บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้ทำการพิจารณาการคำนวณการจัดการแกนเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ในกลุ่มพลังงานความร้อน (thermal group) ใน 2 มิติ คือให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าที่จะทำการคำนวณตามแนวแกน x และ y ส่วนแนวแกน z จะพิจารณาว่ามีลักษณะการเปลี่ยนเปลงซึ่งบรรยายได้โดยฟังก์ชัน $\sin(\pi/H)$ โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าวิกฤต ขนาดและการกระจายของนิวตรอนฟลักซ์ โปรไฟล์ การเปลี่ยนแปลงของเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์ ค่าการเผาผลาญเชื้อเพลิง และการบรรจุเชื้อเพลิงเปรียบเทียบ ซึ่งจะสามารถสรุปแยกออกเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 การคำนวณค่าวิกฤต

การคำนวณค่าวิกฤตในโปรแกรมดำเนินไปพร้อมกับการคำนวณค่าภาคตัดขวางมหภาคการดูดกลืนสำหรับตัวควบคุม สังเกตได้ว่าปริมาณทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกัน กล่าวคือค่าวิกฤตและค่าภาคตัดขวางมหภาคการดูดกลืนของตัวควบคุมจะเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน จากการคำนวณแสดงได้ว่าความคลาดเคลื่อนของค่าวิกฤตที่คำนวณได้จากโปรแกรมเมื่อเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีแล้วมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในลำดับทศนิยมตำแหน่งที่ 3-4 ส่วนค่าภาคตัดขวางมหภาคการดูดกลืนของตัวควบคุมนั้นมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในลำดับทศนิยมตำแหน่งที่ 4-5 ทั้งนี้เนื่องจากโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นมีการตั้งค่าเพื่อตรวจสอบความคลาดเคลื่อนไว้ โดยที่ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าวิกฤตจากรอบก่อนหน้าเทียบกับรอบปัจจุบันคือ 10^{-5} ส่วนค่าความคลาดเคลื่อนของค่าภาคตัดขวางมหภาคการดูดกลืนของตัวควบคุมนั้นตั้งไว้ที่ 10^{-6}

หากต้องการลดความคลาดเคลื่อนดังกล่าว อาจลดค่าตรวจสอบทั้งคู่ลงได้อีก อย่างไรก็ตามการลดค่าการตรวจสอบทั้งสองลงจะมีผลให้การคำนวณใช้เวลานานมากขึ้น นอกจากนี้โดยผลจากการสะสมของความคลาดเคลื่อนในการคำนวณแต่ละครั้งแต่ละรอบ เมื่อจำนวนรอบการคำนวณเพิ่มขึ้นมาก ๆ อาจมีผลให้ไม่สามารถลดความคลาดเคลื่อนของค่าที่ต้องการคำนวณลงให้น้อยกว่าค่าที่กำหนด เป็นผลให้โปรแกรมหยุดการทำงาน โดยไม่ได้ผลการคำนวณที่ต้องการได้

จากตารางและกราฟจะเห็นได้ว่ามีค่าวิกฤตบางค่าที่คำนวณโดยจำนวนโหนดน้อยกว่าแต่มีค่าวิกฤตเข้าใกล้ค่าวิกฤตจากทฤษฎีมากกว่า ลักษณะเช่นนี้น่าจะเกิดเนื่องจากการคำนวณภายในโปรแกรมทำการคำนวณโดยอาศัยพิกัดฉาก (cartesian coordinate) ซึ่งการกำหนดโหนดบาง

ช่วงอาจมีความเหมาะสมกับรูปแบบพื้นที่หน้าตัดของทรงกระบอกมากกว่าถึงแม้มีจำนวนโหนดน้อยกว่าก็ตาม จึงทำให้สามารถคำนวณค่าได้เข้าใกล้ค่าวิกฤตตามทฤษฎีมากกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อจำนวนโหนดที่ใช้เพิ่มมากขึ้น ลักษณะการจัดเรียงโหนดน่าจะเข้าใกล้พื้นที่หน้าตัดของทรงกระบอกโดยอัตโนมัติ ซึ่งผลการคำนวณก็ชี้ว่าน่าจะเป็นไปตามที่คาดไว้ ทว่าลักษณะการลู่เข้าของค่าที่คำนวณได้ค่อนข้างช้ามาก

5.1.2 การคำนวณนิวตรอนฟลักซ์โปรไฟล์

นิวตรอนฟลักซ์โปรไฟล์ทำขึ้นเพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณลักษณะการกระจายฟลักซ์ของนิวตรอนเพื่อทดสอบว่าโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมีความน่าเชื่อถือเพียงใด โดยจะทำการเปรียบเทียบแกนปฏิกรณ์ทรงกระบอกแบบเนื้อเดียว ซึ่งผลที่ได้จากการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่านิวตรอนฟลักซ์โปรไฟล์ซึ่งคำนวณที่ 193 โหนด มีความเบี่ยงเบนจากค่าทางทฤษฎีซึ่งบรรยายได้โดยฟังก์ชัน bessel(J0) อยู่บ้าง เนื่องจากลักษณะของโหนดไม่เป็นแบบพื้นที่หน้าตัดของทรงกระบอกแท้ ดังนั้นเมื่อเพิ่มจำนวนโหนดให้มากขึ้น คือ 349 โหนดจะเห็นได้ว่านิวตรอนฟลักซ์โปรไฟล์ที่คำนวณได้มีความใกล้เคียงกับฟังก์ชัน bessel(J0) มากขึ้น

5.1.3 การเปรียบเทียบขนาดขั้นเวลาที่เหมาะสมสำหรับคำนวณการเปลี่ยนแปลงของเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์

การคำนวณนี้จะแสดงให้เห็นว่าตลอดระยะเวลาหนึ่งรอบของการใช้เชื้อเพลิงนั้นมีการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงในลักษณะใด จากกราฟเมื่อมีการบรรจุเชื้อเพลิงใหม่ลงไปทั้งหมดซึ่งกำหนดให้เวลาดังกล่าวเป็น 0 ค่าวิกฤตที่ได้ก่อนการปรับค่าภาคตัดขวางมหภาคการดูดกลืนของตัวควบคุมมีค่าสูงประมาณ 1.7 แต่เมื่อผ่านไป 20 วัน ค่าที่ได้จะลดลงอย่างมากเนื่องมาจากการเกิดขึ้นของผลผลิตการแตกตัวซึ่งให้ค่ารีแอกติวิตีเป็นลบ คือ ^{135}Xe และ ^{149}Sm หลังจากนี้ค่าวิกฤตก่อนปรับค่าภาคตัดขวางมหภาคการดูดกลืนของตัวควบคุม และค่าภาคตัดขวางมหภาคการดูดกลืนควบคุมของตัวควบคุมจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ เนื่องจากความหนาแน่นของผลผลิตการแตกตัวจะเข้าสู่สภาวะสมดุลดังนั้นการลดลงของปริมาณที่คำนวณทั้งสองจึงเป็นผลจากการลดลงของปริมาณของ ^{235}U ที่เป็นเชื้อเพลิง

การพิจารณาขนาดขั้นเวลาที่เหมาะสมสำหรับคำนวณการเปลี่ยนแปลงภายในเชื้อเพลิงนั้นได้ทดลองคำนวณด้วยขั้นเวลา 4 ค่า คือ 5 วัน (ใช้เวลาในการคำนวณประมาณ 5 ชั่วโมง) 10 วัน (ใช้เวลาคำนวณประมาณ 2 ชั่วโมง 30 นาที) 20 วัน (ใช้เวลาในการคำนวณ 1 ชั่วโมง 30 นาที) และ 40 วัน (ใช้เวลาในการคำนวณ 1 ชั่วโมง) ผลที่ได้คือระยะเวลาของรอบการปฏิบัติงานของแกนปฏิกรณ์ที่คำนวณได้มีความเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดขั้นเวลาที่ใช้ อย่างไรก็ตามระยะเวลา

ที่เปลี่ยนแปลงไปนี้มีค่าลดลงเมื่อขนาดขั้นเวลาลดลง และจะลู่เข้าหาค่าระยะเวลาอันเป็นลิมิตค่าหนึ่ง ซึ่งหมายถึงว่าหากใช้ขั้นเวลาที่เล็กพอ ค่าระยะของรอบการใช้งานแกนปฏิกรณ์ที่คำนวณได้ก็น่าจะมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาระยะเวลาที่ใช้จริงในการคำนวณกับขนาดความคลาดเคลื่อนของระยะรอบที่คำนวณได้ แล้วได้พิจารณาเห็นว่าขนาดขั้นเวลา 20 วันมีความเหมาะสมที่สุดต่อการคำนวณและมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ และจะใช้ขนาดขั้นเวลา 20 วันสำหรับการคำนวณต่อไป

5.1.4 การคำนวณค่าการเผาผลาญเชื้อเพลิง

ค่าการเผาผลาญเชื้อเพลิงจากการคำนวณเชิงตัวเลข (โดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น) ซึ่งทำการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแบบ Out-In Loading พบว่ามีค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม BRACC ที่ทำการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแบบ Out-In Loading เช่นเดียวกัน ความคลาดเคลื่อนนี้น่าจะเกิดเนื่องจากโปรแกรม BRACC ไม่ได้พิจารณาการเกิดขึ้นของผลผลิตการแตกตัวซึ่งสามารถแย่งดูดกลืนนิวตรอนจากเชื้อเพลิงเช่น ^{135}Xe และ ^{149}Sm เพราะฉะนั้นค่าการเผาผลาญเชื้อเพลิงที่ได้จากโปรแกรม BRACC จึงมีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณได้เนื่องจากเชื้อเพลิงถูกใช้ไปได้มากกว่า

เมื่อทำการพิจารณาการกระจายตัวของฟลักซ์นิวตรอนในแต่ละรอบของการเปลี่ยนเชื้อเพลิงจะเห็นได้ว่านิวตรอนฟลักซ์ที่ได้จากการคำนวณมีความสมมาตรน้อยลง เนื่องจากสาเหตุการบรรจุเชื้อเพลิงใหม่ในแต่ละรอบไม่มีความสมมาตรจริงทำให้เกิดการกระจายตัวของนิวตรอนฟลักซ์ไม่สมมาตร ผลต่อเนื่องคือการลู่เข้าสู่ค่าการเผาผลาญเชื้อเพลิงที่สภาวะสมดุลช้ากว่าเมื่อเทียบกับโปรแกรม BRACC ซึ่งโปรแกรม BRACC จะมีการลู่เข้าสู่สภาวะสมดุลในรอบการเปลี่ยนเชื้อเพลิงที่ 4 ส่วนการคำนวณที่ได้จะมีการเข้าสู่สภาวะสมดุลในรอบการเปลี่ยนเชื้อเพลิงที่ 10

เนื่องจากการคำนวณการเผาผลาญแต่ละรอบต้องมีการเปลี่ยนเชื้อเพลิงใหม่ตลอดเวลา การพิจารณาการเปลี่ยนเชื้อเพลิงควรทำการพิจารณาแต่ละรอบของการเปลี่ยนว่าควรมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร ควรนำมัดเชื้อเพลิงตำแหน่งไหนออกจากแกน เพื่อทำให้การกระจายตัวของฟลักซ์นิวตรอนสมมาตร ตำแหน่งไหนเหลือน้อยที่สุดที่ควรนำออกจริง เนื่องจากโปรแกรมในการวิจัยนี้ทำการพิจารณาการนำออกรูปแบบเดียวจึงทำให้เกิดการกระจายตัวของนิวตรอนไม่สมมาตร

5.1.5 เปรียบเทียบการบรรจุเชื้อเพลิง 3 แบบ

การบรรจุเชื้อเพลิงเปรียบเทียบโดยการกำหนดลักษณะของการบรรจุเชื้อเพลิง 3 แบบ คือ แบบเนื้อเดียวกันทั้งแกนปฏิกรณ์ แบบ Out-In Loading และ แบบ In-Scatter Loading ซึ่งทำการคำนวณค่าความหนาแน่นกำลังสูงสุดต่อค่าความหนาแน่นกำลังเฉลี่ย เพื่อพิจารณาว่าการจัดการแบบใดดีกว่ากัน ผลที่ทำการคำนวณได้คือ การบรรจุเชื้อเพลิงแบบ In-Scatter เป็นการบรรจุที่ดีที่สุดเนื่องจาก ค่าความหนาแน่นกำลังสูงสุดต่อค่าความหนาแน่นกำลังเฉลี่ยระหว่างรอบการปฏิบัติงานมีค่าน้อยที่สุดซึ่งหมายถึงว่ามีการกระจายค่าความหนาแน่นกำลังทั่วทั้งบริเวณหน้าตัดค่อนข้างดี รองมาคือ Out-In Loading และ แบบเนื้อเดียวกันทั้งแกนปฏิกรณ์ อย่างไรก็ตามการจัดการเชื้อเพลิงแบบ In-Scatter Loading นี้ต้องการการดูแลควบคุมจากผู้ใช้งานค่อนข้างสูงจึงอาจไม่สะดวกนักเมื่อเทียบกับการจัดการแบบ Out-In Loading และการบรรจุแบบเนื้อเดียว

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการคำนวณการเผาผลาญแต่ละรอบต้องมีการเปลี่ยนเชื้อเพลิงใหม่ตลอดเวลา การเปลี่ยนเชื้อเพลิงควรพิจารณาในแต่ละรอบของการเปลี่ยนว่าควรมีการเปลี่ยนแปลงโดยละเอียดอย่างไร โดยเฉพาะอย่างยิ่งการย้ายตำแหน่งและการนำมัดเชื้อเพลิงออกจากแกน เพื่อทำให้การกระจายตัวของฟลักซ์นิวตรอนมีสมมาตร ทั้งนี้เนื่องจากในปัจจุบันโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในการวิจัยนี้จะพิจารณาการจัดการเชื้อเพลิงในรูปแบบเดียวเท่านั้นโดยมิได้วิเคราะห์จริงว่ามัดเชื้อเพลิงเหล่านี้มีการใช้งานจริงเป็นอย่างไร จึงทำให้การกระจายตัวของนิวตรอนเกิดการไม่สมมาตรได้

การพัฒนาโปรแกรมการจัดการแกนปฏิกรณ์แบบ 2 มิติและหนึ่งกลุ่มพลังงานนั้นทำขึ้นเพื่อศึกษารูปแบบการจัดการแกนปฏิกรณ์ที่เชื้อเพลิงมีการเปลี่ยนแปลงและมีการเกิดขึ้นของผลผลิตการแตกตัว แล้วศึกษาค่าที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเทียบกับโปรแกรม BRACC ซึ่งอย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับแกนปฏิกรณ์จริงการกระจายกำลังในแนวแกน มีการเปลี่ยนแปลงค่าตลอดเช่นกันไม่ได้มีลักษณะคงตัวตามฟังก์ชัน sine ที่กำหนดให้ นอกจากนี้การลดระดับพลังงานของนิวตรอนก็มีผลต่อการคำนวณมากเช่นกัน ดังนั้นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้จึงเป็นเพียงการศึกษาลักษณะการจัดการแกนปฏิกรณ์และการคำนวณค่าต่าง ๆ ภายในแกนคร่าว ๆ ซึ่งมีค่าความถูกต้องน่าเชื่อถือในการคำนวณเพียงที่ระนาบ 2 มิติกลุ่มพลังงานเดียวคือพลังงานเทอร์มัล ถ้ามีการพัฒนาให้มีการคำนวณในแบบ 3 มิติและหลายกลุ่มพลังงานจะให้แบบแผนในการจัดการแกนปฏิกรณ์ที่ถูกต้องและแม่นยำตามการจัดการแกนปฏิกรณ์จริงมากขึ้น