บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการคำนวณแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ในแบบสองมิติ และสองกลุ่มพลังงานโดยอาศัยทฤษฎีการแพร่ของนิวตรอนร่วมกับกระบวนวิธีผลต่างสืบเนื่อง ทำการคำนวณโมเดลแกนปฏิกรณ์ฯ ที่สร้างขึ้นในระบบพิกัดฉาก ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตที่บังคับให้ปริมาณนิวตรอนที่ขอบแกนฯ มีค่าเป็นศูนย์ และ นิวตรอนฟลักซ์คงที่ในช่วงเวลาที่คำนวณ ผลที่ได้จากการคำนวณ ประกอบด้วยค่าวิกฤต การกระจายของนิวตรอนฟลักซ์และการกระจายความหนาแน่นกำลังในแกนฯ ค่าการเผาผลาญเชื้อเพลิง และเปรียบเทียบผลจากการบรรจุเชื้อเพลิงในรูปแบบต่าง ๆ คือ การบรรจุเชื้อเพลิงชนิดเดียวทั้งแกน การบรรจุเชื้อเพลิงแบบ Out-in Loading และการบรรจุเชื้อเพลิงแบบ In-Scatter Loading

ผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้จะนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยทฤษฎีเดียวกันด้วยโปรแกรม SRAC ซึ่งเป็นโปรแกรมที่พัฒนาโดยทบวงการปรมาณูแห่งประเทศญี่ปุ่น (Japan Atomic Energy Agency JAEA) และผลการคำนวณสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ผลการคำนวณค่าวิกฤต

ผลการคำนวณค่าวิกฤตที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนา (DENUMG) เมื่อเปรียบเทียบกับ โปรแกรม SRAC แล้ว มีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์แตกต่างกันที่ทศนิยมตำแหน่งที่ 3 โดยค่าวิกฤตที่คำนวณจากโปรแกรม DENUMG จะมีค่าสูงกว่าการคำนวณด้วยโปรแกรม SRAC ทั้งนี้เนื่องจากในการพัฒนาโปรแกรมได้พิจารณาเงื่อนไขขอบเขตให้ค่านิวตรอนฟลักซ์ที่ขอบมีค่าเป็นศูนย์ แต่ในโปรแกรม SRAC ใช้เงื่อนไขขอบเขตที่ต่างกัน ซึ่งเป็นไปได้ว่านิวตรอนที่เล็ดลอดออกออกจากระบบเมื่อคำนวณด้วยโปรแกรม SRAC มีค่าน้อยกว่า จึงทำให้ค่าวิกฤตที่ได้จากโปรแกรม SRAC มีค่ามากกว่า แต่อย่างไรก็ตาม ผลจากการคำนวณพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ที่น้อยกว่านี้ จะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอตลอดการคำนวณไม่ว่าเงื่อนไขจำนวนเชื้อเพลิง ชนิดเชื้อเพลิง หรือจำนวนโหนดที่กำหนดให้กับทั้งสองโปรแกรมจะมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรก็ตาม ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าโปแกรมที่พัฒนาขึ้นมีกระบวนวิธีในการคำนวณเชิงตัวเลขเป็นไปอย่างถูกต้อง

อย่างไรก็ตาม จากการเปรียบเทียบการคำนวณเมื่อแกนปฏิกรณ์มีขนาดเล็กลง พบว่า การคำนวณด้วยโปรแกรมที่พัฒนาคำนวณค่าวิกฤตสูงกว่าโปรแกรม SRAC มาก ทั้งนี้เนื่องจากเงื่อนไขขอบเขต ซึ่งจะกล่าวอย่างละเอียดอีกครั้งในหัวข้อ การเปรียบเทียบผลการคำนวณแกนปฏิกรณ์ ปปว-1/1

