จากการคำนวณบางส่วนแสดงในตาราง 4.3 รายละเอียดของผลลัพธ์ทั้งหมดแสดงอยู่ในภาคผนวก ค

ตาราง 4.3 ผลการคำนวณมอดูล SLOCON เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากไอบีเอ็มพีซีกับซีดีซี

ผลลัพธ์	ไอบีเอ็มพีซี	ซีดีซี (8)
สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายเฉลี่ย (ซม.)	.350386	.350386
ภาคตัดขวางมหภาคของการดูดกลืนเฉลี่ย (ซม.$^{-1}$)	.106480	.106480
ν*ภาคตัดขวางฟิชชันเฉลี่ย (ซม.$^{-1}$)	.18935120	.18935109
ภาคตัดขวางฟิชชันเฉลี่ย (ซม.$^{-1}$)	.07792230	.07792226
ฟลักซ์เฉลี่ย (ซม.^{2}-วินาที)$^{-1}$	.1872E-02	.1872E-02

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สาเหตุที่ทำให้ได้ผลลัพธ์แตกต่างกัน และเวลาในการประมวลผลแตกต่างกันมาก เมื่อเทียบกับการประมวลผลของมอดูล FARCON มาจากสาเหตุดังนี้

(1) โปรแกรมย่อยฟังก์ชัน ERF(X) ที่เขียนขึ้นเองด้วยเครื่องไอบีเอ็มพีซี ทำงานได้ช้ากว่าฟังก์ชันมาตรฐาน ERF(X) ที่มีอยู่ในระบบคอมพิวเตอร์ขนาดใหญ่

(2) เกณฑ์ของความถูกต้องที่ใช้ในโปรแกรมย่อยฟังก์ชัน ERF(X) ค่อนข้างสูง ทำให้ต้องใช้เวลาคำนวณนาน

(3) ไอบีเอ็มพีซีและเครื่องซีดีซี มีความสามารถในการรับตัวเลขทศนิยมได้ยาวไม่เท่ากัน แต่อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างของผลการคำนวณที่เกิดขึ้นจัดว่าไม่มีนัยสำคัญเนื่องจากความแตกต่างอยู่ในระดับ 5.8×10^{-5}%

ผลลัพธ์ที่ได้จากมอดูล SLOCON ประกอบด้วย

- ค่าพลังงาน และค่าฟลักซ์นิวตรอนที่แต่ละจุดพลังงาน
- ค่าคงที่ของกลุ่มใหญ่ได้แก่ สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย ภาคตัดขวางมหภาคของการดูดกลืน ค่านิวคูณภาคตัดขวางของการเกิดฟิชชัน ภาคตัดขวางของการเกิดฟิชชัน และค่าฟลักซ์นิวตรอนเฉลี่ยตลอดช่วงพลังงานเทอร์มัล
- กราฟที่พล็อตระหว่างฟลักซ์นิวตรอนกับพลังงาน
- ความหนาแน่นกำลังเฉลี่ยตลอดช่วงพลังงานเทอร์มัล

4.1.3 การตรวจสอบความถูกต้องของมอดูล DISFAC

DISFAC เป็นมอดูลที่ใช้ในการคำนวณค่าเทอร์มัลยูทิไลเซชันแฟกเตอร์และค่าดิสแอดวานเตจแฟกเตอร์

รายละเอียดข้อมูลอินพุทของปัญหาทดสอบ

absorption cross section for moderator (1/cm)	= .00858
scattering cross section for moderator (1/cm)	= 1.39150
absorption cross section for fuel (1/cm)	= .30520
scattering cross section for fuel (1/cm)	= .6421
fission cross section for fuel (1/cm)	= .23285
diffusion coefficient for fuel (cm)	= .35185
diffusion coefficient for moderator (cm)	= 1.29962
radius of fuel rod (cm)	= .3775
center to center distance between fuel rods (cm)	= 1.80956
type of cell geometry	= hexagonal

ผลการคำนวณเมื่อประมวลผลด้วยไอบีเอ็มพีซี พบว่าเหมือนกันทุกประการกับผลที่ได้จากเครื่องซีดีซี ดังแสดงในตาราง 4.4 เวลาในการประมวลผลด้วยไอบีเอ็มพีซี เท่ากับ 15 วินาที ส่วนเครื่องซีดีซีใช้เวลา .051 วินาที (8) รายละเอียดของผลลัพธ์ทั้งหมดแสดงอยู่ในภาคผนวก ค

ตาราง 4.4 ผลการคำนวณมอดูล DISFAC เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากไอบีเอ็มพีซีกับซีดีซี

ผลลัพธ์	ไอบีเอ็มพีซี	ซีดีซี(8)
อัตราส่วนปริมาตร (ตัวหน่วงนิวตรอน/เชื้อเพลิง)	8.50133	8.50133
เทอร์มัลยูทิไลเซชัน	.78631	.78631
ดิสแอดวานเตจแฟกเตอร์	1.13713	1.13713
ภาคตัดขวางของการดูดกลืน (ซม.$^{-1}$)	.03639	.03639
ค่าคงที่ของการแพร่กระจาย (ซม.$^{-1}$)	.30472	.30472
ภาคตัดขวางการเกิดฟิชชัน (ซม.$^{-1}$)	.02183	.02183

ผลลัพธ์ที่ได้จากมอดูล DISFAC ประกอบด้วย

- อัตราส่วนปริมาตรระหว่างวัสดุหน่วงนิวตรอนกับวัสดุเชื้อเพลิง
- เทอร์มัลยูทิไลเซชัน
- ดิสแอดวานเตจแฟกเตอร์
- ภาคตัดขวางมหภาคของการเกิดฟิชชันและการดูดกลืน และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายเฉลี่ยทั่วเซลล์

4.1.4 การตรวจสอบความถูกต้องของมอดูล ODOG

ODOG เป็นมอดูลที่ใช้ในการคำนวณสมการการแพร่กระจายของนิวตรอน 1 กลุ่มใน 1 มิติ รายละเอียดของข้อมูลตามรูปแบบที่ใช้เตรียมอินพุท สำหรับเครื่องไอบีเอ็มพีซี มีดังต่อไปนี้

number of region	= 2
type of geometry	= cylinder
eigenvalue convergence criterion	= 0.1E-5
distance (cm) to interface of region #1	= 50

distance (cm) to interface of region #2 = 78

diffusion coefficient (cm) for region #1 = 7.4

diffusion coefficient (cm) for region #2 = 2.12

absorp. cross section (1/cm) for region #1 = .591

absorp. cross section (1/cm) for region #2 = .07

Nu*fission cross section (1/cm) for region #1 = .698

Nu*fission cross section (1/cm) for region #2 = .11

axial buckling (1/cm**2) = .00331

buckling in X-direction (1/cm**2) = 0

buckling in Y-direction (1/cm**2) = 0

ผลการคำนวณ พบว่ามีความใกล้เคียงกันมาก ความแตกต่างของผลลัพธ์ประมาณ 0.1×10^{-4}% สาเหตุของความแตกต่างนี้เนื่องจากความสามารถในการประมวลผลตัวเลขทศนิยม เวลาที่ใช้ประมวลผลด้วยไอบีเอ็มพีซีเท่ากับ 4 นาที ส่วนเครื่องซีดีซีใช้เวลา .948 วินาที (8) ผลลัพธ์บางส่วนแสดงอยู่ในตาราง 4.5 ส่วนผลลัพธ์ทั้งหมดแสดงอยู่ในภาคผนวก ค

