

บทที่ 4

ผลการคำนวณ

4.1 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

ในการคำนวณด้วยโปรแกรมที่ได้พัฒนา (DENUMG) จะใช้ข้อมูลพื้นฐานจากงานวิจัยในรายการอ้างอิงที่ 1 เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการคำนวณภายใต้ข้อสมมติฐานที่ต่างกันด้านพลังงานของนิวตรอนที่พิจารณา กล่าวคือ ในรายการอ้างอิงที่ 1 จะคำนวณแกนปฏิกรณ์ฯ สองมิติ และ หนึ่งกลุ่มพลังงาน ในขณะที่งานวิจัยนี้ทำการคำนวณแกนปฏิกรณ์ฯ ในสองมิติ และ สองกลุ่มพลังงาน ข้อมูลต่าง ๆ ที่ใช้มีดังนี้

4.1.1 ข้อมูลแกนปฏิกรณ์ฯ จะพิจารณาเฉพาะส่วนที่เป็นเชื้อเพลิง (Active zone)

ขนาดแกนปฏิกรณ์ฯ

กว้าง	366.0	เซนติเมตร
ยาว	366.0	เซนติเมตร
สูง	370.0	เซนติเมตร

เชื้อเพลิง

ชนิดเชื้อเพลิง	UO ₂	
เสริมสมรรถนะ	2.1 2.6 และ 3.2	%

การแบ่งโหนด

X	15	โหนด
Y	15	โหนด
Z	1	โหนด

4.1.2 การบรรจุเชื้อเพลิง

ในการบรรจุเชื้อเพลิงจะแบ่งเป็น 3 รูปแบบดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.3 และ 2.4 และมีสัญลักษณ์แทนตำแหน่งต่าง ๆ ภายในแกนคือ

- เลข “0” เป็นสัญลักษณ์แทนบริเวณขอบที่ต้องการบังคับให้มีค่าฟลักซ์เป็น 0
- เลข “1” เป็นสัญลักษณ์แทนเชื้อเพลิงเสริมสมรรถนะ 2.1%
- เลข “2” เป็นสัญลักษณ์แทนเชื้อเพลิงเสริมสมรรถนะ 2.6%
- เลข “3” เป็นสัญลักษณ์แทนเชื้อเพลิงเสริมสมรรถนะ 3.2%

4.1.2.3 การบรรจุเชื้อเพลิงแบบ In-scatter Loading ดังรูปที่ 4.3

0	0	0	0	1	1	3	1	3	3	1	0	0	0	0
0	0	1	1	1	1	2	1	3	3	3	3	0	0	0
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
0	1	2	2	2	1	1	1	2	1	2	1	2	1	0
1	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	2	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

รูปที่ 4.3 การบรรจุเชื้อเพลิงรูปแบบ In-Scatter Loading

4.2 เปรียบเทียบผลการคำนวณกับทฤษฎี และ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ SRAC

4.2.1 ผลการคำนวณทางทฤษฎี

ในทางทฤษฎีจะใช้สมการที่ 2.23 คำนวณหาค่าวิกฤตเพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณระหว่างผลในทางทฤษฎี และ ผลจากการคำนวณด้วยโปรแกรมที่พัฒนา

$$k = \frac{v_1 \Sigma_{f1}}{\Sigma_{R1} + D_1 B^2} + \frac{\Sigma_{12}}{\Sigma_{R1} + D_1 B^2} \frac{v_2 \Sigma_{f2}}{(\Sigma_{a2} + D_2 B^2)}$$

ข้อมูลค่าคงที่กลุ่มที่ใช้ประกอบการคำนวณ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 4.2 และ 4.3 ภายใต้อสมมติฐานว่ามีการบรรจุเชื้อเพลิงแบบเนื้อเดียวทั้งแกนซึ่งแบ่งได้เป็น 3 กรณี คือ

- การบรรจุเชื้อเพลิงเสริมสมรรถนะ 2.1% เนื้อเดียวทั้งแกน
- การบรรจุเชื้อเพลิงเสริมสมรรถนะ 2.6% เนื้อเดียวทั้งแกน
- การบรรจุเชื้อเพลิงเสริมสมรรถนะ 3.2% เนื้อเดียวทั้งแกน

ค่าการยุบตัวเรขาคณิตคำนวณได้จากสมการ

$$B_g^2 = \left(\frac{v_o}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{H}\right)^2$$

$$R = 183.00 \text{ cm} \quad H = 370.00 \text{ cm} \quad v_o = 2.405$$

$$B_g^2 = \left(\frac{2.405}{183.0}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{370.0}\right)^2 = 2.4487 \times 10^{-4}$$

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลค่าคงที่กลุ่มของเชื้อเพลิง เสริมสมรรถนะ 2.1%

g	$v_g \Sigma_{fg}$	Σ_{ag}	χ_g	D_g	Σ_{ig}	Σ_{Rg}
1	5.2125E-03	8.9624E-03	1.0	1.4526E+00	2.3065E-01	2.543E-02
2	8.9752E-02	5.7365E-02	0.0	4.5132E-01	7.5623E-01	
Σ_{11}	2.0522E-01	Σ_{12}	1.6511E-02			
Σ_{21}	1.2757E-04	Σ_{22}	6.9874E-01			

$$k = \frac{5.2125 \times 10^{-3}}{2.5430 \times 10^{-2} + 1.45260 \times 2.4487 \times 10^{-4}} + \frac{1.6511 \times 10^{-2}}{2.5430 \times 10^{-2} + 1.45260 \times 2.4487 \times 10^{-4}} \frac{8.9752 \times 10^{-2}}{5.7365 \times 10^{-2} + 4.5132 \times 10^{-1} \times 2.4487 \times 10^{-4}}$$

$$k = 1.2021$$

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลค่าคงที่กลุ่มของเชื้อเพลิงเสริมสมรรถนะ 2.6%

g	$v_g \Sigma_{fg}$	Σ_{ag}	χ_g	D_g	Σ_{ig}	Σ_{Rg}
1	5.8009E-03	9.2165E-03	1.0	1.4578E+00	2.2986E-01	2.5290E-02
2	1.0584E-01	6.4641E-02	0.0	4.5618E-01	7.4653E-01	
Σ_{11}	2.0457E-01	Σ_{12}	1.6103E-02			
Σ_{21}	1.4373E-04	Σ_{22}	6.8175E-01			

$$k = \frac{5.8009 \times 10^{-3}}{2.5290 \times 10^{-2} + 1.4578 \times 2.4487 \times 10^{-4}} + \frac{1.6103 \times 10^{-2}}{2.529 \times 10^{-2} + 1.4578 \times 2.4487 \times 10^{-4}} \frac{1.0584 \times 10^{-1}}{6.4641 \times 10^{-2} + 4.5618 \times 10^{-1} \times 2.4487 \times 10^{-4}}$$

$$k = 1.2525$$

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลค่าคงที่กลุ่มของเชื้อเพลิงเสริมสมรรถนะ 3.2%

g	$v_g \Sigma_{fg}$	Σ_{ag}	χ_g	D_g	Σ_{ig}	Σ_{Rg}
1	6.4819E-03	9.5235E-03	1.0	1.4620E+00	2.2920E-01	2.5170E-02
2	1.2353E-01	7.2678E-02	0.0	4.6084E-01	7.3728E-01	
Σ_{11}	2.0403E-01	Σ_{12}	1.5689E-02			
Σ_{21}	1.6131E-04	Σ_{22}	6.6444E-01			

$$k = \frac{6.4819 \times 10^{-3}}{2.5170 \times 10^{-2} + 1.4620 \times 2.4487 \times 10^{-4}} + \frac{1.5689 \times 10^{-2}}{2.5170 \times 10^{-2} + 1.4620 \times 2.4487 \times 10^{-4}} \frac{1.2353 \times 10^{-1}}{7.2678 \times 10^{-2} + 4.6084 \times 10^{-1} \times 2.4487 \times 10^{-4}}$$