5.1.2 ผลการคำนวณค่าวิกฤตจากสมการการแพร่สำหรับหนึ่งกลุ่มพลังงานและสองกลุ่มพลังงาน

ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่าวิกฤตที่ได้จากสมการการแพร่สำหรับหนึ่งกลุ่มพลังงาน มีค่าสูงกว่าการคำนวณค่าวิกฤตจากสมการการแพร่สองกลุ่มพลังงาน ทั้งนี้หากพิจารณาสมการหาค่าวิกฤตสำหรับหนึ่งกลุ่มพลังงานแล้วพบว่า สมการจะไม่พิจารณาถึงการลดพลังงานที่เป็นค่าบอกถึงความน่าจะเป็นที่นิวตรอนพลังงานสูงสามารถลดระดับพลังงานมาเป็นเทอร์มัลนิวตรอนโดยไม่ถูกดูดกลืน และนอกจากนี้การคำนวณในแบบหนึ่งกลุ่มพลังงานยังไม่พิจารณาโอกาสที่ฟาสต์นิวตรอนจะไม่เล็ดลอดออกจากจากระบบ จึงทำให้ค่าวิกฤตที่คำนวณสำหรับหนึ่งกลุ่มพลังงานมีค่ามากกว่าค่าวิกฤตที่คำนวณสำหรับสองกลุ่มพลังงาน

5.1.3 ผลการคำนวณค่าพีคกำลังเมื่อบรรจุเชื้อเพลิงในรูปแบบต่าง ๆ

ผลค่าพีคกำลัง หรือ พีคแฟกเตอร์ ที่คำนวณเมื่อบรรจุเชื้อเพลิงสามรูปแบบคือ การบรรจุเชื้อเพลิงแบบเนื้อเดียว การบรรจุเชื้อเพลิงแบบ Out-in Loading และการบรรจุเชื้อเพลิงแบบ In-Scatter Loading พบว่า การบรรจุเชื้อเพลิงแบบเนื้อเดียว ไม่ว่าเชื้อเพลิงจะมีการเสริมสมรรถนะเท่าใด ให้ผลค่าพีคแฟกเตอร์มากที่สุด ในขณะที่ Out-In Loading และ In-Scatter Loading ให้ค่าพีคแฟกเตอร์น้อยลงตามลำดับ ค่าพีคแฟกเตอร์ที่มีค่าสูงแสดงให้เห็นว่าค่ากำลังสูงสุดต่อค่ากำลังเฉลี่ยในแกนมีค่าสูงมากซึ่งไม่ดีต่อการจัดการแกนปฏิกรณ์ฯ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบการบรรจุเชื้อเพลิงทั้งสามรูปแบบแล้วจะเห็นว่า การจัดแกนปฏิกรณ์ในรูปแบบ In-Scatter Loading จะเป็นการจัดแกนปฏิกรณ์ที่เหมาะสมที่สุดเพราะมีการกระจายกำลังในแกนอย่างสม่ำเสมอ ในขณะที่การจัดแกนปฏิกรณ์แบบเนื้อเดียวทั้งแกนให้ผลค่าพีคกำลังสูง และไม่เหมาะสมต่อการจัดการแกนปฏิกรณ์

5.1.4 การคำนวณค่าการเผาผลาญเชื้อเพลิง

ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าในการคำนวณการเผาผลาญเชื้อเพลิงขั้นเวลาที่ 1 (20 วัน) การลดลงของค่าวิกฤตจะลดลงเร็วกว่าขั้นเวลาถัด ๆ ไปเนื่องจากมีการเกิดผลผลิตฟิชชั่นขึ้นภายในเชื้อเพลิงซึ่งจะผลผลิตฟิชชั่นบางตัวมีค่าภาคตัดขวางการดูดกลืนสูงทำให้มีการดูดกลืน

นิวตรอนเพิ่มขึ้นภายในแกนและทำให้การเผาผลาญเชื้อเพลิงช้าลงเป็นผลให้ค่าวิกฤตลดลงอย่างช้า ๆ ตามกันไป