ตาราง 4.5 ผลการคำนวณมอดูล ODOG เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากไอบีเอ็มพีซีกับซีดีซี

ผลลัพธ์	ไอบีเอ็มพีซี	ซีดีซี (8)
จำนวนเอาท์เตอร์ไอเทอเรชัน	166	166
นอร์แมไลซ์ฟลักซ์ที่ระยะ (ซม.)		
r = 1.2821	.2076	.2072
r = 21.7949	.2662	.2658
r = 59.8	1.0000	1.0000
r = 76.6	.1125	.1125
ค่าไอเกน	1.1654	1.1656

ผลลัพธ์ที่ได้จากมอดูล ODOG ประกอบด้วย

- เมทริกซ์สัมประสิทธิ์ของสมการการแพร่กระจายที่อยู่ในรูปไฟไนท์ดิฟเฟอเรนซ์
- จำนวนไอเทอเรชันที่ทำให้เกิดการลู่เข้าของค่าไอเกน

- ฟลักซ์นิวตรอนที่แต่ละจุดเมชนอร์แมไลซ์ไปที่ 1
- ค่าไอเกน

4.1.5 การตรวจสอบความถูกต้องของมอดูล ODMUG

ODMUG เป็นมอดูลที่ใช้คำนวณสภาวะวิกฤตของนิวตรอน 3 กลุ่มใน 1 มิติ ข้อมูลอินพุทของมอดูลนี้บางส่วนได้จากผลลัพธ์ของมอดูล FARCON และ SLOCON รายละเอียดของข้อมูลในปัญหาทดสอบ มีดังต่อไปนี้

left side boundary condition	= zero current
right side boundary condition	= zero flux
type of geometry	= cylinder
number of material region	= 4
eigenvalue search option	= no search
eigenvalue convergence criterion	= -1.E-4
number of group	= 3
width (cm) of region #1	= 82.41
width (cm) of region #2	= 38.89
width (cm) of region #3	= 22.89
width (cm) of region #4	= 55.00
height (cm)	= 250.00

region 1	group 1	group 2	group 3
diffusion coefficient (cm)	1.679	.8580	.3604
absorp. cross section (1/cm)	.2476E-2	.1593E-1	.5779E-1
removal cross section (1/cm)	.3597E-1	.4914E-1	0
Nu*fission cross section (1/cm)	.2674E-2	.5197E-2	.8578E-1
poison absorp. cross section (1/cm)	0	0	0
Nu	2.623	2.434	2.439
buckling (1/cm**2)	.00331	.00331	.00331

region 2			
diffusion coefficient (cm)	1.680	.8540	.3560
absorp. cross section (1/cm)	.2567E-2	.1741E-1	.7755E-1
removal cross section (1/cm)	.3589E-1	.4831E-1	0
Nu*fission cross section (1/cm)	.2882E-2	.7767E-2	.1277
poison absorp. cross section (1/cm)	0	0	0
Nu	2.623	2.434	2.439

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

buckling (1/cm**2)	.00331	.00331	.00331
region 3			
diffusion coefficient (cm)	1.682	.8480	.3504
absorp. cross section (1/cm)	.2709E-2	.1970E-1	.1065
removal cross section (1/cm)	.3577E-1	.4706E-1	0
Nu*fission cross section (1/cm)	.3205E-2	.1173E-1	.1893
poison absorp. cross section (1/cm)	0	0	0
Nu	2.623	2.434	2.439
buckling (1/cm**2)	.00331	.0031	.00331
region 4			
diffusion coefficient (cm)	.727	.278	.1548
absorp. cross section (1/cm)	.6039E-3	.1032E-2	.1878E-1
removal cross section (1/cm)	.2524	.1561	.1561
Nu*fission cross section (1/cm)	0	0	0
poison absorp. cross section (1/cm)	0	0	0
Nu	0	0	0
buckling (1/cm**2)	.00331	.00331	.00331

power level (watts) = 4.4E+8

designed K_{eff} value for poison search = -

convergence criterion for poison search = -

ผลการคำนวณ เมื่อประมวลผลด้วยเครื่องไอบีเอ็มพีซีพบว่าได้ค่าใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่องซีดีซี โดยแตกต่างกันประมาณ .0001 % เวลาที่ใช้ประมวลผลด้วยเครื่องไอบีเอ็มพีซีเท่ากับ 4 นาที 40 วินาที ส่วนเครื่องซีดีซีใช้เวลา 1.38 วินาที (8) ผลลัพธ์จากการคำนวณบางส่วน แสดงในตาราง 4.6 รายละเอียดของผลลัพธ์ทั้งหมดแสดงอยู่ในภาคผนวก ค

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 4.6 ผลการคำนวณมอดุล ODMUG เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากไอบีเอ็มพีซีกับซีดีซี

ผลลัพธ์	ไอบีเอ็มพีซี	ซีดีซี (8)
จำนวนไอเทอเรชัน	23	23
เอฟเฟคทีฟมัลติพลิเคชัน	1.04553	1.04553

ผลลัพธ์ที่ได้จากมอดูล ODMUG ประกอบด้วย

กรณีที่ค่าเกณฑ์การลู่เข้าของค่าไอเกนเป็นลบ (EPS < 0) จะแสดงรายละเอียดต่างๆ ของแต่ละไอเทอเรชัน คือ

- หมายเลขไอเทอเรชัน
- ค่าไอเกน
- หมายเลขไอเทอเรชันแบบเชบีเชฟ (Chebyshev iteration) สำหรับวงรอบใหม่ - 1
- ค่า residuals

$$R_i(l) = \sum_n \left| \phi_n^{i(l)} - \phi_n^{i(l-1)} \right|$$

i คือเลขแสดงกลุ่มนิวตรอน n คือเลขประจำจุดเมช

- ค่าไอเกนสูงและต่ำ (upper and lower eigenvalues)

$$\bar{\lambda}^{(l)} = \max_n \lambda_n^{(l)} \quad , \quad \underline{\lambda}^{(l)} = \min_n \lambda_n^{(l)}$$

เมื่อ

$$\lambda_n^{(l)} = \frac{\sum_{i=1}^{G} \nu_i \Sigma^i_{f,n} \phi_n^{i(l)}}{\left(\sum_{i=1}^{G} \nu_i \Sigma^i_{f,n} \phi_n^{i(l-1)}\right)/\lambda^{(l-1)}}$$

$\lambda^{(l)}$ เป็นค่าไอเกนในไอเทอเรชันที่ l

- $$\epsilon(l) = \frac{\bar{\lambda}^{(l)} - \underline{\lambda}^{(l)}}{\lambda^{(l)}}$$

ถ้าค่า EPS < 0 จะมีการแสดงข้อมูลที่ใช้คำนวณในกระบวนการเร่งการลู่เข้าแบบเชบีเชฟ (Chebyshev technique) (6,8) ได้แก่

- $$SIGB = 1/G \sum_{i=1}^{G} \frac{R_i(l-1)}{R_i(l-2)}$$
- RATIO เป็นปริมาณที่ใช้หาค่าเกณฑ์การลู่เข้าจริง โดย RATIO < EPS

$$RATIO = \frac{\epsilon(l)}{T_m(2/\bar{\sigma} - 1)}$$

เมื่อ σ เป็นอัตราส่วนโดมิแนนซ์ (dominance ratio) และ T_m เป็นเชบีเชฟโพลีนอเมียลลำดับที่ m

- ค่าพารามิเตอร์นอกช่วง (extrapolation parameters), $\theta(l)$

ถ้า $\epsilon(l)/2$ < EPS จะพิมพ์ข้อความ "eigenvalue convergence achieved" แล้วพิมพ์ค่าเอฟเฟคทีฟมัลติพลิเคชันแฟกเตอร์ และค่าฟลักซ์ที่แต่ละจุดเมชและแต่ละกลุ่มนิวตรอน

- เทอมต้นกำเนิด กำหนดด้วยสมการ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$S(r) = G(r) / \int_0^{\infty} G(r)dr \qquad \text{เมื่อ} \qquad G(r) = \sum_{i=1}^{G} \nu_i \Sigma_{f,i}(r)\, \phi_i(r)$$

- ค่าแฟกเตอร์ที่ใช้เพื่อนอร์แมไลซ์ค่าฟลักซ์ไปที่ระดับกำลังที่ต้องการ

4.1.6 การตรวจสอบความถูกต้องของมอดูล FBURN

FBURN เป็นมอดูลที่ใช้ในการคำนวณเบิร์นอัพของเชื้อเพลิงในแกนกลางของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ PWR ข้อมูลอินพุทของมอดูลนี้ บางส่วนได้จากผลลัพธ์ของมอดูล FARCON และ SLOCON รายละเอียดของข้อมูลในปัญหาทดสอบตามรูปแบบในการเตรียมข้อมูล มีดังต่อไปนี้

initial mass density of U-235 (g/cm**3)	.09377
initial mass density of U-236 (g/cm**3)	0
initial mass density of U-238 (g/cm**3)	2.54301
initial mass density of Pu-239 (g/cm**3)	0
initial mass density of Pu-240 (g/cm**3)	0
initial mass density of Pu-241 (g/cm**3)	0
initial mass density of Pu-242 (g/cm**3)	0
macro. removal cross section (1/cm) for group # 1	.03261
macro. removal cross section (1/cm) for group # 2	.046838
diffusion coefficient (cm) for group # 1	1.47651
diffusion coefficient (cm) for group # 2	.871895
diffusion coefficient (cm) for group # 3	.404913
buckling (1/cm**2)	.00331
number of burnup steps	16
power density (W/cm**3)	84.5
burnup step length (hours)	720
macro. absorp. cross section homogenized over	
clad and moderator for group # 1	5.3138E-4
group # 2	.17278E-2
group # 3	.15816E-1
macro. cell absorp. cross section (1/cm) for group # 1	.3214E-2
macro. cell absorp. cross section (1/cm) for group # 2	.2400E-1
macro. cell absorp. cross section (1/cm) for group # 3	.9291E-1
Nu * macro. cell fission cross section (1/cm) for group # 1	.3736E-2

หมายเหตุ: burnup step length คือ ช่วงเวลาที่กำหนดให้มีการคำนวณเบิร์นอัพ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Nu * macro. cell fission cross section (1/cm) for group # 2 .1385E-5

Nu * macro. cell fission cross section (1/cm) for group # 3 .1511

ผลการคำนวณเมื่อประมวลผลด้วยไอบีเอ็มพีซี พบว่าเหมือนกับผลลัพธ์ที่ได้เมื่อประมวลผลด้วยเครื่องซีดีซี เวลาที่ใช้ในการคำนวณด้วยไอบีเอ็มพีซี เท่ากับ 53.6 วินาที ส่วนเครื่องซีดีซี ใช้เวลา .624 วินาที (8) ผลการคำนวณบางส่วนแสดงอยู่ในตาราง 4.7 รายละเอียดของผลลัพธ์แสดงอยู่ในภาคผนวก ค

ตาราง 4.7 ผลการคำนวณมอดูล FBURN เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากไอบีเอ็มพีซีกับซีดีซี

ผลการคำนวณ		ไอบีเอ็มพีซี		ซีดีซี (8)	
burnup step number		4	12	4	12
	U-235	.806E-1	.592E-1	.806E-1	.592E-1
	U-236	.238E-2	.612E-2	.238E-2	.612E-2
isotope	U-238	.254E+1	.252E+1	.254E+1	.252E+1
density	Pu-239	.469E-2	.951E-2	.469E-2	.951E-2
(kg/1)	Pu-240	.336E-3	.161E-2	.336E-3	.161E-2
	Pu-241	.663E-4	.901E-3	.664E-4	.901E-3
	Pu-242	.212E-5	.982E-4	.212E-5	.982E-4
energy density (kW-hr/1)		60780	60574	60781	60573
total burnup (MWD/MT)		3848	11514	3848	11514
k_∞		1.026	.956	1.026	.956

ผลลัพธ์ที่ได้จากมอดูล FBURN ประกอบด้วย

- ค่าภาคตัดขวางจุลภาคชนิด 3 กลุ่มพลังงาน ของไอโซโทปยูเรเนียม พลูโทเนียม และฟิชชันโปรดักท์ ซึ่งเก็บอยู่ในมอดูลในรูปประโยค DATA (DATA statement)