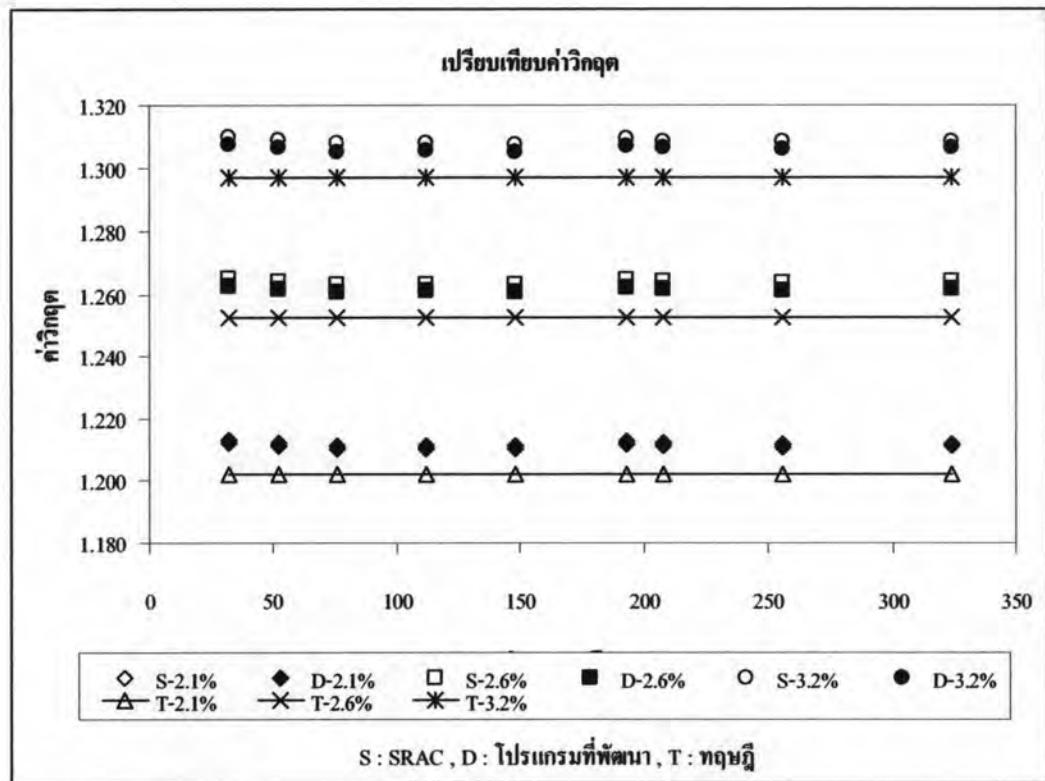
$$k = 1.2969$$

4.2.2 เปรียบเทียบผลการคำนวณทางทฤษฎี ผลจากโปรแกรม SRAC และผลจากโปรแกรมที่พัฒนา

ผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนา (DENUMG) เมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรม SRAC และทฤษฎี สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.4 กำหนดให้การแบ่งตามแกน x และ y มีค่าเท่ากับ 15×15 และการแบ่งตามแกน $z = 1$

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบผลการคำนวณค่าวิกฤตในระบบสองมิติ เมื่อบรรจุเชื้อเพลิงที่เสริมสมรรถนะเดียวทั้งแกน

Nodes	เสริมสมรรถนะ 2.1%		เสริมสมรรถนะ 2.6%		เสริมสมรรถนะ 3.2%	
	SRAC	DENUMG	SRAC	DENUMG	SRAC	DENUMG
32	1.2132	1.2122	1.2653	1.2629	1.3099	1.3075
52	1.2122	1.2111	1.2642	1.2617	1.3088	1.3063
76	1.2112	1.2101	1.2632	1.2607	1.3078	1.3053
112	1.2114	1.2105	1.2634	1.2611	1.3080	1.3057
148	1.2111	1.2101	1.2631	1.2607	1.3076	1.3053
193	1.2127	1.2118	1.2647	1.2625	1.3093	1.3071
208	1.2121	1.2112	1.2641	1.2618	1.3087	1.3064
256	1.2117	1.2109	1.2637	1.2615	1.3083	1.3060
324	1.2120	1.2111	1.2640	1.2618	1.3086	1.3063
ทฤษฎี	1.2021		1.2525		1.2969	



รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณ

4.3 เปรียบเทียบค่าวิกฤตจากการคำนวณสองมิติ หนึ่งกลุ่มพลังงาน และสองกลุ่มพลังงาน

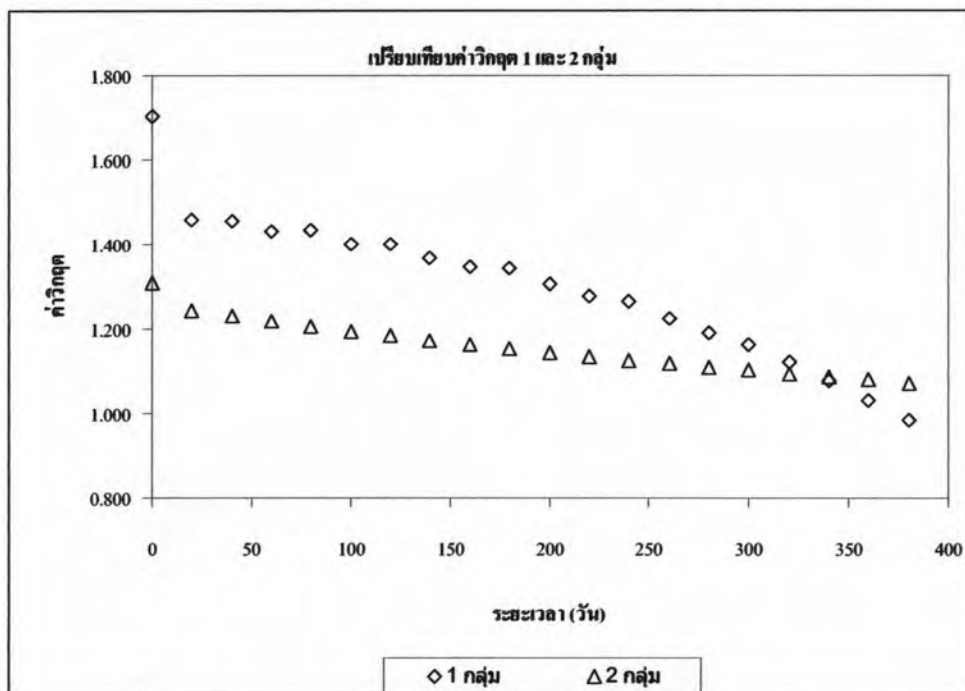
ตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าวิกฤตจากการคำนวณด้วยโปรแกรม สองมิติ หนึ่งกลุ่มพลังงาน^[2] และ สองมิติ สองกลุ่มพลังงาน (โปรแกรมที่พัฒนา)

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบผลการคำนวณค่าวิกฤต 1 และ 2 กลุ่มพลังงาน

เวลา (วัน)	ค่าวิกฤต	
	1 กลุ่มพลังงาน	2 กลุ่มพลังงาน
0	1.7049	1.3071
20	1.4619	1.2427
40	1.4572	1.2294
60	1.4330	1.2167
80	1.4347	1.2048
100	1.4019	1.1935
120	1.4013	1.1826

ตารางที่ 4.5 (ต่อ) เปรียบเทียบผลการคำนวณค่าวิกฤต 1 และ 2 กลุ่มพลังงาน

เวลา (วัน)	ค่าวิกฤต	
	1 กลุ่มพลังงาน	2 กลุ่มพลังงาน
140	1.3670	1.1721
160	1.3453	1.1621
180	1.3409	1.1524
200	1.3043	1.1430
220	1.2773	1.1340
240	1.2628	1.1254
260	1.2246	1.1170
280	1.1900	1.1090
300	1.1617	1.1012
320	1.1207	1.0936
340	1.0764	1.0863
360	1.0316	1.0793
380	0.9836	1.0724



รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าวิกฤตระหว่าง 1 และ 2 กลุ่มพลังงาน

4.4 เปรียบเทียบค่าพิกกำลัง (Peak power factor : PPF) ในการบรรจุเชื้อเพลิงรูปแบบต่าง ๆ

ค่าพิกกำลัง ณ ตำแหน่งใด ๆ ในแกนปฏิกรณ์นิยามจากอัตราส่วนระหว่างกำลังที่ผลิตในเชื้อเพลิงตำแหน่งนั้นต่อกำลังเฉลี่ยที่ผลิตขึ้นในแกนปฏิกรณ์

$$PPF = \frac{P_{max}}{P_{avg}}$$

การจัดรูปแบบการบรรจุเชื้อเพลิงที่ดี ควรจะมีการกระจายกำลังอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งแกน กล่าวคือ ค่า PPF มีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด ในการเปรียบเทียบครั้งนี้จะทำโดยเลือกค่าพิกกำลังที่เกิดขึ้นสูงสุดในแกน เมื่อมีการจัดแกนปฏิกรณ์ในรูปแบบต่าง ๆ ทั้ง 3 รูปแบบมาเปรียบเทียบนั่นคือ การบรรจุเชื้อเพลิงแบบเนื้อเดียวทั้งแกน การบรรจุเชื้อเพลิงแบบ Out-in loading และ การบรรจุเชื้อเพลิงแบบ In-scatter Loading ผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าวิกฤตและค่าพิกกำลังภายในแกนปฏิกรณ์เมื่อบรรจุเชื้อเพลิงแบบต่างกัน