ค่าวิกฤตที่แสดงในตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นถึงค่ารีแอคติวิตีส่วนเกิน (excess reactivity) ในการบรรจุเชื้อเพลิงรูปแบบต่าง ๆ และเมื่อเวลาเปลี่ยนไป จะเห็นว่าค่ารีแอคติวิตีส่วนเกินนี้ ทำให้สามารถประมาณระยะเวลาในการปฏิบัติการแกนปฏิกรณ์ได้ ผลการคำนวณยืนยันว่าการบรรจุเชื้อเพลิงชนิดเสริมสมรรถนะ 3.2% แบบเนื้อเดียวสามารถใช้งานแกนปฏิกรณ์ฯ ได้นานกว่า แต่เนื่องจากมีค่าพีคกำลังสูงดังนั้นจึงไม่เหมาะสม ดังที่กล่าวไว้ใน 5.1.4

5.1.5 การปรับค่าภาคตัดขวางมหภาคการดูดกลืนของสารเคมีควบคุม

การปรับค่าภาคตัดขวางมหภาคการดูดกลืนของสารเคมีควบคุมจะปรับที่กลุ่มพลังงานความร้อน เนื่องจากในแกนปฏิกรณ์ที่ศึกษาจะเกิดอันตรกิริยาแตกตัวกับนิวตรอนที่อยู่ในกลุ่มพลังงานความร้อนเป็นหลัก ดังนั้นการปรับค่าภาคตัดขวางมหภาคการดูดกลืนของสารเคมีควบคุมในกลุ่มพลังงานความร้อนจึงมีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงเทอร์มัลนิวตรอนในระบบ และมีผลต่อค่าวิกฤตโดยตรง อย่างไรก็ตามเทคนิคที่ใช้ในการปรับค่าภาคตัดขวางมหภาคการดูดกลืนอาจทำให้ค่าวิกฤตเข้าสู่สภาวะใต้วิกฤต (น้อยกว่า 1.00) ทำให้การคำนวณที่มีวงรอบเยอะเกิดการสะสมของค่าคลาดเคลื่อน

5.1.6 เปรียบเทียบการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแบบวงรอบ

จากการผลการคำนวณพบว่าการเปลี่ยนเชื้อเพลิงตามรูปแบบที่อธิบายไว้ให้ผลลู่เข้าสู่ค่าการเผาผลาญเกิดการแกว่งเล็กน้อย ทั้งนี้เป็นผลจากการปรับค่าภาคตัดขวางมหภาคการดูดกลืนในการคำนวณและเป็นผลมาจากการคำนวณเชิงตัวเลขเช่นกัน อย่างไรก็ตาม ผลการคำนวณที่ได้จากการกำหนดค่ากลุ่มนิวตรอน 2 และ 4 กลุ่ม จะให้แนวโน้มเดียวกัน ซึ่งการเปรียบเทียบผลจากกาคำนวณด้วยโปรแกรมที่พัฒนา และโปรแกรมที่คำนวณด้วยนิวตรอนกลุ่มเดียว พบว่ามีค่าการเผาผลาญเชื้อเพลิงที่ใกล้เคียงกัน

5.1.7 การคำนวณสมการการแพร่ในระบบพิกัดฉากสามมิติ สองกลุ่มพลังงาน

ผลการคำนวณในระบบพิกัดฉากสามมิติ และสองกลุ่มพลังงานพบว่า ค่าวิกฤตที่คำนวณด้วยโปรแกรมที่พัฒนาเมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรม SRAC แล้วยังมีแนวโน้มในลักษณะเดียวกับการคำนวณในสองมิติ นั่นคือค่าที่คำนวณด้วยโปรแกรม SRAC จะมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบค่าวิกฤตที่คำนวณในสองมิติ และ สามมิติแล้ว จะเห็นว่าค่าวิกฤตที่ได้จากการ

คำนวณในระบบสองมิติจะมีค่าสูงกว่าการคำนวณในระบบสามมิติทั้งนี้เนื่องจากการคำนวณในแกน z ในระบบ 3 มิติ ไม่ได้ใช้ค่ายุบตัวเรขาคณิต แต่ใช้การคำนวณจากการแบ่งจำนวนโหนดตามแกน z