เมื่อสิ้นสุดแต่ละขั้นเวลา ผลลัพธ์ที่จะแสดงได้แก่

- ค่ามัลติพลิเคชันแฟกเตอร์ชนิดอนันต์และค่าภาคตัดขวางพอยซันที่ต้องการเพื่อให้เกิดสภาวะวิกฤต
- ความหนาแน่นมวลของไอโซโทปยูเรเนียมและพลูโทเนียม
- ฟลักซ์กลุ่มนิวตรอนเทอร์มัลและค่าฟลูเอนซ์

- อัตราส่วนการแปลง
- เบิร์นอัพที่ขึ้นเวลาขณะนั้นและค่าเบิร์นอัพรวม
- ความหนาแน่นพลังงาน
- กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นไอโซโทป

4.2 <u>การตรวจสอบความถูกต้องของชุดโปรแกรมรุ่นเชื่อมโยง</u>

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณของชุดโปรแกรมรุ่นเชื่อมโยงทำการเตรียมเพียงครั้งเดียวด้วยโปรแกรม NEWVER.BAS รายละเอียดของข้อมูลตามรูปแบบที่ใช้ในการเตรียมอินพุท มีดังต่อไปนี้

CORE DATA เป็นข้อมูลต่างๆ ของแกนกลางเครื่องปฏิกรณ์

CELL DATA เป็นข้อมูลต่างๆ ของเซลล์เครื่องปฏิกรณ์

FUEL DATA เป็นข้อมูลของวัสดุเชื้อเพลิง

MODERATOR DATA เป็นข้อมูลของวัสดุหน่วงนิวตรอน

CLAD DATA เป็นข้อมูลของวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิง

BURNUP DATA เป็นข้อมูลเกี่ยวกับเบิร์นอัพของเชื้อเพลิง

CRITICALITY DATA เป็นข้อมูลของการคำนวณสภาวะวิกฤต

OTHER DATA เป็นข้อมูลของวัสดุอื่นที่มีในเซลล์

ข้อมูลเหล่านี้จะถูกคำนวณในโปรแกรม NEWVER.BAS แยกเป็นอินพุทของแต่ละมอดูล เนื่องจากในการคำนวณในโปรแกรม NEWVER เป็นการคำนวณอย่างต่อเนื่อง ค่าของตัวแปรต่างๆไม่มีการปัดเศษแตกต่างกับการคำนวณแบบแยกทีละส่วน ทำให้ผลลัพธ์ที่เป็นอินพุทของมอดูลต่างๆ มีความแตกต่างกันเล็กน้อยกับอินพุทที่ใช้คำนวณในโปรแกรมเดิม และอีกประการหนึ่งข้อมูลบางตัวที่เป็นอินพุทในชุดโปรแกรมเดิม มิได้เป็นผลลัพธ์ที่ได้จากมอดูลอื่นในชุดโปรแกรม VPI แต่เป็นข้อมูลจากแหล่งอื่น เช่นจากโปรแกรมมาตรฐานหรือเป็นข้อมูลเฉพาะของเครื่องปฏิกรณ์จริง ทำให้ข้อมูลของชุดโปรแกรมรุ่นเชื่อมโยงแตกต่างจากข้อมูลที่ใช้ในรุ่นปกติ ซึ่งจะมีผลในการตรวจสอบความถูกต้องของชุดโปรแกรมรุ่นเชื่อมโยง ดังนั้นจึงได้เปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ ในไฟล์ข้อมูลหลังจากที่คำนวณโดยโปรแกรม NEWVER ให้มีค่าตรงกับข้อมูลดั้งเดิม แล้วทำการคำนวณโดยใช้ชุดโปรแกรมรุ่นเชื่อมโยง เอาท์พุทของชุดโปรแกรมรุ่นเชื่อมโยงพบว่าให้ผลตรงกับที่ได้จากชุดโปรแกรมรุ่นปกติ ดังที่ได้แสดงแล้วในตาราง 4.1 ถึง 4.6

4.3 <u>การใช้ชุดโปรแกรม VPI ในการคำนวณปัญหาต่างๆ</u>

4.3.1 การคำนวณค่าคงที่ของกลุ่มนิวตรอนเร็วและเรโซแนนซ์

มอดูล FARCON ใช้ในการคำนวณค่าคงที่ของกลุ่มนิวตรอนเร็วและเรโซแนนซ์ของริเจียนต่างๆ ที่ประกอบกันเป็นเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งโดยทั่วไปประกอบด้วยริเจียนเชื้อเพลิง 2-3 ริเจียนที่มีความเข้มข้นยูเรเนียม-235 แตกต่างกัน ถัดจากริเจียนเชื้อเพลิงออกมาที่ตรงขอบของแกนกลางจะเป็นริเจียนของวัสดุ

สะท้อนนิวตรอน (reflector) ในการคำนวณจะต้องหาค่าคงที่ของแต่ละริเจียน

4.3.1.1 การคำนวณริเจียนเชื้อเพลิง ทำการคำนวณริเจียนเชื้อเพลิง 3 ริเจียน ซึ่งมีค่าความเข้มข้นยูเรเนียม-235 แตกต่างกัน คือ 1.6 , 2.4 และ 2.6 เปอร์เซ็นต์ เซลล์เป็นแบบหกเหลี่ยม (hexagonal) รัศมีแท่งเชื้อเพลิง .455 ซม. วัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิงเซอร์คาลอย-2 หนา .0775 ซม. ระยะห่างระหว่างเซลล์ที่อยู่ติดกัน 1.851994 ซม. อุณหภูมิที่ผิวแท่งเชื้อเพลิง 290 ซ. ที่ใจกลางแท่ง 853 ซ. ความหนาแน่นยูเรเนียมไดออกไซด์ 9.92453 กรัม/ซม.^{3} ผลการคำนวณแสดงอยู่ในตาราง 4.8

ตาราง 4.8 ผลการคำนวณค่าคงที่กลุ่มนิวตรอนเร็วและเรโซแนนซ์ของริเจียนเชื้อเพลิงที่มีความเข้มข้นยูเรเนียม-235 ต่างกัน

region	group	D (cm)	Σ_a (cm^{-1})	Σ_R (cm^{-1})	$\nu\Sigma_f$ (cm^{-1})	$K\Sigma_f$
region 1 1.6 %	fast	.648	.2493E-2	.3924E-1	.2721E-2	.3056E-13
	resonance	.825	.1694E-1	.5419E-1	.5285E-2	.6784E-13
region 2 2.4 %	fast	1.648	.2586E-2	.3916E-1	.2932E-2	.3320E-13
	resonance	.821	.1845E-1	.5335E-1	.7902E-2	.1015E-12
region 3 3.6 %	fast	1.651	.2725E-2	.3904E-1	.3248E-2	.3714E-13
	resonance	.816	.2069E-1	.5212E-1	.1179E-1	.1514E-12