การบรรจุเชื้อเพลิงแบบเนื้อเดียว			การบรรจุเชื้อเพลิงแบบ Out-In Loading		การบรรจุเชื้อเพลิงแบบ In-Scatter	
เสริมสมรรถนะ	ค่าวิกฤต	PPF	ค่าวิกฤต	PPF	ค่าวิกฤต	PPF
2.1%	1.2118	2.1076				
2.6%	1.2625	2.1086	1.2423	1.4506	1.2444	1.4321
3.2%	1.3071	2.1089				

4.5 การคำนวณค่าการเผาผลาญเชื้อเพลิง (Fuel Burnup)

การคำนวณการเผาผลาญเชื้อเพลิงจะทำเพื่อคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงค่าวิกฤต เมื่อเวลาต่างออกไป นอกจากนี้ ในสภาวะการปฏิบัติการจริง แกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์จะถูกควบคุมให้อยู่ในสภาวะวิกฤต (ค่า $k = 1$) ซึ่งจะทำให้ได้การกระจายนิวตรอนฟลักซ์ในแกนปฏิกรณ์ฯ อยู่ในสภาวะใกล้เคียงสภาวะจริง ดังนั้นกรณีที่จะศึกษาสำหรับการคำนวณสามารถแบ่งได้เป็น

- การคำนวณและเปรียบเทียบค่าวิกฤตเมื่อ ไม่มีการปรับสารเคมีควบคุม
- การคำนวณการกระจายความหนาแน่นกำลังและปริมาณภาคตัดขวางมหภาค การดูดกลืนเมื่อมีการปรับสารเคมีควบคุมให้แกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์อยู่ในสภาวะวิกฤต

รูปแบบการบรรจุเชื้อเพลิงจะเป็นไปตามเงื่อนไขที่ได้ระบุไว้ในบทที่ 3 คือ การบรรจุเชื้อเพลิงแบบเป็นเนื้อเดียวของเชื้อเพลิงเสริมสมรรถนะต่างกัน การบรรจุเชื้อเพลิงแบบ Out-In Loading และการบรรจุเชื้อเพลิงแบบ In-Scatter การบรรจุเชื้อเพลิงทั้งสามรูปแบบจะทำให้ระยะเวลาในการปฏิบัติการแตกต่างกันไป

4.5.1 การคำนวณและเปรียบเทียบค่าวิกฤตเมื่อไม่มีการปรับสารเคมีควบคุม

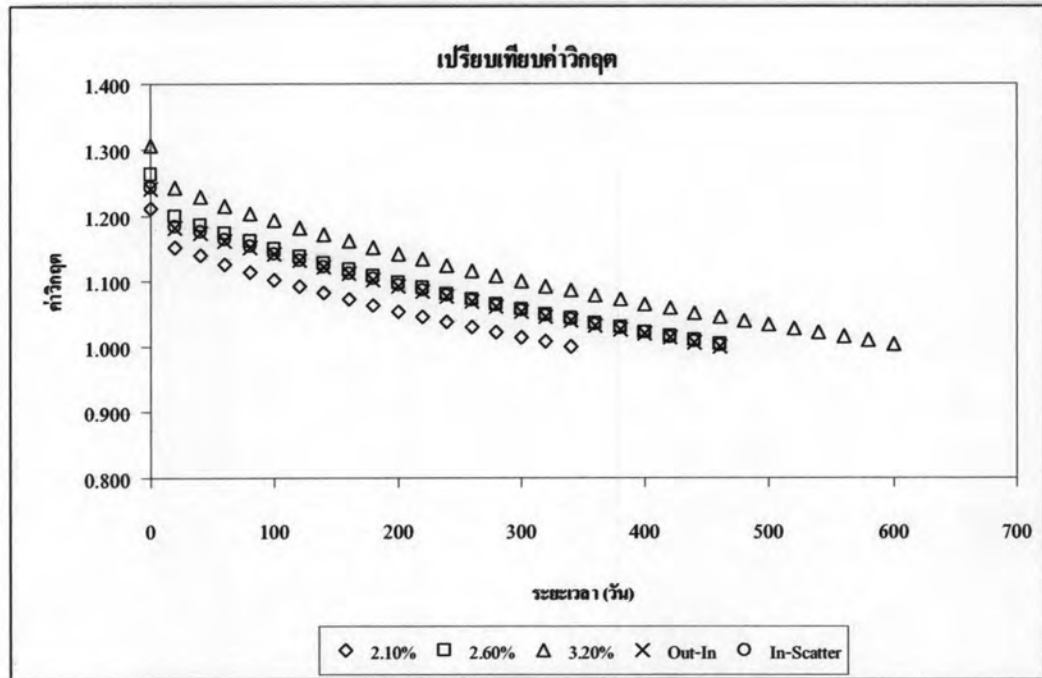
ตารางที่ 4.7 และ กราฟรูปที่ 4.6 แสดงผลคำนวณค่าวิกฤตที่เวลาต่าง ๆ เมื่อไม่มีการปรับสารเคมีควบคุม พบว่าการบรรจุเชื้อเพลิงเสริมสมรรถนะ 3.2% แบบเนื้อเดียวให้ผลค่าวิกฤตสูงสุดและสามารถปฏิบัติการได้นานสุด ในขณะที่การบรรจุเชื้อเพลิงแบบ Out-in Loading และ In-Scatter ให้ผลการคำนวณค่าวิกฤตและระยะเวลาในการปฏิบัติการใกล้เคียงกับการบรรจุเชื้อเพลิงเสริมสมรรถนะ 2.6% แบบเนื้อเดียว

ตารางที่ 4.7 ค่าวิกฤตจากการบรรจุเชื้อเพลิงแบบต่าง ๆ เมื่อเวลาเปลี่ยนไป

T (วัน)	Uniform 2.1%	Uniform 2.6%	Uniform 3.2%	Out-in Loading	In Scatter
0	1.2119	1.2626	1.3071	1.2423	1.2444
20	1.1519	1.1999	1.2427	1.1830	1.1851
40	1.1396	1.1867	1.2294	1.1737	1.1753
60	1.1267	1.1736	1.2167	1.1633	1.1647
80	1.1147	1.1616	1.2048	1.1527	1.1538
100	1.1034	1.1501	1.1935	1.1422	1.1433
120	1.0926	1.1391	1.1826	1.1320	1.1332
140	1.0823	1.1285	1.1721	1.1220	1.1232
160	1.0725	1.1184	1.1621	1.1123	1.1136
180	1.0632	1.1087	1.1524	1.1030	1.1043
200	1.0542	1.0994	1.1430	1.0941	1.0955
220	1.0457	1.0905	1.1340	1.0854	1.0869
240	1.0375	1.0819	1.1254	1.0771	1.0786
260	1.0296	1.0736	1.1170	1.0691	1.0706
280	1.0219	1.0656	1.1090	1.0612	1.0628

ตารางที่ 4.7 (ต่อ) ค่าวิกฤตจากการบรรจุเชื้อเพลิงแบบต่าง ๆ เมื่อเวลาเปลี่ยนไป

T (วัน)	Uniform 2.1%	Uniform 2.6%	Uniform 3.2%	Out-in Loading	In Scatter
300	1.0145	1.0578	1.1012	1.0537	1.0553
320	1.0073	1.0503	1.0936	1.0465	1.0480
340	1.0004	1.0431	1.0863	1.0394	1.0410
360	-	1.0360	1.0793	1.0326	1.0341
380	-	1.0291	1.0724	1.0258	1.0274
400	-	1.0224	1.0655	1.0193	1.0208
420	-	1.0159	1.0588	1.0129	1.0145
440	-	1.0095	1.0522	1.0067	1.0083
460	-	1.0033	1.0459	1.0006	1.0022
480	-	-	1.0397	-	-
500	-	-	1.0335	-	-
520	-	-	1.0275	-	-
540	-	-	1.0215	-	-
560	-	-	1.0156	-	-
580	-	-	1.0100	-	-
600	-	-	1.0045	-	-



รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงค่าวิกฤตเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

4.5.2 ผลการคำนวณ ค่าพิกกำลัง (Peak Power Factor) จากการปรับค่าสารเคมีควบคุม

ผลการคำนวณในตารางที่ 4.8 พบว่าเมื่อทำการปรับสารเคมีควบคุมให้ค่าวิกฤตเข้าสู่ 1.00 โดยนั้น ค่าพิกกำลังสูงสุดเกิดขึ้นในการบรรจุเชื้อเพลิงแบบเป็นเนื้อเดียวทั้งสามชนิด (เชื้อเพลิงชนิดเสริมสมรรถนะ 2.1% 2.6% และ 3.2%) สำหรับการบรรจุเชื้อเพลิงอีกสองรูปแบบพบว่า การบรรจุเชื้อเพลิงแบบ Out-In Loading จะให้ค่า พิกกำลังสูงกว่าการบรรจุเชื้อเพลิงแบบ In-Scatter