ทดลองคำนวณโดยแบ่งจำนวนโหนดตามแกน x y เท่าเดิมคือ 15 x 15 แต่เปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดตามแกน z พบว่า ผลการคำนวณจะมีแนวโน้มลู่เข้าสู่ค่าค่า 1.2016 เมื่อจำนวนโหนดตามแกน z เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการแบ่งโหนดตามแกน z ที่เหมาะสมในการคำนวณนี้มีค่าระหว่าง 6 ถึง 9 โหนด เนื่องจากผลการคำนวณมีค่าเข้าสู่ผลการคำนวณทางทฤษฎี

5.1.8 ระยะเวลาในการคำนวณหาผลเฉลย

ระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณขึ้นอยู่กับจำนวนโหนด จำนวนกลุ่มพลังงาน ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สำหรับการลู่เข้า ค่าภาคตัดขวางมหภาคการดูดกลืนสารเคมีควบคุมที่ปรับ ขั้นเวลาในการเผาผลาญเชื้อเพลิงและสมรรถนะของคอมพิวเตอร์ ทั้งนี้พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณเมื่อจำนวนโหนดเพิ่มขึ้นมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น

5.1.9 เปรียบเทียบผลการคำนวณแกนปฏิกรณ์ ปปว-1/1

โปรแกรมที่พัฒนาเมื่อนำมาใช้กับการคำนวณแกนปฏิกรณ์ ปปว-1/1 เมื่อคำนวณในระบบสองมิติ พบว่าค่าวิกฤตที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่าค่าวิกฤตที่คำนวณได้จากโปรแกรม SRAC เนื่องจากในการคำนวณแกนปฏิกรณ์ขนาดเล็กเงื่อนไขขอบเขตที่ตั้งไว้แต่ต้นสำหรับโปรแกรม DENUMG ทำให้ปริมาณนิวตรอนที่รั่วไหลออกจากระบบน้อยกว่าที่ควรจะเป็นนั่นคือ 55.88 / 26 = 2.15 เซนติเมตร เมื่อเทียบกับแกนปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ 366.0/15 = 24.4 เซนติเมตร ซึ่งตามทฤษฎีแล้ว ที่สภาวะขอบค่ามีระยะขยาย (Extended length) ประมาณ $0.7\lambda tr$ (λtr คือ transport mean free path) ซึ่งค่ามากกว่า 2.15 เซนติเมตร

การคำนวณในรูปแบบสองมิติภายใต้สมมติฐานที่กล่าวมาสำหรับโปรแกรม DENUMG ไม่สามารถคำนวณแกนขนาดเล็กได้ จึงปรับปรุงการคำนวณโดยเพิ่มส่วนที่เป็นสารสะท้อนนิวตรอน (Reflector) ไว้ที่ขอบแกนปฏิกรณ์เพื่อแก้ปัญหาจากการการประมาณค่านิวตรอนเล็ดลอดต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่า การคำนวณในแบบสามมิติ สามารถลดผลกระทบจากสภาวะขอบได้ โดยค่าวิกฤตที่คำนวณได้มีค่าลดลงและผลจากการคำนวณด้วยโปรแกรม SRAC ก็มีค่าลดลงเช่นกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรปรับปรุงการพิจารณาเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) เพื่อให้ค่าที่คำนวณมีความแม่นยำมากขึ้น จะเห็นว่าเมื่อแกนปฏิกรณ์มีขนาดใหญ่ การคำนวณค่าวิกฤตมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณด้วยโปรแกรม SRAC แต่เมื่อแกนปฏิกรณ์มีขนาดเล็กลง โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นคำนวณค่าวิกฤตได้ห่างไกลจากการคำนวณด้วยโปรแกรม SRAC มาก