4.3.1.2 การคำนวณริเจียนวัสดุสะท้อนนิวตรอน วัสดุสะท้อนนิวตรอนที่พิจารณาคือ น้ำธรรมดา ซึ่งเป็นชนิดที่ใช้โดยทั่วไปในเครื่องปฏิกรณ์แบบ PWR ในการคำนวณริเจียนตัวสะท้อนนิวตรอนของมอดูล FARCON เนื่องจากไม่มีมอดูล REP ซึ่งเป็นมอดูลที่ใช้คำนวณค่าเรโซแนนซ์เอสเคปพรอบาบิลิตี (resonance escape probability, REP) โดยเฉพาะจึงจำเป็นต้องใช้การคำนวณโดยมอดูล FARCON เท่าที่จะสามารถทำได้ ในการคำนวณตัวสะท้อนนิวตรอนโดยใช้มอดูล FARCON สามารถทำได้ 3 วิธี คือ

- วิธีที่ 1 กำหนดในอินพุทให้มีการคำนวณค่า REP สำหรับกลุ่มย่อยที่ 1-32 ภายในมอดูล กำหนด P(33)=1 และให้สัดส่วนปริมาตรของเชื้อเพลิงและวัสดุหุ้มแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับศูนย์ สัดส่วนปริมาตรของวัสดุหน่วงนิวตรอนเท่ากับ 1 ความหนาแน่นยูเรเนียมไดออกไซด์เท่ากับศูนย์
- วิธีที่ 2 กำหนดให้ค่า REP เป็นข้อมูลอินพุทของมอดูลโดยให้ REP_i =1 ,i=1,2,...,33

- วิธีที่ 3 โดยการสมมุติให้ รีเจียนตัวสะท้อนนิวตรอนเป็นรีเจียนเชื้อเพลิงที่มีรัศมีของแท่งเชื้อเพลิงน้อยมาก เช่น R=.05 ซม.

ผลการคำนวณค่าคงที่กลุ่มนิวตรอนเร็วและเรโซแนนซ์ของรีเจียนตัวสะท้อนนิวตรอนด้วยวิธีต่างๆ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากโปรแกรมมาตรฐาน WIMS (8) แสดงในตาราง 4.9

ตาราง 4.9 ผลการคำนวณค่าคงที่กลุ่มนิวตรอนเร็วและเรโซแนนซ์ของตัวสะท้อนนิวตรอน

	group	D (cm)	Σ_a (cm^{-1})	Σ_R (cm^{-1})
วิธีที่ 1	fast	2.109	0	.6394E-1
	resonance	.768	0	.11316
วิธีที่ 2	fast	2.109	0	.6394E-1
	resonance	.768	0	.11316
วิธีที่ 3	fast	2.108	.4579E-4	.6363E-1
	resonance	.77	.7908E-3	.11209
โปรแกรม WIMS	fast	2.029	1.932E-4	.5510E-1
	resonance	.733	.8736E-3	.1163

ศูนย์วิทยทรัพยากร

4.3.2 การคำนวณค่าคงที่ของกลุ่มนิวตรอนเทอร์มัล

4.3.2.1 การคำนวณรีเจียนเชื้อเพลิง การคำนวณค่าคงที่ต่างๆ ของกลุ่มเทอร์มัลสำหรับรีเจียนเชื้อเพลิงที่มีความเข้มข้นยูเรเนียม-235 3.6 เปอร์เซ็นต์ ข้อมูลอินพุทเป็นชุดเดียวกับที่ได้กล่าวในหัวข้อ 4.1.2 ผลการคำนวณโดยใช้มอดูล SLOCON เปรียบเทียบกับผลการคำนวณโดยใช้โปรแกรมมาตรฐาน LEOPARD (8) แสดงในตาราง 4.10

ตาราง 4.10 การเปรียบเทียบค่าคงที่กลุ่มเทอร์มัลระหว่างการคำนวณโดย SLOCON กับโปรแกรม LEOPARD

	D (cm)	Σ_a (cm^{-1})	Σ_R (cm^{-1})
SLOCON	.3506	.10648	.07792
LEOPARD	.3952	.0886	.06324

ต่อไปเป็นการคำนวณปัญหาของรีเจียนเชื้อเพลิงที่มีความเข้มข้นยูเรเนียม-235 แตกต่างกัน ข้อมูลอินพุทเป็นชุดเดียวกับที่แสดงในหัวข้อ 4.3.1 ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของวัสดุหน่วงนิวตรอนเท่ากับ 277 °ซ. ผลการคำนวณแสดงในตาราง 4.11

ตาราง 4.11 ผลการคำนวณค่าคงที่กลุ่มเทอร์มัลของรีเจียนเชื้อเพลิงที่มีความเข้มข้นยูเรเนียม-235 ต่างกัน

region	D (cm)	Σ_a (cm^{-1})	Σ_f (cm^{-1})
1.6 %	.3604	.0578	.0353
2.4 %	.3560	.0776	.0526
3.6 %	.3504	.1065	.0779

เมื่อกำหนดปัญหาใหม่ โดยพิจารณารีเจียนเชื้อเพลิงที่มีความเข้มข้นยูเรเนียม-235 2.4 เปอร์เซ็นต์ แล้วเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุหน่วงนิวตรอน ผลการคำนวณแสดงในตาราง 4.12

ตาราง 4.12 ค่าคงที่กลุ่มเทอร์มัลของริเจียนเชื้อเพลิง เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุหน่วงนิวตรอน

temp. °C	D (cm)	Σ_a (cm^{-1})	Σ_f (cm^{-1})
127	.3338	.0868	.0585
277	.3560	.0776	.0526
427	.3786	.0704	.0480

มอดูล SLOCON ไม่สามารถใช้คำนวณริเจียนที่ไม่มีไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบได้ ในระหว่างการทดลองคำนวณริเจียนที่ไม่มีไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบจะเกิดความผิดพลาดชนิด "REAL devided by zero" ขึ้น

4.3.3 การคำนวณเทอร์มัลยูทิไลเซชันและดิสแอดวานเตจแฟกเตอร์

แม้ว่าในภาคการตรวจสอบความถูกต้องของมอดูล DISFAC จะแสดงให้เห็นว่าผลการคำนวณที่ได้จากไอบีเอ็มพีซีตรงกับผลการคำนวณจากของเดิม (8) แต่จากการตรวจสอบสมการที่ใช้คำนวณค่าอัตราส่วนปริมาตรระหว่างของตัวหน่วงนิวตรอนกับเชื้อเพลิง สำหรับโครงข่ายแบบหกเหลี่ยม ตรงบรรทัดที่ A710 ในมอดูล DISFAC ของเดิม (8)

```
VMF=(3.*SQRT(3.)/(4.*3.14159))*(X/A)**2-1                    A710
```

พบว่าเป็นสมการที่ไม่ถูกต้อง พิจารณาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีเซลล์ r กับระยะห่างระหว่างเซลล์ X ในกรณีโครงข่ายแบบหกเหลี่ยมด้านเท่า จะได้

$$r = (\sqrt{3}/2\pi)^{1/2}X$$

เมื่อพื้นที่หน้าตัดของแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ πA^2 เมื่อ A เป็นรัศมีแท่งเชื้อเพลิง จะได้

$$VMF = \frac{\pi r^2-\pi A^2}{\pi A^2} = \frac{r^2}{A^2}-1$$

$$VMF = \frac{\sqrt{3}}{2\pi}\left[\frac{X}{A}\right]^2 - 1$$

ดังนั้น สมการในบรรทัดที่ A710 ควรจะเป็น

```
VMF=(SQRT(3.)/(2*3.14159))*(X/A)**2-1
```

เมื่อเปลี่ยนข้อความในบรรทัดที่ A710 ใหม่แล้วทำการคำนวณ ผลการคำนวณเปรียบเทียบระหว่างผลลัพธ์เดิมกับเมื่อใช้สมการใหม่แสดงอยู่ในตาราง 4.13

ตาราง 4.13 ผลการคำนวณมอดูล DISFAC เมื่อเปลี่ยนแปลงสมการที่ A710

ผลลัพธ์	ก่อนเปลี่ยน	หลังเปลี่ยน
อัตราส่วนปริมาตร (ตัวหน่วงนิวตรอน/เชื้อเพลิง)	8.50133	5.33422
เทอร์มัลยูทิไลเซชัน	.78631	.85503
ดิสแอดวานเตจแฟกเตอร์	1.13713	1.1306
ภาคตัดขวางของการดูดกลืน (ซม.$^{-1}$)	.03639	.05077
ค่าคงที่ของการแพร่กระจาย (ซม.)	.30472	.30730
ภาคตัดขวางของการเกิดฟิชชัน (ซม.$^{-1}$)	.02183	.03312

4.3.4 การคำนวณสมการการแพร่กระจายของนิวตรอนหนึ่งกลุ่มในหนึ่งมิติ

ปัญหาตัวอย่างที่ทำการคำนวณโดยใช้มอดูล ODOG เป็นปัญหาของเครื่องปฏิกรณ์แบบเทอร์มัล มอดูล ODOG จะทำการคำนวณค่าไอเกนหรือมัลติพลิเคชันแฟกเตอร์เปรียบเทียบกับค่าไอเกนที่ถูกต้อง รายละเอียดของปัญหากับผลการคำนวณมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ปัญหาที่ 1 เครื่องปฏิกรณ์แบบเทอร์มัลรูปทรงกลมรัศมี 50 ซม. ประกอบด้วย 1 รีเจียนเชื้อเพลิง มีค่าคงที่ คือ

D = 1.00 ซม. Σ_a = .75 ซม.$^{-1}$ และ $\nu\Sigma_f$ = .78 ซม.$^{-1}$

ค่าไอเกนที่ถูกต้อง = 1.03455 ค่าที่คำนวณโดยมอดูล ODOG เท่ากับ 1.0346

ปัญหาที่ 2 เครื่องปฏิกรณ์แบบเทอร์มัลรูปทรงกลมรัศมี 78 ซม. ประกอบด้วย 2 รีเจียนเชื้อเพลิง รีเจียนแรกรัศมี 50 ซม. รีเจียนที่ 2 หนา 28 ซม.

ค่าคงที่ของรีเจียนที่ 1 D = 7.40 ซม. Σ_a = .591 ซม.$^{-1}$ และ $\nu\Sigma_f$ = .698 ซม.$^{-1}$

ค่าคงที่ของรีเจียนที่ 2 D = 2.12 ซม. Σ_a = .07 ซม.$^{-1}$ และ $\nu\Sigma_f$ = .11 ซม.$^{-1}$

ค่าไอเกนที่ถูกต้อง = 1.2376 ค่าที่คำนวณโดยมอดูล ODOG เท่ากับ 1.2402

4.3.5 การคำนวณสภาวะวิกฤตของนิวตรอน 3 กลุ่มพลังงาน

ปัญหาตัวอย่างที่จะคำนวณโดยใช้มอดูล ODMUG มีรายละเอียดดังนี้ เครื่องปฏิกรณ์กำลังขนาด 800 เมกะวัตต์ รูปทรงกระบอกสูง 365.76 ซม. รัศมี 137.16 ซม. มี 2 รีเจียน รีเจียนด้านในรัศมี 76.2 ซม. ประกอบด้วยแท่งเชื้อเพลิงชนิดยูเรเนียมไดออกไซด์มีความเข้มข้นยูเรเนียม-235 2.4 % หุ้มด้วยเซอร์คาลอย-2 และมีน้ำเป็นตัวหน่วงนิวตรอนและระบายความร้อน รีเจียนด้านนอกมีส่วนประกอบเหมือนด้านในทุกอย่างยกเว้นมีความเข้มข้นยูเรเนียม-235 2.6 % ค่าข้อมูลภาคตัดขวางมหภาคแสดงอยู่ในตาราง 4.14

ตาราง 4.14 ข้อมูลค่าคงที่ที่ใช้คำนวณในปัญหาสภาวะวิกฤต

group	D (cm)	Σ_a (cm^{-1})	Σ_R (cm^{-1})	$\nu\Sigma_f$ (cm^{-1})	ν
region 1 (2.4 %)					
1	1.7069	.34344E-2	.61173E-1	.40468E-2	2.62336
2	.85339	.23168E-1	.50626E-1	.10832E-1	2.43370
3	.39639	.1006	0.0	.12255	2.43878
region 2 (2.6 %)					
1	1.70691	.34557E-2	.61165E-1	.40959E-2	2.62315
2	0.85343	.23680E-1	.50383E-1	.11691E-1	2.43438
3	0.39620	.10832	0.0	.13119	2.43878

ผลการคำนวณโดยมอดูล ODMUG ตามข้อมูลข้างบน จะได้ค่าเอฟเฟคทีฟมัลติพลิเคชันแฟกเตอร์ k_∞ = 0.9777