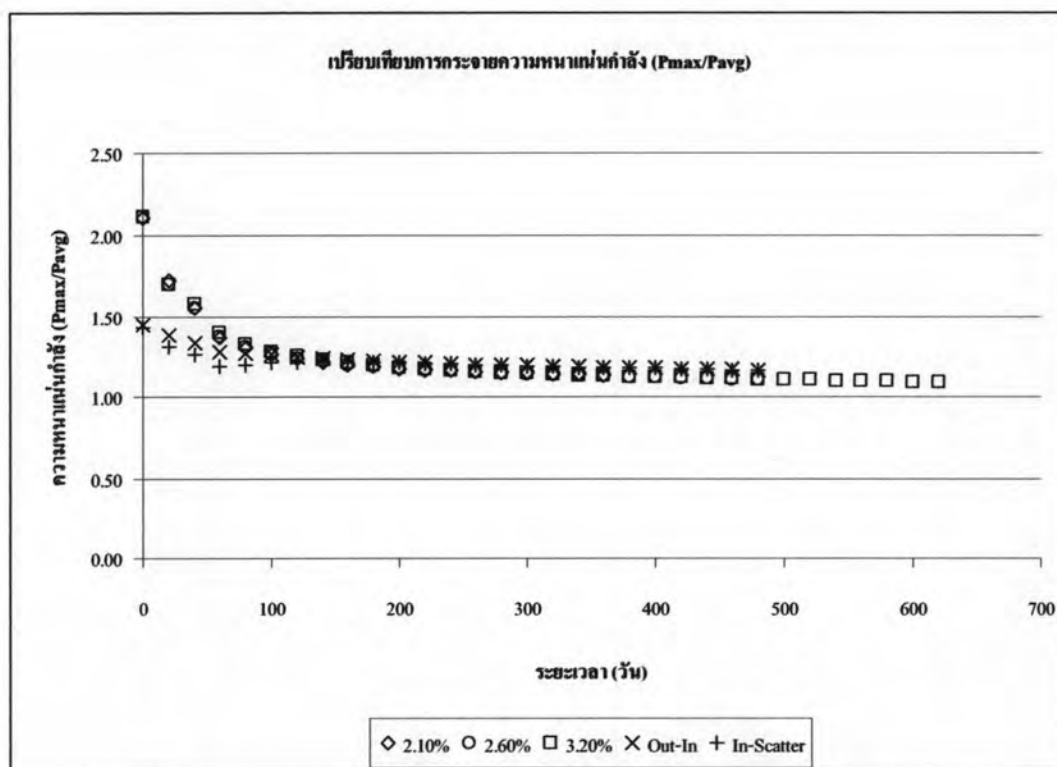
ผลที่เกิดจากการปรับสารเคมีควบคุมสามารถแสดงให้เห็นเป็นปริมาณค่าภาคตัดขวางมหภาคการคูดกลืนที่เพิ่มเข้าสู่ระบบ ดังแสดงในตารางที่ 4.9 ปริมาณค่าภาคตัดขวางมหภาคการคูดกลืนนี้มีเส้นแนวโน้มที่สอดคล้องกับค่าวิกฤตที่คำนวณในรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.8 การพืดกำลัง (Pmax/Pavg) ภายในแกนปฏิกรณ์

T (วัน)	Uniform 2.1%	Uniform 2.6%	Uniform 3.2%	Out-in Loading	In Scatter
0	2.1076	2.1086	2.1089	1.4506	1.4321
20	1.7225	1.6970	1.6955	1.3837	1.3096
40	1.5553	1.5497	1.5808	1.3335	1.2621
60	1.3684	1.3794	1.3966	1.2782	1.1866
80	1.2993	1.3112	1.3244	1.2709	1.1996
100	1.2606	1.2688	1.2800	1.2588	1.2104
120	1.2368	1.2415	1.2502	1.2477	1.2138
140	1.2161	1.2189	1.2285	1.2376	1.2171
160	1.1995	1.2011	1.2101	1.2288	1.2172
180	1.1875	1.1886	1.1954	1.2201	1.2159
200	1.1768	1.1783	1.1839	1.2148	1.2103
220	1.1678	1.1687	1.1734	1.2106	1.2050
240	1.1612	1.1616	1.1660	1.2056	1.2017
260	1.1555	1.1550	1.1590	1.2013	1.1982
280	1.1496	1.1481	1.1518	1.1977	1.1936
300	1.1452	1.1430	1.1463	1.1939	1.1902
320	1.1413	1.1382	1.1409	1.1894	1.1866
340	1.1378	1.1333	1.1356	1.1875	1.1843
360	1.1338	1.1292	1.1315	1.1847	1.1827
380	-	1.1252	1.1285	1.1831	1.1808
400	-	1.1214	1.1255	1.1799	1.1780
420	-	1.1185	1.1218	1.1760	1.1747
440	-	1.1150	1.1172	1.1729	1.1709
460	-	1.1123	1.1130	1.1706	1.1684
480	-	1.1109	1.1101	1.1681	1.1662
500	-	-	1.1073	-	-
520	-	-	1.1050	-	-

ตารางที่ 4.8 (ต่อ) การพีคกำลัง (Pmax/Pavg) ภายในแกนปฏิกรณ์

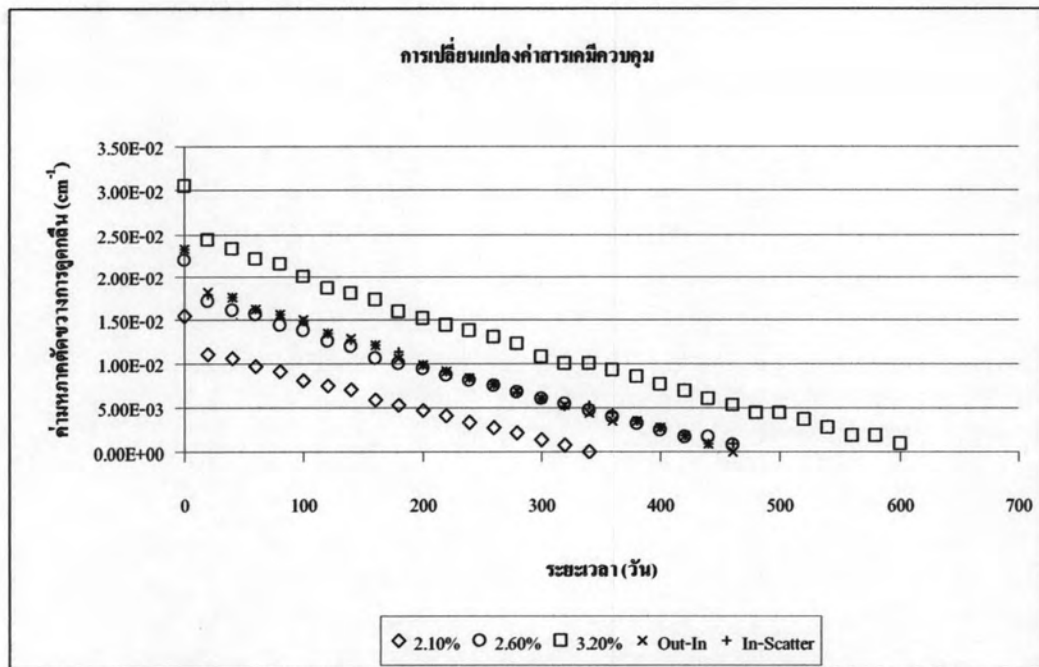
T (วัน)	Uniform 2.1%	Uniform 2.6%	Uniform 3.2%	Out-in Loading	In Scatter
540	-	-	1.1024	-	-
560	-	-	1.1005	-	-
580	-	-	1.0975	-	-
600	-	-	1.0947	-	-
620	-	-	1.0935	-	-



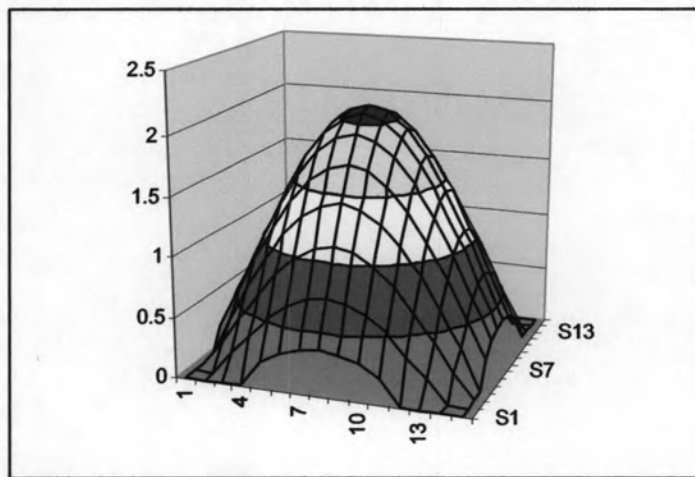
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกำลังเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