ในการปรับค่าภาคตัดขวางมหภาคการดูดกลืนสารเคมีควบคุมจะเป็นการเพิ่มค่าเข้าไปในระบบ 1% ทุก ๆ การคำนวณในแต่ละวงรอบ จนกระทั่งพบว่าค่าวิกฤตที่คำนวณได้มีค่าต่ำกว่า 1.001 จึงหยุดการปรับค่าภาคตัดขวางแล้วใช้ค่าคงที่กลุ่มจากการคำนวณก่อนหน้า จากการทำเช่นนี้ทำให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนสะสมและสืบทอดไปยังการคำนวณในวงรอบถัดไป ดังนั้นควรปรับปรุงการคำนวณค่าภาคตัดขวางมหภาคการดูดกลืนสารเคมีควบคุมให้ค่าวิกฤตเข้าใกล้ 1.00 มากที่สุด จะสามารถลดผลกระทบอันเกิดจากการสะสมค่าคลาดเคลื่อนได้

ควรสร้างโมเดลของแท่งควบคุม เพื่อใช้สำหรับการควบคุมปริมาณนิวตรอนที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาการแตกตัว แทนการควบคุมด้วยการปรับค่าภาคตัดขวางมหภาคการดูดกลืนสารเคมีควบคุม

รูปแบบของแกนที่ใช้ในการคำนวณจะมีรูปแบบเดียวกัน ซึ่งในการคำนวณสามารถปรับปรุงสมการการแพร่ของนิวตรอนให้คำนวณเพียง 1 ใน 4 หรือ 1 ใน 8 ส่วน ของแกนได้ โดยการสร้างเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสม จะทำให้ระยะเวลาในการคำนวณลดลง

เนื่องจากค่าภาคตัดขวางจุลภาคของแต่ละกลุ่มจะไม่คงที่ ดังนั้นจึงไม่สามารถหาค่าภาคตัดขวางจุลภาคที่เหมาะสมได้ เป็นผลให้ไม่สามารถทราบการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอะตอมขององค์ประกอบต่าง ๆ ได้ (U-235 U238 ฯลฯ) ดังนั้นควรเพิ่มเติมส่วนการติดต่อข้อมูลจากฐานข้อมูลนิวเคลียร์ (Nuclear Data Library) และขุบรวมกลุ่มเพื่อสร้างค่าคงที่กลุ่มโดยตรง จะทำให้สามารถคำนวณความหนาแน่นอะตอมองค์ประกอบต่าง ๆ ได้

เพิ่มการคำนวณด้วยพิกัดอื่น เช่นพิกัดทรงกระบอก พิกัดทรงกลม หรือ การคำนวณเมื่อเชื้อเพลิงจัดเรียงในรูปแบบหกเหลี่ยม (เช่นแกนปฏิกรณ์ฯ ปปว-1/1)

ตารางที่ 5.1 ตารางสรุปข้อดีและข้อเสียของการบรรจุเชื้อเพลิงในแบบต่าง ๆ

รูปแบบการบรรจุเชื้อเพลิง	ข้อดี	ข้อเสีย
การบรรจุเชื้อเพลิงเนื้อเดียวทั้งแกน	- บรรจุได้ง่าย - สามารถเดินเครื่องได้ระยะเวลานานต่อการบรรจุเชื้อเพลิง 1 ครั้ง - ค่ารีแอคติวิตี้ส่วนเกินขึ้นกับการเสริมสมรรถนะของเชื้อเพลิงที่นำมาบรรจุ	- มีค่าพีคแฟกเตอร์สูงทำให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นกำลังในแกนปฏิกรณ์
การบรรจุเชื้อเพลิงแบบ Out-In Loading	- ให้ค่าพีคแฟกเตอร์ปานกลาง - ค่ารีแอคติวิตี้ส่วนเกินขึ้นกับการเสริมสมรรถนะเฉลี่ยของเชื้อเพลิงที่นำมาบรรจุ	- ค่าพีคแฟกเตอร์จะสูงที่ขอบและเปลี่ยนตำแหน่งต่อวงรอบการคำนวณ
การบรรจุเชื้อเพลิงแบบ In-Scatter Loading	- ให้ค่าพีคแฟกเตอร์ดีที่สุด - ค่ารีแอคติวิตี้ส่วนเกินขึ้นกับการเสริมสมรรถนะเฉลี่ยของเชื้อเพลิงที่นำมาบรรจุ	- ค่าพีคแฟกเตอร์จะมีการเปลี่ยนตำแหน่งต่อวงรอบการคำนวณ