มอดูล ODMUG สามารถตรวจหาค่าภาคตัดขวางของพอยซัน (poison cross section) ที่ต้องการเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ค่าเอฟเฟคทีฟมัลติพลิเคชันแฟกเตอร์ตามที่ได้ออกแบบไว้ ในการคำนวณเพื่อตรวจหาภาคตัดขวางพอยซัน จะต้องกำหนดค่าเดาเริ่มต้นของแต่ละรีเจียน แล้วมอดูลจะทำการคำนวณหาค่าที่ถูกต้อง ปัญหาที่จะทำการศึกษาต่อไปนี้จะเป็นการตรวจสอบความสามารถของมอดูลในการตรวจหาภาคตัดขวางพอยซัน โดยการเปลี่ยนค่าเดาเริ่มต้นแล้วส่งไปคำนวณเพื่อดูว่า ค่าเดาที่แตกต่างกันจะให้ผลที่ต่างกันหรือไม่ ข้อมูลอินพุทเป็นข้อมูลชุดเดียวกับในตอนต้นของหัวข้อนี้ โดยมีข้อมูลเพิ่มเติมคือ ให้ตรวจหาภาคตัดขวางพอยซันที่จะทำให้ค่าเอฟเฟคทีฟมัลติพลิเคชันแฟกเตอร์เป็น 0.95 ตาราง 4.15 แสดงค่าเดาเริ่มต้นของแต่ละ

รีเจียนและผลการคำนวณ

ตาราง 4.15 ผลการตรวจหาภาคตัดขวางพอยซันเมื่อเปลี่ยนค่าเดาเริ่มต้น

region	group	Σ_p(guess) (cm^{-1})	Σ_p(result) (cm^{-1})	Σ_p(guess) (cm^{-1})	Σ_p(result) (cm^{-1})	Σ_p(guess) (cm^{-1})	Σ_p(result) (cm^{-1})
1	1	1.0E-3	.5547E-4	1.0E-3	.8163E-3	1.0E-2	.8126E-3
1	2	1.0E-2	.5547E-3	1.0E-3	.8163E-3	1.0E-2	.8126E-3
1	3	5.0E-2	.2774E-2	1.0E-3	.8163E-3	1.0E-2	.8126E-3
2	1	1.0E-3	.5547E-4	1.0E-3	.8163E-3	1.0E-2	.8126E-3
2	2	1.0E-2	.5547E-3	1.0E-3	.8163E-3	1.0E-2	.8126E-3
2	3	5.0E-2	.2774E-2	1.0E-3	.8163E-3	1.0E-2	.8126E-3
		k_{eff}error=-.58E-4		k_{eff}error=-.11E-3		k_{eff}error=-.52E-5	

จากตาราง 4.15 แสดงให้เห็นความแตกต่างของภาคตัดขวางพอยซันเมื่อเปลี่ยนค่าเดาเริ่มต้น ผลลัพธ์จากชุดแรกจะมีความแตกต่างอย่างมากมายกับผลลัพธ์ในชุดที่ 2 และ 3 แต่ผลลัพธ์ในชุดที่ 2 มีค่าที่ใกล้เคียงกับผลลัพธ์ในชุดที่ 3 จากตัวอย่างแสดงให้เห็นว่าค่าเดาเริ่มต้นของแต่ละรีเจียนจะมีผลต่อค่าภาคตัดขวางที่ตรวจพบสำหรับแต่ละรีเจียน แต่ผลลัพธ์สุดท้ายก็จะให้ค่าเอฟเฟคทีฟมัลติพลิเคชันแฟกเตอร์เท่ากัน

4.3.6 การคำนวณเบิร์นอัพของเชื้อเพลิง

ในชุดโปรแกรม VPI เดิมได้มีการตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้จากมอดูล FBURN โดยการคำนวณปัญหาพิเศษ ข้อมูลที่เวลาเริ่มต้น (zero time step) ได้จากผลลัพธ์ของโปรแกรม LEOPARD แล้วทำการคำนวณทั้งมอดูล FBURN และ โปรแกรม LEOPARD ผลการคำนวณปัญหาของเครื่องปฏิกรณ์แบบ PWR ที่มีเซลล์เชื้อเพลิงความเข้มข้น 3.6 % ความเข้มข้นสุดท้ายของเชื้อเพลิงหลังเบิร์นอัพคำนวณโดย LEOPARD เท่ากับ 2.14 % จากมอดูล FBURN เป็น 2.00 % ผลผลิตพลูโทเนียมเป็น 0.0140 และ .0146 กิโลกรัมต่อลิตร ยูเรเนียมที่สูญไปเท่ากับ 58.8 และ 60.24 กิโลกรัมต่อลิตร เมื่อคำนวณด้วย LEOPARD และ FBURN ตามลำดับ

หมายเหตุ : ค่าเดาคือค่าที่สมมุติขึ้น

4.3.7 การคำนวณปัญหาโดยใช้ชุดโปรแกรมรุ่นเชื่อมโยง

ชุดโปรแกรมรุ่นเชื่อมโยงประกอบด้วยมอดูล FARCON SLOCON ODMUG และ FBURN ที่ได้ทำการดัดแปลงให้สามารถรับส่งข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทระหว่างมอดูลได้ การเตรียมอินพุทสำหรับมอดูลต่างๆ กระทำเพียงครั้งเดียว ปัญหาตัวอย่างที่จะคำนวณโดยใช้ชุดโปรแกรมรุ่นเชื่อมโยงมีรายละเอียดดังนี้ เครื่องปฏิกรณ์กำลังขนาด 800 เมกะวัตต์ รูปทรงกระบอกสูง 365.76 ซม. รัศมี 137.16 ซม. มี 2 รีเจียน รีเจียนด้านในรัศมี 76.2 ซม. ประกอบด้วยแท่งเชื้อเพลิงรัศมี .455 ซม. เป็นชนิดยูเรเนียมไดออกไซด์ความหนาแน่น 9.92453 กรัม/ซม.^{3} และมีความเข้มข้น 2.4 % ยูเรเนียม-235 หุ้มด้วยเซอร์คาลอย-2 ความหนาแน่น 6.5 กรัม/ซม.^{3} หนา .0775 ซม. อุณหภูมิที่ใจกลางแท่งเชื้อเพลิง 853 °ซ. ที่ผิวแท่ง 290 °ซ. โดยมีน้ำเป็นตัวหน่วงนิวตรอนและระบายความร้อน อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเท่ากับ 277 °ซ. ความหนาแน่น .75091 กรัม/ซม.^{3} รีเจียนด้านนอกมีส่วนประกอบเหมือนกันกับรีเจียนในยกเว้นมีความเข้มข้น 2.6 % ยูเรเนียม-235 ผลการคำนวณเมื่อใช้ชุดโปรแกรมรุ่นเชื่อมโยงแสดงอยู่ในตาราง 4.16 - 4.17