ตารางที่ 4.9 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าภาคตัดขวางมหภาคการดูดกลืนจากสารเคมีควบคุม

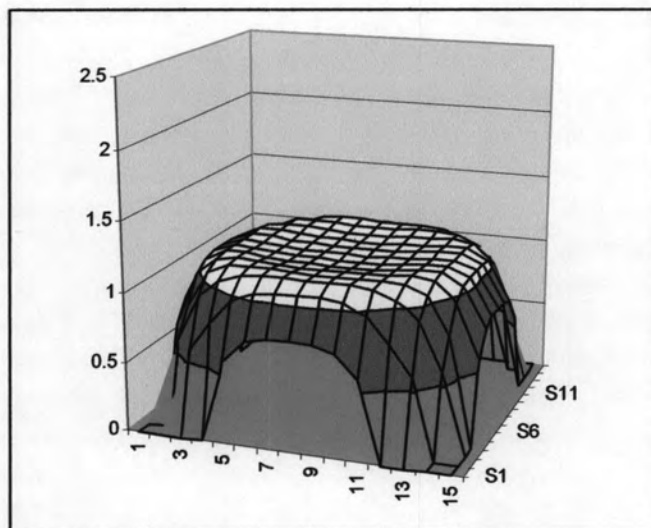
T (วัน)	Uniform 2.1%	Uniform 2.6%	Uniform 3.2%	Out-in Scatter	In Scatter
0	1.549E-02	2.198E-02	3.053E-02	2.326E-02	2.326E-02
20	1.108E-02	1.706E-02	2.431E-02	1.812E-02	1.795E-02
40	1.073E-02	1.607E-02	2.326E-02	1.763E-02	1.753E-02
60	9.699E-03	1.562E-02	2.203E-02	1.628E-02	1.617E-02
80	9.196E-03	1.439E-02	2.141E-02	1.567E-02	1.556E-02
100	8.065E-03	1.383E-02	2.002E-02	1.504E-02	1.494E-02
120	7.537E-03	1.256E-02	1.862E-02	1.359E-02	1.350E-02
140	6.995E-03	1.198E-02	1.798E-02	1.290E-02	1.282E-02
160	5.795E-03	1.068E-02	1.733E-02	1.221E-02	1.213E-02
180	5.215E-03	1.006E-02	1.587E-02	1.067E-02	1.142E-02
200	4.610E-03	9.424E-03	1.519E-02	9.942E-03	9.882E-03
220	3.992E-03	8.774E-03	1.449E-02	9.191E-03	9.142E-03
240	3.361E-03	8.113E-03	1.378E-02	8.418E-03	8.378E-03
260	2.717E-03	7.441E-03	1.307E-02	7.632E-03	7.597E-03
280	2.060E-03	6.757E-03	1.234E-02	6.835E-03	6.804E-03
300	1.388E-03	6.060E-03	1.078E-02	6.026E-03	5.998E-03
320	7.006E-04	5.347E-03	1.002E-02	5.199E-03	5.180E-03
340	0.000E+00	4.616E-03	1.008E-02	4.359E-03	5.212E-03
360	-	3.875E-03	9.297E-03	3.508E-03	4.370E-03
380	-	3.122E-03	8.505E-03	3.529E-03	3.517E-03
400	-	2.359E-03	7.702E-03	2.663E-03	2.654E-03
420	-	1.584E-03	6.890E-03	1.784E-03	1.779E-03
440	-	1.594E-03	6.064E-03	8.963E-04	8.939E-04



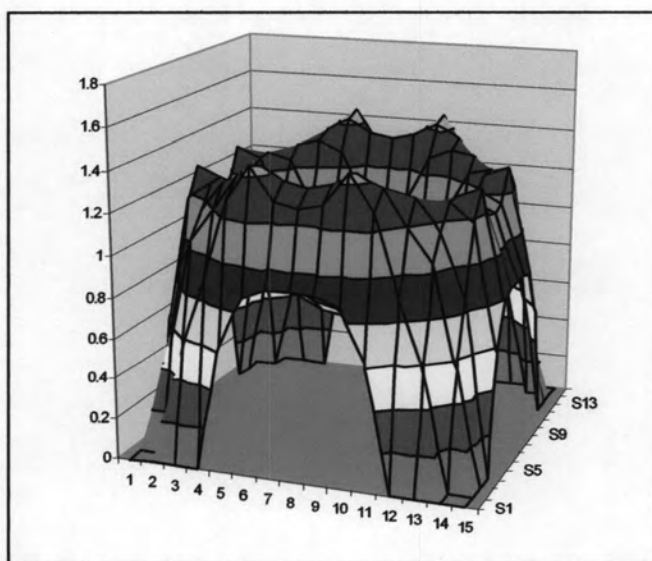
รูปที่ 4.8 ค่าภาคตัดขวางมหภาคการดูดกลืนที่เพิ่มในระบบ



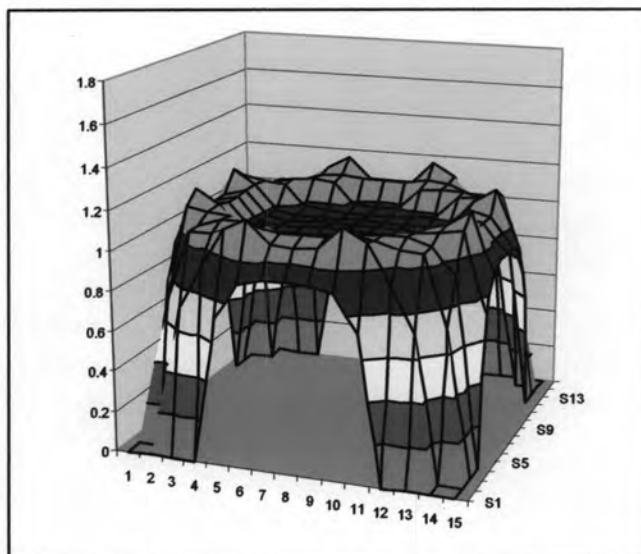
รูปที่ 4.9 การกระจายค่าพิกัดกำลังในแกนปฏิกรณ์ฯ เมื่อบรรจุเชื้อเพลิงแบบเนื้อเดียวที่เวลา 0 วัน



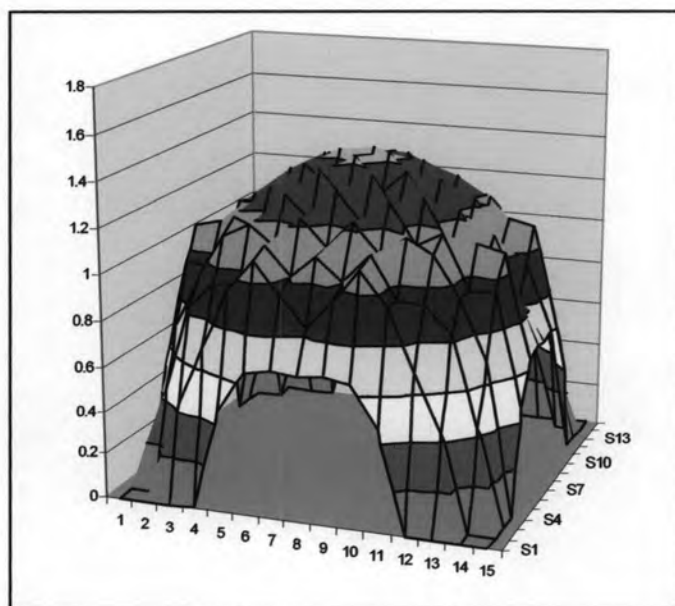
รูปที่ 4.10 การกระจายค่าพีคกำลังในแกนปฏิกรณ์ฯ เมื่อบรรจุเชื้อเพลิงแบบเนื้อเดียวที่เวลา 400 วัน



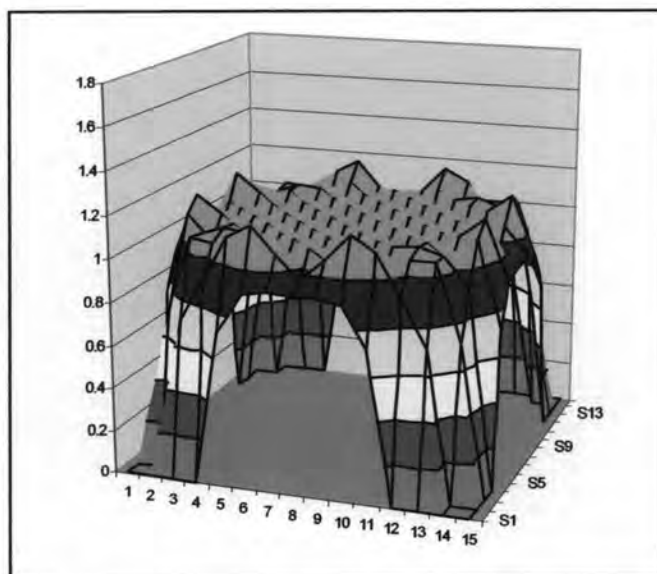
รูปที่ 4.11 การกระจายค่าพีคกำลังในแกนปฏิกรณ์ฯ เมื่อบรรจุเชื้อเพลิงแบบ Out-in ที่เวลา 0 วัน



รูปที่ 4.12 การกระจายค่าพืคกำลังในแกนปฏิกรณ์ฯ เมื่อบรรจุเชื้อเพลิงแบบ Out-in ที่เวลา 400 วัน



รูปที่ 4.13 การกระจายค่าพืคกำลังในแกนปฏิกรณ์ฯ เมื่อบรรจุเชื้อเพลิงแบบ In-Scatter ที่เวลา 0 วัน



รูปที่ 4.14 การกระจายค่าพิศกำลังในแกนปฏิกรณ์ฯ เมื่อบรรจุเชื้อเพลิงแบบ In-Scatter ที่เวลา 400 วัน

4.6 การคำนวณค่าการเผาผลาญเชื้อเพลิงต่อการบรรจุเชื้อเพลิงในแต่ละวงรอบ (cycle)

การคำนวณการบรรจุเชื้อเพลิงเป็นวงรอบหรือการเติมเชื้อเพลิงเข้าไปในแกนปฏิกรณ์ฯ ที่ได้ดำเนินการมาเป็นระยะเวลาหนึ่งจนกระทั่งคาร์แอกติวิตีส่วนเกินมีค่าลดต่ำลงจนไม่สามารถนำแกนปฏิกรณ์ฯ เข้าสู่ภาวะวิกฤตได้ จำเป็นต้องจัดการแกนใหม่

การคำนวณในหัวข้อนี้จะทำการคำนวณในกรณีที่แกนปฏิกรณ์ฯ บรรจุเชื้อเพลิงแบบเนื้อเดียวไว้ และทำการคำนวณการเผาผลาญเชื้อเพลิงจนกระทั่งพบว่าค่าวิกฤตที่ได้จากการคำนวณมีค่าต่ำกว่า 1.00 จึงเข้าสู่กระบวนการจัดการเชื้อเพลิงโดยการนำเชื้อเพลิง 65 มัดที่มีการเผาผลาญมากที่สุดออกจากแกนปฏิกรณ์ฯ ในกรณีนี้จะเป็นเชื้อเพลิงที่บรรจุอยู่ส่วนวงรอบในของแกนปฏิกรณ์ฯ ออก จากนั้นเลือกเชื้อเพลิง 1 มัด จาก 65 มัดที่เลือกออกไปโดยเลือกมัดที่มีค่าการเผาผลาญน้อยที่สุด นำมาใส่ไว้ที่ตำแหน่งกลางแกนปฏิกรณ์ฯ จากนั้นย้ายเชื้อเพลิงที่เหลือรอบนอกเข้ามาบรรจุข้างในแทน แล้วจึงบรรจุเชื้อเพลิงมัดใหม่ ณ ตำแหน่งที่ว่างที่วงรอบข้างนอกอีกครั้ง โดยมีข้อกำหนดว่าเชื้อเพลิงใหม่ที่บรรจุสำหรับการคำนวณนี้จะบรรจุเชื้อเพลิงที่มีค่าเสริมสมรรถนะเดิม

ค่าที่ได้จากการคำนวณค่าการเผาผลาญเชื้อเพลิงมีหน่วยเป็นเมกะวัตต์วันต่อกิโลกรัมยูเรเนียม (MWD/kgU) และจะนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับการคำนวณในระบบสองมิติและหนึ่งกลุ่มพลังงาน

0	0	0	0	1	2	3	4	5	6	7	0	0	0	0
0	0	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	0	0
0	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	0
0	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	0
45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74
75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	102	104
105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119
120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134
135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149
0	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	0
0	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	0
0	0	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	0	0
0	0	0	0	187	188	189	190	191	192	193	0	0	0	0

 มัคเชื้อเพลิงที่นำออกจากแกนปฏิกรณ์ฯ

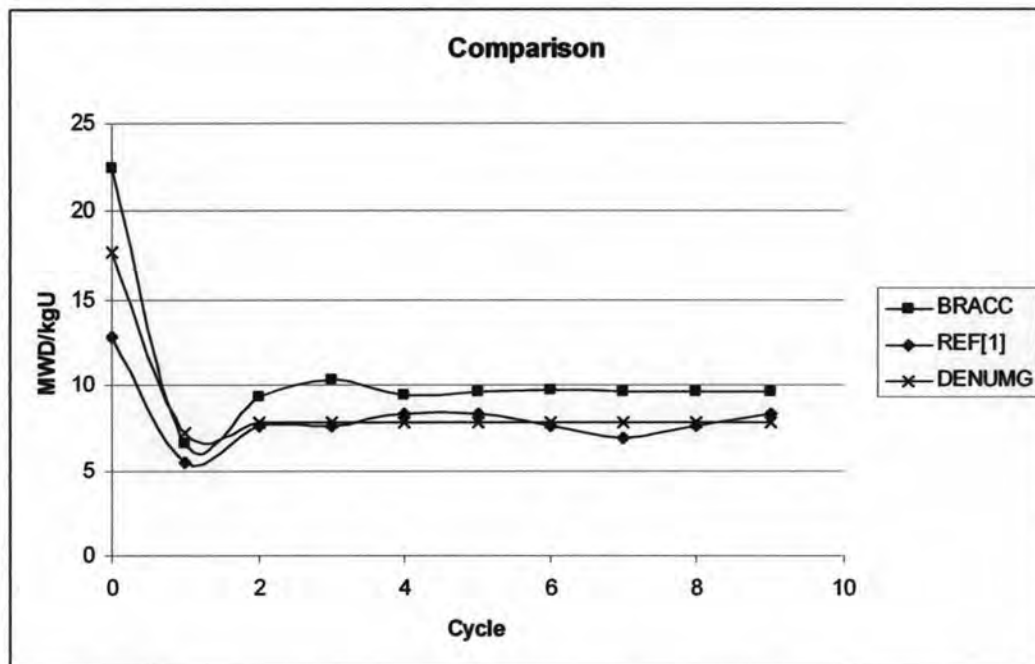
รูปที่ 4.15 หมายเลขประจำตำแหน่งที่สมมูลกับการบรรจุเชื้อเพลิงเมื่อพิจารณาการแบ่งแกนปฏิกรณ์ ออกเป็น 15 x 15

0	0	0	0								0	0	0	0		
0	0					8	188	18						0	0	
0			1	60	9	20	178	30	17	74	7				0	
0		45	75	61	11	12	13	14	15	73	89	59			0	
		3	46	34	23	23	107	27	28	29	58	5				
		90	35	47	17	92	153	25	91	57	43	190				
	19	32	76	34	14	49	167	56	26	42	88	44	31			
	2	10	91	62	35	36	83	158	159	152	105	184	192			
	163	150	106	152	168	159	40	146	170	160	119	162	175			
		4	151	137	123	168	41	102	111	147	161	104				
		189	136	165	166	154	72	174	177	172	148	191				
0		135	105	121	179	160	184	182	183	133	119	149			0	
0				187	120	177	164	16	174	185	134	193			0	
0	0					176	6	186							0	0
0	0	0	0												0	0

 มัคเชื้อเพลิงใหม่ที่นำเข้าแกนปฏิกรณ์ฯ

รูปที่ 4.16 หมายเลขประจำตำแหน่งภายหลังการสลับตำแหน่งและบรรจุเชื้อเพลิงเพิ่ม

ผลการคำนวณเมื่อบรรจุเชื้อเพลิงชนิด 3.2% แบบเนื้อเคียวและการปรับเปลี่ยนเชื้อเพลิงแบบวงรอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.17 พบว่าค่าการเผาผลาญเชื้อเพลิงเข้าสู่ค่าประมาณ 7.82 เมกะวัตต์วันต่อกิโลกรัมยูเรเนียม



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบผลคำนวณการเผาผลาญเชื้อเพลิงในหน่วยเมกะวัตต์วันต่อกิโลกรัมยูเรเนียม

4.7 การคำนวณสามมิติ สองกลุ่มพลังงาน

การคำนวณในพิกัดจากแบบสามมิติจะอาศัยข้อมูลในการคำนวณเดิมคือแบ่งจำนวนโหนดตามแกน x และ y เป็น 15 x 15 และกำหนดให้แกน z มีค่ามากกว่า 1 เมื่อโหนดในแกน z มีค่ามากกว่า 1 ในการคำนวณจะไม่ใช้ค่าขุบตัวเรขาคณิต แต่จะคำนวณด้วยกระบวนการวิธีผลต่างสี่บเนื่องแบบสามมิติ

4.7.1 เปรียบเทียบผลการคำนวณค่าวิกฤตทางทฤษฎี ผลจากโปรแกรม SRAC และผลจากโปรแกรมที่พัฒนา ในแบบสามมิติ

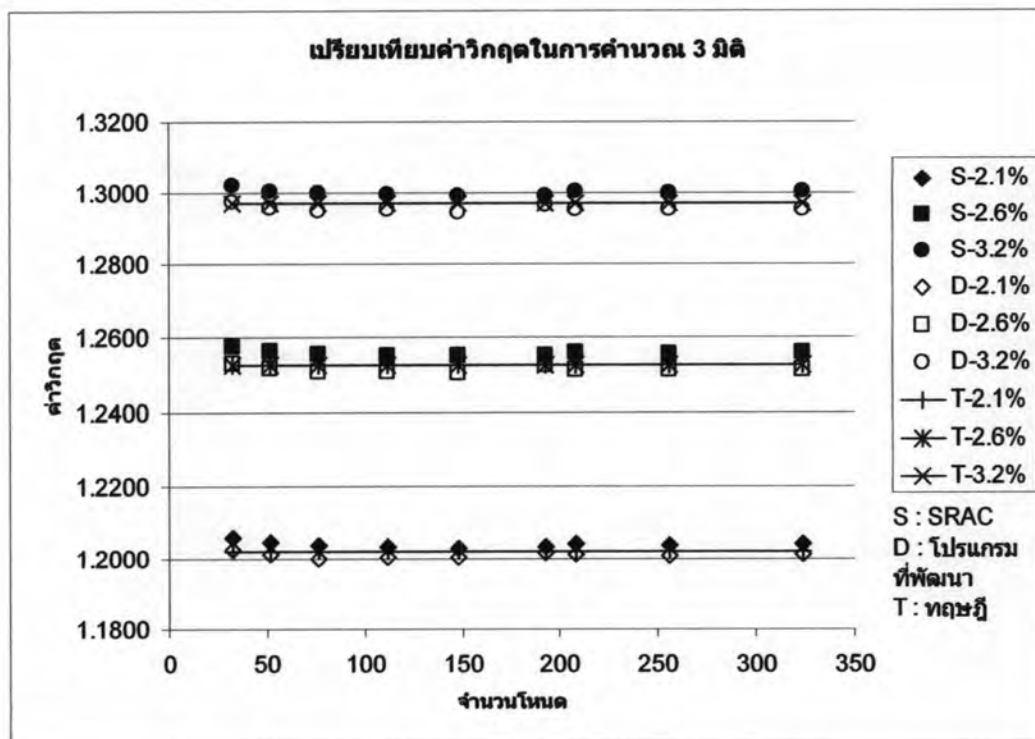
ในการคำนวณแบบสามมิติ พิจารณาจำนวนโหนดตามภาคตัดขวางของแกนปฏิกรณ์ และจะคำนวณโดยกำหนดให้การแบ่งโหนด ตามแกน z มีค่าเท่ากับการแบ่งโหนดตามแกน x และ y ตามตารางที่ 4.10 ผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนา (DENUMG) เมื่อเปรียบเทียบกับ โปรแกรม SRAC และทฤษฎี สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.18

ตารางที่ 4.10 การแบ่งโหนดตามแกน x y และ z และจำนวนโหนดตามภาคตัดขวาง

x y z	จำนวนโหนดตามภาคตัดขวาง x y
6x6x6	32
8x8x8	52
10x10x10	76
12x12x12	112
14x14x14	148
15x15x15	193
16x16x16	193
18x18x18	208
20x20x20	254

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบผลการคำนวณค่าวิกฤตในแบบสามมิติ เมื่อบรรจุเชื้อเพลิงที่เสริมสมรรถนะเดียวกันทั้งแกน

Nodes	เสริมสมรรถนะ 2.1%		เสริมสมรรถนะ 2.6%		เสริมสมรรถนะ 3.2%	
	SRAC	DENUMG	SRAC	DENUMG	SRAC	DENUMG
32	1.2057	1.2025	1.2575	1.2530	1.3020	1.2973
52	1.2044	1.2012	1.2562	1.2517	1.3006	1.2960
76	1.2039	1.2001	1.2557	1.2507	1.3001	1.2949
112	1.2035	1.2005	1.2553	1.2509	1.2997	1.2952
148	1.2031	1.2002	1.2549	1.2503	1.2993	1.2945
193	1.2032	1.2017	1.2549	1.2523	1.2993	1.2965
208	1.2042	1.2012	1.2560	1.2511	1.3004	1.2955
256	1.2039	1.2010	1.2556	1.2511	1.3000	1.2952
324	1.2041	1.2011	1.2559	1.2514	1.3003	1.2953



รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบผลการคำนวณ

4.7.2 เปรียบเทียบผลการคำนวณค่าวิกฤตเมื่อแบ่งแกน z ในจำนวนโหนดต่างกัน

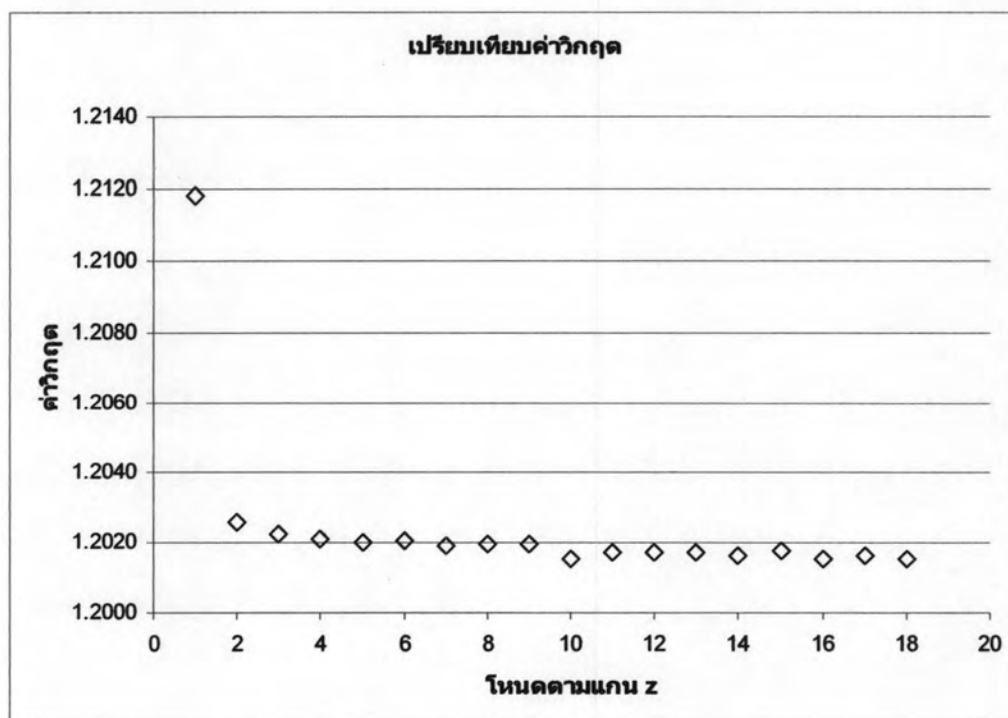
การเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดตามแกน z มีผลต่อค่าวิกฤต ตามตารางที่ 4.12 พบว่าค่าวิกฤตเข้าสู่ค่าประมาณ 1.2016

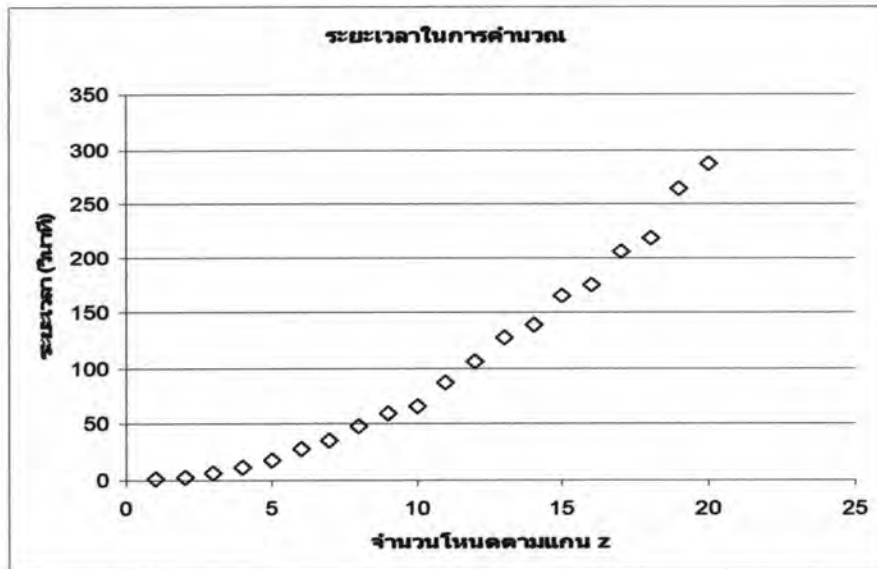
ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบค่าวิกฤตเมื่อแบ่งจำนวนโหนดตามแกน z ต่างกัน

จำนวนโหนดตามแกน z ที่แบ่ง	ค่าวิกฤต	ระยะเวลาในการคำนวณ (วินาที)
1	1.2118	1
2	1.2026	3
3	1.2022	6
4	1.2021	11
5	1.2020	17
6	1.2021	28
7	1.2019	35
8	1.2020	48

ตารางที่ 4.12 (ต่อ) เปรียบเทียบค่าวิกฤตเมื่อแบ่งจำนวนโหนดตามแกน z ต่างกัน

จำนวนโหนดตามแกน z ที่แบ่ง	ค่าวิกฤต	ระยะเวลาในการคำนวณ (วินาที)
9	1.2020	59
10	1.2015	65
11	1.2017	87
12	1.2017	106
13	1.2017	127
14	1.2016	138
15	1.2017	165
16	1.2015	175
17	1.2016	207
18	1.2015	219

รูปที่ 4.19 การดูเข้าของค่าวิกฤตเมื่อแบ่งแกน Z จำนวนโหนดต่างๆ



รูปที่ 4.20 ระยะเวลาในการคำนวณเมื่อแบ่งจำนวน โหนดตามแกน z ต่างกัน

4.7.3 ค่าพีคกำลังเมื่อคำนวณในแบบ 3 มิติ

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบค่าวิกฤตและค่าพีคกำลังภายในแกนปฏิกรณ์เมื่อบรรจุเชื้อเพลิงแบบต่างกัน

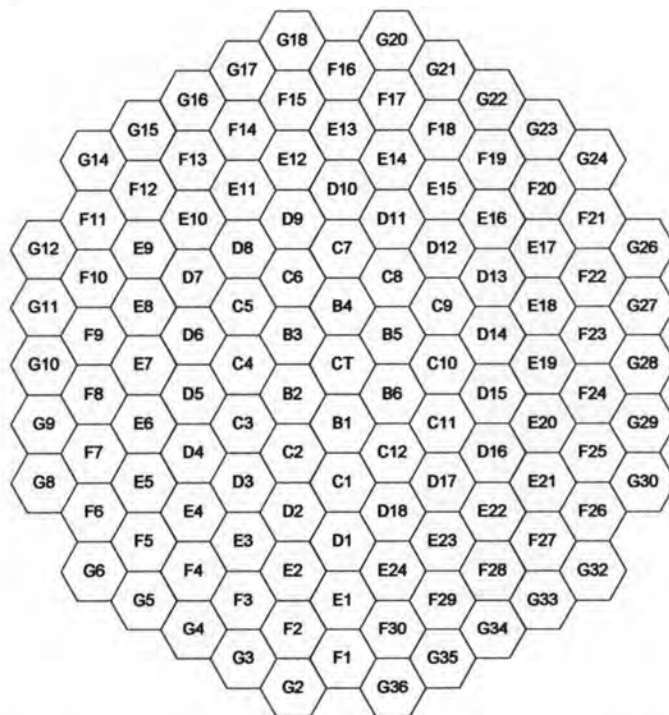
การบรรจุเชื้อเพลิงแบบเนื้อเดียว			การบรรจุเชื้อเพลิงแบบ Out-In Loading		การบรรจุเชื้อเพลิงแบบ In-Scatter	
เสริมสมรรถนะ	ค่าวิกฤต	PPF	ค่าวิกฤต	PPF	ค่าวิกฤต	PPF
2.1%	1.2017	2.1079				
2.6%	1.2519	2.1086	1.2320	1.4571	1.2341	1.4250
3.2%	1.2966	2.1090				

4.8 เปรียบเทียบผลการคำนวณการจัดแกนปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว-1/1 จากโปรแกรม SRAC และ DENUMG โดยทำการคำนวณในรูปแบบสองมิติ และสองกลุ่มพลังงาน

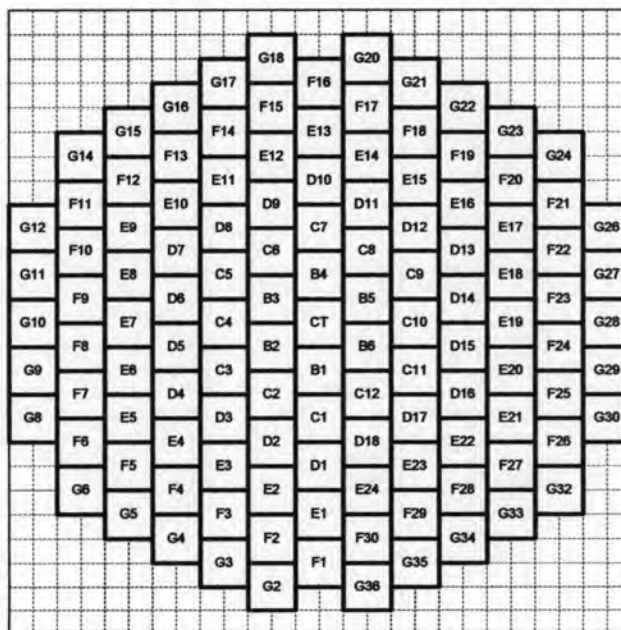
ผลการคำนวณนี้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณการบรรจุเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์ ปปว-1/1 ด้วยโปรแกรม SRAC เทียบกับโปรแกรม DENUMG

แกนปฏิกรณ์ ปปว -1/1 ถูกจัดเรียงอยู่ในลักษณะหกเหลี่ยม (Hexagonal) ซึ่งโปรแกรม SRAC จะจำลองรูปแบบการจัดแกนได้ ในขณะที่การจัดเรียงด้วยโปรแกรม DENUMG จะพยายามจัดให้อยู่ในรูปแบบใกล้เคียง 6 เหลี่ยมมากที่สุด ดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 และพิจารณาการ

คำนวณในรูปแบบสองมิติ โดยมีความกว้าง x ยาว = 55.88 cm x 55.88 cm และส่วนที่เป็นเนื้อ
เชื้อเพลิงมีความสูง 38.1 cm



รูปที่ 4.21 การจัดวางเชื้อเพลิงภายในแกนปฏิกรณ์ ปปว -1/1 และคำนวณด้วยโปรแกรม SRAC



รูปที่ 4.22 การจัดวางเชื้อเพลิงที่สมมูลกับแกนปฏิกรณ์ ปปว-1/1 และคำนวณด้วยโปรแกรม
DENUMG

ตารางที่ 4.14 ผลการคำนวณแกนปฏิกรณ์ ปปว-1/1 ด้วยโปรแกรม SRAC และ DENUMG

โหนดที่ใช้ใน DENUMG	SRAC		DENUMG	
	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	ค่าวิกฤต	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	ค่าวิกฤต
492	1920.20	1.1517	2272.64	1.3971
369	1920.20	1.1517	2178.13	1.3781
56	1920.20	1.1517	1748.64	1.2958

ผลการคำนวณแม่พยามจักรูปแบบแกนปฏิกรณ์ในพิกัดฉากสองมิติให้คล้ายกับการจัดแกนในรูปแบบหกเหลี่ยม (รูปแบบการจัดแกนปฏิกรณ์ ปปว-1/1) ค่าวิกฤตที่คำนวณได้มีค่าสูงมากดังนั้นจึงทำการปรับปรุงรูปแบบการบรรจุเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์ที่คำนวณด้วยโปรแกรม DENUMG โดยจะเพิ่มส่วนที่เป็นสารสะท้อนนิวตรอนไปที่ขอบของแกนปฏิกรณ์และใช้การคำนวณรูปแบบสามมิติแบ่งจำนวนโหนดตามแกน x y และ z เป็น 26 x 26 x 9 และดูผลการคำนวณค่าวิกฤตที่ได้จากโปรแกรม SRAC และ DENUMG

ตารางที่ 4.15 ผลการคำนวณแกนปฏิกรณ์ ปปว-1/1 ด้วยโปรแกรม SRAC และ DENUMG ในสามมิติ

ค่าวิกฤตจากโปรแกรม SRAC	ค่าวิกฤตจากโปรแกรม DENUMG
1.0216	1.0176