บทที่ 5

สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปการวิจัย

ในการศึกษานี้เป็นการคำนวนการลดของนิวตรอนและแกมมาในเกราะกำบังรังสี โดยใช้วิธีรีมูฟเวลดีฟิวชั่นเป็นหลักในการคำนวนแบ่งพลังงานนิวตรอนเป็นช่วงๆ ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SABINE-3 ซึ่งเป็นภาษาโฟรแทรน แบ่งกลุ่มพลังงานที่คำนวนรีมูฟเวลนิวตรอนฟลักซ์ระหว่าง 18-0.5 เมกกะอิเลคตรอนโวลต์เป็น 19 กลุ่ม และคำนวนดีฟิวชั่นฟลักซ์ระหว่าง 15-0 เมกกะอิเลคตรอนโวลต์ แบ่งเป็น 26 กลุ่ม ส่วนการคำนวนแกมมาฟลักซ์แบ่งจากช่วงพลังงาน 10-0 เมกกะอิเลคตรอนโวลต์เป็น 7 กลุ่ม นอกจากนั้นยังคำนวนนิวตรอนและแกมมาโดสเรทโดยมีรูปทรงของแหล่งกำเนิดและเกราะกำบังรังสีที่คำนวนฟลักซ์จากการฟุ้งกระจายเป็นระนาบ ทรงกระบอก ทรงกลมและจาน มีเกราะกำบังรังสีที่คำนวนฟลักซ์จากแหล่งกำเนิดเป็นแผ่นระนาบ ชั้นทรงกระบอกและทรงกลม ส่วนรูปทรงเกราะกำบังรังสีที่คำนวนฟลักซ์เนื่องจากแกมมาทุติยภูมิอาจเป็นแผ่นระนาบขนาดอนันต์ ชั้นทรงกระบอกและทรงกลมหรือจานก็ได้

หลังจากได้ศึกษาทฤษฎี หลักการคำนวนและวิธีการคำนวนของโปรแกรมนี้แล้วจึงจัดโปรแกรมให้เหมาะสมกับเครื่องคอมพิวเตอร์ และสามารถคำนวนปัญหาต่างๆได้ จึงเริ่มทำการคำนวนปัญหาต่างๆดังนี้

ในการวิจัยขั้นต้นได้ทำการตรวจสอบโปรแกรม รวมทั้งได้เปรียบเทียบผลการคำนวนของโปรแกรมโดยใช้แหล่งกำเนิดเป็น Californium-252 รูปทรงกลม ซึ่งเป็นไอโซโทปที่ให้ฟิชชั่นตามธรรมชาติ มีอัตราการเกิดฟิชชั่น 1.213×10^{7} ครั้งต่อลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที แหล่งกำเนิดชั้นนี้ล้อมรอบด้วยช่องว่างอากาศ ลักษณะของเกราะกำบังรังสีเป็นรูปทรงกลม 2 ชั้น ประกอบด้วยน้ำหนา 10 ซม. และคอนกรีตหนา 100 ซม. ผลการคำนวนปรากฏว่าได้ค่านิวตรอนฟลักซ์ที่หลังเกราะกำบังรังสีสำหรับนิวตรอนกลุ่มที่ 1 ถึงกลุ่มที่ 26 อยู่ในช่วง 5.1×10^{-1} ถึง 7.2×10^{1} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที ส่วนค่านิวตรอนโดสเรทที่คำนวนได้ประมาณ 20 มิลลิเรมต่อชม.ที่หลังเกราะกำบังรังสี ซึ่งผลการคำนวนนี้สอดคล้องกับผลที่ผู้พัฒนาโปรแกรมได้

เสนอไว้ นอกจากนี้ยังได้คำนวนค่าแกมมาโดสเรทที่หลังเกราะกำบังรังสี ได้ค่าประมาณ 35 มิลลิเรนเก้นต์ต่อชม. เมื่อทดสอบโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว ได้ทำการทดลองคำนวนปัญหาใน 3 ลักษณะด้วยกันคือ