ตาราง 4.16 ผลการคำนวณค่าคงที่ของรีเจียนต่างๆ เมื่อใช้ชุดโปรแกรมรุ่นเชื่อมโยง

group	D (cm)	Σ_a (cm^{-1})	Σ_R (cm^{-1})	$\nu\Sigma_f$ (cm^{-1})	ν
			region 1 (2.4 %)		
1	1.646	.2594E-2	.3996E-1	.2926E-2	2.736
2	.8218	.1850E-1	.5444E-1	.7941E-2	2.430
3	.3562	.7756E-1	0.0	.1278	2.430
			region 2 (2.6 %)		
1	1.646	.2617E-2	.3994E-1	.2979E-2	2.731
2	0.8208	.1888E-1	.5422E-1	.8596E-2	2.430
3	0.3550	.8247E-1	0.0	.1382	2.430

ผลการคำนวณสภาวะวิกฤตเมื่อใช้มอดูล ODMUG ในรุ่นเชื่อมโยงจากผลลัพธ์ที่ได้จากมอดูล FARCON และ SLOCON ในตารางที่ 4.16 ได้คำตอบค่าเอฟเฟคทีฟมัลติพลิเคชันแฟกเตอร์ เท่ากับ 1.30529

ตาราง 4.17 ผลการคำนวณเบิร์นอัพเมื่อใช้ชุดโปรแกรมรุ่นเชื่อมโยง

region number		1 (2.4 %)		2 (2.6 %)	
burnup step number		4	8	4	8
isotope density (kg/l)	U-235	.504E-1	.408E-1	.554E-1	.454E-1
	U-236	.208E-2	.371E-2	.214E-2	.384E-2
	U-238	.257E+1	.256E+1	.256E+1	.255E+1
	Pu-239	.504E-2	.756E-2	.499E-2	.762E-2
	Pu-240	.529E-3	.139E-2	.486E-3	.130E-2
	Pu-241	.116E-4	.570E-3	.105E-3	.531E-3
	Pu-242	.553E-5	.585E-4	.463E-5	.503E-4
energy density (kW-hr/l)		60900	60636	60874	6063
total burnup (MWD/MT)		3866	7704	3862	7700
k_∞		1.088	1.041	1.102	1.055

4.3.8 การคำนวณเชื้อเพลิงในวัฏจักรถัดไป

เมื่อทดลองทำการคำนวณสำหรับวัฏจักรเชื้อเพลิงถัดไป ผลลัพธ์ที่ได้ผิดพลาดอย่างมากมายเนื่องจากค่าภาคตัดขวางมหภาคของการดูดกลืนเฉลี่ยที่คำนวณจากมอดูล SLOCON มีค่าสูงจนไม่น่าเป็นไปได้ คือ Σ_a=20 ซม.$^{-1}$ ทำให้การคำนวณมอดูล ODMUG และ FBURN ให้ผลลัพธ์ที่ผิดพลาดไปด้วย ได้ทำการตรวจสอบหาข้อผิดพลาดในระหว่างการปรับปรุงชุดโปรแกรมรุ่นเชื่อมโยง พบว่าการรับส่งข้อมูลระหว่างมอดูลเป็นไปอย่างที่ออกแบบไว้ จึงไม่น่าเกิดความผิดพลาดที่จุดนี้ ต่อไปจึงทำการตรวจสอบต้นฉบับมอดูล SLOCON พบว่าในการคำนวณค่าภาคตัดขวางจุลภาคของการดูดกลืนของไอโซโทปพลูโทเนียม-242 ในมอดูล SLOCON บรรทัดที่ C60

```
SA(7)=.3344772E+2-.2702485E+3*R+1155269E+4*R2-.2129833E+4*R3+.1399812E+4*R4
```

ซึ่งน่าเชื่อว่าไม่ถูกต้อง เช่นเมื่อกำหนดพลังงานนิวตรอน .0253 อิเล็กตรอนโวลต์ คำนวณค่า σ_a ของพลูโทเนียม-242 ได้เท่ากับ 7.39x10^6 บาร์น ซึ่งมากเกินความจริง เมื่อตรวจสอบประโยคในบรรทัดที่ C60 ตรงตัวเลข +1155269E+4 ที่ถูกต้องน่าจะเป็น +.1155269E+4 และได้แก้ไขตรงจุดนี้ แล้วทดลอง

คำนวณค่า σ_a ของพลูโทเนียม-242 ใหม่ได้คำตอบ σ_a = 27.3 บาร์น เมื่อเปรียบเทียบกับค่าในตารางมาตรฐานที่พลังงานเดียวกัน เท่ากับ 30 บาร์น (4) ซึ่งจัดว่าใกล้เคียงกันมาก ตาราง 4.18 - 4.19 แสดงผลการคำนวณการจัดการเชื้อเพลิงในวัฏจักรถัดไปเมื่อแก้ไขข้อผิดพลาดในมอดูล SLOCON แล้ว

ตาราง 4.18 ผลการคำนวณค่าคงที่ของรีเจียนในวัฏจักรถัดไปด้วยชุดโปรแกรมรุ่นเชื่อมโยง

group	D (cm)	Σ_a (cm^{-1})	Σ_R (cm^{-1})	$\nu\Sigma_f$ (cm^{-1})	ν
region 1 (2.4 %)					
1	1.649	.2518E-2	.3998E-1	.2807E-2	2.766
2	.8243	.1807E-1	.5458E-1	.6652E-2	2.517
3	.3464	.1108	0.0	.1239	2.563
region 2 (2.6 %)					
1	1.649	.2539E-2	.3997E-1	.2853E-2	2.761
2	0.8235	.1839E-1	.5440E-1	.7225E-2	2.510
3	0.3456	.1162	0.0	.1331	2.554

ผลการคำนวณสภาวะวิกฤตเมื่อใช้มอดูล ODMUG ในรุ่นเชื่อมโยงจากผลลัพธ์ที่ได้จากมอดูล FARCON และ SLOCON ในตารางที่ 4.18 ได้คำตอบค่าเอฟเฟคทีฟมัลติพลิเคชันแฟกเตอร์ เท่ากับ .93143

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 4.19 ผลการคำนวณเบิร์นอัพสำหรับวัฏจักรถัดไป เมื่อใช้ชุดโปรแกรมรุ่นเชื่อมโยง

region number		1 (2.4 %)		2 (2.6 %)	
burnup step number		4	8	4	8
	U-235	.328E-1	.264E-1	.370E-1	.301E-1
	U-236	.505E-2	.606E-2	.528E-2	.638E-2
isotope	U-238	.255E+1	.254E+1	.254E+1	.254E+1
density	Pu-239	.998E-2	.112E-1	.101E-1	.114E-1
(kg/l)	Pu-240	.199E-2	.249E-2	.190E-2	.240E-2
	Pu-241	.143E-2	.224E-2	.135E-2	.217E-2
	Pu-242	.217E-3	.493E-3	.190E-3	.440E-3
energy density (kW-hr/l)		60889	60739	60838	60730
total burnup (MWD/MT)		3891	7769	3889	7769
k_∞		1.064	1.033	1.077	1.045

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย