บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาทางทฤษฎีเพื่อออกแบบสูตรแก้วที่จะทำการวิจัย โดยจะเป็นไปในแนวเดียวกับโครงการวิจัยที่ 1 ที่อยู่ชุดโครงการเดียวกันโดยกำหนดพลังงานของรังสีแกมมา (โฟตอน) ที่จะใช้ในการศึกษาตัวอย่าง ซึ่งเป็นพลังงานที่มีความสอดคล้องกัน โดยคำนวณหาอันตรกิริยารวมและอันตรกิริยาย่อยของรังสีแกมมา (โฟตอน) ต่อตัวอย่างแก้วในงานวิจัยที่ระดับพลังงานต่างๆ และสมบัติในการกำบังรังสีของตัวอย่างแก้วจากทฤษฎี โดยเทียบกับวัสดุกำบังรังสีมาตรฐานจากวารสารระดับนานาชาติ หรือฐานข้อมูลของวัสดุกำบังรังสี การเตรียมตัวอย่างแก้วแบเรียมโซเดียมซิลิโกบอเรตสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของแก้วด้วยการใช้โปรแกรม WinXCom ของแก้วแต่ละสูตรที่สามารถหาได้ง่ายในประเทศไทย ซึ่งจากการออกแบบผู้วิจัยเลือกแก้วแบเรียมโซเดียมซิลิโกบอเรต ซึ่งแต่ละตัวอย่างจะมีส่วนผสมของ $BaSO_4$, Na_2O, SiO_2และ B_2O_3 ตามสูตร $xBaSO_4 : 15Na_2O : 15SiO_2 : (70-x)B_2O_3$ โดยที่ x เท่ากับ 0, 5, 10, 15 และ 20 mol% ตามลำดับ และนำเสนอผลคุณสมบัติการกำบังรังสีจากการคำนวณหาอันตรกิริยารวมและอันตรกิริยาย่อยของรังสีแกมมา ผลค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแก้วตัวอย่างผลค่าตัวแปรทางการกำบังรังสีทางทฤษฎีได้แก่ ค่าภาคตัดขวาง ค่าเลขอะตอมยังผลและค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผลของแก้วในงานวิจัยที่พลังงานต่างๆกัน โดยแสดงผลเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองที่ได้ รวมถึงค่าความหนาครึ่งค่าของแก้วเทียบกับวัสดุกำบังรังสีที่มีอยู่ในท้องตลาด วารสารระดับนานาชาติ หรือฐานข้อมูลของวัสดุกำบังรังสี ซึ่งผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของอันตรกิริยารวมของตัวอย่างแก้วทุกตัวอย่างแบเรียมโซเดียมซิลิโกบอเรต มีแนวโน้มลดลงตามระดับพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้น โดยสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วที่ความเข้มข้นของ $BaSO_4$ เป็น 20 mol% มีค่าสูงที่สุด แต่จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของ $BaSO_4$ ขึ้น สามารถแบ่งอันตรกิริยาออกเป็นสามช่วงคือ มีการลดทอนลงอย่างรวดเร็วในช่วงอันตรกิริยา photoelectric และ อันตรกิริยาการกระเจิงแบบ coherent ที่ระดับพลังงานต่ำ (<1 MeV) มีการลดทอนลงชั้นปานกลางในช่วงการกระเจิงแบบ incoherent (Compton) scattering ที่ระดับพลังงานปานกลาง จากนั้นการลดทอนจะคงที่ และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยช่วง pair production ที่ระดับพลังงานสูง (>1MeV) โดยสามารถแยกพิจารณาเป็นช่วงอันตรกิริยาคือ

(1) ช่วงอันตรกิริยาย่อย photoelectric ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วทุกตัวอย่าง มีแนวโน้มลดลงตามระดับพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้น มีช่วงกระโดดของระดับพลังงานที่ ประมาณ 0.1 MeV มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลประมาณ 1 cm^2/g โดยสัมประสิทธิ์การ

ลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วที่ 20 mol% มีค่าสูงที่สุด แต่จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มระดับความเข้มข้นของ $BaSO_4$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีคุณสมบัติในการกำบังรังสีที่ดีขึ้น

(2) ช่วงอันตรกิริยาย่อยแบบ Coherent ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วทุกตัวอย่าง มีแนวโน้มลดลงตามระดับพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้นเป็นลักษณะเชิงเส้น โดยสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วที่ 20 mol% มีค่าสูงที่สุด จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแก้วแบเรียมโซเดียมซิลิโกบอเรต แต่จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มระดับความเข้มข้นของ $BaSO_4$

(3) ช่วงอันตรกิริยาย่อยแบบ incoherent ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วทุกตัวอย่าง พบว่า มีการเพิ่มขึ้นในช่วงระดับพลังงานที่ 0.001 – 0.4 MeV ที่เป็นจุดสูงสุดมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลประมาณ 0.2 cm^2/g และมีแนวโน้มลดลงตามระดับพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้น โดยสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของทุกตัวอย่างแก้วจะมีค่าประมาณเท่ากัน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเพิ่มระดับความเข้มข้นของ $BaSO_4$

(4) ช่วงอันตรกิริยาย่อยแบบ Pair production nuclear และ electron ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วทุกตัวอย่าง พบว่าช่วงการกระเจิงแบบ Pair production (nuclear) มีการเพิ่มขึ้นในช่วงระดับพลังงานที่ 1 MeV ในลักษณะของเอกโปเนนเชียล และเริ่มมีค่าคงที่ระดับพลังงานมากกว่า 10^3 MeV มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วที่ 20 mol% สูงที่สุดประมาณ $3x10^{-1}$ cm^2/g และมีแนวโน้มคงที่ตามระดับพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้น อัตรกิริยาแบบ Pair production (electron) มีการเพิ่มขึ้นในช่วงระดับพลังงานที่ 1 MeV และเริ่มมีค่าคงที่ระดับพลังงานมากกว่า 10^3 MeV มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วที่ 0 mol% สูงที่สุดประมาณ 0.27 cm^2/g และมีแนวโน้มคงที่ตามระดับพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้น

จากการศึกษาพบว่ามีความสอดคล้องของความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วทุกตัวอย่าง ของการศึกษาของ Icelli และคณะ [10] ที่วัดค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของสารประกอบโบรอนและขยะที่เหลือจากการผลิตโบรอนในประเทศตุรกี ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับค่าที่คำนวณจากโปรแกรม WinXCom นอกไปจากนั้นงานวิจัยดังกล่าวยังได้แสดงให้เห็นถึงการใช้ประโยชน์จากขยะที่เหลือในการผลิตโบรอนในการกำบังรังสีอีกด้วย

5.1.2 ผลการวิเคราะห์ค่าภาคตัดขวางเชิงอะตอมและเชิงอิเล็กตรอน

ความสัมพันธ์ระหว่างภาคตัดขวางเชิงอะตอมของตัวอย่างแก้วกับระดับพลังงานโฟตอนของรังสีแกมมาที่ระดับพลังงาน 1 keV-100 GeV มีแนวโน้มลดลงตามระดับพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้น และเกิดช่วงปฏิกิริยาของบ่อศักย์และการกระโดดของค่าภาคตัดขวางเชิงอะตอมที่ระดับพลังงาน 0.006 MeV และ 0.4 MeV โดยค่าภาคตัดขวางเชิงอะตอมของตัวอย่างแก้วที่ 20 mol% มีค่าสูงที่สุด

ความสัมพันธ์ระหว่างภาคตัดขวางเชิงอิเล็กตรอนของตัวอย่างแก้วกับระดับพลังงานโฟตอนของรังสีแกมมาที่ระดับพลังงาน 1 keV-100 GeV มีแนวโน้มลดลงตามระดับพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้น

จนกระทั่งถึงช่วง 1 MeV จะมีค่าคงตัว และเกิดช่วงปฏิกิริยาของบ่อศักย์และการกระโดดของค่าภาคตัดขวางเชิงอิเล็กตรอน ที่ระดับพลังงานที่ 0.006 MeV และ 0.4 MeV โดยค่าภาคตัดขวางเชิงอะตอมของตัวอย่างแก้วที่ 20 mol% มีค่าสูงที่สุด

5.1.3 ผลการวิเคราะห์ค่าเลขอะตอมยังผล

ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของค่าเลขอะตอมยังผลของแก้วตัวอย่าง กับระดับพลังงานโฟตอนของรังสีแกมมาเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ $BaSO_4$ พบว่าค่าเลขอะตอมยังผลมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงการดูดกลืนของ photoelectric และเกิดการกระโดดแบบไม่ต่อเนื่องในช่วงระดับพลังงาน 0.005-0.012 MeV พบจุดสูงสุดของค่าเลขอะตอมยังผล Z_{eff} ที่พลังงานโฟตอน 0.04 MeV ด้วยความเข้มข้น $BaSO_4$ ที่ 20 mol % และจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ในช่วง 0.04-0.4 MeV จนถึงจุดต่ำสุดในช่วง 0.04-1 MeV ซึ่งเป็นช่วงอันตรกิริยาการกระเจิงแบบ incoherent หลังจากนั้น เมื่อระดับพลังงานสูงขึ้น >10 MeV จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเริ่มคงที่จากช่วง 100 MeV เป็นต้นไป ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Hanagodimath และ Manohara [8] ที่ศึกษาค่าเลขอะตอมยังผลและค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผลของกรดอะมิโนที่สำคัญในช่วงพลังงาน 1 keV-100 GeV โดยใช้โปรแกรม WinXCom ผลที่ได้พบว่าตัวแปรที่ศึกษามีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนแปลงพลังงานและองค์ประกอบของกรดอะมิโน และผลการวิจัยที่ได้ยังสอดคล้องกับผลการทดลองของอีกหลายทีมวิจัยที่ได้ทำการทดลองมาก่อนหน้า

5.1.4 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผล

ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผลที่คำนวณได้จากสมการอัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลกับภาคเชิงอิเล็กตรอนของตัวอย่างแก้ว กับระดับพลังงานโฟตอนของรังสีแกมมาเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ $BaSO_4$ พบว่าค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผลมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงการดูกลืนของ photoelectric และเกิดการกระโดดแบบไม่ต่อเนื่องในช่วงระดับพลังงาน 0.005-0.012 MeV พบจุดสูงสุดของค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผล ที่พลังงานโฟตอน 0.04 MeV ด้วยความเข้มข้น $BaSO_4$ ที่ 20 mol % และจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ในช่วง 0.004-0.3 MeV จนถึงจุดต่ำสุดในช่วง 0.4-4 MeV ซึ่งเป็นช่วงอันตรกิริยาการกระเจิงแบบ incoherent หลังจากนั้น เมื่อระดับพลังงานสูงขึ้น >10 MeV จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเริ่มคงที่จากช่วง 100 MeV เป็นต้นไป

5.1.5 การเปรียบเทียบผลการคำนวณทางทฤษฎีกับผลการทดลอง

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแก้วตัวอย่างเปรียบเทียบระหว่างค่าทฤษฎีกับการทดลอง ที่ระดับพลังงานโฟตอนของรังสีแกมมาเท่ากับ 662 keV เมื่อระดับความเข้มข้นของ BaSO4 ต่างกัน พบว่าแก้วตัวอย่างทั้ง 5 ความเข้มข้นมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลเพิ่มขึ้นเมื่อเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของสารที่เติมเข้าไปเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติในการกำบังรังสีดีขึ้น และพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณผ่านโปรแกรม WinXCom แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติในการกำบังรังสีของกระจก สามารถคำนวณหาเบื้องต้นได้จากการคำนวณทางทฤษฎีที่แม่นยำ อีกทั้งยังสามารถประยุกต์ไปใช้กับสารองค์ประกอบอื่นๆที่มีอย่างมากมายในประเทศ

5.1.6 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาครึ่งค่า

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาครึ่งค่าของแก้วแบเรียมโซเดียมซิลิโกบอเรตเปรียบเทียบกับ commercial window, ordinary และ hematite-serpentine concretes ในช่วงพลังงานโฟตอนเท่ากับ 1 keV–100 GeV พบว่าที่ความเข้มข้นของ $BaSO_4$ เท่ากับ 20 mol% สามารถกำบังรังสีได้ดีที่สุด รองลงมาคือ 15 mol% และ 10 mol% เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุกำบังรังสีที่ถูกเลือกนำมาศึกษา ซึ่งความหนาครึ่งค่าที่มีค่าน้อยบ่งบอกถึงความสามารถในการกำบังรังสีที่ดีโดยมีความหนาของวัสดุที่น้อย

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาความหนาครึ่งค่าของตัวอย่างแก้วเปรียบเทียบกับวัสดุในการกำบังรังสีชนิดอื่นๆ เพิ่มเติม เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้การศึกษาอันตรกริยาของโฟตอนต่อวัสดุต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินชีวิตของมนุษย์ยังมีข้อมูลไม่เพียงพอจึงควรที่จะมีการศึกษาที่มากขึ้น เพื่อเป็นประโยชน์ในการป้องกันรังสีและการดำรงชีวิตที่ดีขึ้นต่อไปในอนาคต