1. ศึกษาเกราะกำบังรังสีของเครื่องปฏิกรณ์แบบใช้แกสเป็นตัวหล่อเย็นขนาด 180 เมกกะวัตต์ความร้อน โดยเลือกเครื่องปฏิกรณ์ Calder Hall เป็นตัวอย่างในการศึกษา โดยมีความหนาแน่นของการเกิดฟิชชั่น 1.897×10^{10} และ 1.243×10^{10} ครั้งต่อลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที ในแหล่งกำเนิดทั้งสองชั้นตามลำดับ โดยมีเกราะกำบังรังสีแบ่งเป็น 4 ชั้น มีกราไฟต์ หนา 76.2 ซม.(ตัวหน่วงนิวตรอน) เหล็กหนา 5.08 ซม.(เป็น pressure vessel) เหล็กหนา 15.24 ซม.(เกราะกันความร้อน) และคอนกรีตหนา 213.36 ซม.(biological shield) ระหว่างชั้นของเกราะแต่ละชั้นมีช่องว่างอากาศหนา 15.24,101.6 และ 42.24 ซม. ตามลำดับ รูปทรงของแหล่งกำเนิดและเกราะกำบังรังสีเป็นทรงกระบอก ได้ผลการคำนวนค่านิวตรอนฟลักซ์ที่หลังเกราะกำบังรังสีทั้ง 26 กลุ่มพลังงานอยู่ในช่วง 2.5×10^{-5} ถึง 7.18 นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที และได้เฉลี่ยค่านิวตรอนฟลักซ์ที่ช่วงพลังงานที่สอดคล้องกับการจัดกลุ่มพลังงานที่ใช้ในการคำนวนด้วยโปรแกรม RASH คือจาก 2 เมกกะอิเลคตรอนโวลต์ถึงเทอร์มัลแบ่งเป็น 5 กลุ่มพลังงาน ดังนั้นนิวตรอนฟลักซ์ที่เฉลี่ยใน 5 กลุ่มพลังงานที่หลังเกราะกำบังรังสีมีค่าในช่วง 2.0×10^{-3} ถึง 10 นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที เพื่อเป็นการศึกษาเพิ่มเติมจึงได้เปรียบเทียบกับผลการคำนวนของโปรแกรม RASH แล้วปรากฏว่าค่านิวตรอนฟลักซ์ที่คำนวนได้ใกล้เคียงกัน ยกเว้นในกลุ่มเทอร์มัลที่คำนวนได้มีค่ามากกว่า เนื่องมาจากส่วนประกอบของชั้นคอนกรีตต่างกัน นอกจากนี้สาเหตุที่ทำให้ผลการคำนวนต่างกันคือ การแบ่งกลุ่มพลังงานในการคำนวนพบว่าในโปรแกรม SABINE-3 คำนวนครอบคลุมช่วงพลังงานกว้างกว่ามาก การแบ่งช่วงพลังงานต่างกัน ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวนต่างกัน เป็นต้น ส่วนค่านิวตรอนโดสเรทที่คำนวนได้หลังเกราะกำบังรังสีประมาณ 1.8×10^{-6} มิลลิเรมต่อชม. จากนั้นได้คำนวนทดสอบความแตกต่างของค่าแกมมาโดสเรทเมื่อกำหนดการคำนวนบิลอัพเฟคเตอร์โดยวิธี Broder และ Kitazume ปรากฏว่าผลการคำนวนตามวิธี Broder น้อยกว่าการคำนวนตามวิธี Kitazume โดยค่าแกมมาโดสเรทที่คำนวนได้หลังเกราะกำบังรังสีประมาณ 1.2 มิลลิเรนเก้นต์ต่อชม.

2. ศึกษาเกราะกำบังรังสีของเครื่องปฏิกรณ์แบบใช้น้ำเป็นตัวหล่อเย็นขนาด 272 เมกกะวัตต์ เลือกศึกษาเครื่องปฏิกรณ์ชนิด Pressurized Water Reactor ที่ Indian Point Atomic Power Reactor ซึ่งมีความหนาแน่นของการเกิดฟิชชั่น 9.96×10^{12} และ 2.19×10^{12} ครั้งต่อลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที ในแหล่งกำเนิดรูปทรงกระบอก 2 ชั้นตามลำดับ ลักษณะของเกราะกำบังรังสีเป็นรูปทรงกระบอกมี 9 ชั้นประกอบด้วย stainless steel 3 ชั้น ความหนา 2.54,4.445 และ 4.445 ซม. (เกราะกันความร้อน) carbon steelหนา 17.6276 ซม.หุ้มด้วย stainless steel หนา 0.2794 ซม.(reactor vessel) น้ำหนา 99.06 ซม. คอนกรีตความหนาแน่นสูง หนา 94.44 ซม. carbon steelหนา 2.222 ซม. และคอนกรีตธรรมดาหนา 167.44 ซม. ปรากฏว่าได้ค่านิวตรอนฟลักซ์หลังเกราะกำบังรังสีของกลุ่มพลังงานที่ 1 ถึง 26 อยู่ในช่วง 7.3×10^{-9} ถึง 8.5×10^{-7}นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที ค่านิวตรอนโดสเรทที่คำนวนหลังเกราะกำบังรังสีได้ประมาณ 2.6×10^{-8} มิลลิเรมต่อชม. เมื่อเทียบกับค่าโดสเรทที่ยอมรับได้กำหนดไว้สำหรับประชาชนโดยทั่วไปประมาณ 0.17 เรมต่อปี ($\sim$0.019 มิลลิเรมต่อชม.) จึงมีความปลอดภัยมาก ส่วนค่าแกมมาโดสเรทหลังเกราะกำบังรังสีได้ค่าประมาณ 1.2×10^{-6} มิลลิเรนเก้นต่อชม.

จากนั้นเพื่อเป็นการศึกษาเกราะกำบังรังสีเพิ่มเติม จึงได้ทดลองเพิ่มวัสดุที่เป็นเกราะกำบังรังสีโดยเปลี่ยนแปลงเกราะกำบังรังสีในชั้นที่ 9 ซึ่งเดิมเป็นคอนกรีตอย่างเดียวเป็นคอนกรีตและเหล็ก ซึ่งกำหนดให้มีความหนาในรูปของจำนวน mfp. เท่ากัน (5.5 mfp.) และจำนวน mfp. ของคอนกรีตและเหล็กรวมกันเท่ากับจำนวน mfp. ของคอนกรีตเดิม (11 mfp.) ปรากฏว่าได้ค่านิวตรอนและแกมมาโดสเรทที่หลังเกราะกำบังรังสีประมาณ 9.14×10^{-6} มิลลิเรมต่อชม.และ 1.34×10^{-6} มิลลิเรนเก้นต่อชม.ตามลำดับ ต่อไปได้สลับชั้นของคอนกรีตและเหล็กโดยเงื่อนไขทุกประการยังคงเดิมได้ค่านิวตรอนและแกมมาโดสเรทที่หลังเกราะกำบังรังสีมีค่าประมาณ 1.96×10^{-6} มิลลิเรมต่อชม. และ 4.006×10^{-6} มิลลิเรนเก้นต่อชม. ตามลำดับ นั่นคือจะลดนิวตรอนได้ดี แต่ให้แกมมาเพิ่มขึ้นโดยกรณีที่วางคอนกรีตไว้หน้าเหล็ก คอนกรีตจะลดจำนวนนิวตรอนลงก่อน เมื่อมาถึงชั้นที่เป็นเหล็กกั้นแกมมาออกไปและจำนวนนิวตรอนฟลักซ์ในกลุ่มที่ 13 จนถึง 26 ลดลงอย่างรวดเร็ว ต่อไปได้สลับและเพิ่มชั้นเกราะกำบังรังสีอีก โดยเปลี่ยนจากคอนกรีตและเหล็ก เป็นคอนกรีตหนา 2.75 mfp. เหล็กหนา

5.5 mfp. และคอนกรีต 2.75 mfp. ปรากฏผลการคำนวนว่าค่านิวตรอนโดสเรทเพิ่มขึ้นเป็น 3.17×10^{-6} มิลลิเรมต่อชม. ส่วนค่าแกมมาโดสเรทลดลงเป็น 3.3×10^{-6} มิลลิเรนเก้นต่อชม. ต่อไปจัดชั้นเกราะกำบังรังสีเป็น คอนกรีต เหล็ก คอนกรีต เหล็ก ตามลำดับ ทุกชั้นหนา 2.75 mfp. ปรากฏว่าคำนวนค่านิวตรอนและแกมมาโดสเรทมีค่าประมาณ 3.67×10^{-6} มิลลิเรมต่อชม.และ 1.36×10^{-6} มิลลิเรนเก้นต่อชม. เมื่อคิดโดสเรทรวมหลังเกราะกำบังรังสีในกรณีของคอนกรีตและเหล็กสลับกัน 4 ชั้น มีค่าน้อยที่สุด ยกเว้นโดสเรทที่คำนวนเมื่อชั้นเกราะกำบังรังสีชั้นสุดท้ายเป็นคอนกรีตอย่างเดียวถึงแม้จะให้โดสเรทน้อยกว่าการวางสลับชั้นแต่ต้องใช้คอนกรีตหนามาก จึงสรุปได้ว่าการวางเหล็กสลับคอนกรีต 4 ชั้น ป้องกันดีที่สุดโดยใช้เกราะกำบังรังสีหนาไม่มาก สะดวกแก่การสร้าง มีน้ำหนักน้อย

3. ศึกษาเกราะกำบังรังสีของต้นกำเนิดนิวตรอน เนื่องจากต้นกำเนิดนิวตรอนไม่มีการเกิดฟิชชั่นมาเกี่ยวข้องทั้งในส่วนนิวตรอนและแกมมา จึงต้องมีการดัดแปลงโปรแกรมในบางส่วนเพื่อให้ใช้งานได้ จากนั้นศึกษาไอโซโทปที่เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน โดยเลือก Pu^{238}-Be 5 คูรี่ มีแหล่งกำเนิดมีรูปทรงกระบอกเฉพาะในบริเวณที่ 2 เท่านั้น มีเกราะกำบังรังสีรูประนาบประกอบด้วยคอนกรีต 1 ชั้น หนา 100 ซม. คำนวนเปรียบเทียบระหว่างการใช้คอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตความหนาแผ่นสูงปรากฏว่าให้นิวตรอนฟลักซ์หลังเกราะกำบังรังสีคอนกรีตธรรมดาอยู่ในช่วง 2×10^{-5} ถึง 3.7 นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที สำหรับนิวตรอนพลังงานกลุ่มที่ 1 ถึง 26 ค่านิวตรอนและแกมมาโดสเรทที่คำนวนได้มีค่าประมาณ 1.384×10^{-2} มิลลิเรมต่อชม. และ 2.146×10^{-2} มิลลิเรนเก้นต่อชม. ส่วนนิวตรอนฟลักซ์หลังเกราะกำบังรังสีคอนกรีตธรรมดา ที่คำนวนได้อยู่ในช่วง 9.7×10^{-4} ถึง 3.7 นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที ค่านิวตรอนและแกมมาโดสเรทมีค่าประมาณ 9.73×10^{-3} มิลลิเรมต่อชม.และ 1.37×10^{-2} มิลลิเรนเก้นต่อชม.ตามลำดับ เมื่อพิจารณาโดยตลอดแล้วสรุปได้ว่า คอนกรีตความหนาแน่นสูงกั้นทั้งนิวตรอนและแกมมาได้ดีกว่า - คอนกรีตธรรมดา เนื่องจากการใช้คอนกรีตหนา 100 ซม.ให้ค่าโดสเรทน้อย จึงได้เลือกคำนวนนี้ความหนาคอนกรีตลดลง ในที่สุดจึงเลือกศึกษาที่ความหนาคอนกรีต 70 ซม.ต่อไป โดยการคำนวนทั้งหมดข้างต้นสมมติให้นิวตรอนทุกกลุ่มพลังงานมีค่าเท่ากัน ถึงแม้จะให้ฟลักซ์มากกว่าที่เป็นจริง แต่ผลที่ได้จากการคำนวนยังสามารถนำมา

ศึกษาความแตกต่างระหว่างคอนกรีตทั้งสองชนิดได้ดี

ดังนั้นหลังจากได้ศึกษาสเปคตรัมของ Pu-Be อย่างละเอียดแล้ว จึงทำการคำนวนนิวตรอนตามสเปคตรัม และเมื่อศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับเกราะกำบังรังสีให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จึงได้เติมโบรอน 2 % ลงในคอนกรีตธรรมดา ปรากฏว่าผลการคำนวนนิวตรอนฟลักซ์ก่อนและหลังจากเติมโบรอน 2 % ที่หลังเกราะกำบังรังสีมีค่าอยู่ในช่วง 1.35×10^{-3} ถึง 50.49 และ 1.18×10^{-3} ถึง 3.29×10^{-4} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที ค่านิวตรอนโดสเรทที่คำนวนได้คือ 0.193และ 2.937×10^{-3} มิลลิเรมต่อชม.ตามลำดับ ส่วนค่าแกมมาโดสเรทเมื่อเติมโบรอนลงไปลดลงจาก 0.167 เป็น 2.785×10^{-3} มิลลิเรนเก้นต์ต่อชม. จึงสรุปได้ว่า เมื่อเติมโบรอน 2 % ลงไปทั้งนิวตรอนและแกมมาโดสเรทลดลงมาก เนื่องจากโบรอนดูดจับเทอร์มัลนิวตรอนไว้มาก ทำให้นิวตรอนโดสเรทต่ำ และจำนวนนิวตรอนที่ผ่านไปในเกราะกำบังรังสีและก่อให้เกิดแกมมาจากการดูดจับนิวตรอนมีค่าต่ำ

สรุปได้ว่าโปรแกรม SABINE-3 นี้ สามารถคำนวนจำนวนนิวตรอนและแกมมาฟลักซ์รวมทั้งค่าโดสเรทเพื่อเป็นทางในการศึกษารายละเอียดต่างๆอีกมากมาย แต่ในการคำนวนนั้น เนื่องจากข้อมูลและปัญหาที่มีในแต่ละปัญหา จึงต้องมีการประมาณในการจัดข้อมูลให้เหมาะสมกับโปรแกรมบ้าง เพื่อให้โปรแกรมทำงานอย่างดีที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

ภายหลังที่ได้ทำการศึกษาวิธีคำนวนรีมูฟเวลดีฟิวชั่นและโปรแกรมสำเร็จรูป SABINE -3 รวมถึงการทดสอบโปรแกรม การนำโปรแกรมนี้ไปใช้กับปัญหาลักษณะต่างๆ เช่น ใช้คำนวนเกราะกำบังรังสีของเตาปฏิกรณ์แบบใช้น้ำเป็นตัวหล่อเย็น, แบบใช้แกสเป็นตัวหล่อเย็น และดัดแปลงโปรแกรม เพื่อใช้กับปัญหาบางปัญหาได้ เช่น ต้นกำเนิดนิวตรอนเป็นต้น จึงมีข้อเสนอแนะที่น่าจะได้ทำการศึกษาและทดลองต่อไป

1. ควรศึกษาทฤษฎีและหลักการคำนวนนี้โดยวิธีอื่น เช่น วิธีมอนติ คาร์โล วิธี Discrete Ordinate เป็นต้น เพื่อเป็นการเปรียบเทียบทั้งด้านชีดความสามารถในการคำนวนและค่าใช้จ่ายที่จะต้องใช้ กับวิธีและโปรแกรมที่ใช้หลักการรีมูฟเวล - ดีฟิวชั่นดังได้ศึกษาแล้วในการวิจัยนี้

2. ควรศึกษาและคำนวนผลของนิวตรอนและแกมมาฟลักซ์รวมทั้งค่าโดสเรทที่ได้จากเกราะกำบังรังสีชนิดอื่นๆ นอกจากคอนกรีตธรรมดาและเหล็กที่ได้คำนวนไว้แล้ว เช่นใช้คอนกรีตซึ่งมีการเติม aggregates ชนิดต่างๆ หรือตะกั่วเป็นต้น เพื่อประโยชน์ในการพิจารณารายละเอียดของเกราะกำบังรังสีต่อไป

3. ควรทำการทดลองเปรียบเทียบผลการคำนวนที่ได้จากภาคทฤษฎีกับการวัดในทางปฏิบัติ เมื่อใช้เกราะกำบังรังสีต่างๆ ดังที่ได้คำนวนไว้แล้ว เช่นในกรณีเกราะกำบังรังสีของต้นกำเนิดนิวตรอน Pu^{238}-Be 5 Ci และผลที่ได้จากการสลับชั้นของเกราะกำบังรังสี เป็นต้น

4. ควรทำการศึกษาและคำนวนเรื่องเกี่ยวกับความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในเกราะกำบังรังสี ซึ่งสามารถคำนวนได้ที่จุดต่างๆ จะเป็นประโยชน์มากในการออกแบบเกราะกำบังรังสีในทางปฏิบัติ เนื่องจากเมื่อได้รับรังสีแล้วจะเกิดความร้อนขึ้นภายในเกราะถ้าไม่ศึกษาเรื่องนี้ให้ดีอาจเกิดอันตรายได้

5. ควรทำการศึกษาในรายละเอียดและสาเหตุของการเกิดการเพิ่มของจำนวนนิวตรอนฟลักซ์แล้วลดลง ในชั้นของเกราะกำบังรังสีที่เป็นเหล็กหนาในช่วงพลังงานเทอร์มัลนิวตรอน ลักษณะเช่นนี้ไม่ปรากฏในเหล็กบาง

6. ศึกษาวิธีการคำนวนและดัดแปลงโปรแกรมเพื่อคำนวน ในกรณีที่แหล่งกำเนิดและเกราะกำบังรังสีแต่ละชั้นมีรูปทรงต่างกัน เช่น ในกรณีแหล่งกำเนิดรูปทรงกระบอก มีเกราะกำบังรังสีเป็นทรงกระบอกอยู่ในห้องซึ่งมีผนังรูประนาบทั้ง 4 ด้าน เป็นต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย