



การสร้างแก้วกำบังรังสีจากซิลิกาเจลที่เสื่อมสภาพ



ภัทรนิภา กั้นทะคุณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



FABRICATION OF RADIATION SHIELDING GLASS
FROM SILICA GEL DEGRADATION

PATTARANIPA GUNHAKOON

A THESIS SUMMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE

MAJOR IN PHYSICS

FACULTY OF SCIENCE

UBON RATCHATHANI UNIVERSITY

ACADEMIC YEAR 2016

COPYRIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์



เรื่อง การสร้างแก้วกำบังรังสีจากซิลิกาเจลที่เสื่อมสภาพ


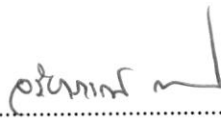
ผู้วิจัย นางสาวภัทรนิภา กันทะคุณ

คณะกรรมการสอบ

รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว	ประธานกรรมการ
รองศาสตราจารย์เรวัฒน์ เหล่าไพบุลย์	กรรมการ
รองศาสตราจารย์จินตนา เหล่าไพบุลย์	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชิดศักดิ์ บุตรจอมชัย	กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษา

 (รองศาสตราจารย์เรวัฒน์ เหล่าไพบุลย์)	อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
 (รองศาสตราจารย์จินตนา เหล่าไพบุลย์)	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

 (รองศาสตราจารย์ ดร.อุทิศ อินทร์ประสิทธิ์) คณบดีคณะวิทยาศาสตร์	 (รองศาสตราจารย์ ดร.อริยาภรณ์ พงษ์รัตน์) รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
--	---

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2559

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีนั้น ก็ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือ เป็นอย่างยิ่งจากรองศาสตราจารย์เรวัฒน์ เหล่าไพบุลย์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และรองศาสตราจารย์ จินตนา เหล่าไพบุลย์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ขอขอบพระคุณที่ท่านคอยช่วยเหลือประสิทธิประสาทศรัทธา วิชาความรู้รวมทั้งให้คำแนะนำปรึกษาแก้ไขข้อผิดพลาดจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบพระคุณ อาจารย์จเด็จ เย็นใจ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในการทดสอบคุณสมบัติทางรังสีของ ตัวอย่างแก้ว ขอขอบพระคุณ ดร.อัสสุภาวุฒิ ปาทาคำ นักวิจัยประจำศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุ แห่งชาติ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในการทดสอบองค์ประกอบของซิลิกาเจล และขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้แก่ รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชิดศักดิ์ บุตรจอมชัย ที่ได้กรุณาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำแนะนำและ ข้อเสนอแนะต่าง ๆ ตลอดทั้งการตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ และศูนย์ความเชี่ยวชาญเทคโนโลยีแก้วสำหรับการ อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่างๆ และเงินสนับสนุนในการจัดซื้อสารเคมีสำหรับการทำวิจัย ขอขอบคุณทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย (Science Achievement Scholarship of Thailand) ที่ช่วยสนับสนุนทุนการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ ทุกท่านที่ให้ความรู้ตลอดระยะเวลาที่ศึกษาในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ขอขอบคุณคุณวิเชียร ผิวบาง เจ้าหน้าที่ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ และผู้ที่มีส่วนช่วยในงานวิจัยครั้งนี้ ข้าพเจ้าต้องขอภัยที่ไม่สามารถ กล่าวนามได้ทั้งหมดในที่นี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาของผู้วิจัยเป็นอย่างสูง ที่ได้ส่งเสริม สนับสนุนและเป็น กำลังใจตลอดมา หากรายงานวิจัยฉบับนี้มีสิ่งใดขาดตกบกพร่อง ผู้วิจัยต้องขอภัยเป็นอย่างสูง และ หวังว่างานวิจัยฉบับสมบูรณ์นี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจในงานด้านนี้ต่อไป

ภัทรนิภา
ภัทรนิภา กันทะคุณ
ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

เรื่อง : การสร้างแก้วกำบังรังสีจากซิลิกาเจลที่เสื่อมสภาพ
 ผู้วิจัย : ภัทรนิภา กันหะคุณ
 ชื่อปริญญา : วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
 สาขาวิชา : ฟิสิกส์
 อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์เรวัตน์ เหล่าไพบุลย์
 อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : รองศาสตราจารย์จินตนา เหล่าไพบุลย์
 คำสำคัญ : แก้ว, สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล, วิธี Makishima - Mackenzie model, วิธี bond compression model

ตัวอย่างแก้วในระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ เมื่อ RSG คือ ซิลิกาเจลที่เสื่อมสภาพ โดย x คือ 20, 25, 30, 35, 40 และ 45 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ได้ถูกเตรียมด้วยเทคนิคการหลอม โดยหลอมที่อุณหภูมิ $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ความหนาแน่นถูกศึกษาโดยอาศัยหลักการของอาร์คิมิดีส ข้อมูลความหนาแน่นถูกนำไปใช้คำนวณหาปริมาตรโดยโมลของตัวอย่างแก้ว ตัวอย่างแก้วทั้งหมดจะถูกนำมาศึกษาความเป็นผลึกและไม่เป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และทำการวัดความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกทั้งตามยาวและเฉือนโดยใช้เทคนิคพัลส์เอคโค ข้อมูลความหนาแน่นและความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกถูกนำมาคำนวณหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่คำนวณได้จากวิธี Makishima-Mackenzie model และวิธี bond compression model ศึกษาสมบัติทางด้านรังสีของตัวอย่างแก้ว โดยจะศึกษาสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลด้วยเทคนิคการส่งผ่านแบบลำรังสีแคบ ที่พลังงานโฟตอน 74.228, 122, 662 และ 1173 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ข้อมูลที่ได้ถูกนำมาใช้คำนวณความหนาแน่นครั้งค่าและระยะปลอดการชน ผลที่ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม WinXcom และคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน ผลทดลองพบว่า ตัวอย่างแก้วทั้งหมดมีโครงสร้างแบบอสัณฐาน ความหนาแน่น ปริมาตรโดยโมล สมบัติยืดหยุ่นและสมบัติทางด้านรังสีเปลี่ยนแปลงไปตามสัดส่วนของตะกั่วออกไซด์ และสมบัติทางด้านรังสียังขึ้นอยู่กับพลังงานโฟตอนด้วย ส่วนในวิธีการคำนวณสมบัติยืดหยุ่นพบว่าการคำนวณด้วยวิธี Makishima-Mackenzie model ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองมากกว่าวิธี bond compression model

ABSTRACT

TITLE : FABRICATION OF RADIATION SHIELDING GLASS FROM SILICA GEL
DEGRADATION

AUTHOR : PATTARANIPA GUNHAKOON

DEGREE : MASTER OF SCIENCE

MAJOR : PHYSICS

ADVISOR : ASSOCIATE PROFESSOR RAEWAT LAOPAIBOON

CO-ADVISOR : ASSOCIATE PROFESSOR JINTANA LAOPAIBOON

KEYWORDS : GLASS, MASS ATTENUATION COEFFICIENT, MAKISHIMA-MACKENZIE
MODEL, BOND COMPRESSION MODEL

Glass samples in system $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$, where RSG is silica gel degradation and $x = 20, 25, 30, 35, 40$ and 45 mol%, were prepared by the melted quenching technique at a temperature of 1250°C . The principle of Archimedes was used to measure the density of the glass samples, and the obtained values were used to calculate their molar volume. All glass samples were studied for crystallization and non-crystallization by X-ray diffraction technique. Ultrasonic velocities of the glass samples were measured using the pulse echo technique and then the values of density and velocity of the glass samples were further used to calculate their elastic moduli. The obtained results were compared with theoretical values which were calculated from the Makishima-Mackenzie model and the bond compression model. The mass attenuation coefficient was studied by using Narrow beam transmission techniques at $74.228, 122, 662$ and 1173 keV photon energies. The obtained data were used to calculate the half value layers and mean free paths. The results were compared with the variations that were computed using the WinXcom program and the standard concrete commonly used for radiation shielding. The results of density, molar volume, elastic properties, and radiation properties depended on the concentration of lead oxide. The Makishima-Mackenzie model gave a closer value to the value obtained from the pulse echo technique than the value obtained from the bond compression model.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.4 ขอบเขตของการศึกษาค้นคว้า	4
1.5 สถานที่ทำการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 หลักการทฤษฎี	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	36
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ สารเคมีและวิธีการทดลอง	
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี	41
3.2 วิธีการทดลอง	42
บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ผล	
4.1 ผลการหาค่าประกอบของซิลิกาเจลด้วยเทคนิค EDS	50
4.2 ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างแก้ว	51
4.3 ผลจากการวัดความหนาแน่นของแก้ว	52
4.4 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	53
4.5 สมบัติทางรังสี	54

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6 การศึกษาสมบัติยืดหยุ่น	67
บทที่ 5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผล	76
5.2 ข้อเสนอแนะ	78
เอกสารอ้างอิง	79
ภาคผนวก	
ก วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	88
ข โปรแกรม WinXcom	94
ประวัติผู้วิจัย	97

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	วัสดุกำบังรังสีแบ่งตามชนิดของรังสี	32
3.1	องค์ประกอบของแก้ว Strontium lead silicate	43
3.2	ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าโมดูลัสเชิงปริมาตรและอัตราส่วนของบิวส์ของส์ ด้วยวิธี bond compression model	45
3.3	จำนวนพันธะต่อหน่วยปริมาตรของแก้ว (n_b) ค่าคงที่ของแรงยึดเฉลี่ยของพันธะ (\bar{F}) ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงต่อสูตรแก้ว (\bar{n}_c)	45
3.4	ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าโมดูลัสของยังส์ ด้วยวิธี Makishima-Mackenzie model	46
3.5	ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าโมดูลัสเชิงปริมาตร ด้วยวิธี Makishima-Mackenzie model	46
4.1	องค์ประกอบของซิลิกาเจลที่ทดสอบด้วยเทคนิค EDS	50
4.2	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกของระบบแก้ว $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$	69
4.3	เลขโคออร์ดิเนชันของประจุบวก (n_f) จำนวนความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงต่อประจุบวกในออกไซด์ i (n_c), ความยาวพันธะระหว่างประจุลบและประจุบวก (r) และค่าคงที่ของแรงการยึดลำดับแรกของออกไซด์ (f)	72
4.4	จำนวนโครงข่ายพันธะต่อหน่วยปริมาตรของแก้ว (n_b), ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงโดยเฉลี่ย (\bar{n}_c), จำนวนประจุบวกต่อหน่วยสูตรแก้ว (N_c) และค่าคงที่ของแรงการยึดพันธะโดยเฉลี่ย (\bar{F})	72
4.5	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี bond compression model ของระบบแก้ว $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$	73
4.6	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี Makishima-Mackenzie model ของระบบแก้ว $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$	74
4.7	เปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกการคำนวณด้วยวิธี bond compression model และวิธี Makishima-Mackenzie model ของระบบแก้ว $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$	75

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า	
2.1	ประเภทของแก้วแบ่งตามองค์ประกอบทางเคมี	9
2.2	(ก) โครงสร้างทรงสี่หน้า (tetrahedral) ของซิลิกาและ (ข) โครงสร้างแบบอสัณฐาน (amorphous) ของแก้ว	10
2.3	โครงสร้างของแก้วที่ประกอบด้วย network former และ network modifier	11
2.4	การสะท้อนของคลื่นที่ตกกระทบในแนวทำมุม	16
2.5	หลักการสะท้อนกลับของสัญญาณพัลส์	17
2.6	โมดูลัสตามยาวของวัสดุ	18
2.7	โมดูลัสเฉือนของวัสดุ	18
2.8	โมดูลัสเชิงปริมาตรของวัสดุ	19
2.9	อัตราส่วนปัวส์ซองส์ของวัสดุ	19
2.10	โมดูลัสของยังส์ของวัสดุ	20
2.11	ความแข็งระดับไมโครของวัสดุ	20
2.12	แนวความคิดของ cross-link ในระนาบของอะตอม	21
2.13	การเกิดอันตรกิริยาแบบ photoelectric effects	28
2.14	การเกิดอันตรกิริยาแบบ Compton scattering	29
2.15	การเกิดอันตรกิริยาแบบ pair production	30
2.16	อำนาจในการทะลุทะลวงของรังสีชนิดต่าง ๆ	32
2.17	การดูดกลืนและส่งผ่านรังสีในวัสดุ	33
2.18	ความสัมพันธ์ระหว่าง I/I_0 กับความหนาของวัสดุ	34
2.19	หน้าจอแสดงผลของโปรแกรม WinXcom	36
2.20	การคำนวณสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของธาตุไฮโดรเจน (H)	36
3.1	แผนภาพขั้นตอนการทำวิจัย	47
3.2	เทคนิคการส่งผ่านแบบลำรังสีแคบ (Narrow beam transmission)	48
3.3	เทคนิคการส่งผ่านแบบลำรังสีแคบ แบบ secondary target	49
4.1	องค์ประกอบของซิลิกาเจลที่ทดสอบด้วยเทคนิค EDS	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
4.2	ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างแก้วระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ เมื่อ $x = 20, 25, 30, 35, 40$ และ 45 เปอร์เซ็นต์โดยโมล	51
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและปริมาตรโดยโมลกับปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$	52
4.4	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวอย่างแก้ว	53
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลที่ได้จากการทดลองของระบบแก้ว $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ กับพลังงานโฟตอน	55
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม WinXcom ของระบบแก้ว $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ กับพลังงานโฟตอน	55
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นที่ค่าที่ได้จากการทดลองของระบบแก้ว $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ กับพลังงานโฟตอน	56
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นที่ค่าที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม WinXcom ของระบบแก้ว $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ กับพลังงานโฟตอน	57
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะปลอดการชนที่ได้จากการทดลองด้วยวิธีของระบบแก้ว $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ กับพลังงานโฟตอน	58
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะปลอดการชนที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม WinXcom ของระบบแก้ว $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ กับพลังงานโฟตอน	58
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลอง จากการคำนวณ ตามปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ ที่พลังงาน 74.228 keV เทียบกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน	59
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นที่ค่าของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลอง จากการคำนวณ ตามปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ ที่พลังงาน 74.228 keV เทียบกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะปลอดการชนของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลองจากการคำนวณโดย ตามปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ ที่พลังงาน 74.228 keV เทียบกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน	60
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลอง จากการคำนวณ ตามปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ ที่พลังงาน 122 keV เทียบกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน	61
4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นค่าของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลองจากการคำนวณ ตามปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ ที่พลังงาน 122 keV เทียบกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน	61
4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะปลอดการชนของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลองจากการคำนวณ ตามปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ ที่พลังงาน 122 keV เทียบกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน	62
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลอง จากการคำนวณ ตามปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ ที่พลังงาน 662 keV เทียบกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน	62
4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นค่าของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลองจากการคำนวณ ตามปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ ที่พลังงาน 662 keV เทียบกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน	63

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะปลอดการชนของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลองจากการคำนวณ ตามปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ ที่พลังงาน 662 keV เทียบกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน	63
4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลอง จากการคำนวณ ตามปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ ที่พลังงาน 1173 keV เทียบกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน	65
4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาครึ่งค่าของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลอง จากการคำนวณ ตามปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ ที่พลังงาน 1173 keV เทียบกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน	65
4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะปลอดการชนของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลอง จากการคำนวณ ตามปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ ที่พลังงาน 1173 keV เทียบกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน	66
4.23	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกทั้งตามยาวและเฉือนเทียบกับเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$	69
4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นเทียบกับเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$	70
4.25	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งระดับไมโครเทียบกับเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$	70
4.26	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของปิวส์ของส์เทียบกับเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$	71
ก.1	เตาหลอมไฟฟ้าอุณหภูมิสูง สร้างโดยกลุ่ม GTEC ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	89

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ก.2	เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ บริษัท Denver Instrument ความละเอียด 0.0001 g	89
ก.3	เตาอบไฟฟ้า สร้างโดยกลุ่ม GTEC ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	89
ก.4	เครื่องตัดชิ้นงาน ยี่ห้อ Benetec limited รุ่น labcut 1010	90
ก.5	เครื่องขัดชิ้นงาน สร้างโดยกลุ่ม GTEC ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	90
ก.6	เครื่อง Ultrasonic Flaw Detector ยี่ห้อ SONATAST รุ่น Sitiescan 230	90
ก.7	บำหกลมที่ใช้เป็นภาชนะในการหลอมแก้ว	91
ก.8	แม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม	91
ก.9	เทคนิคการลดทอนรังสีเอกซ์ (X-ray attenuation method)	91
ก.10	เทคนิคการส่งผ่านแบบรังสีแคบ (Narrow beam transmission)	92
ก.11	ตะกั่วกำบังรังสี	92
ก.12	เครื่อง Power supply (model PX2T-CdTe)	92
ก.13	เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) ยี่ห้อ HITACHI รุ่น S-3400N Type II	93
ก.14	เครื่อง X-ray Diffractometer ยี่ห้อ PANalytical รุ่น X'Pert High score	93
ข.1	หน้าต่างโปรแกรม WinXcom	95
ข.2	การเลือกธาตุที่ต้องการศึกษา	95
ข.3	การสร้างสารประกอบ	96
ข.4	ผลการคำนวณของสารประกอบที่ต้องการศึกษา	96

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมายหน่วย	หน่วย
ρ	ความหนาแน่น	กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร (g/cm^3)
V_a	ปริมาตรโดยโมล	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ โมล (cm^3/mol)
v_s	ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกตามเฉือน	เมตรต่อวินาที (m/s)
v_L	ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกตามยาว	เมตรต่อวินาที (m/s)
G	โมดูลัสเฉือน	จิกะพาสคัลส์ (GPa)
L	โมดูลัสตามยาว	จิกะพาสคัลส์ (GPa)
E	โมดูลัสของยังส์	จิกะพาสคัลส์ (GPa)
K	โมดูลัสเชิงปริมาตร	จิกะพาสคัลส์ (GPa)
σ	อัตราส่วนของปัวส์ซองส์	ไม่มีหน่วย
V_i	ตัวประกอบการอัดแน่น (Packing factor)	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ โมล (cm^3/mol)
G_i	พลังงานของการสลายพันธะ (Dissociation energy)	กิโลจูลต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร (kJ/cm^3)
n_b	จำนวนพันธะต่อหน่วยปริมาตรของแก้ว	ต่อลูกบาศก์เมตร (m^{-3})
n_f	เลขโคออร์ดิเนตของไอออนบวก	ไม่มีหน่วย
N_A	เลขอาโวกาโดมีค่าเท่ากับ 6.023×10^{23}	ไม่มีหน่วย
\bar{n}_c	ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง ต่อสูตรแก้ว	ไม่มีหน่วย
n_c	จำนวนของพันธะเชื่อมโยงของไอออนบวก	ต่อลูกบาศก์เมตร (m^{-3})
N_c	จำนวนของไอออนบวกต่อหน่วยสูตรแก้ว	ไม่มีหน่วย
f	ค่าคงที่ของแรงยืด (stretching force constant)	นิวตันต่อเมตร (N/m)

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
\bar{F}	ค่าคงที่ของแรงยืดเฉลี่ยของพันธะ (Average stretching force constant)	นิวตันต่อเมตร (N/m)
S_m	โมดูลัสเฉือนที่หาจากวิธีของ Makishima-Mackenzie model	จิกะพาสคัลส์ (GPa)
E_m	โมดูลัสของยังส์ที่หาจากวิธีของ Makishima-Mackenzie model	จิกะพาสคัลส์ (GPa)
K_m	โมดูลัสเชิงปริมาตรที่หาจากวิธีของ Makishima-Mackenzie model	จิกะพาสคัลส์ (GPa)
σ_m	อัตราส่วนของปัวส์ซองส์ที่หาจากวิธีของ Makishima-Mackenzie model	ไม่มีหน่วย
G_{bc}	โมดูลัสเฉือนที่หาจากวิธี bond compression model	จิกะพาสคัลส์ (GPa)
L_{bc}	โมดูลัสตามยาวที่หาจากวิธี bond compression model	จิกะพาสคัลส์ (GPa)
E_{bc}	โมดูลัสของยังส์ที่หาจากวิธี bond compression model	จิกะพาสคัลส์ (GPa)
K_{bc}	โมดูลัสเชิงปริมาตรที่หาจากวิธี bond compression model	จิกะพาสคัลส์ (GPa)
σ_{bc}	อัตราส่วนของปัวส์ซองส์ที่หาจากวิธี bond compression model	ไม่มีหน่วย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

การพลิกฟื้นสภาวะทางเศรษฐกิจในยุคปัจจุบัน อันหมายถึงความยากไร้ของประชาชนในประเทศชาติให้มีสถานะทัดเทียมกับมิตรประเทศ และก้าวหน้าไปสู่ความอยู่ดีกินดีอย่างจริงจัง เทคโนโลยีทางพลังงานนิวเคลียร์ จะเป็นกลไกอันหนึ่งที่จะช่วยส่งเสริมการพัฒนาประเทศในด้านต่าง ๆ ที่สำคัญ คือ อุตสาหกรรม การเกษตร การแพทย์และอนามัย พลังงาน สิ่งแวดล้อม และการจัดการทรัพยากร [1] ซึ่งในปัจจุบันการใช้รังสีและเทคนิคด้านนิวเคลียร์นั้นได้นำประโยชน์อย่างมากมาสู่สังคม การใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ สำหรับการวินิจฉัยและการรักษา ได้ช่วยรักษาชีวิตมนุษย์จำนวนมาก รังสีเป็นเครื่องมือสำคัญในการรักษามะเร็งหลายชนิด สามในสี่ของผู้ป่วยในโรงพยาบาลในประเทศอุตสาหกรรม ได้รับประโยชน์ไม่ทางใดก็ทางหนึ่งจากเวชศาสตร์นิวเคลียร์ เช่นเดียวกับประโยชน์ที่ได้รับจากเทคโนโลยีนิวเคลียร์ในด้านอื่น ๆ [2] แต่กิจกรรมของมนุษย์ไม่มีการกระทำใดที่ไม่มีความเสี่ยง เพราะในอีกด้านหนึ่งรังสีก็สามารถทำอันตรายต่อมนุษย์ได้เช่นกันหากไม่ระมัดระวังอย่างเคร่งครัด ผู้ที่ได้รับรังสีในปริมาณที่สูงอาจถึงขั้นเสียชีวิตได้ หรือหากได้รับรังสีปริมาณน้อย ๆ อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลาาน ก็จะทำให้เกิดเซลล์มะเร็งได้เช่นกัน เมื่อเราทราบถึงประโยชน์และโทษของรังสีแล้ว สิ่งที่เราจะต้องคำนึงถึงก็คือ การระมัดระวังความปลอดภัยของผู้ที่ปฏิบัติงานหรือมีหน้าที่เกี่ยวข้องกับรังสีไม่ว่าจะเป็นบุคลากรผู้ซึ่งทำงานในโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ เจ้าหน้าที่ด้านเทคนิค รังสีทางการแพทย์ ผู้ประกอบการภาคเกษตร ภาคอุตสาหกรรม และอาชีพอื่น ๆ ที่ต้องดำเนินงานภายใต้การใช้รังสี โดยต้องคำนึงถึงหลักการป้องกันอันตรายจากรังสี ได้แก่ การใช้เวลาปฏิบัติงานให้สั้นที่สุด รักษาระยะทางให้ห่างจากต้นกำเนิดรังสีให้มากที่สุด และควรจัดให้มีวัสดุกำบังรังสี ให้เหมาะสมตามคุณสมบัติของรังสีแต่ละชนิด [3]

จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้น วัสดุกำบังรังสีจะต้องมีความเหมาะสมตามคุณสมบัติของรังสีแต่ละชนิด รังสีแกมมา (gamma ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานสูง ดังนั้นการกำบังรังสีแกมมาต้องใช้วัสดุที่มีความหนาแน่นสูง เช่น ผนังคอนกรีตหรือตะกั่วหนา ๆ โดยขึ้นกับพลังงานของรังสี [4] แต่เนื่องจากคอนกรีตมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น มีความทึบแสง น้ำสามารถซึมผ่านได้ง่าย ยากต่อการขนย้าย และเมื่อได้รับรังสีนิวเคลียร์เป็นเวลานานอาจเกิดการแตกร้าวดัง่าย นักวิจัยหลายท่านจึงได้พัฒนาวัสดุ

แก้ว เพื่อนำมาใช้แทนคอนกรีตในการเป็นวัสดุกำบังรังสี เนื่องจากแก้วมีข้อดี คือ มีความโปร่งแสง สามารถปรับเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีเพื่อให้มีคุณสมบัติตามต้องการได้ ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี และยังสามารถป้องกันความชื้นหรือการซึมผ่านของน้ำได้ดีอีกด้วย [5] โดยแก้วส่วนใหญ่จะมีซิลิกอน ไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก แก้วที่มีปริมาณของ SiO_2 สูง จะทำให้แก้วนั้นมีโครงสร้างที่แข็งแรง ทนต่อความร้อนและสารเคมีได้ดี [6] สำหรับการพัฒนาวัสดุแก้วกำบังรังสีชนิดใหม่ในงานวิจัยนี้ มีส่วนช่วยในการลดต้นทุนการผลิตโดยใช้ประโยชน์จากวัสดุที่เหลือใช้หรือไม่ได้ใช้แล้ว เช่น ซิลิกาเจลที่เสื่อมสภาพการใช้งาน หรือซิลิกาเจลที่ถูกบรรจุในบรรจุภัณฑ์ขนม และของใช้ต่าง ๆ ซึ่งไม่ได้นำกลับไปใช้อีก เป็นต้น

ซิลิกาเจลหรือสารดูดความชื้น เป็นสารสังเคราะห์ที่อยู่ในรูปแบบซิลิกอน ไดออกไซด์ (Silicon Dioxide) สกัดจากทรายขาว ผสมกรดกำมะถัน มีลักษณะเป็นเม็ดกลม มีรูพรุน ทำให้มีพื้นผิวในการดูดความชื้นเป็นจำนวนมาก [7] ในปัจจุบันนี้ ซิลิกาเจลได้มีบทบาทสำคัญเป็นอย่างมากในธุรกิจการค้าของประเทศไทย สินค้าหรือผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิดที่ควรบรรจุซิลิกาเจล ควบคุมอุณหภูมิในบรรจุภัณฑ์ เช่น เสื้อผ้า รองเท้า เครื่องหนังต่าง ๆ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ยา อาหารแห้งอื่น ๆ และการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศเนื่องจากสินค้าหรือ ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ดังกล่าวนี้อาจมีโอกาสจะเกิดความเสียหายหรือแปรสภาพไปจากเดิม อันเนื่องมาจากความชื้นในอากาศ [8] อีกทั้งในปัจจุบันทางเลือกในการบริโภคอาหารที่มีหลากหลาย ประกอบกับวิถีการใช้ชีวิตของมนุษย์ที่เร่งรีบและต้องการความสะดวกสบาย ทำให้ขนมขบเคี้ยว ซึ่งถือเป็นอาหารสำเร็จรูป จึงได้รับความนิยมสำหรับการบริโภคในทุกเพศทุกวัย โดยเฉพาะวัยรุ่นหรือเด็กๆ เนื่องจากสินค้าขนมขบเคี้ยวมีรูปแบบรสชาติที่หลากหลายพกพาสะดวก อีกทั้งยังมีการโฆษณา และโปรโมชันต่าง ๆ เป็นการสร้างแรงจูงใจให้ผู้บริโภคเลือกซื้อมารับประทานได้เป็นอย่างมาก [9] ซึ่งขนมหลายชนิดต้องใช้ซิลิกาเจล ใส่ลงไปบรรจุภัณฑ์ เพื่อป้องกันความชื้นและช่วยรักษาความสดใหม่ ความกรอบและรสชาติให้คงเดิม [10] จะเห็นได้ว่ามีการใช้ประโยชน์จากซิลิกาเจลในหลาย ๆ ด้าน เมื่อนำมาใช้เป็นเวลานานคุณสมบัติการดูดความชื้นของซิลิกาเจลจะลดลง และซิลิกาเจลในบรรจุภัณฑ์ขนมก็ไม่ได้นำกลับมาใช้ใหม่ถูกทิ้งไว้ทำให้กลายเป็นขยะจากซิลิกาเจลจำนวนมาก

ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการนำขยะซิลิกาเจลนี้ มาใช้ทดแทนซิลิกอน ไดออกไซด์บริสุทธิ์ซึ่งเป็นสารที่ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของแก้วกำบังรังสี โดยมีสตรอนเทียมออกไซด์ (SrO) เป็นสารที่มีคุณสมบัติช่วยเพิ่มความแข็งของแก้ว [11] ทำให้แก้วมีความทนต่อแรงที่มากระทำได้มากขึ้น ในงานทางด้านรังสี แก้วที่มีส่วนผสมของตะกั่วในปริมาณมาก (high lead content glass) จะมีคุณสมบัติในการดูดกลืนรังสีแกมมา (gamma ray) และรังสีเอกซ์ได้ดี (X-ray) [12] เนื่องจากตะกั่วมีความหนาแน่นสูง และมีความทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี [13] ซึ่งเป็นข้อดีในการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำบังรังสีของวัสดุแก้ว งานวิจัยนี้จึงได้มีการเติมตะกั่วออกไซด์ (PbO)

เพื่อให้แก้วมีคุณสมบัติการกักขังรังสีที่ดีขึ้น นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพของวัสดุแก้วนี้ โดยวัดความหนาแน่นของแก้วด้วยหลักการอาร์คิมิดีส ความเป็นผลึกของแก้วจะทดสอบโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สมบัติทางด้านรังสีวัดจากการทดลองโดยวิธี Narrow beam transmission โดยผลจากการทดลองถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณโดยโปรแกรม WinXcom ซึ่งพัฒนาโดย National Institute of Standards and Technology ส่วนสมบัติยืดหยุ่นจะทดสอบโดยเครื่องอัลตราโซนิกเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยวิธี bond compression model และวิธี Makishima-Mackenzie model เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการปรับปรุงและพัฒนาแก้วกักขังรังสีให้มีคุณภาพที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาองค์ประกอบของซิลิกาเจลด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์
- 1.2.2 เพื่อเตรียมตัวอย่างแก้วในระบบ Strontium lead silicate
- 1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพของแก้ว Strontium lead silicate โดยการวัดความหนาแน่นด้วยหลักการอาร์คิมิดีส
- 1.2.4 เพื่อศึกษาความเป็นผลึกของแก้ว Strontium lead silicate ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
- 1.2.5 เพื่อศึกษาสมบัติทางด้านรังสีของแก้ว Strontium lead silicate ทั้งจากการทดลองโดยวิธี Narrow beam transmission และวิธี X-ray attenuation เปรียบเทียบกับการคำนวณโดยโปรแกรม WinXcom
- 1.2.6 เพื่อศึกษาสมบัติยืดหยุ่นของแก้ว Strontium lead silicate ด้วยเทคนิค Ultrasonic เปรียบเทียบกับการคำนวณด้วยวิธี bond compression model และวิธี Makishima-Mackenzie model

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

มีความรู้และเข้าใจกระบวนการหลอมแก้ว สามารถระบุอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารเคมีเพื่อใช้ในการหลอมแก้วได้ สามารถระบุสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางโครงสร้าง สมบัติทางด้านรังสี และสมบัติยืดหยุ่นของแก้ว Strontium lead silicate ได้ สามารถพัฒนาสูตรแก้วให้มีความเหมาะสมสำหรับเป็นวัสดุกักขังรังสีและองค์ความรู้ที่ได้เป็นส่วนช่วยในการเลือกวัสดุที่จะไปใช้งานทางด้านรังสี เช่น การประยุกต์ใช้ซิลิกาเจลที่เสื่อมสภาพการใช้งานแล้วให้เกิดประโยชน์ เป็นการลดจำนวนขยะซิลิกาเจล นอกจากนี้องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยจะเป็นฐานข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจสามารถนำไปขยายผลได้ต่อไปในอนาคต

1.4 ขอบเขตของการศึกษาค้นคว้า

วิเคราะห์องค์ประกอบของซิลิกาเจลด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ ศึกษาสมบัติทางกายภาพของแก้ว Strontium lead silicate โดยการวัดความหนาแน่นด้วยหลักการอาร์คิมิดีส ศึกษาสมบัติทางโครงสร้างของแก้วด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ศึกษาสมบัติทางด้านรังสีของแก้วด้วยวิธี Narrow beam transmission และวิธี X-ray attenuation เปรียบเทียบกับการคำนวณโดยโปรแกรม WinXcom ทดสอบสมบัติยืดหยุ่นของแก้วด้วยเทคนิค Ultrasonic โดยใช้หัวตรวจสอบตรงและหัวตรวจสอบมุม เพื่อหาความเร็วคลื่นเสียงในวัสดุแก้วซึ่งใช้ในการคำนวณค่าโมดูลัสต่าง ๆ อัตราส่วนปัวส์ซองส์ และค่าความแข็ง เปรียบเทียบกับการคำนวณด้วยวิธี bond compression model และวิธี Makishima-Mackenzie model

1.5 สถานที่ทำการวิจัย

1.5.1 ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

1.5.2 ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.5.3 ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (National Metal and Materials Technology Center: MTEC)

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการทฤษฎี

2.1.1 ประวัติของแก้ว

วัสดุแก้วในธรรมชาติที่เป็นที่รู้จักกันดีก็คือ แร่ obsidian ซึ่งมักพบบริเวณภูเขาไฟเกิดจากลาวาที่มีการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว มนุษย์มีการใช้งานแร่ obsidian ตั้งแต่ยุคหิน เนื่องจากแก้วเมื่อแตกแล้วจะมีความคม มนุษย์ยุคหินจึงนิยม ใช้เป็นเครื่องมือในการล่าสัตว์ หรือเป็นมีดแล่นเนื้อนั่นเอง นอกจากนั้นแก้วจากธรรมชาติบางชนิดก็มีความสวยงาม ใช้เป็นเครื่องประดับได้ ส่วนการผลิตแก้วโดยมนุษย์นั้นพบมาตั้งแต่สมัยอียิปต์ ก่อนคริสต์ศักราชถึง 1500 ปี โดยจะกล่าวถึงตามลำดับได้ดังนี้ 5000 ปีก่อนคริสต์ศักราช นักเขียนโรมันบันทึกว่าพ่อค้าชาว phoenician ได้แวะพักที่ชายฝั่งของปาเลสไตน์และได้มีการก่อไฟโดยใช้เนตรอนซึ่งเป็นคาร์บอนเตของโซดา สองก้อนแทนเตมารองหม้อชุปที่ตั้งอยู่บนไฟ ทำให้ก้อนเนตรอนหลอมละลายรวมกับพื้นทรายข้างล่างเกิดเป็นแก้วขึ้น จึงเชื่อกันว่าการค้นพบโดยบังเอิญนี้เป็นจุดกำเนิดของแก้วโดยฝีมือมนุษย์นั่นเอง ต่อมา 3500 ปีก่อนคริสต์ศักราช ตามหลักฐานที่ค้นพบคาดว่าแก้วที่ผลิตโดยมนุษย์นั้น ในช่วงแรกจะเป็นพวกลูกปัดแก้วที่ผลิตในแถบอียิปต์และแถบเมโสโปเตเมียตะวันออกซึ่งปัจจุบันคือประเทศอิรัก ส่วนการทำเคลือบแก้วบนภาชนะ เครื่องปั้นดินเผาเริ่มพบในแถบเมโสโปเตเมียตอนกลาง โดยการเผาหม้อทรายที่มีหินปูนเป็นองค์ประกอบแล้วเกิดการรวมตัวกับโซดาหลอมกลายเป็นเคลือบสีบนภาชนะ จากนั้น 1500 ปีก่อนคริสต์ศักราช ถือเป็นจุดกำเนิดของการทำ hollow glass เนื่องจากพบชิ้นส่วนของถ้วยแก้วในอียิปต์ที่มีชื่อของฟาโรห์ Thoutmosis III ปรากฏอยู่ นอกจากนี้ยังพบหลักฐานการทำแก้ว ในประเทศกรีซ และจีนอีกด้วย 650 ปีก่อนคริสต์ศักราช มีการเขียนคู่มือการทำแก้ว ค้นพบที่ห้องสมุดของ Assyrian King Ashurbanipal และ 27 ปีก่อนคริสต์ศักราชจนถึงคริสต์ศักราชที่ 14 ที่บริเวณ Sidon Babylon ช่างฝีมือชาวซีเรีย ได้ค้นพบวิธีการ blowing ซึ่งทำให้ สามารถผลิตภาชนะหลายรูปแบบได้ปริมาณมาก [14]

สำหรับประวัติเรื่องแก้วทางทวีปเอเชีย ปรากฏตามหลักฐานที่บันทึกไว้ว่าเครื่องแก้วและเครื่องเคลือบดินเผาหรือผลิตภัณฑ์เซรามิกส์มีความเจริญก้าวหน้ามากในประเทศจีนโดยเฉพาะในด้านวัฒนธรรมของชาวจีนที่มีส่วนเกี่ยวข้องอยู่กับงานแก้วและงานเซรามิกส์เป็นอย่างมาก จะเห็นได้

จากตัวอย่างวัตถุโบราณที่เก็บไว้ในพิพิธภัณฑ์ต่าง ๆ ทั่วโลก เช่นในพิพิธภัณฑ์ของประเทศอังกฤษได้มีเครื่องแก้วที่เป็นโบราณวัตถุของประเทศจีนในยุคต่าง ๆ แสดงไว้ โดยพบว่าเครื่องแก้วในประเทศจีนมีความเจริญก้าวหน้ายืนยาวมานานทัดเทียมได้กับประเทศอียิปต์ที่แตกต่างกันคือรูปร่างและลักษณะ ซึ่งอุตสาหกรรมแก้วในทวีปเอเชียนี้คาดว่าเริ่มต้นมาจากประเทศจีนและได้เผยแพร่ออกไปทั่วทุกทิศ

การนำเครื่องแก้วและผลิตภัณฑ์เซรามิกส์มาสู่ประเทศไทย เริ่มตั้งแต่สมัยสุโขทัยยุคพ่อขุนรามคำแหงมหาราช โดยเฉพาะเครื่องเคลือบดินเผาได้มีการนำเข้าเข้ามาช่วยทำในประเทศไทย ดังจะเห็นจากเครื่องสังคโลกได้มีการผลิตคล้ายของประเทศจีนและได้ทำการผลิตเพื่อนำออกไปขายในต่างประเทศ เพราะในสมัยสุโขทัยนั้นแผ่นดินไทยได้ติดต่อกับต่างประเทศมาก แต่อย่างไรก็ตามความเจริญของเครื่องแก้วก็ยังมีไม่มากเท่าเครื่องเคลือบดินเผา ต่อมาสมัยรัตนโกสินทร์ราว พ.ศ. 2359 ในรัชกาลที่ 4 ได้มีเจ้านายผู้ใหญ่หลายพระองค์ทรงสนพระทัย และการทำแก้วได้มีความนิยมกันมาก โดยเฉพาะของทางราชการซึ่งปรากฏในหลักฐานที่หอสมุดแห่งชาติว่าในรัชกาลที่ 4 นี้ ได้จัดหน่วยราชการระดับกรมซึ่งมีหน้าที่ทำการผลิตแก้วขึ้นโดยเฉพาะเรียกว่ากรมช่างหุงกระจก มีกรมขุนวรจักรฯ (เจ้าชายปราโมช) ซึ่งเป็นราชโอรสองค์ที่ 61 ในรัชกาลที่ 2 ทรงเป็นผู้ควบคุมการทำแก้ว มีพนักงานจำนวนมากและใช้ฟืนเป็นเชื้อเพลิง ในสมัยนี้การหลอมแก้วจะหลอมด้วยเข่าซึ่งในสมัยนั้นเรียกว่าตุ้ม

การทำแก้วของประเทศไทยในระยะแรกยังคงเป็นโรงงานขนาดเล็กและใช้แรงงานคน จนกระทั่งในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 การขาดแคลนเครื่องแก้วมีมากขึ้น โดยเฉพาะอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการสื่อสารซึ่งกองสัญญาณทหารเรือได้ประสบกับปัญหาและอุปสรรคอย่างมาก กองทัพเรือจึงได้มอบให้กองสัญญาณทหารเรือเป็นผู้ทดลองและผลิตแก้วที่ทำจากทรายเป็นโครงการขั้นต้น ในสมัยนี้ทางราชการได้มีการจัดตั้งองค์การแก้วขึ้นและได้พัฒนามาเรื่อยๆ จนถึงปัจจุบันซึ่งเป็นโรงงานแก้วที่มีขนาดใหญ่และทันสมัย [15]

2.1.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแก้วและความหมายของแก้ว

แก้วเป็นวัสดุเซรามิกส์ประเภทหนึ่งที่มีนิยมนำใช้อย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะแก้วมีสมบัติเฉพาะตัวในเรื่องของความโปร่งใส ความแข็งแรง และความมันวาววาว ซึ่งเป็นสมบัติที่วัสดุอื่นทดแทนไม่ได้ อีกทั้งในปัจจุบันมนุษย์สามารถสร้างสรรค์และผลิตแก้วได้อย่างหลากหลายลักษณะ ไม่ว่าจะเป็นแท่งแก้วที่บิดงอ แผ่นแก้วที่บางเฉียบหรือเส้นใยแก้วที่ละเอียดอ่อน ดังนั้นการได้ศึกษาถึงวิวัฒนาการของแก้ว สมบัติและประเภทของแก้วรวมถึงขั้นตอนการผลิตแก้วลักษณะต่าง ๆ ที่จะช่วยให้เกิดความเข้าใจในวัสดุประเภทนี้มากขึ้น อันจะนำมาซึ่งการเลือกใช้ได้อย่างเหมาะสมในชีวิตประจำวัน รวมทั้งเพื่อการปรับปรุง พัฒนาและสร้างสรรค์ผลิตภัณฑ์แก้วต่อไป [15]

แก้วเป็นวัสดุที่ประกอบด้วยอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ร่วมกันโดยไม่มีระเบียบตัวอย่างเป็นระเบียบที่เรียกว่า วัสดุอสัณฐาน แก้วเตรียมได้จากการหลอมสารอนินทรีย์ที่อุณหภูมิสูงจนวัตถุดิบหลอมเป็นแก้วเหลวอยู่ในสถานะเป็นของเหลว จากนั้นถูกขึ้นรูปและทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจน

องค์ประกอบของโครงสร้างแก้วไม่มีเวลาเพียงพอที่จะเรียงตัวให้เป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบของแข็งที่ได้จากการขึ้นรูปจากแก้วหลอมจึงเป็นลักษณะของแข็งที่ไม่มีผลึก มีสมบัติกึ่งเสถียร (Metastable) มีพลังงานสะสมในโครงสร้างน้อยกว่าของเหลวแต่สูงกว่าของแข็งที่มีผลึก [16]

หากพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพแล้วนั้น แก้วจะหมายถึงวัสดุที่มีความแข็ง โปร่งใส เปราะ มีความแวววาว มีจุดหลอมละลายสูง ไม่ละลายในน้ำและในสารละลายใด ๆ อีกทั้งไม่ติดไฟ ซึ่งแก้วมีสมบัติดังต่อไปนี้

- (1) แก้วมีโครงสร้างทางเคมีไม่แน่นอน แต่แก้วจะมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกัน คือประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคาร์บอเนตเป็นหลัก
- (2) มีความแข็งแต่เปราะทำให้แตกหักง่าย
- (3) เป็นตัวนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องไม่ดี
- (4) มีลักษณะโปร่งใส (transparency)
- (5) สามารถทำให้หลอมละลายได้ด้วยความร้อน
- (6) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสมบัติของแก้วจะเปลี่ยนไปทั้งลักษณะทางกายภาพ และสมบัติทางเคมี
- (7) มีช่วงการหลอมละลายที่กว้างมาก
- (8) สมบัติทางกายภาพต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงนั้นจะสามารถสังเกตเห็นได้

แก้วเป็นวัสดุที่ทำจากทรายแก้วเป็นส่วนประกอบหลัก นอกจากนั้นจะเป็นโลหะออกไซด์ต่าง ๆ เช่น เหล็กออกไซด์ (ferric oxide) ฟอสเฟอริกออกไซด์ (phosphoric oxide) เป็นต้น โดยที่แก้วมีส่วนประกอบทางเคมีไม่แน่นอน แต่ส่วนผสมจะต้องอยู่ในขอบเขตจำกัด หากส่วนผสมคลาดเคลื่อนไปจากที่กำหนดไว้จะทำให้แก้วไม่หลอมละลายในอุณหภูมิที่กำหนดหรือเกิดความยุ่งยากอื่น ๆ ขึ้น เช่น เกิดตำหนิ สมบัติผิดไปจากความต้องการ เป็นต้น บรรดาแก้วหลากหลายชนิดที่มนุษย์ผลิตขึ้นสามารถผลิตแก้วให้เบาเหมือนไม้คอร์ก (cork) หรือแก้วมีน้ำหนักมากเหมือนโลหะพวกเหล็ก (iron) แก้วที่มีความแข็งเหมือนเหล็กกล้า (steel) แก้วที่มีความเปราะเหมือนเปลือกไข่ให้อ่อนนุ่มเหมือนปุ๋ยฝ้าย หรือให้แข็งเหมือนเพชรพลอย ทั้งนี้เนื่องจากแก้วสามารถควบคุมส่วนผสมและวิธีการผลิตให้มีสมบัติตามต้องการได้จึงมีการนำแก้วไปใช้ในงานต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นงานทางด้านวิทยาศาสตร์ ใช้ในด้านอุตสาหกรรม สถาปัตยกรรม โทรคมนาคม งานวิศวกรรม เป็นของใช้ภายในบ้านเรือนและชีวิตประจำวันหรือแม้กระทั่งเครื่องประดับขนาดเล็ก [15]

2.1.3 ประเภทของแก้ว

แก้วจำแนกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ [15]

2.1.3.1 แก้วที่เกิดโดยธรรมชาติ

แก้วที่เกิดโดยธรรมชาติเรียกว่า ออบซิเดียน ซึ่งเกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของสารหลอมเหลวที่พุ่งออกมาจากปล่องภูเขาไฟ (magma) มีสีเทาหรือสีม่วงดำ ต่อมาในยุคหินที่มนุษย์เริ่มรู้จักใช้ความร้อนจากไฟในการหุงต้ม กรวดและทรายบริเวณเชิงตะกอนของเตาไฟที่หุงต้มเมื่อได้รับความร้อนสูงจะเกิดการหลอมละลายบริเวณผิวจนกระทั่งมีลักษณะคล้ายลูกปัดแก้วก่อนกลมๆ (glass bead) โดยแก้วธรรมชาติที่เกิดจากการหลอมตัวของทรายหรือทรายแก้วซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีคือซิลิกอนไดออกไซด์ นอกจากนี้แก้วที่เกิดโดยธรรมชาติยังเกิดจากการหลอมตัวของซิลิกอนไดออกไซด์ที่อยู่ในลักษณะของหินหรือแร่ เช่น หินเขี้ยวหนุमान (quartz) ซึ่งมีจุดหลอมสูงมากกว่าทราย ที่หากเกิดการหลอมละลายแล้วจะเรียกว่าซิลิกาหลอม (fused silica)

2.1.3.2 แก้วที่มนุษย์สร้างขึ้น

การแบ่งประเภทของแก้วที่มนุษย์ประดิษฐ์คิดขึ้นนั้น สามารถแบ่งได้หลายแบบ เช่น แบ่งตามกรรมวิธีการผลิต แบ่งตามองค์ประกอบทางเคมี หรือแบ่งตามการใช้งาน แต่โดยส่วนใหญ่เรามักจะบอกประเภทของแก้วตามองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งแบ่งได้เป็น 7 ชนิด ดังแสดงในภาพที่ 2.1 ซึ่งมีดังนี้ [15]

1) แก้วโซดาไลม์ (Soda-lime glass) แก้วสีเบียร์ชนิดของผลิตภัณฑ์แก้วทั้งหมดนั้นผลิตจาก soda-lime glass แก้วประเภทนี้ประกอบด้วยซิลิกา 71-73 เปอร์เซ็นต์ Na_2O 12-14 เปอร์เซ็นต์ และ CaO 10-12 เปอร์เซ็นต์ ง่ายต่อการขึ้นรูป นอกจากนี้อาจเติม MgO 1-4 เปอร์เซ็นต์ เพื่อป้องกันการเกิด devitrification และเติม Al_2O_3 0.5-1.5 เปอร์เซ็นต์เพิ่มความแข็งแรงทนทาน soda-lime glass ใช้ทำแผ่นแก้วบาง ภาชนะบรรจุ ถ้วยชาม ผลิตภัณฑ์ที่ให้แสงสว่างซึ่งทนต่อสารเคมีแต่ไม่จำเป็นต้องทนต่อความร้อน สามารถทำให้เกิดสีต่าง ๆ ได้โดยการเติมออกไซด์ของโลหะบางชนิดลงไป

1) แก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate glass) หรือเรียกว่าแก้ว Pyrex เป็นแก้วที่มีการเติมบอริกออกไซด์ลงไป ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ และทนต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อน แก้วที่ได้สามารถนำไปใช้ทำเครื่องแก้ววิทยาศาสตร์ ทำภาชนะแก้วสำหรับใช้ในเตาไมโครเวฟ เป็นต้น

2) แก้วตะกั่ว (Lead glass) หรือแก้วคริสตัล เป็นแก้วที่มีการเติมสารผสมของตะกั่วออกไซด์ อยู่มากกว่า 24% โดยน้ำหนัก จะเป็นแก้วที่มีดัชนีหักเหสูงมากกว่าแก้วชนิดอื่น ทำให้มีประกายแวววาวสวยงามและแกะสลักเป็นลวดลายต่าง ๆ ได้ ใช้ทำเครื่องประดับที่มีราคาแพง

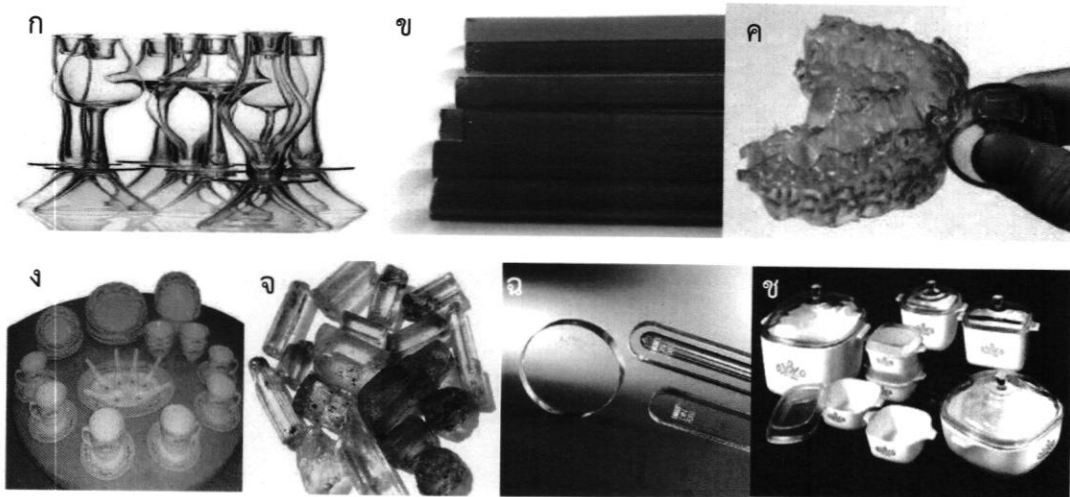
3) แก้วโอปอล (Opal glass) เป็นแก้วที่มีการเติมสารบางชนิดลงไป เช่น สาร

โซเดียมฟลูออไรด์ หรือแคลเซียมฟลูออไรด์ ทำให้มีการตกผลึก หรือการแยกเฟสขึ้นในเนื้อแก้ว ทำให้แก้วชนิดนี้มีความขุ่นหรือโปร่งแสงเนื่องจากสามารถหลอม และขึ้นรูปได้ง่ายจึงมีต้นทุนการผลิตต่ำ และสามารถทำให้มีความแข็งแรงและทนทานมากขึ้นเมื่อนำไปผ่านกระบวนการอบ (tempering) หรือกระบวนการเคลือบ (laminating) เช่น ภาชนะใส่อาหารและเครื่องดื่ม

4) แก้วอลูมิโนซิลิเกต (Alumino silicate glass) มีอลูมินาและซิลิกาเป็นส่วนผสมหลัก มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำและมีจุดอ่อนตัวของแก้ว (softening point) สูง พอที่จะป้องกันการเสียรูปทรงเมื่อทำการอบ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ผลิตภัณฑ์ เช่น เครื่องประดับแวววาว

5) แก้วอัลคาไลน์-เอิร์ท อลูมิโนซิลิเกต (alkaline-earth aluminosilicate) มีส่วนผสมของแคลเซียมออกไซด์ หรือแบเรียมออกไซด์ ทำให้มีค่าดัชนีหักเหใกล้เคียงกับแก้วตะกั่ว แต่ผลิตง่ายกว่าและมีความทนทานต่อกรดและด่างมากกว่าแก้วตะกั่วเล็กน้อย เช่น เครื่องประดับแวววาว

6) กลาส-เซรามิกส์ (glass-ceramics) เป็นแก้วประเภทลิเทียมอลูมิโนซิลิเกตที่มี TiO_2 หรือ ZrO_2 ผสมอยู่เล็กน้อย ซึ่งจะทำให้เกิดผลึกในเนื้อแก้ว ซึ่งอาจทำให้แก้วมีความทึบแสงหรือโปร่งใส ขึ้นกับชนิดของผลึก กลาส-เซรามิกส์จะทนทาน และมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำมาก สามารถนำไปใช้เป็นภาชนะหุงต้มหรือเป็นแผ่นบนเตาหุงต้มได้ นอกจากนี้ยังมีแก้วประเภทอื่นๆ อีกหลายประเภท ขึ้นอยู่กับส่วนผสมที่แตกต่างกันออกไป



ภาพที่ 2.1 ประเภทของแก้วแบ่งตามองค์ประกอบทางเคมี : (ก) แก้วโซดาไลม์ (ข) แก้วบอโรซิลิเกต (ค) แก้วตะกั่ว (ง) แก้วโอปอล (จ) แก้วอลูมิโนซิลิเกต (ฉ) แก้วอัลคาไลน์-เอิร์ท อลูมิโนซิลิเกต (ช) กลาส-เซรามิกส์

2.1.4 ทฤษฎีเกี่ยวกับโครงสร้างแก้ว

ทฤษฎีของ K.H.Sun [16] ใช้ค่าความแข็งแรงของพันธะเดี่ยว (Bond strength) ระหว่างธาตุนั้นกับออกซิเจนอะตอม ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าพลังงานสลายพันธะ (Dissociation energy)หารด้วยจำนวนอะตอมของออกซิเจนที่ล้อมรอบอะตอมของไอออนบวกนั้น หรือ เลขโคออดิเนชัน (Coordination number)

ธาตุที่เป็น Network former มีหน้าที่สร้างโครงข่ายแก้วต้องมีค่าความแข็งแรงของพันธะของธาตุนั้นกับออกซิเจนมากกว่า 80 กิโลแคลอรี/กรัมอะตอม

ธาตุที่เป็น Intermediate ซึ่งมีบทบาทอยู่ระหว่างธาตุที่เป็น Network former และธาตุที่เป็น Modifier ซึ่งธาตุที่เป็น Intermediate จะมีค่าความแข็งแรงของพันธะของธาตุนั้นกับออกซิเจนอยู่ระหว่าง 80-60 กิโลแคลอรี/กรัมอะตอม

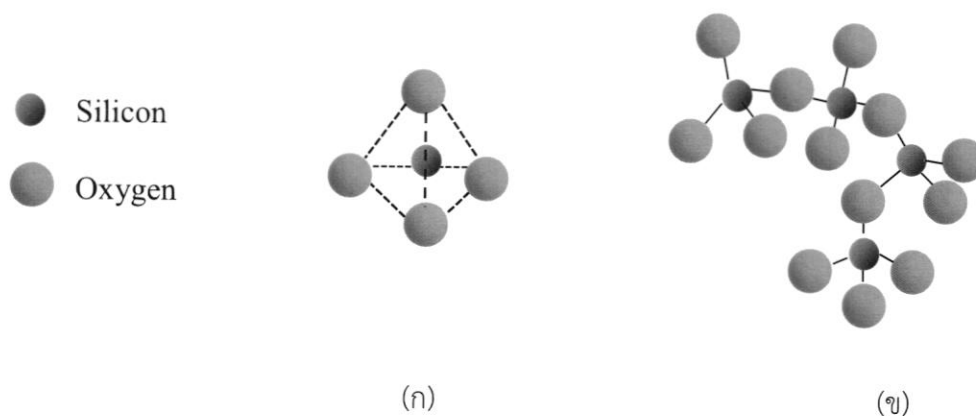
ธาตุที่เป็น Modifier ธาตุที่มีบทบาทเป็นตัวช่วยดัดแปลงหรือปรับปรุงโครงข่าย จะมีค่าความแข็งแรงของพันธะของธาตุนั้นกับออกซิเจนน้อยกว่า 60 กิโลแคลอรี/กรัมอะตอม

2.1.5 องค์ประกอบของแก้ว

แก้วมีองค์ประกอบเป็นออกไซด์ของธาตุต่าง ๆ ซึ่งถ้าหากพิจารณาในด้านบทบาทในโครงสร้างของแก้วแล้ว สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภทด้วยกันคือ [17-18]

2.1.5.1 Glass-forming oxide

Glass-forming oxide หรืออาจเรียกว่า network former คือ ออกไซด์ที่ทำให้เกิดโครงสร้างแก้ว โดยทั่วไปอาจเป็นซิลิกา (SiO_2) ซึ่งมีหน่วยย่อยพื้นฐานเป็นซิลิเกต (SiO_4) ดังแสดงในภาพที่ 2.2 นอกจากซิลิกาแล้ว ยังมีออกไซด์ตัวอื่น ๆ อีก เช่น โบรอนออกไซด์ (B_2O_3) ในโครงสร้างของแก้ว borosilicate และ alumino-borosilicate เป็นต้น



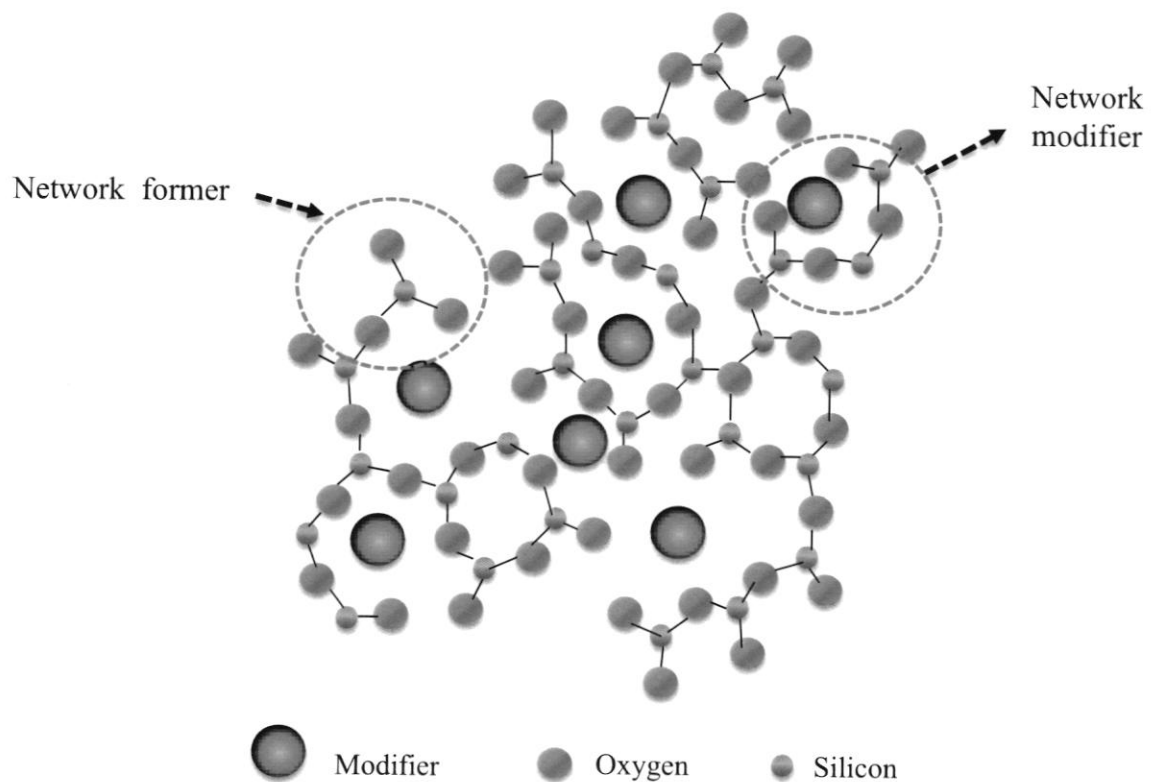
ภาพที่ 2.2 (ก) โครงสร้างทรงสี่หน้า (tetrahedral) ของซิลิกาและ (ข) โครงสร้างแบบอสัณฐาน (amorphous) ของแก้ว

2.1.5.2 Intermediate oxide

Intermediate oxide เป็นออกไซด์ที่ไม่สามารถทำให้เกิดโครงสร้างแก้วได้ด้วยตัวเอง แต่สามารถเข้าไปร่วมกับโครงสร้างที่มีอยู่ได้ ตัวอย่างเช่น Al_2O_3 จะเข้าไปอยู่ในรูปของ AlO_4 tetrahedra แทนกลุ่มของ SiO_4 บางกลุ่ม และเกิดเป็นแก้วประเภท aluminosilicate ซึ่งมีสมบัติทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดี เป็นต้น

2.1.5.3 Glass-modifying oxide

Glass-modifying oxide หรือ network modifier เป็นสารที่เมื่อเติมลงไป ในโครงสร้างแก้วแล้วจะไปทำลายโครงสร้างของแก้วบางส่วน จะทำให้ความหนืดของแก้วลดลง และนำไปขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น ตัวอย่างของสารกลุ่มนี้เช่น Na_2O K_2O CaO และ MgO เป็นต้น



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของแก้วที่ประกอบด้วย network former และ network modifier

จากภาพที่ 2.3 เมื่อเติม glass-modifying oxide ลงไป ออกซิเจนจะเข้าสู่โครงสร้าง ณ บริเวณจุดเชื่อมระหว่างเตตระฮีดรอนของ SiO_4 และทำลายโครงสร้าง ส่วนพวกประจุบวก เช่น Na^+ หรือ Ca^{2+} จะเข้าไปอยู่ในช่องว่างในโครงสร้างและเกิดพันธะไอออนิก ประจุเหล่านี้จะส่งเสริมให้แก้วเกิดผลึกภายในโครงสร้างได้

2.1.6 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแก้ว

องค์ประกอบทางเคมีของแก้วจะมีผลต่อคุณสมบัติของแก้ว [19] ดังต่อไปนี้

2.1.6.1 SiO_2 แก้วที่มีปริมาณของ SiO_2 สูงนั้น จะทำให้แก้วนั้นมีโครงสร้างที่แข็งแรง ทนต่อความร้อนและสารเคมี แต่ทำการผลิตได้ยากเนื่องจากต้องใช้อุณหภูมิในการหลอมเหลวสูงขึ้น และขึ้นรูปได้ยากเนื่องจากมีความหนืดสูง

2.1.6.2 Na_2O แก้วที่มีปริมาณ Na_2O สูงจะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำ เพราะแตกง่ายและไม่ทนต่อสารเคมี ถ้ามีปริมาณ Na_2O สูงมากๆ จะสามารถละลายน้ำได้

2.1.6.3 K_2O ช่วยให้การตกผลึกเป็นไปอย่างช้า ๆ ทำให้การเรียงตัวของผลึกนั้นออกมาสวยงาม

2.1.6.4 CaO MgO หรือ BaO จะช่วยในการขึ้นรูป ทำให้แก้วคงตัวเร็วขึ้นเมื่อเย็นลงและเพิ่มความทนต่อสารเคมี แก้วที่มีปริมาณ MgO มากกว่า CaO จะทำให้ให้การตกผลึกเป็นไปอย่างช้า ๆ ทำให้การเรียงตัวของผลึกออกมาสวยงาม

2.1.6.5 Al_2O_3 แก้วที่มีปริมาณของ Al_2O_3 สูง จะทำให้แก้วนั้นมีความทนทานต่อการสึกกร่อนและสารเคมีได้ดีขึ้น

2.1.6.6 B_2O_3 แก้วที่มีสารประกอบของสาร Boron เป็นองค์ประกอบจะมีความคงทนต่อกรด-ด่าง และทนต่อความร้อน เนื่องจากจะทำให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนลดลง แก้วประเภทนี้เป็นแก้วที่ใช้ในอุปกรณ์วิทยาศาสตร์และเป็นแก้วประเภทที่สามารถใช้ในเตาไมโครเวฟได้

2.1.6.7 PbO แก้วที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ (Lead glass) เนื้อแก้วใสวาวเนื่องจากมีค่าดัชนีหักเหสูงมีความอ่อน (soft) ง่ายต่อการเจียรระโน เมื่อเคาะจะมีเสียงกังวาน

2.1.6.8 Fe_2O_3 มีสมบัติช่วยลดจุดหลอมเหลว จะทำให้เนื้อกระจกนั้นใส มีสีค่อนข้างเขียว

2.1.6.9 ออกไซด์อื่น ๆ หากต้องการให้แก้วมีสีอื่นต่าง ๆ สามารถเติมสารนอกเหนือจากส่วนผสมข้างต้นที่กล่าวมาแล้ว ดังนี้ Chromium oxide (Cr_2O_3) ให้สีเขียว Cobalt oxide (CoO) ให้สีน้ำเงิน Uranium (U) ให้สีเหลือง Carbon-Sulfur-Iron (C-S-Fe) ให้สีอำพัน Nickle (Ni) ให้สีน้ำตาล และ Manganese (Mn) ให้สีม่วง

2.1.7 ตัวอย่างการใช้งานวัสดุแก้ว

เนื่องจากแก้วเป็นวัสดุที่มีคุณค่า และประโยชน์อย่างมากมาย จึงมีการนำไปประยุกต์ใช้ด้านต่าง ๆ ดังนี้ [15]

2.1.7.1 แก้วที่ใช้ในด้านวิทยาศาสตร์ ได้แก่ หลอดแก้วทดลองต่าง ๆ ปริซึม และปีกเกอร์ เป็นต้น

2.1.7.2 แก้วที่ใช้ในการให้แสงสว่าง ใช้ทำหลอดไฟที่ให้แสงสว่าง เช่น หลอดฟลูออเรสเซนต์ (fluorescent) แก้วประเภทนี้ยังใช้ทำเลนส์ของแว่นตา แว่นขยาย กล้องถ่ายรูป กล้องจุลทรรศน์ กล้องส่องทางไกล เป็นต้น

2.1.7.3 แก้วที่ใช้ในด้านก่อสร้าง เช่น แก้วบุเพดาน เนื่องจากสมบัติด้านการเป็นฉนวนที่กันความร้อน เส้นใยแก้ว (fiber glass) เสื่อกันความร้อนและเสื่อกันไฟ

2.1.7.4 แก้วสะเทิน (neutral glass) หมายถึงแก้วที่ไม่ทำปฏิกิริยากับกรดหรือด่าง แก้วพวกนี้ได้แก่ ขวดใส่ยา ขวดใส่น้ำเกลือ เป็นต้น

2.1.7.5 แก้วกระจกรถยนต์ (safety glass) หรือเรียกโดยทั่วไปว่าแก้วนิรภัย มีสมบัติเด่นของแก้วชนิดนี้คือเมื่อแตกจะไม่มีลักษณะแหลมคม (angular fragment) ทั้งนี้เพราะขณะขึ้นรูป ใช้ลมเป่าให้ผิวด้านนอกของแผ่นแก้วเย็นและหดตัวอย่างรวดเร็ว เมื่อมีการกระทบที่ผิวจึงเกิดการแตกร้าวเป็นฝอย แก้วที่นำมาทำกระจกรถยนต์นี้เป็นแก้วชนิดโซดาไลม์

2.1.7.6 แก้วกันกระสุน (bullet proof glass) เป็นแก้วชนิดโซดาไลม์ ที่ภายหลังการขึ้นรูปให้เป็นแผ่นบาง ๆ (sheet) หลาย ๆ แผ่น แล้วใช้แผ่นพลาสติก (laminare) แทรกใส่ระหว่างชั้นหรือแผ่นแก้วและประกบกันจนกระทั่งได้ความหนาตามความต้องการ แก้วชนิดนี้จะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจนสามารถกันกระสุนปืนทะลุผ่านได้ โดยกรณีที่ถูกยิง กระสุนปืนจะแฉลบไม่สามารถทะลุกระจกเข้าไปได้และหากส่วนที่เป็นแก้วหรือกระจกแตก จะมีลักษณะร้าวเป็นแผ่นไม่หลุดแตกกระจาย เพราะมีแผ่นพลาสติกเชื่อมยึดเศษแก้วอยู่

2.1.7.7 ใยแก้ว ทำได้โดยการดึงแก้วเป็นเส้นใยแล้วนำมาอัดขึ้นรูป ใยแก้วจะมีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กกล้าแต่มีความเบาและอ่อนนุ่มเหมือนขนสัตว์ อีกทั้งสามารถที่จะ โค้งงอได้ สามารถดึงให้เป็นเส้นเล็กได้ถึง 1/300 ของความหนาของเส้นผม ทนต่ออุณหภูมิสูงได้สมบัติของใยแก้วคือเก็บเสียงและกันความร้อนได้ดี นอกจากนั้นยังนิยมนำแผ่นใยแก้วไปต่อเป็นโครงเรือได้เพราะมีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรง

2.1.7.8 แก้วในวงการศิลปะ โดยผลิตภัณฑ์แก้วประเภทนี้ ได้แก่ แก้วที่มีความไวต่อแสงอัลตราไวโอเลต (ultraviolet) โดยสามารถจะอัดภาพถ่ายลงไปในพื้นผิวของแก้วได้ (photosensitive glass) นอกจากนี้แก้วที่ใช้ในวงการศิลปะยังรวมถึงแก้วสีตลอดจนเครื่องประดับต่าง ๆ

2.1.7.9 แก้วที่เป็นเครื่องใช้ในชีวิตประจำวัน ได้แก่ โคมไฟ และภาชนะเครื่องแก้วต่าง ๆ เพราะสมบัติของแก้วที่แม้จะเป็นตัวนำความร้อนได้ไม่ดี แต่สามารถดูดความร้อนได้ดี ฉะนั้นหม้อแก้วจึงสามารถดูดและกักเก็บความร้อนไว้ได้นานกว่าหม้อโลหะ

2.1.7.10 แก้วในงานอิเล็กทรอนิกส์และงานด้านการโทรคมนาคม แก้วประเภทนี้ ได้แก่ หลอดโทรทัศน์ หลอดสุญญากาศ เป็นต้น

2.1.7.11 แก้วในด้านอวกาศ เช่นแก้วที่ใช้ทำหน้าต่างกระสวยอวกาศ เครื่องบิน เป็นต้น

2.1.8 การหาความหนาแน่น (Density)

การวัดความหนาแน่นของตัวอย่างแก้วโดยอาศัยหลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes's principle) ซึ่งกล่าวไว้ว่า เมื่อวัตถุใด ๆ ที่จมอยู่ในของเหลวทั้งก้อน หรือจมอยู่เพียงบางส่วนจะถูกแรงลอยตัวกระทำและขนาดของแรงลอยตัวจะเท่ากับน้ำหนักของของเหลวที่ถูกวัตถุนั้นแทนที่ [20] ในงานวิจัยนี้ของเหลวที่ใช้คือ n-hexane ซึ่งมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.661 g/cm^3 โดยใช้เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ บริษัท Denver Instrument ความละเอียด 0.0001 g และนำค่าที่ได้มาคำนวณดังสมการที่ (2.1) [21]

$$\rho = \rho_l \left(\frac{W_a}{W_a - W_b} \right) \quad (2.1)$$

- เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของแก้วตัวอย่าง
 ρ_l คือ ความหนาแน่นของของเหลว
 W_a คือ มวลของแก้วตัวอย่างที่ชั่งในอากาศ
 W_b คือ มวลของแก้วตัวอย่างที่ชั่งในของเหลว

2.1.9 การหาปริมาตรโดยโมล (Molar volume)

Molar volume เป็นปริมาตรที่ถูกครอบครองของสารหนึ่งโมล สามารถหาได้จากสมการที่ (2.2) [21]

$$V_a = \frac{M_w}{\rho} \quad (2.2)$$

- เมื่อ V_a คือ Molar volume
 M_w คือ มวลโมเลกุลของแก้ว
 ρ คือ ความหนาแน่นของแก้วตัวอย่าง

2.1.10 สมบัติความยืดหยุ่น (Elastic properties) โดยใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิค

สมบัติความยืดหยุ่นเป็นสมบัติที่สำคัญของวัสดุทางวิศวกรรมเนื่องจากสามารถบอกได้ว่าวัสดุนั้นสามารถทนแรงกระทำได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งการวัดสมบัติความยืดหยุ่นสามารถทำได้โดยวิธีการทดสอบแบบทำลาย (Destructive Testing: DT) และการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Testing: NDT)

การหาสมบัติความยืดหยุ่นสามารถทำได้โดยวิธีการแบบไม่ทำลาย ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยม

นิยมอย่างมากเนื่องจากการทดสอบโดยที่ชิ้นงานไม่เสียหาย ไม่ยุ่งยากในการเตรียมชิ้นงาน งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาสมบัติความยืดหยุ่นด้วยวิธีการใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิก (Ultrasonic Testing) [22] ซึ่งเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing: NDT) โดยมีหลักการ และรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.10.1 คลื่นเสียงอัลตราโซนิก (Ultrasonic wave)

คลื่นเสียงอัลตราโซนิก [23] คือคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินกว่าที่หูของมนุษย์จะได้ยิน โดยทั่วไปแล้วหูของมนุษย์โดยเฉลี่ยจะได้ยินเสียงสูงถึงเพียงแค่ประมาณ 15 KHz เท่านั้น ถ้ามีอายุน้อย ๆ อาจจะได้ยินเสียงที่มีความถี่สูงกว่านี้ได้ ดังนั้นโดยปกติแล้วคำว่าอัลตราโซนิกจึงมักจะหมายถึงคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 KHz ขึ้นไป สามารถแบ่งชนิดของคลื่นเสียงได้ 2 ประเภท ดังนี้

1) คลื่นตามยาว (longitudinal waves) เป็นคลื่นที่ส่งผ่านเข้าไปในตัวกลางแล้วทำให้อนุภาคในตัวกลางเคลื่อนที่ตามแนวขนานกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น ความเร็วคลื่นเสียงตามยาวจะมีค่าคงที่ในวัสดุแต่ละประเภท เช่น ความเร็วคลื่นเสียงตามยาวในวัสดุเหล็กกล้ามีค่าเท่ากับ 5,920 m/s เป็นต้น

2) คลื่นเฉือน (shear waves) เป็นคลื่นที่ส่งผ่านเข้าไปในตัวกลางแล้วทำให้อนุภาคในตัวกลางเคลื่อนที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น ทำให้คลื่นเฉือนมีค่าความเร็วต่ำกว่าคลื่นตามยาว ความเร็วคลื่นเสียงเฉือนจะมีค่าคงที่ในวัสดุแต่ละชนิด เช่น ความเร็วคลื่นเสียงเฉือนของวัสดุเหล็กกล้ามีค่าเท่ากับ 3,250 m/s เป็นต้น

2.1.10.2 คุณสมบัติของคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic properties)

สมบัติของคลื่นอัลตราโซนิก [22-23] เป็นไปตามคุณสมบัติของคลื่นเสียงโดยทั่วไป กล่าวคือคลื่นเสียงในตัวกลางแต่ละชนิด ณ สถานะหนึ่ง จะมีความเร็วคงที่ค่าหนึ่ง โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว (v) ความถี่ (f) และความยาวคลื่น (λ) จะเป็นไปตามสมการที่ (2.3) ดังนี้

$$v = f\lambda \quad (2.3)$$

เมื่อคลื่นเสียงเดินทางถึงบริเวณรอยต่อระหว่างตัวกลางต่างชนิดกัน คลื่นที่สะท้อนและส่งผ่านรอยต่อสามารถเกิดขึ้นได้ 2 กรณี ดังต่อไปนี้ [24]

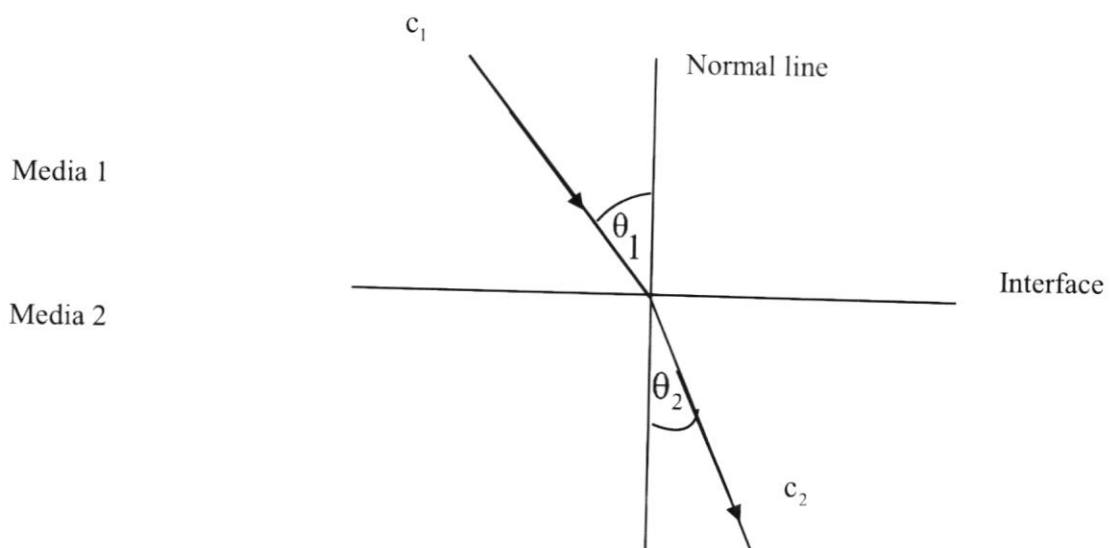
1) การสะท้อนของคลื่นเมื่อคลื่นตกกระทบในแนวตั้งฉากกับรอยต่อระหว่างตัวกลาง อัตราส่วนของคลื่นเสียงที่สะท้อนกลับ และคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่ผ่านรอยต่อจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเสียงที่เรียกว่าอิมพีแดนซ์เสียงนั้น (acoustic impedance: Z) ของตัวกลางทั้งสอง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.4)

$$z = cp \quad (2.4)$$

เมื่อ c คือความเร็วของเสียงในตัวกลางนั้น และ p คือความหนาแน่นของตัวกลาง

2) การสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นที่ตกกระทบในแนวทำมุมคลื่นเสียงจะมีการสะท้อนกลับและการส่งผ่านของคลื่นในกรณีที่ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นไม่ได้ตั้งฉากกับรอยต่อระหว่างตัวกลาง จะเป็นไปตามกฎของสเนล (Snell's law) ดังสมการที่ (2.5)

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{c_1}{c_2} \quad (2.5)$$

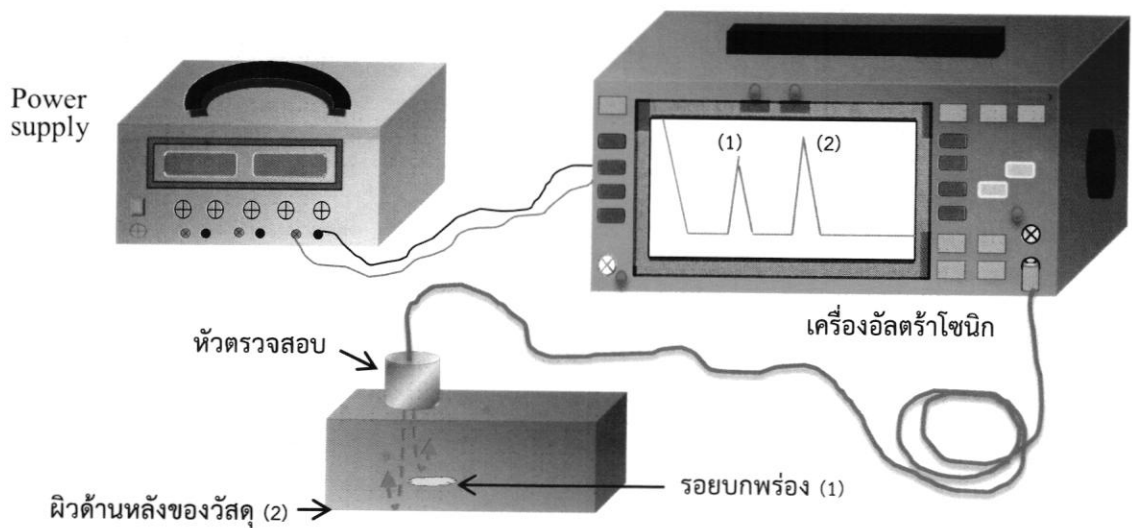


ภาพที่ 2.4 การสะท้อนของคลื่นที่ตกกระทบบริเวณรอยต่อของตัวกลางโดยทำมุมกับเส้นปกติ [23]

เมื่อ c_1 และ c_2 คือ ความเร็วของคลื่นเสียงในตัวกลางที่ 1 และตัวกลางที่ 2 ตามลำดับ θ_1 และ θ_2 คือ มุมตกกระทบของคลื่นเสียงในตัวกลางที่ 1 และตัวกลางที่ 2 ตามลำดับ

2.1.10.3 เทคนิคพัลส์เอคโค (pulse echo technique)

วิธีการตรวจสอบความหนาหรือการตรวจสอบจุดบกพร่องในวัตถุมีอยู่ 3 วิธี คือ วิธีที่ใช้การสะท้อนกลับของคลื่น วิธีที่ใช้การส่งผ่านของคลื่น และวิธีเรโซแนนท์ ใน 3 วิธีการนี้ วิธีที่ใช้การสะท้อนกลับของสัญญาณพัลส์ (pulse-echo) [24] เป็นวิธีการที่นิยมใช้มากที่สุด ในภาพที่ 2.5 แสดงระบบตรวจสอบรอยบกพร่องภายในของวัตถุ โดยใช้หลักการของการสะท้อนกลับของสัญญาณพัลส์



ภาพที่ 2.5 หลักการสะท้อนกลับของสัญญาณพัลส์

ภาพที่ 2.5 ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์ซึ่งทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณไฟฟ้าสำหรับป้อนให้หัวส่งคลื่นอัลตราโซนิก เมื่อหัวส่งคลื่นอัลตราโซนิกได้รับสัญญาณไฟฟ้า จะทำให้เกิดการสั่นและเกิดเป็นคลื่นอัลตราโซนิกขึ้นมา ส่งคลื่นอัลตราโซนิกเดินทางเข้าไปในวัสดุทดสอบและจะเกิดการสะท้อนกลับเมื่อเดินทางไปกระทบกับผิวด้านหลังสุดของวัตถุหรือรอยบกพร่องในวัสดุ คลื่นที่สะท้อนกลับมานี้จะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่หัวรับสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก หัวรับและหัวส่งคลื่นอัลตราโซนิกอาจจะเป็นตัวเดียวกันหรือแยกกันก็ได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบ สัญญาณที่รับได้จะถูกขยายและนำไปประมวลผลเพื่อคำนวณหาตำแหน่งของรอยบกพร่องหรือความหนาของวัตถุ ในการคำนวณหาความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกในวัสดุทดสอบสามารถหาได้จากสมการที่ (2.6) ดังนี้

$$V_w = \frac{V_{ST} \times S_w}{S_{ST}} \quad (2.6)$$

- เมื่อ V_w คือ ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกในวัสดุทดสอบ
 V_{ST} คือ ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกในแท่งเปรียบเทียบมาตรฐาน
 S_w คือ ความหนาของวัสดุทดสอบที่วัดโดยเวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์
 S_{ST} คือ ความหนาของวัสดุทดสอบที่ได้จากเครื่องอัลตราโซนิก

2.1.10.4 สมการที่เกี่ยวข้องกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิกที่ใช้ตรวจสอบ

เมื่อทำการวัดความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกทั้งตามยาวและเฉือนแล้วสามารถคำนวณหาค่าสมบัติความยืดหยุ่น [25] ได้ดังสมการต่อไปนี้

โมดูลัสตามยาว (Longitudinal modulus: L) คือค่าความต้านทานต่อแรงกดในแนวตามยาวของวัสดุ ซึ่งเป็นอัตราส่วนความเค้นตามยาวต่อความเครียดตามยาว

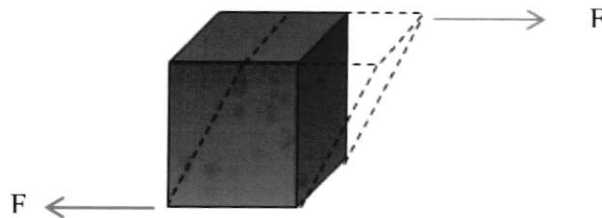
$$L = \rho v_L^2 \quad (2.7)$$



ภาพที่ 2.6 โมดูลัสตามยาวของวัสดุ

โมดูลัสเฉือน (Shear modulus: G) คือความทนต่อการเลื่อนระหว่างผิวของวัสดุ วัสดุที่มีโมดูลัสเฉือนสูงแสดงว่าวัสดุนั้นมีความทนต่อการเลื่อนระหว่างผิวของวัสดุ ซึ่งเป็นอัตราส่วนความเค้นเฉือนต่อความเครียดเฉือน หรือมีแรงขนาดเท่ากันกระทำต่อวัสดุในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้ผิววัสดุเกิดการเลื่อนไป

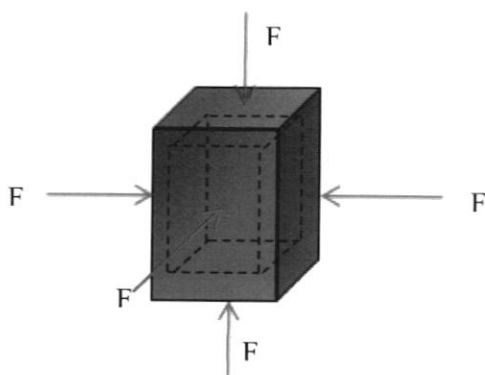
$$G = \rho v_s^2 \quad (2.8)$$



ภาพที่ 2.7 โมดูลัสเฉือนของวัสดุ

โมดูลัสเชิงปริมาตร (Bulk modulus: K) คือการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อมีแรงกระทำทุกทิศทาง เป็นค่าที่บอกความต้านทานของของแข็งหรือของเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร

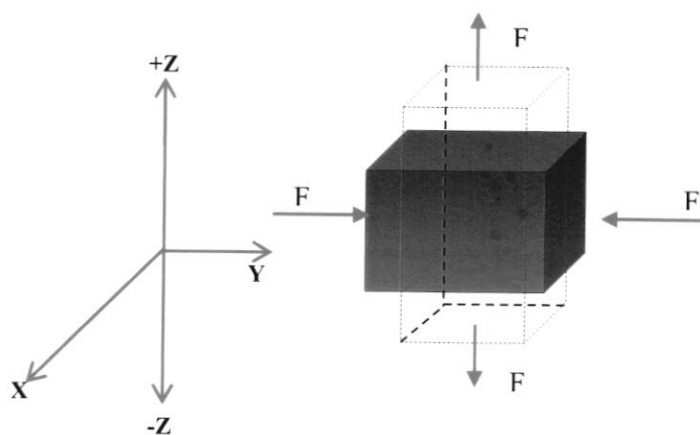
$$K = L - \left(\frac{4}{3}\right)G \quad (2.9)$$



ภาพที่ 2.8 โมดูลัสเชิงปริมาตรของวัสดุ

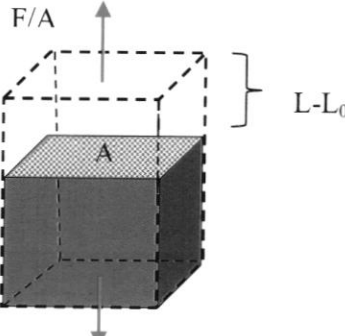
อัตราส่วนปัวส์ซองส์ (Poisson's ratio: σ) คืออัตราส่วนของความเครียดตามขวางต่อความเครียดตามยาวที่เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกระทำ หรืออัตราส่วนของการหดตัวตามขวางต่อหน่วยความยาวกับการขยายตัวตามยาวต่อหน่วยความยาว

$$\sigma = \frac{L - 2G}{2(L - G)} \quad (2.10)$$



ภาพที่ 2.9 อัตราส่วนปัวส์ซองส์ของวัสดุ

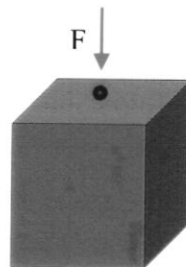
โมดูลัสของยังส์ (Young' modulus: E) คืออัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดของวัสดุ เป็นค่าที่แสดงถึงความต้านทานต่อความเครียดที่มีแรงกระทำทิศทางเดียว วัสดุที่มีโมดูลัสของยังส์มาก แสดงว่ามีความทนต่อการเปลี่ยนแปลงความยาวได้มาก

$$E = 2(1+\sigma)G \quad (2.11)$$


ภาพที่ 2.10 แสดงโมดูลัสของยังส์ของวัสดุ

ความแข็งระดับไมโคร (Micro-hardness: H) คือคุณสมบัติของวัสดุที่สามารถต้านทานหรือทนต่อการเสียรูปแบบพลาสติก โดยปกติเกิดจากการทำให้เป็นรอยจากการกด และความแข็งอาจรวมถึงความต้านทานหรือความทนต่อการขีด การขีด เป็นต้น

$$H = \frac{(1-2\sigma)E}{6(1+\sigma)} \quad (2.12)$$



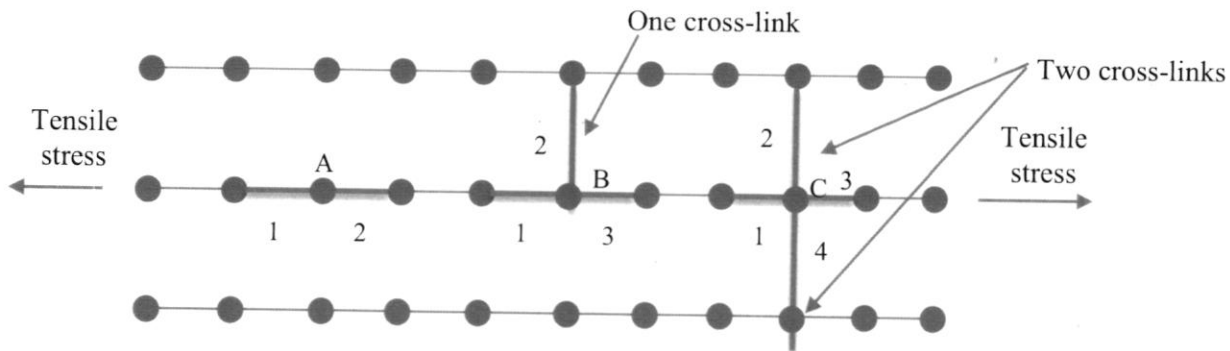
ภาพที่ 2.11 แสดงความแข็งระดับไมโครของวัสดุ

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่น

v_L คือ ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกตามยาว

v_S คือ ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกเฉือน

2.1.10.5 การคำนวณโดยใช้วิธี bond compression model



ภาพที่ 2.12 แนวความคิดของ cross-link ในระนาบของอะตอม [26]

จากภาพที่ 2.11 แสดงระนาบของอะตอมแบบ 2 มิติ อธิบายลักษณะของพันธะเชื่อมโยง (cross-link) ในวัสดุ โดยจุดที่บแทนอะตอม ที่ตำแหน่ง A ซึ่งเป็นอะตอมที่มีจำนวนพันธะต่อสูตร (n_f) มีค่าเท่ากับ 2 ดังภาพ และพบว่าอะตอม A ไม่มีการเชื่อมต่อกับระนาบอื่นจึงทำให้มีพันธะเชื่อมโยง (n_c) เท่ากับ 0 ($n_c = n_f - 2$) ที่จุด B พบว่ามี n_f เท่ากับ 3 ซึ่งมีอะตอมข้างเคียงที่เชื่อมโยงกัน 3 อะตอม และ $n_c = 3 - 2 = 1$ ทำนองเดียวกันที่จุด C จะได้ $n_f = 4$ และ $n_c = 2$ [26]

การคำนวณโดยวิธี bond compression model นี้ ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่าการเปลี่ยนรูปแบบไอโซโทรปิกของวัสดุ หรือการเปลี่ยนรูปของวัสดุที่ไม่มีสมบัติเฉพาะในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเป็นพิเศษ เป็นเพียงการเปลี่ยนแปลงความยาวพันธะในโครงข่ายวัสดุโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงของมุมพันธะ [27] โดยจะคำนึงถึงการจัดเรียงอะตอมเป็นโมเลกุลในรูปแบบสามมิติของออกไซด์แต่ละชนิด เช่น ความยาวของพันธะ และเลขโคออดิเนชัน โดย Bridge ได้ตั้งข้อสังเกตว่าค่าของความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงต่อหน่วยสูตรโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามค่าคงที่ของแรงการยืด (stretching force) ลำดับแรก [28] สามารถคำนวณหาค่าสมบัติความยืดหยุ่น [27-31] ได้ดังสมการต่อไปนี้

โมดูลัสเชิงปริมาตรจากการบีบอัดของพันธะ (Bond compression bulk modulus: K_{bc})

$$K_{bc} = \frac{\sum \{n_b r^2 \bar{F}\}}{9} \tag{2.13}$$

โมดูลัสตามยาวทางทฤษฎี (Theoretical longitudinal modulus: L_{bc})

$$L_{bc} = K_{bc} + (1.33)G_{bc} \tag{2.14}$$

โมดูลัสเฉือนทางทฤษฎี (Theoretical shear modulus: G_{bc})

$$G_{bc} = (1.5)K_{bc} \left[\frac{1-2\sigma_{bc}}{1+\sigma_{bc}} \right] \quad (2.15)$$

อัตราส่วนปัวส์ของสสารทางทฤษฎี (Theoretical Poisson's ratio: σ_{bc})

$$\sigma_{bc} = 0.28(\bar{n}_c)^{-0.25} \quad (2.16)$$

ยังโมดูลัสทางทฤษฎี (Theoretical Young's modulus: E_{bc})

$$E_{bc} = 2(1+\sigma_{bc})G_{bc} \quad (2.17)$$

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการคำนวณโดยวิธี bond compression model มีดังต่อไปนี้

$$\bar{n}_c = \frac{\sum_i x_i (n_c)_i (N_c)_i}{\sum_i x_i (N_c)_i} \quad (2.18)$$

$$n_b = \frac{N_A}{V_a} \sum_i (n_f x)_i \quad (2.19)$$

$$f = 5.28N \left[\frac{X_a X_b}{r^2} \right]^{\frac{3}{4}} + 30 \quad (2.20)$$

$$\bar{F} = \frac{\sum (x n_f f)_i}{\sum (x n_f)_i} \quad (2.21)$$

เมื่อ	r	คือ ความยาวพันธะระหว่างไอออนลบและไอออนบวก
	n_b	คือ จำนวนโครงข่ายพันธะต่อหน่วยปริมาตรของแก้ว
	f	คือ ค่าคงที่ของแรงการยึดลำดับแรกของออกไซด์
	X_a และ X_b	คือ ค่าอิเล็กโทรเนกาติวิตีของไอออนลบและไอออนบวก ตามลำดับ
	N	คือ ลำดับพันธะ (1, 2 หรือ 3)

\bar{F}	คือ ค่าคงที่ของแรงการยึดพันธะโดยเฉลี่ย
\bar{n}_c	คือ ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงโดยเฉลี่ย
x_i	คือ เศษส่วนโมลของออกไซด์องค์ประกอบ i
n_c	คือ จำนวนความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงต่อไอออนบวกในออกไซด์ i
N_c	คือ จำนวนไอออนบวกต่อหน่วยสูตรแก้ว
N_A	คือ เลขอาโวกาโดร
V_a	คือ ปริมาตรโดยโมลของแก้ว
n_f	คือ เลขโคออร์ดิเนชันของไอออนบวก

2.1.10.6 การคำนวณโดยใช้วิธี Makishima-Mackenzie model

การศึกษาสมบัติของวัสดุแก้วเป็นเรื่องที่น่าสนใจอย่างมาก เนื่องจากวัสดุชนิดนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย เช่น หน้าจอโทรศัพท์ โครงข่ายไฟเบอร์ออปติก กระจกหน้าต่างต่าง ๆ ไป เป็นต้น ดังนั้นการนำวัสดุชนิดนี้ไปใช้ประโยชน์จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบถึงคุณสมบัติของแก้วที่จะนำไปใช้ ในการหาสมบัติยืดหยุ่นมีวิธีที่น่าสนใจอีกวิธีหนึ่ง คือ ทฤษฎีของ Makishima-Mackenzie ซึ่งนำเสนอโดย A. Makishima และ J. D. Mackenzie ในปี ค.ศ. 1970 โดยให้ความสนใจที่คุณสมบัติของส่วนประกอบของแก้ว โดยจะใช้ SiO_2 เป็นต้นแบบซึ่ง SiO_2 มีโครงสร้างแบบ tetrahedral โดยซิลิกอน (Si) จะจับกับออกซิเจน (O) 4 อะตอม สมมติให้สมบัติของพันธะเคมีมีคุณสมบัติที่เหมือนกันทั้งในรูปของแก้วและผลึก ให้แก้วประกอบขึ้นจากสารที่มีโครงสร้างที่เหมือนกันต่อ ๆ กัน ที่กำหนดโดย coordination centers (ซิลิกอนและออกซิเจนในแก้วซิลิเกต) และสมมติว่าโครงสร้างเหล่านี้เชื่อมต่อกันในรูปทรงวงกลม และความเครียดของพันธะอธิบายด้วยพลังงานการสลายพันธะซึ่งการหาค่านี้จะอาศัยวิธีของ Sun และ Huggin [32] ทฤษฎีของ Makishima-Mackenzie เป็นการแสดงความสัมพันธ์ของโมดูลัสเชิงปริมาตรกับความหนาแน่นของการบรรจุและพลังงานการสลายพันธะต่อหน่วยปริมาตร โดย Makishima และ Mackenzie ได้นำเสนอ semi empirical formula model เพื่อคำนวณหาโมดูลัสยืดหยุ่นของออกไซด์แก้วในแง่ขององค์ประกอบทางเคมี ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของการบรรจุ (V_f) และพลังงานการสลายพันธะ (G_f) ของแต่ละออกไซด์ ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าสมบัติความยืดหยุ่น [27-28, 33-34] ได้ดังสมการต่อไปนี้

ยังโมดูลัสทางทฤษฎี Makishima-Mackenzie (Young's Modulus: E_m)

$$E_m = 2V_f \sum_i G_f x_i \quad (2.22)$$

โมดูลัสเชิงปริมาตรทางทฤษฎี Makishima-Mackenzie (Bulk Modulus: K_m)

$$K_m = 2\gamma V_t E_m \quad (2.23)$$

โมดูลัสเฉือนทางทฤษฎี Makishima-Mackenzie (Shear Modulus: G_m)

$$G_m = 3E_m K_m / (9K_m - E_m) \quad (2.24)$$

อัตราส่วนปัวส์ของสสารทางทฤษฎี Makishima-Mackenzie (Poisson's ratio: σ_m)

$$\sigma_m = (E_m / 2G_m) - 1 \quad (2.25)$$

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการคำนวณโดยวิธี Makishima-Mackenzie model มีดังต่อไปนี้

$$V_i = \left(\frac{\rho_i}{M_i} \right) \left(\frac{4\pi}{3} \right) (xR_M^3 + yR_O^3) N_A \quad (2.26)$$

$$V_t = \left(\frac{1}{V_a} \right) \sum_i V_i x_i = \sum_i \frac{\rho_i}{M_i} \sum_i V_i x_i \quad (2.27)$$

- เมื่อ G_i คือ พลังงานการสลายพันธะขององค์ประกอบออกไซด์ต่อหน่วยปริมาตร
- V_t คือ ความหนาแน่นของการบรรจุโดยรวม
- V_i คือ ปัจจัยการบรรจุขององค์ประกอบ i
- x_i คือ เศษส่วนโมลของออกไซด์องค์ประกอบ i
- ρ_i คือ ความหนาแน่นขององค์ประกอบ i
- V_a คือ ปริมาตรโดยโมลจากการทดลอง
- M_i คือ น้ำหนักโมเลกุลของ M_xO_y
- R_M, R_O คือ รัศมีไอออนของ Pauling ของธาตุ M และ O ตามลำดับ
- γ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การปรับปรุงโดยหาได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าโมดูลัสเชิงปริมาตรที่ได้จากการทดลองและค่าโมดูลัสของยังส์ที่ได้จากการทดลองคูณกับค่าความหนาแน่นของการบรรจุโดยรวม

2.1.11 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับรังสี

2.1.11.1 รังสี (radiation)

พลังงานที่แผ่กระจายจากแหล่งกำเนิดออกไปในอากาศหรือตัวกลางใด ๆ ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่น รังสีความร้อน รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา ฯลฯ และรวมไปถึงอนุภาคที่มีความเร็วสูงด้วยอาทิเช่น รังสีแอลฟา รังสีบีตา และรังสีนิวตรอน อาจจำแนกรังสีดังกล่าวตามคุณสมบัติทางกายภาพได้เป็น 2 กลุ่ม [35-36] คือ

- 1) รังสีไม่ก่อไอออน (non-ionizing radiation) รังสีชนิดนี้เป็นรังสีที่มีพลังงานต่ำอยู่ในช่วงต่ำของแถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic spectrum) เช่น แสงอาทิตย์ แสงอินฟราเรด คลื่นไมโครเวฟ และคลื่นวิทยุ เป็นต้น
- 2) รังสีที่ก่อให้เกิดไอออน (ionizing radiation) รังสีชนิดนี้จะเกิดจากอะตอมหรือธาตุที่ไม่เสถียรซึ่งเรียกว่า ธาตุกัมมันตรังสี (radioactive element) เช่น ยูเรเนียม และทอเรียมที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการทำปฏิกิริยานิวเคลียร์

2.1.11.2 ชนิดของรังสี

การแผ่รังสีได้เองอย่างต่อเนื่องของธาตุกัมมันตรังสีนั้นเรียกว่า กัมมันตภาพรังสี (radioactivity) โดยรังสีที่อะตอมหรือธาตุที่ไม่เสถียรปลดปล่อยออกมาเป็นรังสีที่ก่อให้เกิดไอออนที่มักพบได้ 5 ชนิดหลักดังนี้ [37]

- 1) รังสีแอลฟา (alpha radiation) อนุภาคแอลฟาที่แผ่ออกมาจากนิวเคลียสใดๆ มีอำนาจก่อให้เกิดการแตกตัวได้ดีแต่มีความสามารถในการทะลุทะลวงผ่านวัตถุเพียงเล็กน้อย อนุภาคแอลฟาหนึ่งอนุภาค ก็คือนิวเคลียสของธาตุฮีเลียมซึ่งประกอบด้วยโปรตอนสองอนุภาคและนิวตรอนสองอนุภาค มีประจุไฟฟ้าบวกสองรังสีแอลฟาสามารถหยุดยั้งได้ด้วยแผ่นกระดาษ หรือเนื้อเยื่อบาง ๆ ที่ผิวหนังชั้นนอกของเรา แต่ถ้าวัสดุที่ให้รังสีแอลฟาเข้าไปภายในร่างกายของเรา อาจจะทำให้เกิดการกินหรือการดื่ม สามารถที่จะเกิดปฏิกิริยาโดยตรงกับเนื้อเยื่อภายใน และอาจทำให้เกิดความเสียหายกับเซลล์ได้
- 2) รังสีบีตา (beta radiation) อนุภาคอิเล็กตรอนที่แผ่ออกมาจากนิวเคลียสใดๆ มีอำนาจก่อให้เกิดการแตกตัวน้อยกว่ารังสีแอลฟา แต่สามารถทะลุทะลวงได้ดีกว่า สามารถผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำได้ประมาณ 1-2 เซนติเมตร โดยทั่วไปแผ่นอลูมิเนียมความหนาไม่กี่มิลลิเมตรก็สามารถหยุดรังสีบีตาได้ ตามปกติในนิวเคลียสไม่มีอิเล็กตรอนแต่เมื่อเกิดการแตกตัวของนิวตรอนจะเกิดเป็นอนุภาคโปรตอนและอิเล็กตรอน ซึ่งอิเล็กตรอนนี้เองที่เรียกว่าอนุภาคบีตา
- 3) รังสีแกมมา (gamma rays) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นมากมีจุดกำเนิดจากนิวเคลียสมีอำนาจทำให้เกิดการแตกตัวเพียงเล็กน้อย แต่มีความสามารถทะลุทะลวงสูง

รังสีแกมมาสามารถเคลื่อนที่ผ่านร่างกายคนไปได้ แต่หยุดได้ด้วยผนังคอนกรีตหรือตะกั่วหนา ๆ โดยขึ้นกับพลังงานของรังสี

4) รังสีเอกซ์ (X-rays) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นมากเช่นกัน มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับรังสีแกมมา แต่ไม่ได้มาจากนิวเคลียสแต่มีจุดกำเนิดจากชั้นของอิเล็กตรอนของอะตอมใด ๆ เช่น เกิดจากการยิงอิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูงไปถูกเป้าที่ทำด้วยโลหะที่เกิดในเครื่องเอกซเรย์ เป็นต้น

5) รังสีนิวตรอน (neutrons) จะเกิดขึ้นในเครื่องเร่งอนุภาคนิวตรอนหรือในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูโดยในเครื่องดังกล่าวจะผลิตอนุภาคนิวตรอนได้อย่างมากมายและนิวตรอนที่เกิดขึ้นเหล่านั้น มีปริมาณมากและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงมากด้วย รังสีนิวตรอนสามารถผ่านวัตถุได้ดี แต่จะหยุดลงได้ด้วยคอนกรีตหนา น้ำ หรือพาราฟิน (paraffin)

2.1.11.3 อันตรกิริยาของรังสีเอกซ์และแกมมาต่อสสาร

เมื่อรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาเคลื่อนที่ผ่านสสารซึ่งสสารนั้นประกอบด้วยอะตอมต่าง ๆ อะตอมแต่ละตัวล้วนมีค่าพื้นที่ตัดขวาง (cross section) ให้เกิดอันตรกิริยากับรังสีเอกซ์หรือแกมมา [38] ซึ่งจะลดทอนความเข้มรังสีลงโดยแสดงในเทอมสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (linear attenuation coefficient) ใช้สัญลักษณ์ μ หรือสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (mass attenuation coefficient) ใช้สัญลักษณ์ μ/p

ความเข้มรังสีที่ลดลงมีความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

$$I = I_0 e^{-\mu x} = I_0 e^{-(\mu/p)px} \quad (2.28)$$

เมื่อ I และ I_0 เป็นความเข้มรังสีที่มากกระทบบและทะลุผ่านตัวกลางความหนา x ที่มีความหนาแน่น p ตามลำดับ

กลไกของรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาพลังงานต่าง ๆ อาจเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางหรือสสารได้หลายรูปแบบที่สำคัญ เช่น Rayleigh หรือ Coherent scattering, photoelectric effects, Compton scattering, pair production และ photonuclear interaction อันตรกิริยาแต่ละแบบเกิดขึ้นที่ระดับพลังงานต่าง ๆ กัน ดังนั้นสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (μ) จึงประกอบด้วยสัมประสิทธิ์การดูดกลืนย่อย ๆ ของแต่ละอันตรกิริยา

รังสีเอกซ์และรังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติเหมือน ๆ กัน โดยรังสีเอกซ์เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรอบ ๆ อะตอม ส่วนรังสีแกมมาเกิดจากการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียส ทั้งรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาต่อไปจะเรียกรวมว่า “โฟตอน” อันตรกิริยาที่เกิดขึ้น มีดังนี้

(1) Rayleigh หรือ coherent scattering เกิดเมื่อโฟตอนชนกับอิเล็กตรอนที่ชั้นในใกล้ ๆ นิวเคลียส โฟตอนจะถูกเปลี่ยนแปลงทิศทางเล็กน้อยหรือเกือบไม่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทาง อันตรกิริยานี้จะเกิดมากเมื่อตัวกลางมีเลขอะตอมสูงขึ้นไป แต่จะเกิดเฉพาะในโฟตอนช่วงพลังงานต่ำ ๆ ซึ่งโอกาสการเกิดอันตรกิริยา coherent scattering มีความสัมพันธ์ดังนี้

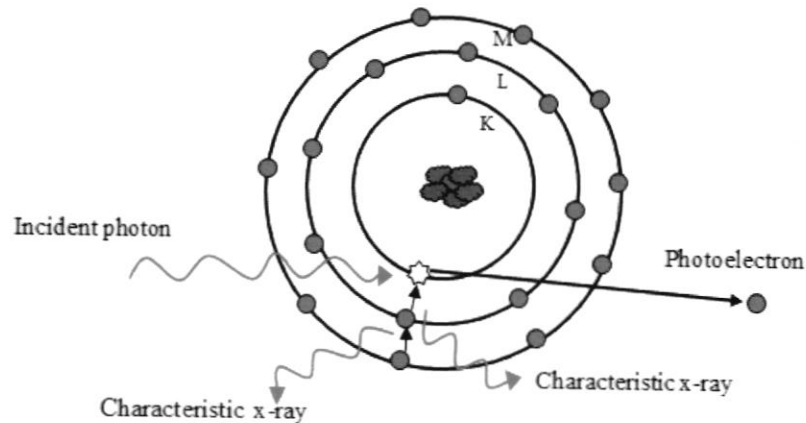
$$\sigma_{\text{coh}} \propto \frac{Z^2}{E^2}$$

เมื่อ	Z	คือ เลขอะตอมของธาตุ
	σ_{coh}	คือ โอกาสการเกิดปรากฏการณ์ coherent scattering
	E	คือ พลังงานทั้งหมดของโฟตอน

(2) Photoelectric effects อันตรกิริยานี้จะเกิดมากที่โฟตอนพลังงานต่ำ ๆ ซึ่งพลังงานเกือบทั้งหมดของโฟตอนถูกดูดกลืนและถ่ายเทไปยังอิเล็กตรอนชั้นในให้หลุดออกมา แล้วอิเล็กตรอนชั้นนอกที่มีระดับพลังงานสูงกว่าจะเข้ามาแทนที่พร้อมกับคายพลังงานออกมาเป็น characteristic X-rays ดังแสดงในภาพที่ 2.13 อันตรกิริยาจะเกิดได้ดีที่สุดเมื่อโฟตอนมีพลังงานสูงกว่าพลังงานของ orbital electron ระดับนั้นเพียงเล็กน้อย โอกาสการเกิดอันตรกิริยานี้จะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อพลังงานโฟตอนเพิ่มขึ้น [39] ซึ่งโอกาสการเกิดอันตรกิริยา Photoelectric effects มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\sigma_{\text{PE}} \propto \frac{Z^3}{E^3}$$

การดูดกลืนรังสีแบบอันตรกิริยา photoelectric effects ในช่วงระดับพลังงานใกล้ ๆ ระดับ K-shell ของวัสดุที่มีเลขอะตอมมากกว่า 30 ขึ้นไป ซึ่งตรงกับพลังงานของรังสีเอกซ์ในรังสีที่ใช้ในการวินิจฉัยโรค ปรากฏการณ์นี้จะเอื้อประโยชน์ต่อการเลือกใช้วัสดุทำฉากเรืองแสงรังสีเอกซ์ หรือการเลือกสารเคมีทำสารทึบรังสี

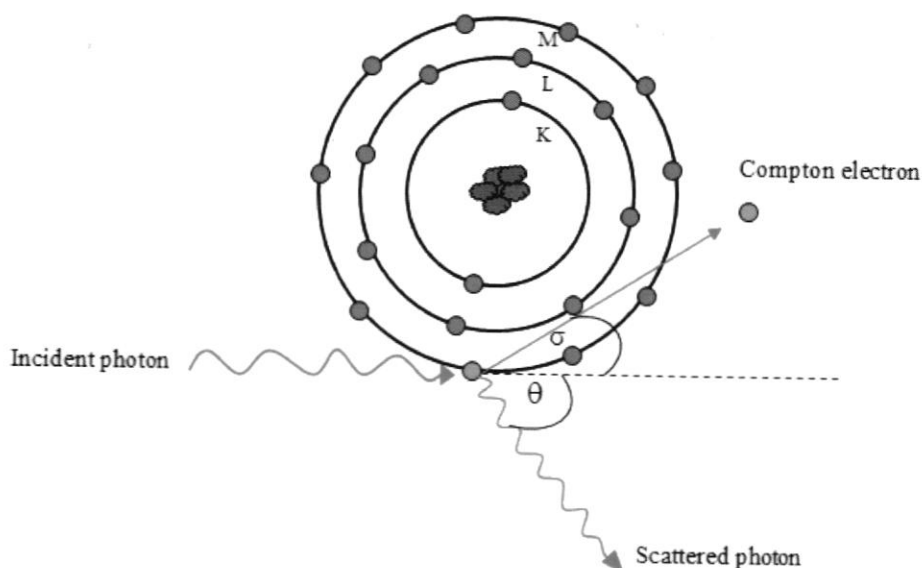


ภาพที่ 2.13 การเกิดอันตรกิริยาแบบ photoelectric effects

(3) Compton scattering

เมื่อพลังงานบางส่วนของโฟตอนนั้นถูกถ่ายเทให้กับอิเล็กตรอนที่อยู่วงนอกของอะตอมหรืออิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งมีพลังงานน้อยกว่าพลังงานที่มาตกกระทบหลายเท่า โฟตอนถูกเปลี่ยนทิศทางเป็นรังสีกระเจิง และอิเล็กตรอนถูกชนกระเด็นไปทิศทางอื่น โดยทั้งหมดยังคงเป็นไปตามกฎการทรงพลังงานและโมเมนตัม ดังแสดงในภาพที่ 2.14 ซึ่งอันตรกิริยานี้จะเกิดขึ้นได้กับพลังงานโฟตอนในช่วงกว้างตั้งแต่พลังงานต่ำๆ จนถึงพลังงานระดับสูงชัน อันตรกิริยานี้ไม่ขึ้นกับเลขอะตอมโดยตรง แต่ขึ้นกับความหนาแน่นอิเล็กตรอนของตัวกลาง ปรากฏการณ์นี้จึงเอื้อประโยชน์ในเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ เพราะเป็นการสร้างภาพจากรังสีที่ทะลุคนไข้ โดยสัมพันธ์กับความหนาแน่นอิเล็กตรอนของเนื้อเยื่อ การใช้รังสีเอกซ์พลังงานสูง เพื่อเป็นการลด photoelectric effects จากรังสีเอกซ์ช่วงพลังงานต่ำ Compton scattering เกิดที่พลังงานโฟตอน >100 keV

$$\sigma_c \propto \frac{Z^2}{E^2}$$



ภาพที่ 2.14 การเกิดอันตรกิริยาแบบ Compton scattering

ในช่วงที่พลังงานโฟตอนต่ำ ๆ ปริมาณของรังสีกระเจิงในอันตรกิริยานี้จะเท่ากัน ทั้ง forward และ backward scatter รังสีกระเจิงจากโฟตอนพลังงานสูงส่วนใหญ่จะไปข้างหน้า พลังงานของโฟตอนที่กระเจิงไปจะลดลงเนื่องจากการสูญเสียพลังงาน พิจารณาจากความยาวคลื่นของรังสีกระเจิงที่เปลี่ยนไปดังนี้

$$\lambda = (h/m_e c)(1 - \cos\theta) \quad (2.29)$$

เมื่อ h = Planck's constant, m_e = มวลอิเล็กตรอน และ c = ความเร็วของแสง
ดังนั้นเมื่อใช้ความยาวคลื่นเป็น Angstrom (10^{-10} เมตร)

$$\lambda = 0.024(1 - \cos\theta) \text{ \AA} \quad (2.30)$$

สัดส่วนพลังงานของโฟตอนที่สูญเสียไปจากรังสีที่ตกกระทบจะเพิ่มขึ้นตามพลังงานของรังสี เช่น ที่มุม 60° สัดส่วนพลังงานที่อิเล็กตรอนพาออกไป 5% ที่ 60 keV, 9% ที่ 100 keV และ 50% ที่ 1 MeV

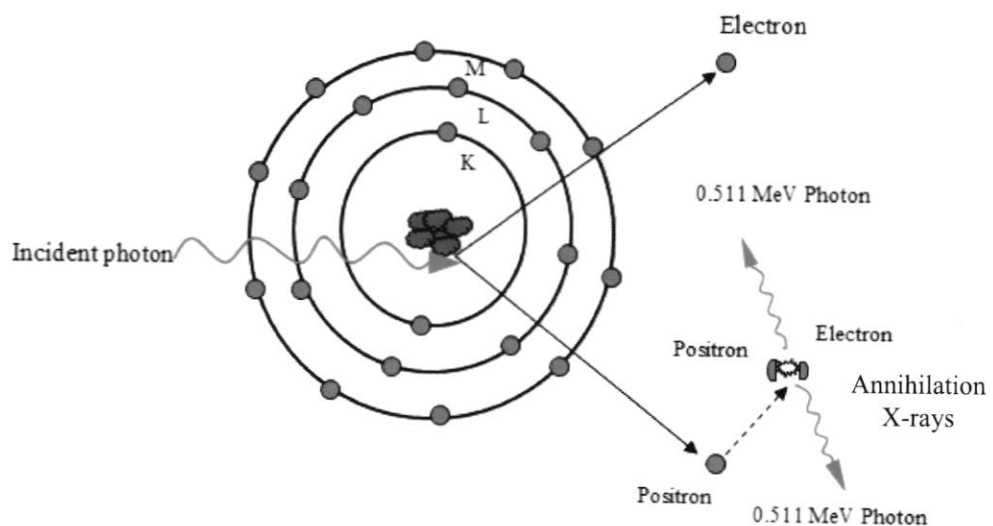
(4) Pair production

เป็นอันตรกิริยาที่มีการแปรรูปพลังงานโฟตอนเป็นอนุภาคคู่อิเล็กตรอนและโพสิตรอน โดยโฟตอนที่ตกกระทบต้องมีพลังงานมากกว่า 1.022 MeV ซึ่งเป็นสมมูลย์พลังงานของคู่อิเล็กตรอนและโพสิตรอน โดย $E = m_e c^2$ เมื่อ m_e เป็นมวลของอิเล็กตรอน โดย $E = 0.511$ MeV อิเล็กตรอนและโพสิตรอนจะไม่มีเสถียรภาพทางพลังงานจะรวมตัวกันกลับพร้อมคายพลังงานจลน์ออกมา 0.511 MeV สองตัวในทิศทางตรงข้ามกันเสมอ เรียกว่า annihilation X-rays ดังแสดงในภาพที่ 2.15 ปรากฏ- การณ์นี้เอื้อประโยชน์ต่อการตรวจวินิจฉัยด้วยเครื่อง Positron Emission Tomography (PET scan)

อันตรกิริยาแบบ pair production จะเกิดมากในช่วงพลังงานโฟตอนสูง ๆ โดยโอกาสการเกิด pair production จะเพิ่มตามพลังงานโฟตอนและเลขอะตอมของตัวกลาง ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\sigma_{pp} \propto (E - 1.022 \text{ MeV})Z$$

เมื่อโฟตอนมีพลังงาน > 3 MeV การเกิด pair production จะชัดเจนขึ้นในตัวกลางที่มีเลขอะตอมสูง



ภาพที่ 2.15 การเกิดอันตรกิริยาแบบ pair production

โอกาสในการเกิดอันตรกิริยาแต่ละอย่างนั้นจะขึ้นอยู่กับพลังงานโฟตอนที่มาตกกระทบและเลขอะตอมของตัวกลางเป็นสำคัญ ดังนั้นสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีจึงเป็นผลรวมของสัมประสิทธิ์การลดทอนรวมของทุกอันตรกิริยา

$$\mu = \sigma_{\text{coh}} + \sigma_{\text{PE}} + \sigma_{\text{c}} + \sigma_{\text{pp}} \quad (2.31)$$

สมการการดูดกลืนรังสีเชิงเส้น จึงอาจเขียนได้เป็น

$$I = I_0 e^{-\sigma_{\text{coh}} x} e^{-\sigma_{\text{PE}} x} e^{-\sigma_{\text{c}} x} e^{-\sigma_{\text{pp}} x} = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.32)$$

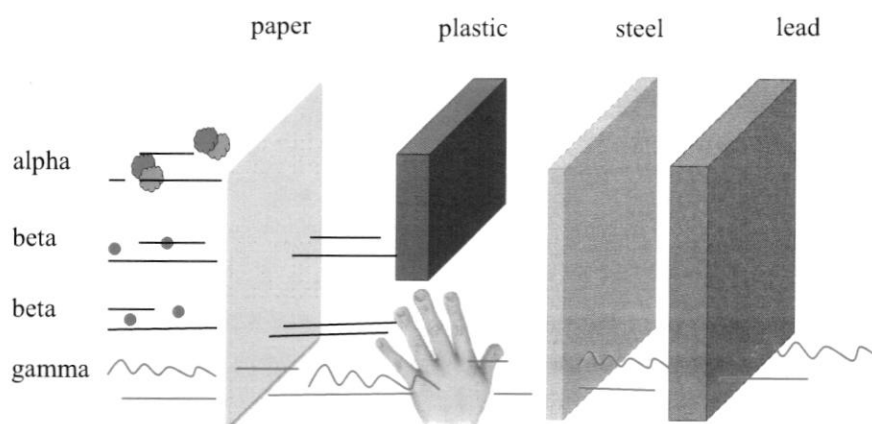
2.1.11.5 วัสดุกำบังรังสี [40]

เมื่อรังสีกระทบต่อสิ่งมีชีวิตจะก่อให้เกิดผลตามมาโดยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ๆ อย่าง เช่น ชนิดรังสี พลังงานของรังสี ปริมาณรังสี และชนิดของอวัยวะที่รังสีตกกระทบ รังสีที่ก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน (ionizing radiation) นั้นมีผลต่อสิ่งมีชีวิตโดยทำให้อะตอม โมเลกุล ภายในเซลล์ และระบบการทำงานของเซลล์เปลี่ยนแปลงและเกิดอาการผิดปกติในร่างกายขึ้นได้ ดังนั้นในการทำงานเกี่ยวข้องกับรังสีผู้ปฏิบัติงานควรมีเครื่องกำบังรังสี (shielding) เพื่อลดปริมาณรังสีที่จะเข้าสู่ร่างกาย

1) การเลือกใช้ชนิดเครื่องกำบังรังสี ต้องคำนึงถึง

- 1.1) ความแรงรังสีของต้นกำเนิดรังสี
- 1.2) ชนิดของรังสีหรือพลังงานรังสี เช่น รังสีแกมมา รังสีบีต้าพลังงานสูง รังสีบีต้าพลังงานต่ำ รังสีแอลฟา
- 1.3) ค่าที่ยอมรับได้หลังจากผ่านเครื่องกำบังรังสี เช่น ค่าที่ยอมให้ผู้ปฏิบัติงานรับได้ในระหว่างปฏิบัติงาน

จากภาพที่ 2.16 แสดงให้เห็นว่า ชนิดของรังสีหรือพลังงานรังสีที่แตกต่างกันไป มีอำนาจทะลุทะลวงต่างกัน และต้องการเครื่องกำบังรังสีต่างชนิดกันด้วย



ภาพที่ 2.16 อำนาจในการทะลุทะลวงของรังสีชนิดต่าง ๆ

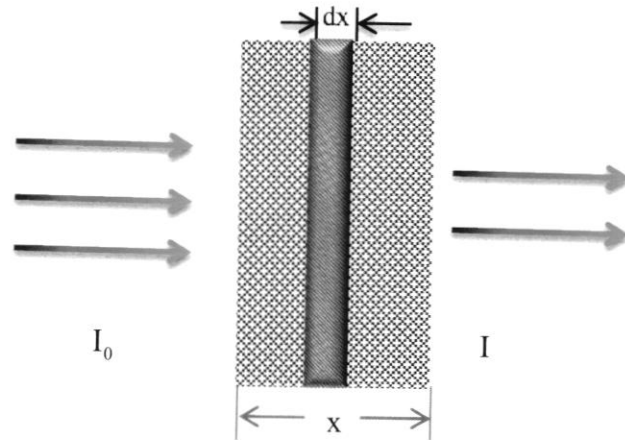
รังสีแกมมาจะต้องใช้วัสดุที่มีความหนาแน่นสูง เช่น ตะกั่ว เหล็ก คอนกรีตหนา ฯลฯ รังสีนิวตรอนต้องอาศัยวัสดุที่มีไฮโดรเจนสูง เช่น น้ำ พาราฟิน ส่วนรังสีนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำ (thermal neutron) ก็อาจจะใช้วัสดุที่มีการดูดกลืนนิวตรอนสูง (high neutron absorption) เช่น โบรอน และแคดเมียม เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 วัสดุกำบังรังสีแบ่งตามชนิดของรังสี

ชนิดของรังสี	ชนิดของเครื่องกำบังรังสี
แอลฟา	ไม่จำเป็น
บีต่าพลังงานต่ำ	ไม่จำเป็น
บีต่าพลังงานสูง	พลาสติก
รังสีเอกซ์และแกมมา	คอนกรีต/ตะกั่ว/เหล็ก
นิวตรอน	คอนกรีต/น้ำ/ polythene/พาราฟิน

2) หลักการออกแบบเครื่องกำบังรังสีเบื้องต้น

รังสีในแนวขนาน ซึ่งประกอบด้วย อนุภาคที่ไม่มีประจุเป็นจำนวนมาก I_0 ตกกระทบตั้งฉากกับแผ่นวัสดุซึ่งมีความหนา x ดังแสดงในภาพที่ 2.17 สมมติให้กรณีนี้ แต่ละอนุภาค ถูกดูดกลืนโดยสมบูรณ์ ในอันตรกิริยาเดี่ยว ผลที่เกิดขึ้นจะไม่มีมีการกระจายของรังสีทุติยภูมิ หรือ อนุภาคไม่มีประจุ จะผ่านเข้าไปในแผ่นวัสดุ ด้วยพลังงานและทิศทางในแนวเส้นตรง



ภาพที่ 2.17 การดูดกลืนและส่งผ่านรังสีแกมมาในวัสดุ

ให้ μ คือความน่าจะเป็นของอันตรกิริยาของแต่ละอนุภาคต่อวัสดุที่มีความหนาของภาคตัดขวาง 1 หน่วย ดังนั้นความน่าจะเป็นที่จะเกิดอันตรกิริยาต่อความหนา dx คือ μdx ถ้าอนุภาคจำนวน I_0 ตกกระทบความหนา dx การเปลี่ยนแปลงของ dI_0 จากจำนวน I_0 เนื่องจากถูกดูดกลืนสามารถเขียนได้ดังนี้

$$dI = -\mu I_0 dx \quad (2.33)$$

ความเข้มของรังสีแกมมา I_0 เมื่อผ่านวัตถุที่มีความหนา x ความเข้มของรังสีแกมมาจะลดลง I อัตราการลดลงของความเข้มของรังสี จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของรังสีที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางนั้น

$$-\left(\frac{dI}{dx}\right) = \mu I_0 \quad (2.34)$$

เครื่องหมายลบ แสดงถึงความเข้มของรังสีแกมมาลดลงเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง ซึ่งในที่นี้เรียกว่าตัวดูดกลืน (absorber) โดยที่ μ คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้นของตัวกลาง (linear attenuation coefficient) เมื่อหารด้วยความหนาแน่นของของตัวกลางที่ดูดกลืนจะได้สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล (μ/ρ)

ในการหาค่า I ซึ่งเป็นจำนวนโฟตอนที่เคลื่อนที่ผ่านวัตถุหนา x ได้ สิ่งที่จะต้องคำนึงถึงคือ ลำรังสีแกมมาต้องมีพลังงานเท่ากัน และรังสีแกมมาต้องถูกดูดกลืนภายใต้ภาวะที่ถูกต้อง คือลำของรังสีแกมมาต้องไม่มีการสะท้อน

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = \int_0^x -\mu dx \quad (2.35)$$

$$\ln I \Big|_{I_0}^I = -\mu x \Big|_0^x \quad (2.36)$$

$$\ln I - \ln I_0 = \ln \frac{I}{I_0} = -\mu x \quad (2.37)$$

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu x} \quad (2.38)$$

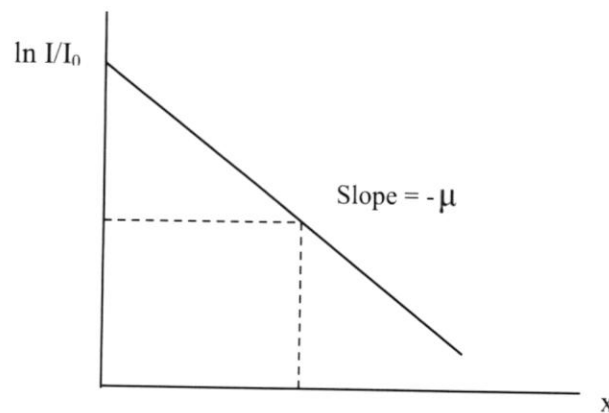
$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.39)$$

โดยที่ I_0 คือ ความเข้มของรังสีแกมมาก่อนที่จะผ่านตัวกลาง

I คือ ความเข้มของรังสีแกมมาหลังผ่านตัวกลาง

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีแกมมา [41] จากสมการที่ (2.37)

ถ้านำค่า $\ln(I/I_0)$ กับค่า x มาเขียนกราฟ semi-log จะได้เส้นตรงที่มีค่าความชันเท่ากับ $-\mu$



ภาพที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I/I_0)$ ในแกน y ซึ่งเป็นสเกลแบบล็อกกาลีทึมและค่าความหนาของตัวกลาง (x) ซึ่งเป็นสเกลแบบเชิงเส้น

เมื่อทราบค่าของ μ จะสามารถหาค่าความหนาของวัสดุที่ทำให้ความเข้มรังสีลดลงครึ่งหนึ่ง (Half Value Layer: HVL) ได้จาก

$$\mu = \frac{-\ln \frac{I}{I_0}}{x} \quad (2.40)$$

$$\mu = \frac{\ln \frac{I_0}{I}}{x} \quad (2.41)$$

เมื่อแทนค่า $x = \text{HVL}$ หรือความหนาของวัสดุที่ทำให้ความแรงของรังสีลดลงครึ่งหนึ่ง (HVL) และ $I = I_0/2$ จะได้

$$\mu = \frac{\ln \frac{I_0}{I_0/2}}{\text{HVL}} \quad (2.42)$$

$$\mu = \frac{\ln 2}{\text{HVL}} \quad (2.43)$$

$$\text{HVL} = \frac{0.693}{\mu} \quad (2.44)$$

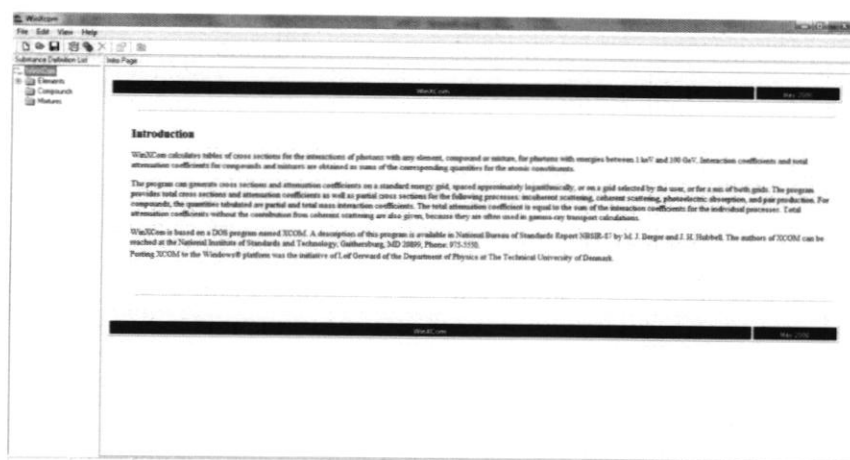
นอกจากนี้เมื่อทราบค่าของ μ ยังสามารถคำนวณค่าระยะปลอดการชน (Mean free path: MFP) ซึ่งเป็น ระยะทางเฉลี่ยที่โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้ก่อนที่จะชนกับโมเลกุลอื่น โดยคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{MFP} = \frac{1}{\mu} \quad (2.45)$$

2.1.12 โปรแกรม WinXcom

ปี ค.ศ. 1995 Hubbell และ Seltzer ได้ค้นพบวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (μ/ρ) โดยสามารถแสดงในรูปแบบของตารางข้อมูลเพื่อนำมาสนับสนุนงานวิจัย [42] จากนั้นในปี ค.ศ. 1999 Berger และ Hubbell ได้มีการพัฒนาการแสดงตารางข้อมูลเป็นโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ Xcom สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (μ/ρ) ซึ่งสามารถคำนวณได้ทั้งธาตุและสารประกอบในช่วงพลังงาน 1 keV ถึง 100 GeV [42] ในปี ค.ศ. 2001 Gerward และคณะ ได้มีการพัฒนาโปรแกรม Xcom ให้สามารถใช้งานระบบปฏิบัติการแบบ windows และเปลี่ยนชื่อเป็น WinXcom โดยโปรแกรม WinXcom นี้ใช้สำหรับการคำนวณสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล สามารถคำนวณได้ทั้งธาตุและสารประกอบ นอกจากนี้ยังทราบถึงอันตรกิริยาต่าง ๆ เมื่อโฟตอน

กระทำต่อสสาร ได้แก่ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก การกระเจิงแบบคอมป์ตัน และการผลิตอนุภาคคู่ ในช่วงพลังงานตั้งแต่ 1 keV ถึง 100 GeV [42] สำหรับปัจจุบันโปรแกรม WinXcom มีหน้าจอแสดงผลดังภาพที่ 2.19 และภาพที่ 2.20 เป็นการแสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลและโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาต่างๆของธาตุไฮโดรเจน



ภาพที่ 2.19 หน้าจอแสดงผลของโปรแกรม WinXcom

Substance	Energy (MeV)	Coherent (barns)	Incoherent (barns)	Photo Electric (barns)	Pair Nucleus (barns)	Pair Electron (barns)	Sum (barns)	Sum NonCoherent (barns)
H (Hydrogen)								
He (Helium)								
Li (Lithium)	1.000E-003	5.81E-001	8.42E-002	1.14E-001	0	0	1.21E+000	1.13E+000
Be (Beryllium)	1.500E-003	4.98E-001	1.85E-001	2.93E+000	0	0	3.60E+000	3.10E+000
B (Boron)	2.000E-003	4.14E-001	2.48E-001	1.11E+000	0	0	1.77E+000	1.36E+000
C (Carbon)	3.000E-003	2.76E-001	3.82E-001	2.81E-001	0	0	9.39E-001	6.63E-001
N (Nitrogen)	4.000E-003	1.89E-001	4.68E-001	1.93E-001	0	0	7.61E-001	5.73E-001
O (Oxygen)	5.000E-003	1.34E-001	5.19E-001	4.91E-002	0	0	6.76E-001	5.77E-001
F (Fluorine)	6.000E-003	9.99E-002	5.88E-001	2.63E-002	0	0	6.76E-001	5.77E-001
Ne (Neon)	8.000E-003	6.12E-002	5.84E-001	9.82E-003	0	0	6.55E-001	5.94E-001
Na (Sodium)	1.000E-002	4.12E-002	5.99E-001	4.56E-003	0	0	6.40E-001	6.04E-001
Mg (Magnesium)	1.300E-002	1.94E-002	6.10E-001	1.13E-003	0	0	6.30E-001	6.11E-001
Al (Aluminum)	2.000E-002	1.12E-002	6.07E-001	4.19E-004	0	0	6.18E-001	6.07E-001
Si (Silicon)	3.000E-002	5.05E-003	5.92E-001	1.03E-004	0	0	5.99E-001	5.93E-001
P (Phosphorus)	4.000E-002	2.87E-003	5.74E-001	3.82E-005	0	0	5.79E-001	5.74E-001
S (Sulfur)	5.000E-002	1.84E-003	5.60E-001	1.77E-005	0	0	5.62E-001	5.60E-001
Cl (Chlorine)	6.000E-002	1.28E-003	5.44E-001	9.44E-006	0	0	5.46E-001	5.44E-001
K (Potassium)	8.000E-002	7.21E-004	5.17E-001	3.52E-006	0	0	5.17E-001	5.17E-001
Ca (Calcium)	1.000E-001	4.62E-004	4.92E-001	1.54E-006	0	0	4.93E-001	4.92E-001
Sc (Scandium)	1.500E-001	2.09E-004	4.44E-001	4.18E-007	0	0	4.44E-001	4.44E-001
Ti (Titanium)	2.000E-001	1.16E-004	4.04E-001	1.01E-007	0	0	4.07E-001	4.06E-001
V (Vanadium)	3.000E-001	5.14E-005	3.53E-001	4.41E-008	0	0	3.54E-001	3.54E-001
Cr (Chromium)	4.000E-001	2.89E-005	3.17E-001	1.86E-008	0	0	3.17E-001	3.17E-001
Mn (Manganese)	5.000E-001	1.83E-005	2.89E-001	9.93E-009	0	0	2.89E-001	2.89E-001
Fe (Iron)	6.000E-001	1.29E-005	2.68E-001	6.14E-009	0	0	2.68E-001	2.68E-001
Co (Cobalt)	8.000E-001	7.23E-006	2.35E-001	3.12E-009	0	0	2.35E-001	2.35E-001
Ni (Nickel)	1.000E+000	4.62E-006	2.11E-001	1.94E-009	0	0	2.11E-001	2.11E-001
Cu (Copper)	1.022E+000	4.43E-006	2.09E-001	1.89E-009	0	0	2.09E-001	2.09E-001
Zn (Zinc)	1.250E+000	2.96E-006	1.89E-001	1.30E-009	7.81E-006	0	1.89E-001	1.89E-001
Ga (Gallium)	1.500E+000	2.08E-006	1.72E-001	9.73E-010	4.39E-005	0	1.72E-001	1.72E-001

ภาพที่ 2.20 การคำนวณสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของธาตุไฮโดรเจน (H)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การแผ่รังสีของสารกัมมันตรังสีเป็นปรากฏการณ์ที่มนุษย์ไม่อาจสังเกตได้ด้วยตาเปล่า จึงอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพและชีวิตได้ โดยอันตรายที่เกิดขึ้นนั้นมาจากคุณสมบัติที่สามารถแตกตัวเป็นไอออน (Ionizing Radiation) เมื่อรังสีผ่านเข้าไปในเนื้อเยื่อของร่างกาย ก็จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อเซลล์ถึงในระดับดีเอ็นเอ โดยทำให้โมเลกุลภายในเซลล์ และระบบการทำงานของเซลล์เปลี่ยนแปลงไป

การนำคุณสมบัติของสารกัมมันตรังสีมาใช้ประโยชน์นั้น จึงต้องอยู่ภายใต้ระเบียบวิธีการปฏิบัติงานเกี่ยวกับรังสีที่กำหนดโดยคณะกรรมการนาานาชาติว่าด้วยการป้องกันอันตรายจากรังสี (International Commission on Radiological Protection: ICRP) ซึ่งยึดหลักให้ผู้ปฏิบัติงาน และสาธารณชน ได้รับรังสีน้อยที่สุดโดยอาศัย 3 มาตรการป้องกันที่สำคัญ คือ ใช้เวลาปฏิบัติงานให้สั้นที่สุด รักษาระยะห่างจากรังสีให้มากที่สุด และจัดให้มีเครื่องกำบังที่เหมาะสม [43] เนื่องจากรังสีแกมมามีประโยชน์ในหลายๆด้าน แต่โทษที่อาจเกิดขึ้นก็มีมากมายเช่นกัน ในการกำบังรังสีแกมมาจากเดิมที่เคยนิยมใช้คอนกรีต ซึ่งพบข้อด้อยหลายประการ เช่น มีความทึบแสง น้ำสามารถซึมผ่านได้ง่าย ยากต่อการขนย้าย และเมื่อได้รับรังสีนิวเคลียร์เป็นเวลานานอาจเกิดการแตกหักได้ง่าย นักวิจัยหลายท่านจึงได้พัฒนาวัสดุแก้ว เพื่อนำมาใช้แทนคอนกรีตในการเป็นวัสดุกำบังรังสี เนื่องจากแก้วมีข้อดี คือ มีความโปร่งแสง สามารถปรับเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีเพื่อให้มีคุณสมบัติตามต้องการได้ ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี และยังสามารถป้องกันความชื้นหรือการซึมผ่านของน้ำได้ดีอีกด้วย [5] โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการปรับปรุงคุณสมบัติของแก้วเพื่อทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ มีการศึกษาผลของสารตัวเติมต่อแก้วตัวอย่าง เช่น ในปี ค.ศ. 2008 K.J. Singh และคณะ [44] ได้ศึกษาคุณสมบัติโครงสร้างและสมบัติการกำบังรังสีแกมมาของระบบแก้ว $x\text{PbO}(1-x)\text{SiO}_2$ ($x = 0.45-0.70$) โดยทำการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาด้วยวิธี narrow beam transmission ที่พลังงานโฟตอน 662, 1173 และ 1332 keV ส่วนค่าทางทฤษฎีจะใช้กฎ 'mixture rule' และโปรแกรม 'Xcom' ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะนำไปคำนวณค่าความหนาแน่นค่าต่อไป สมบัติการกำบังรังสีแกมมาของแก้วระบบนี้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน ในส่วนของสมบัติทางโครงสร้างจะคำนวณหาปริมาตรโดยโมล และการศึกษา FTIR และ acoustic ของแก้วตัวอย่าง จากการศึกษาพบว่าแก้วระบบนี้มีศักยภาพในการเป็นวัสดุกำบังรังสีแกมมาและมีค่าความหนาแน่นค่าต่ำกว่าคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐานจึงสามารถทำวัสดุกำบังรังสีให้มีขนาดเล็กลงและมีความโปร่งแสงได้ และพบว่าเกิดการแตกหักของโครงข่ายแก้วและเกิดการก่อตัวของ NBO ขึ้นเมื่อมีปริมาณของ PbO เพิ่มมากขึ้น ต่อมาปี ค.ศ. 2013 Raewat Laopaiboon และ Cherdasak Bootjomchai [45] ได้ศึกษาความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก สมบัติยืดหยุ่น อัตราส่วนปัวซอง และความแข็งของแก้วที่ได้จากทรายท้องถิ่นจังหวัดอุบลราชธานีกับซิลิกาบริสุทธิ์ โดยใช้ เทคนิคอัลตราโซนิก FTIR spectroscopy และค่าความแข็งระดับไมโคร ผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ มีความใกล้เคียงกัน ดังนั้นทรายท้องถิ่นสามารถที่จะนำมาใช้ทดแทนซิลิกาบริสุทธิ์ได้เมื่อพิจารณาในแง่ของสมบัติยืดหยุ่น และในปีเดียวกัน Khamirul Amin Matori และคณะ [13] ได้ศึกษาแก้วในระบบ $(\text{PbO})_x(\text{P}_2\text{O}_5)_{1-x}$ ซึ่งมีสัดส่วนโมลที่แตกต่างกันเมื่อ $x = 0.1$ ถึง 0.6 โดยศึกษาค่าความหนาแน่นของแก้วโดยใช้หลักอาร์คิมิดีส วัดความเร็วคลื่นเสียงตามยาวและตามขวางด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก ซึ่งค่าที่ได้ถูกนำมาคำนวณหาคุณสมบัติความยืดหยุ่นของแก้ว คือ โมดูลัสตามยาว โมดูลัสตามขวาง โมดูลัสของยัง โมดูลัสเชิงปริมาตร อัตราส่วน

ของบัวซอง และอุณหภูมิตอบาย พบว่าการเติม PbO ในโครงข่ายแก้วทำให้ความหนาแน่นของแก้วเพิ่มขึ้นตามมวลอะตอมและรัศมีอะตอมของอะตอมตะกั่ว นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของ PbO และการลดลงของความเข้มข้นของ P_2O_5 ในโครงข่ายของแก้วก็เป็นสาเหตุที่ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งชี้ให้เห็นว่า Pb^{2+} มีบทบาทเป็น modifier ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแก้วโดยการเกิด NBOs ในโครงข่าย ทำให้สมบัติยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของ PbO ต่อมาในปี ค.ศ. 2014 Sandeep Kaur และ K.J. Singh [46] ได้ศึกษาวัสดุแก้วระบบ $xPbO-(0.90-x)B_2O_3-0.10Al_2O_3$ ที่สัดส่วน $x = 0.25, 0.30, 0.35, 0.40$ และ 0.45 ศึกษาคุณสมบัติการกำบังรังสีแกมมา และคุณสมบัติทางโครงสร้างของแก้วระบบนี้ โดยใช้เทคนิคอัลตราโซนิก UV-visible และ DSC จากการศึกษาพบว่าตัวอย่างแก้วระบบ $PbO-B_2O_3-Al_2O_3$ มีศักยภาพสำหรับการใช้งานการกำบังรังสีแกมมา โดยระบบแก้วนี้มีคุณสมบัติการกำบังรังสีเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ PbO เพิ่มขึ้น ผลการศึกษาปริมาตรโดยโมล UV-visible DSC และความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของระบบแก้วนี้ชี้ให้เห็นว่ามีการก่อตัวของ NBOs มากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของ PbO ในปีเดียวกันนี้ K.J. Singh และคณะ [47] ได้ศึกษาเปรียบเทียบการป้องกันรังสีแกมมาและคุณสมบัติบางอย่างของระบบแก้ว $PbO-SiO_2-Al_2O_3$ และ $Bi_2O_3-SiO_2-Al_2O_3$ โดยได้ศึกษาคุณสมบัติของรังสีแกมมาในด้านของค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล ค่าความหนาแน่นครั้งค่า และระยะปลอดการชน ในขณะที่สมบัติทางโครงสร้างได้ดำเนินการในด้านความหนาแน่น แถบช่องว่างพลังงานทางแสง อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว และความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกตามยาว โดยใช้เทคนิคต่างๆ ดังนี้ คือการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ UV-Visible DSC และเทคนิคอัลตราโซนิก ตัวอย่างของแก้วทั้งสองระบบ ซึ่งมีสูตรแก้ว $xPbO-(0.90-x)SiO_2-0.10Al_2O_3$ เมื่อ $x = 0.50$ ถึง 0.80 และ $xBi_2O_3-(0.90-x)SiO_2-0.10Al_2O_3$ เมื่อ $x = 0.50$ ถึง 0.75 จะถูกเตรียมขึ้นโดยใช้เทคนิค melt-quenching ความหนาแน่นของกลุ่มตัวอย่างถูกวัดโดยหลักการอาร์คิมิดีส โดยใช้เบนซินเป็นของเหลว จากผลการทดลองพบว่า ระบบแก้ว $Bi_2O_3-SiO_2-Al_2O_3$ มีความหนาแน่น ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนมวล แถบช่องว่างพลังงานทางแสง ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกตามยาวสูงกว่าระบบแก้ว $PbO-SiO_2-Al_2O_3$ และมีค่า HVL และ MFP ต่ำกว่าระบบแก้ว $PbO-SiO_2-Al_2O_3$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตะกั่วสามารถแทนที่ด้วยบิสมาทสำหรับการเตรียมวัสดุกำบังรังสีแกมมา ดังนั้นแก้ว $PbO-SiO_2-Al_2O_3$ ถูกพิจารณาว่ามีขนาดที่เหมาะสมในการใช้เป็นเป็นวัสดุกำบังรังสีแกมมามากกว่าแก้ว $Bi_2O_3-SiO_2-Al_2O_3$ และการเพิ่มขึ้นของจำนวน NBOs ปรากฏเมื่อออกไซด์โลหะหนักมีปริมาณที่สูงขึ้นในแก้วทั้งสองระบบ ต่อมาปี ค.ศ.2015 N. Elkhoshkhany และคณะ [31] ได้ศึกษาระบบแก้ว $75TeO_2-15ZnO-(10x)Nb_2O_5-xGd_2O_3$ ($x=0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ mol.%) ซึ่งถูกเตรียมโดยเทคนิค melt quenching ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกทั้งตามยาวและเฉือนถูกวัดด้วยวิธี pulse-echo ความถี่ 5 MHz ในอุณหภูมิห้อง โมดูลัสยืดหยุ่นถูกคำนวณจากวิธี Makishima-Mackenzie model และ bond compression model จากการศึกษาผลของ Gd_2O_3 ต่อโมดูลัสยืดหยุ่นของแก้วระบบนี้

พบว่าโมดูลีตียืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณ $x\text{Gd}_2\text{O}_3$ mol.% เพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนปัวของ อุณหภูมิเดอบาย ความแข็งระดับไมโคร และอุณหภูมิการอ่อนตัว มีค่าลดลง เมื่อปริมาณ $x\text{Gd}_2\text{O}_3$ mol.% เพิ่มขึ้น การวิเคราะห์เชิงปริมาณของโมดูลีตียืดหยุ่นพบว่าขึ้นอยู่กับจำนวนพันธะต่อหน่วย ปริมาตร ค่าเฉลี่ยของพันธะที่เชื่อมต่อและจำนวนของอะตอมที่สัมผัสต่อหน่วยปริมาตร ล่าสุดในปี ค.ศ. 2016 H.A. Sidek และคณะ [28] ได้ศึกษาผลของ PbO ต่อสมบัติยืดหยุ่นของระบบแก้ว $\text{ZnO}-\text{P}_2\text{O}_5$ โดยได้ทำการเตรียมระบบแก้ว $40(\text{P}_2\text{O}_5)-(60-x)\text{ZnO}-x\text{PbO}$ และ $50(\text{P}_2\text{O}_5)-(50-x)\text{ZnO}-x\text{PbO}$ เมื่อ $x = 0-60$ mol.% ด้วยเทคนิค melt quenching จากนั้นทำการวัดความเร็วคลื่นเสียง อัลตราโซนิกทั้งตามยาวและเฉือนด้วยเครื่องอัลตราโซนิก ใช้ความถี่ 10 MHz ซึ่งวัดที่อุณหภูมิห้อง ข้อมูลความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกและความหนาแน่น ถูกนำไปใช้คำนวณโมดูลีตียืดหยุ่น พบว่า มีค่าขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและถูกวิเคราะห์ในแง่ของการปรับเปลี่ยนปริมาณของ PbO ความสัมพันธ์ของโมดูลีตียืดหยุ่นกับความหนาแน่นของการบรรจุอะตอมของแก้วเหล่านี้ถูกนำมาวิเคราะห์ เพื่อทำนายโมดูลีตียืดหยุ่นของแก้วนี้ การตีความหมายของการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการยืดหยุ่นจากการ ทดลองที่สังเกตได้ จะถูกศึกษาบนพื้นฐานของ bond compression และ Makishima-Mackenzie model จากการศึกษาพบว่า ความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ PbO และยัง เกิดจากตะกั่วที่มีมวลอะตอมสูง การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของแก้วที่มาพร้อมกับการเพิ่มขึ้นของ PbO นี้ อาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงได้ ความเร็วคลื่นเสียง และคุณสมบัติยืดหยุ่น เช่น โมดูลีตียืดหยุ่น โมดูลีตียืดหยุ่นเชิงปริมาตร โมดูลีตียืดหยุ่นเฉือนและโมดูลีตียืดหยุ่นตามยาวลดลง ในขณะที่อัตราส่วนปัวของเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PbO การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนปัวของแสดงให้เห็นว่า ความแข็งแรงของแก้วได้ลดลง ผลของ PbO ที่มีต่อพฤติกรรมการยืดหยุ่นของระบบแก้ว $\text{ZnO}-\text{P}_2\text{O}_5$ ได้ถูกวิเคราะห์ตาม ค่าคงที่ของแรงการยึดพันธะโดยเฉลี่ย ค่าเฉลี่ยขนาดของวงแหวน จำนวนพันธะต่อ หน่วยปริมาตร จำนวนพันธะเชื่อมโยงต่อประจุบวก ค่าความหนาแน่นการบรรจุ และพลังงานการ สลายพันธะของแต่ละออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบ ค่าโมดูลีตียืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวของที่วัดได้ พบว่าอยู่ในระหว่างค่าโมดูลีตียืดหยุ่นที่คำนวณทางทฤษฎีจาก bond compression model และ Makishima-Mackenzie model จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องนี้ ผู้วิจัยได้เกิดองค์ความรู้เพื่อนำมาพัฒนาวัสดุแก้วกำบังรังสี โดยเทคนิคการวัดสมบัติต่างๆ เช่น การวัดความหนาแน่นด้วยหลักการ อาร์คิมิดีส การวัดความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกเพื่อคำนวณหาโมดูลีตียืดหยุ่นต่าง ๆ การวัดสมบัติ บางอย่างทางด้านรังสีด้วยเทคนิค narrow beam transmission การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การ ลดทอนเชิงมวลโดยใช้โปรแกรม WinXcom รวมถึงทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณโมดูลีตียืดหยุ่นต่าง ๆ คือ bond compression model และ Makishima-Mackenzie model พร้อมทั้งผลจากการทดลอง ของนักวิจัย เช่น K.J. Singh, Khamirul Amin Matori, Sandeep Kaur และ H.A. Sidek พร้อมทั้ง คณะของพวกเขา ต่างก็พบว่า แก้วที่มี PbO เป็นองค์ประกอบ มีคุณสมบัติการกำบังรังสีเพิ่มขึ้นเมื่อ

ปริมาณ PbO เพิ่มขึ้น และชี้ให้เห็นว่า Pb^{2+} มีบทบาทเป็น modifier ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแก้วโดยการเกิด NBOs ในโครงข่าย ทำให้สมบัติยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของ PbO ซึ่งองค์ความรู้จากผลการวิจัยเหล่านี้เป็นส่วนสำคัญยิ่งที่จะช่วยให้งานวิจัยชิ้นนี้ดำเนินไปได้ด้วยดี

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ สารเคมีและวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์

- 3.1.1.1 เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) ยี่ห้อ HITACHI รุ่น S-3400N Type II โดยมีอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ บริษัท EDAX รุ่น Genesis
- 3.1.1.2 เครื่อง X-ray Diffractometer ยี่ห้อ PANalytical รุ่น X'Pert High score
- 3.1.1.3 เตาหลอมไฟฟ้าที่มีอุณหภูมิสูงสุด 1800 องศาเซลเซียส สร้างโดย GTEC ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
- 3.1.1.4 เตาอบไฟฟ้าที่มีอุณหภูมิสูงสุด 1000 องศาเซลเซียส สร้างโดย GTEC ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
- 3.1.1.5 เบ้าหลอมแก้ว
- 3.1.1.6 แบบพิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม
- 3.1.1.7 เครื่องตัดชิ้นงาน ยี่ห้อ Benetec limited รุ่น labcut 1010
- 3.1.1.8 เครื่องขัดแก้ว สร้างโดย GTEC ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
- 3.1.1.9 เครื่อง Ultrasonic Flaw Detector ยี่ห้อ SONATAST รุ่น Sitiescan 230
- 3.1.1.10 แท่งปรับเทียบ V1 และ V2
- 3.1.1.11 หัวตรวจสอบคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบตรง ความถี่ 4 MHz
- 3.1.1.12 หัวคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแบบมุม ความถี่ 4 MHz
- 3.1.1.13 เวอร์เนียร์คาร์ลิเปอร์ของบริษัท Pro'skit ความละเอียด 0.05 มิลลิเมตร
- 3.1.1.14 เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ ความละเอียด 0.0001 กรัม ยี่ห้อ Denver Instrument รุ่น TB-214
- 3.1.1.15 ปีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 3.1.1.16 silicon carbide papers
- 3.1.1.17 ไอโซโทปธาตุกัมมันตรังสีชนิด Cs-137 Co-60 และ Co-57 ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 3.1.1.18 หัววัดรังสีชนิด NaI(Tl) ยี่ห้อ Canberra Model 802

- 3.1.1.19 หัววัดรังสีชนิด CdTe Model XR-100T
- 3.1.1.20 แผ่นตะกั่วและทองแดงสำหรับกำบังรังสี
- 3.1.1.21 เครื่อง Multichannel analyzer บริษัท ORTEC
- 3.1.1.22 โลหะสำหรับใช้เป็น target คือ Pb

3.1.2 สารเคมี

- 3.1.2.1 Recycled silica gel (RSG)
- 3.1.2.2 Strontium carbonate (SrCO_3) จากบริษัท ALDRICH ความบริสุทธิ์ 98.00%
- 3.1.2.3 Lead Oxide (Pb_3O_4) จากบริษัท Metenere Limited ความบริสุทธิ์ 99.98%
- 3.1.2.4 n-hexane จากบริษัท Fisher scientific ความบริสุทธิ์ 95.00 %
- 3.1.2.5 กลีเซอร์ลีน

3.1.3 โปรแกรมที่ใช้ในการทำวิจัย

- 3.1.3.1 โปรแกรม WinXcom
- 3.1.3.2 โปรแกรม Microsoft Excel

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 วิเคราะห์องค์ประกอบของซิลิกาเจล

นำซิลิกาเจลที่จะใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตแก้ว วิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอ็กซ์ระบบ EDS (Energy Dispersive Spectrometer)

3.2.2 วิธีการเตรียมตัวอย่าง

คำนวณหาปริมาณสารที่จะต้องใช้ในการหลอมแก้วดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยสูตรแก้วคือ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ จากนั้นทำการชั่งสารเคมีตามปริมาณที่ได้จากการคำนวณ โดยนำไปชั่งด้วยเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ของบริษัท Denver Instrument ความละเอียด 0.0001 ซึ่ง SrO อยู่ในรูปของ SrCO_3 และ PbO อยู่ในรูปของ Pb_3O_4 สารเคมีที่ชั่งได้จะถูกผสมในเข้าหลอมแก้วที่เตรียมไว้

3.2.3 วิธีการหลอมแก้ว

ในการทดลองสามารถสรุปเป็นแผนภาพขั้นตอนการวิจัยดังภาพที่ 3.1 สารเคมีที่ถูกผสมในเข้าหลอมแก้วจะถูกนำไปหลอมที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาพบรรยากาศปกติ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อหลอมเป็นเนื้อเดียวกันแล้วก็เทลงในบนแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม แล้วนำตัวอย่างแก้วที่ได้อบที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อลดความเค้นภายในตัวอย่างแก้ว หลังจากนั้นปิดเตาอบเพื่อให้อุณหภูมิภายในเตาลดลงถึงอุณหภูมิห้อง แล้วนำตัวอย่างแก้วออกจากเตา

อบ นำแก้วที่ได้ไปตัดให้ได้ขนาดที่เหมาะสม และขัดให้ได้ระนาบ จะได้แก้วตัวอย่างสำหรับที่จะนำไปวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ต่อไป องค์ประกอบของแก้วที่เตรียมได้ ระบุไว้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของแก้ว Strontium lead silicate

Mixture No.	RSG (mol.%)	SrO (mol.%)	PbO (mol.%)
PbSrRSG1	70	10	20
PbSrRSG2	65	10	25
PbSrRSG3	60	10	30
PbSrRSG4	55	10	35
PbSrRSG5	50	10	40
PbSrRSG6	45	10	45

3.2.4 การวัดความหนาแน่นของตัวอย่างแก้วและ Molar volume

การวัดความหนาแน่นของตัวอย่างแก้วจะใช้หลักการของอาร์คิมิดีส โดยมีสาร n-hexane ที่ทราบความหนาแน่นที่แน่นอนเป็นของเหลว ซึ่งจะหาน้ำหนักของตัวอย่างแก้วที่ชั่งในอากาศ และหาน้ำหนักของตัวอย่างแก้วที่ชั่งใน n-Hexane โดยในการชั่งน้ำหนักจะใช้เครื่องชั่งดิจิตอล จากนั้นจะหาค่าความหนาแน่นของแก้วโดยคำนวณจากสมการที่ (2.1) เมื่อได้ความหนาแน่นของแก้วตัวอย่างแล้ว จะได้ค่า Molar volume สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.2)

3.2.5 การทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างแก้วมีโครงสร้างแบบอสัณฐาน โดยเครื่อง X-ray Diffractometer ยี่ห้อ PANalytical รุ่น X'Pert High score ถูกนำมาใช้ซึ่งมี $\text{Cu K}\alpha$ เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความเข้มสูง ค่าที่ได้จะถูกบันทึกที่มุม (2θ) $10-70^\circ$ กรณีที่ไม่มียอดการตกผลึกในข้อมูล XRD แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่เตรียมไว้มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน

3.2.6 การทดสอบสมบัติทางรังสี

3.2.6.1 การทดลองโดยวิธี Narrow beam transmission

สำหรับการวัดสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาด้วยเทคนิคการส่งผ่านแบบลำรังสีแคบ ดังแสดงในภาพที่ 3.2 โดยมีแหล่งกำเนิดรังสีแกมมา คือ Co-60 Cs-137 และ Co-57 สำหรับพลังงาน 1173, 662 และ 122 keV ตามลำดับ และสำหรับพลังงาน 74.228 keV จะใช้วิธีการบังคับให้ต้นกำเนิดรังสีไปกระตุ้นแผ่น Target โดยในที่นี้คือแผ่นตะกั่วให้ปลดปล่อยพลังงานออกมาแล้วจะบังคับลำรังสีให้เคลื่อนที่ไปชนกับตัวอย่างแก้ว ดังแสดงในภาพที่ 3.3 จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ในแต่

ละพลังงานมาคำนวณค่าความหนาครึ่งค่า (Half value layer) และระยะปลอดการชน (Mean free path) ดังสมการที่ (2.44) และ (2.45) ตามลำดับ ด้วยโปรแกรม Microsoft excel

3.2.6.2 การคำนวณโดยโปรแกรม WinXcom

โปรแกรม WinXcom ถูกพัฒนาโดย National Institute of Standards and Technology เป็นฐานข้อมูลที่สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลและอันตรกิริยา ย่อยต่าง ๆ เช่น การกระเจิงแบบโคเฮเรนต์ การกระเจิงแบบคอมป์ตัน การเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก กระบวนการเกิดแพรวุติคชัน ซึ่งสามารถคำนวณได้ทั้งธาตุ สารประกอบ และสารผสมที่อยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์โดยมวล ที่ระดับพลังงาน 1 keV ถึง 100 GeV จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลมาคำนวณค่าความหนาครึ่งค่า (Half value layer) และระยะปลอดการชน (Mean free path) ดังสมการที่ (2.44) และ (2.45) ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองด้วยวิธี Narrow beam transmission

3.2.7 การศึกษาสมบัติยืดหยุ่น

3.2.7.1 การทดสอบด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก

ในการทดสอบสมบัติความยืดหยุ่นต่างๆ ของแก้วตัวอย่าง โดยใช้เครื่องอัลตราโซนิก ยี่ห้อ SONATAST รุ่น SITESCAN 230 พร้อมหัวตรวจสอบตรง และหัวตรวจสอบมุม ความถี่หัววัด 4 MHz และแท่ง Calibrate V1 แท่ง Calibrate V2 ใช้กิลิเซอรอลเป็น Couplant เพื่อวัดความเร็วเครื่องเสียงตามยาวและเฉือน แล้วคำนวณสมบัติความยืดหยุ่นได้ดังสมการที่ (2.7) - (2.12)

3.2.7.2 การคำนวณโดยใช้วิธี bond compression model

สมบัติความยืดหยุ่นต่าง ๆ ทางทฤษฎี bond compression model สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.13) - (2.17) และตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการคำนวณนั้นจะแสดงในสมการที่ (2.18) - (2.21) สำหรับตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณค่าโมดูลัสเชิงปริมาตรและอัตราส่วนของปัวซองส์ของแก้ว 10SrO - 20PbO - 70RSG แสดงในตารางที่ 3.2 และ 3.3

ตารางที่ 3.2 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าโมดูลัสเชิงปริมาตรและอัตราส่วนของปิวส์ของส์ ด้วยวิธี bond compression model

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง	SiO ₂	PbO	SrO
x_i	0.7	0.2	0.1
n_c	2	4	2
n_f	4	6	4
N_c	1	1	1
N	1	2	2
r (nm)	0.186	0.229	0.162
X_a	1.9	2	0.82
X_b	3.44	3.44	3.44
f (N/m)	299.0596	439.3568	382.5093

ตารางที่ 3.3 จำนวนพันธะต่อหน่วยปริมาตรของแก้ว (n_b) ค่าคงที่ของแรงยึดเฉลี่ยของพันธะ (\bar{F}) ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงต่อสูตรแก้ว (\bar{n}_c)

PbO (mol%)	$n_b \times 10^{28}$ (m ⁻³)	\bar{F} (N/m)	\bar{n}_c
20	13.3114	344.9088	2.4
25	13.1479	353.2431	2.5
30	12.9247	361.2150	2.6
35	12.5086	368.8477	2.7
40	12.0913	376.1624	2.8
45	11.7565	383.1785	2.9

3.2.7.3 การคำนวณโดยใช้วิธี Makishima-Mackenzie model

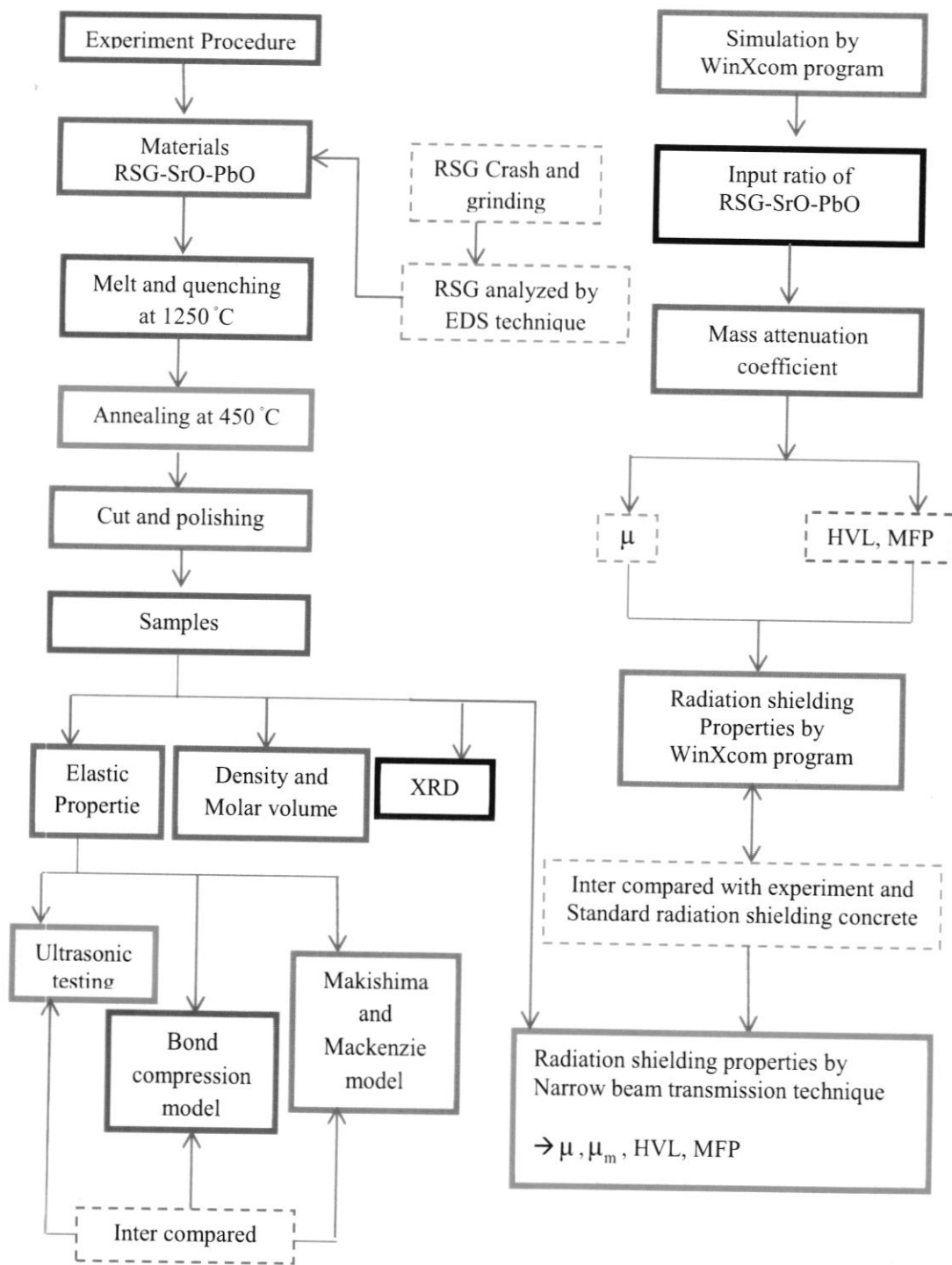
สมบัติความยืดหยุ่นทางทฤษฎี Makishima-Mackenzie model นั้น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.22) - (2.25) และตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการคำนวณนั้นจะแสดงในสมการที่ (2.26) - (2.27) สำหรับตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณค่าโมดูลัสของยังส์และค่าโมดูลัสเชิงปริมาตรของแก้ว 10SrO - 20PbO - 70RSG แสดงในตารางที่ 3.4 และ 3.5

ตารางที่ 3.4 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าโมดูลัสของยังส์ ด้วยวิธี Makishima-Mackenzie model

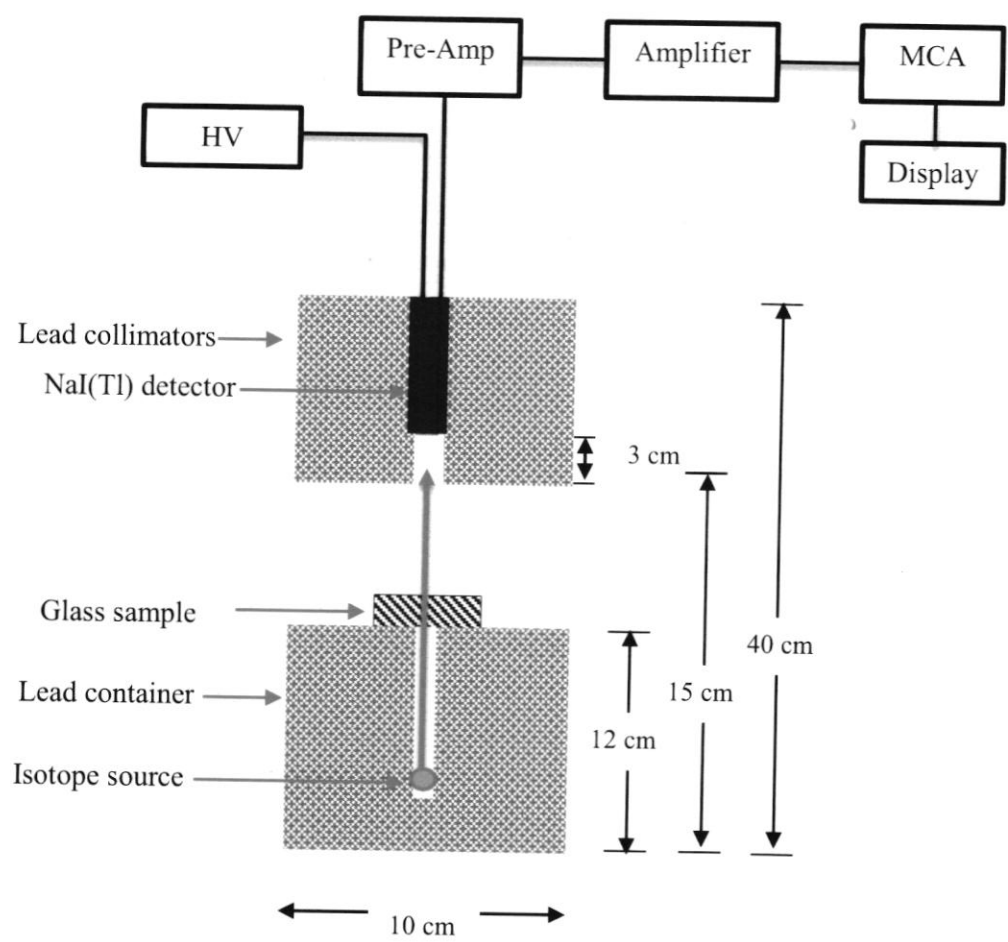
ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง	SiO ₂	PbO	SrO
X_i	0.7	0.2	0.1
V_i	1.38945×10^{-5}	1.1178×10^{-5}	1.10717×10^{-5}
G_i (10^6 kJ/m ³)	67.55	48.54	21.72
R_M (m)	2.6×10^{-11}	1.19×10^{-10}	1.18×10^{-10}
R_O (m)	1.4×10^{-10}	1.4×10^{-10}	1.4×10^{-10}

ตารางที่ 3.5 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าโมดูลัสเชิงปริมาตร ด้วยวิธี Makishima-Mackenzie model

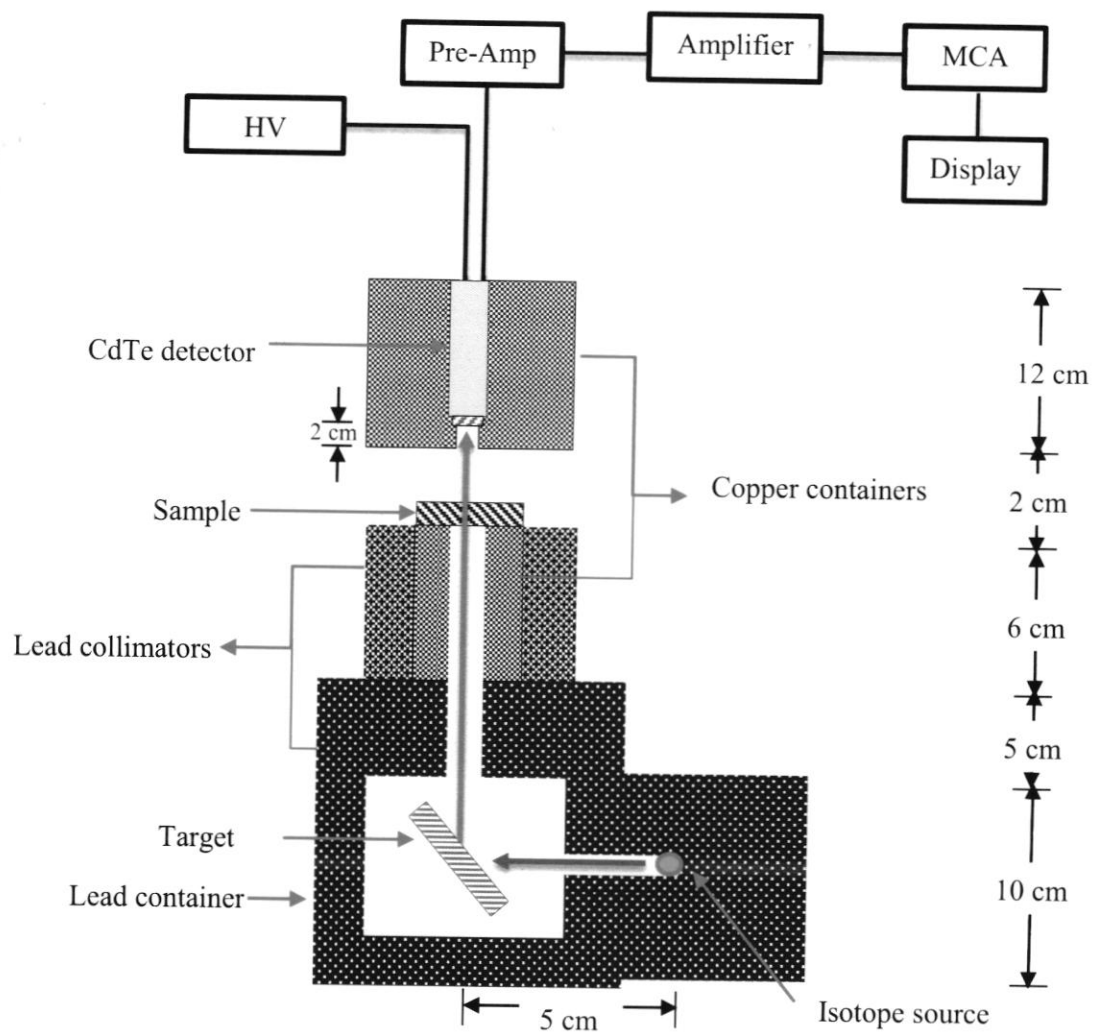
PbO (mol.%)	K_{exp}	E_{exp}	V_t	$\gamma = K_{exp}/2E_{exp}V_t$
20	35.70763	68.65639	0.656539064	0.396086002
25	34.88832	66.81305	0.627476819	0.416093640
30	33.12980	63.68714	0.597077342	0.435618666
35	34.84722	67.06328	0.559555552	0.464312250
40	33.20298	63.80368	0.523936369	0.496618386
45	33.72531	64.68603	0.493620965	0.528106922
ค่าเฉลี่ย				0.456139311



ภาพที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการทำวิจัย



ภาพที่ 3.2 เทคนิคการส่งผ่านแบบลำรังสีแคบ (Narrow beam transmission)



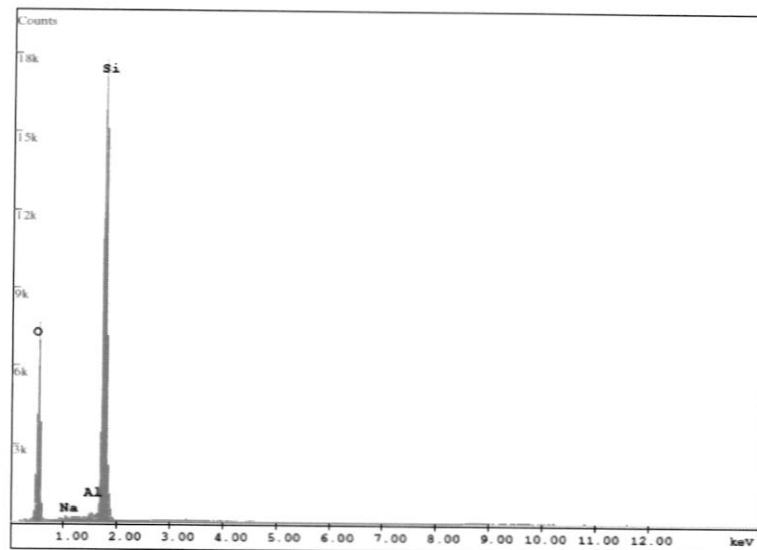
ภาพที่ 3.3 เทคนิคการส่งผ่านแบบลำรังสีแคบ (Narrow beam transmission)
แบบsecondary target

บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการหาค่าองค์ประกอบของซิลิกาเจลที่เสื่อมสภาพด้วยเทคนิค EDS

จากการนำซิลิกาเจลที่เสื่อมสภาพแล้วมาวิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer: EDS) ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ผลที่ได้ดังแสดงในภาพที่ 4.1 และตารางที่ 4.1



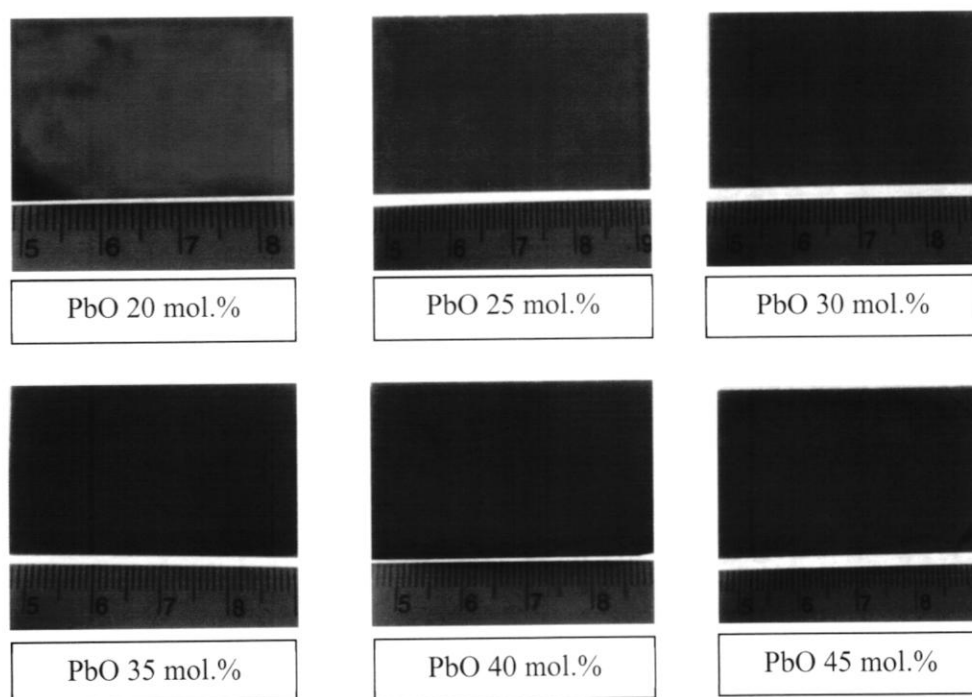
ภาพที่ 4.1 องค์ประกอบของซิลิกาเจลที่เสื่อมสภาพทดสอบด้วยเทคนิค EDS

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของซิลิกาเจลที่เสื่อมสภาพทดสอบด้วยเทคนิค EDS

Element	mol.%
O	64.42
Na	0.51
Al	0.48
Si	34.60
Total	100.00

จากภาพที่ 4.1 และตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบของซิลิกาเจลที่เสื่อมสภาพด้วยเทคนิค EDS ประกอบด้วยออกซิเจน (O), โซเดียม (Na), อะลูมิเนียม (Al) และซิลิกอน (Si) เป็น 64.42, 0.51, 0.48 และ 34.60 เปอร์เซ็นต์โดยโมล จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ระบบ EDS พบว่ามีออกซิเจน (O) และซิลิกอน (Si) เป็นปริมาณมาก แสดงให้เห็นว่าธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักของซิลิกาเจลคือ ซิลิกอนกับออกซิเจนซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นโครงสร้างหลักในการผลิตเป็นวัสดุแก้วได้

4.2 ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างแก้ว



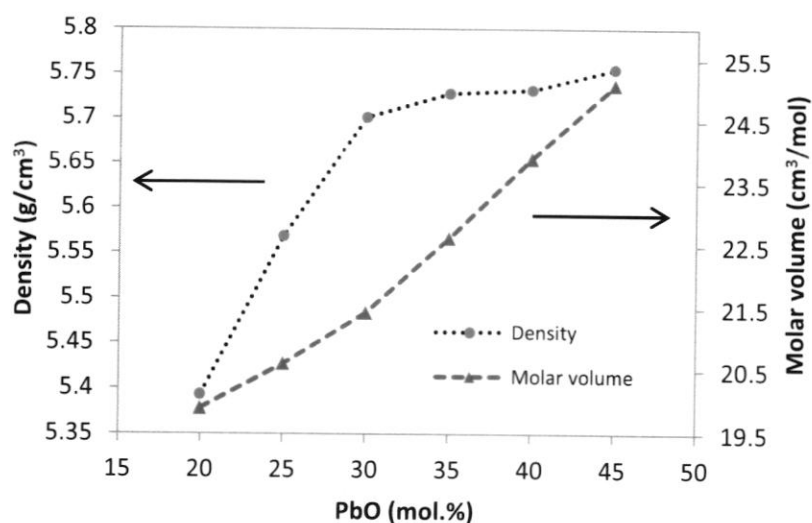
ภาพที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างแก้วระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ เมื่อ $x = 20, 25, 30, 35, 40$ และ 45 เปอร์เซ็นต์โดยโมล

จากภาพที่ 4.2 เป็นลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างแก้ว พบว่าตัวอย่างแก้วมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน แก้วที่เติมตะกั่วออกไซด์ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยโมล มีสีน้ำเงินเข้ม อาจเนื่องมาจากปริมาณของโคบอลต์ที่มีอยู่ในซิลิกาเจลที่เป็นวัตถุดิบในการทดลอง ซึ่งการวิเคราะห์ซิลิกาเจลที่เสื่อมสภาพด้วยเทคนิค EDS อาจวิเคราะห์ไม่ได้ เนื่องจากมีปริมาณของโคบอลต์น้อยมาก เมื่อเติมตะกั่วออกไซด์ปริมาณ 25 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ตัวอย่างแก้วที่ได้มีสีน้ำเงินอมเขียว ส่วนแก้วที่เติมตะกั่วออกไซด์ปริมาณ 30, 35, 40 และ 45 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ตามลำดับ พบว่าแก้วมีสีเขียวเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ

เมื่อเพิ่มปริมาณตะกั่วออกไซด์ตามเปอร์เซ็นต์โดยโมล เนื่องจากผลของตะกั่วทำให้มีการดูดกลืนแสงสีอื่นหมด และจะสะท้อนแสงสีเขียว (460 nm – 600 nm) ออกมาจึงมองเห็นแก้วตัวอย่างเป็นสีเขียว กล่าวคือเมื่อแสงขาวตกกระทบวัตถุทึบแสง วัตถุนั้นจะดูดกลืนแสงแต่ละสีที่ประกอบเป็นแสงขาวนั้นไว้ในปริมาณต่าง ๆ กัน แสงส่วนที่เหลือจากการดูดกลืนจะสะท้อนกลับเข้าตา ทำให้เราเห็นวัตถุเป็นสีเขียวเดียวกับแสงที่สะท้อนมาเข้าตามากที่สุด [48]

4.3 ผลจากการวัดความหนาแน่นของแก้ว

จากการวัดความหนาแน่นของตัวอย่างแก้วในระบบ $10 \text{ SrO} - x \text{ PbO} - (90-x) \text{ RSG}$ เมื่อ x คือ 20, 25, 30, 35, 40 และ 45 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ตามลำดับ โดยใช้หลักการของอาร์คิมิดีส ดังสมการที่ (2.1) โดยของเหลวที่ใช้ในการชั่งน้ำหนักเป็น n - hexane ซึ่งจะไม่ทำปฏิกิริยากับตัวอย่างแก้ว และคำนวณหาค่าปริมาตรโดยโมล ดังสมการที่ (2.2) ความหนาแน่นและปริมาตรโดยโมลแสดงดังภาพที่ 4.3 โดยพบว่าค่าความหนาแน่นและปริมาตรโดยโมลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามการเพิ่มปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์



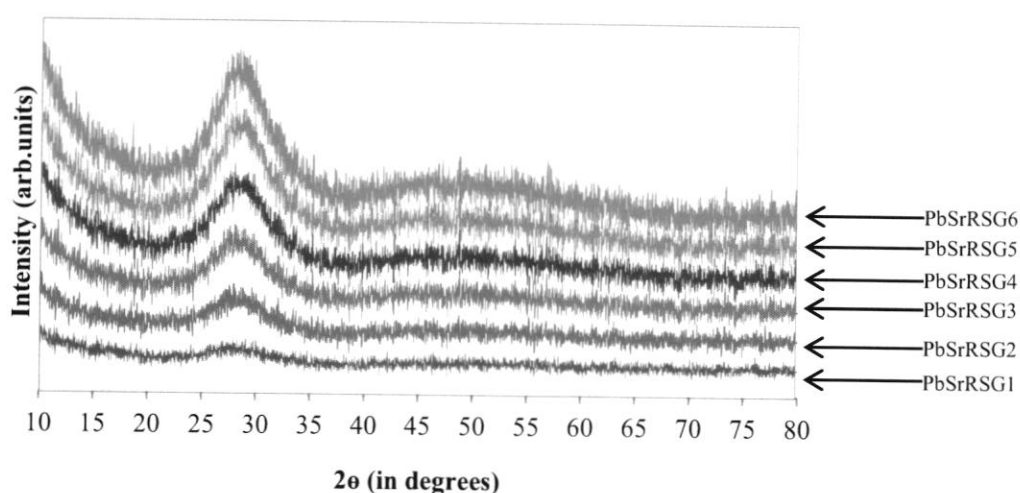
ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและปริมาตรโดยโมลกับปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$

จากภาพที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของแก้วจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงความเข้มข้นของตะกั่วออกไซด์ตั้งแต่ 0 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยโมล หลังจากนั้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงความเข้มข้นของตะกั่วออกไซด์ตั้งแต่ 30 ถึง 45 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณของตะกั่วออกไซด์ เนื่องจากความหนาแน่นของตะกั่ว (9.53 g/cm^3) [49] และสตรอนเทียม (4.70 g/cm^3) มีค่ามากกว่า

ซิลิกอน (2.648 g/cm^3) [50] ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของแก้ว เมื่อเติมตะกั่วออกไซด์เข้าไปในปริมาณที่มากขึ้นจึงทำให้ความหนาแน่นของแก้วตัวอย่างเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย [51] และพบว่าปริมาตรโดยโมลของตัวอย่างแก้วเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ ซึ่งปริมาตรโดยโมลคือปริมาตรของสารหนึ่งโมลของวัสดุในหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตร การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโดยโมลเป็นผลมาจากขนาดของรัศมีไอออน (ionic radius) ที่อยู่ในระบบแก้ว เนื่องจากรัศมีไอออนของตะกั่ว (1.19 \AA) [52] และสตรอนเทียม (1.18 \AA) มีขนาดใหญ่กว่า รัศมีไอออนของซิลิกอน (0.54 \AA) ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของแก้ว ทำให้ปริมาตรโดยโมลของแก้วมีขนาดเพิ่มขึ้น [45]

4.4 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

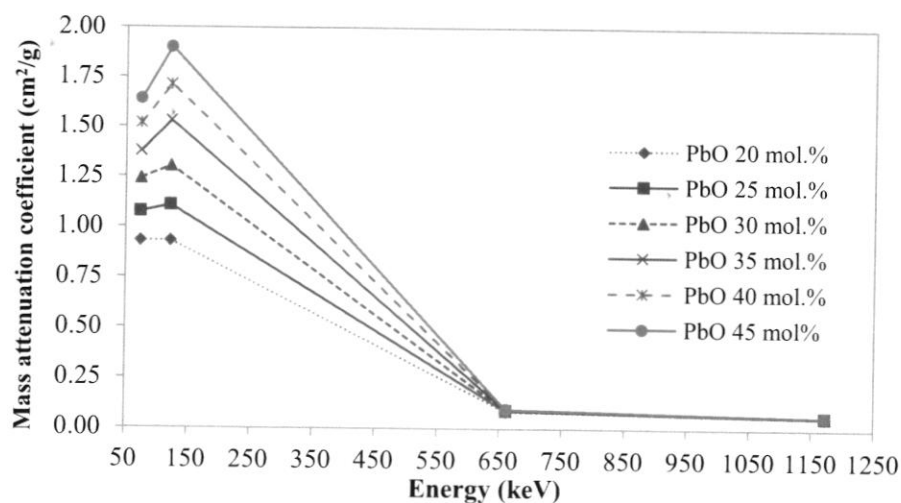
การวัดความเป็นผลึกหรือไม่เป็นผลึกของตัวอย่างแก้วในระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ เมื่อ x คือ 20, 25, 30, 35, 40 และ 45 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ตามลำดับ โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction: XRD) ซึ่งจะอาศัยหลักการของการยิงรังสีเอกซ์ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆกันโดยมีหัววัดเป็นตัวรับข้อมูล เนื่องจากองศาในการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆได้ [53] จากภาพที่ 4.4 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าไม่ปรากฏพีคใดๆ และปรากฏส่วนโค้งรัศมีกว้างที่มุมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (2θ) ในช่วง 25-35 องศา ซึ่งเป็นลักษณะของวัสดุอสัณฐาน [54] ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ตัวอย่างแก้วระบบนี้ไม่มีความเป็นผลึก หรือเป็นวัสดุอสัณฐานนั่นเอง



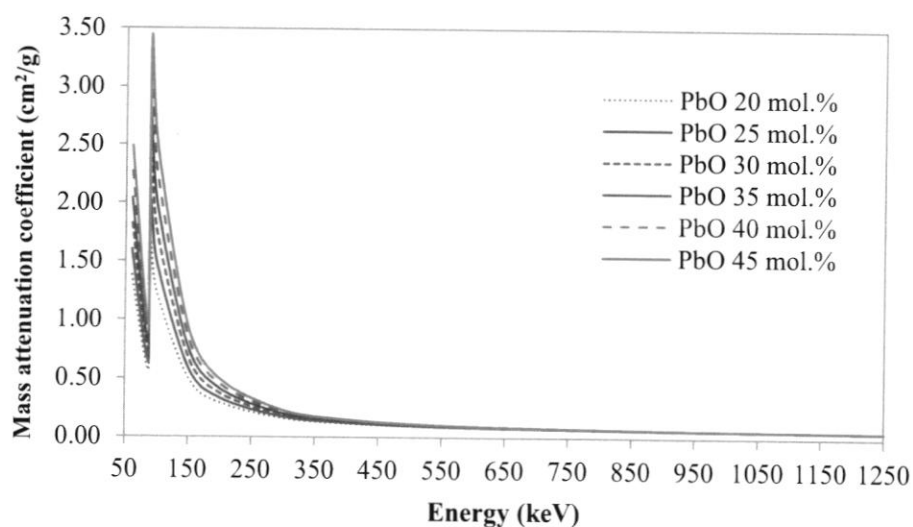
ภาพที่ 4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวอย่างแก้วในระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$

4.5 สมบัติทางรังสี

จากการศึกษาความสามารถในการลดทอนรังสี โดยที่พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นกับปริมาณสารดูดกลืนรังสี ความหนาของวัสดุกำบังรังสีและพลังงานของรังสี โดยตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสมบัติทางด้านรังสีประกอบด้วย ความหนาครึ่งค่า (half-value layer: HVL) คือความหนาของวัสดุซึ่งสามารถลดความเข้มของลำรังสีลงไปครึ่งหนึ่งจากความเข้มเดิม นอกจากนี้ในการพิจารณาการลดทอนรังสีในระดับโมเลกุลหรืออะตอม จะใช้ค่าระยะปลอดการชน (Mean free path: MFP) ซึ่งเป็นระยะทางเฉลี่ยที่โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้ก่อนที่จะชนกับโมเลกุลอื่น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือระยะทางโดยเฉลี่ยที่รังสีปริมาณหนึ่งหน่วยสามารถเดินทางไปในวัสดุก่อนที่จะถูกดูดกลืน ในการศึกษาความหนาครึ่งค่าและระยะปลอดการชนจะต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นและสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล ในงานวิจัยครั้งนี้ศึกษาด้วยเทคนิคการส่งผ่านแบบลำรังสีแคบ (Narrow beam transmission) โดยศึกษาที่พลังงาน 74.228, 122, 662 และ 1173 keV สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นสามารถหาได้จากการวัดความเข้มของรังสีก่อน (I_0) และความเข้มของรังสีเมื่อผ่านตัวอย่างแก้ว (I) โดยอาศัยความสัมพันธ์ของเบียร์-แลมเบิร์ต ดังสมการที่ (2.28) โดยค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นจะขึ้นอยู่กับความหนาของตัวอย่างแก้วตามความสัมพันธ์ของเบียร์-แลมเบิร์ต ดังนั้นจึงต้องมีการหาสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล ซึ่งสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลจะไม่ขึ้นอยู่กับความหนาของตัวอย่างแก้วเพราะคิดต่อความหนาแน่นของวัสดุ ดังนั้นสมบัติการลดทอนรังสีจึงขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของวัสดุ นอกจากค่าที่ได้จากการทดลองแล้ว สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลยังสามารถหาได้โดยการใช้โปรแกรม WinXcom ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองและโปรแกรม WinXcom แสดงในภาพที่ 4.5 และ 4.6



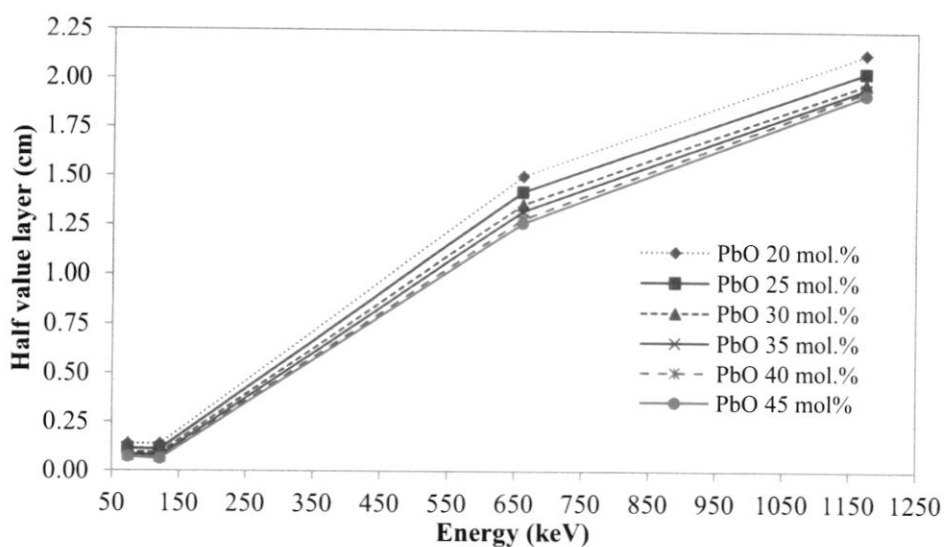
ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลที่ได้จากการทดลองของระบบ แก้ว 10SrO - xPbO - (90-x)RSG กับพลังงานโฟตอน



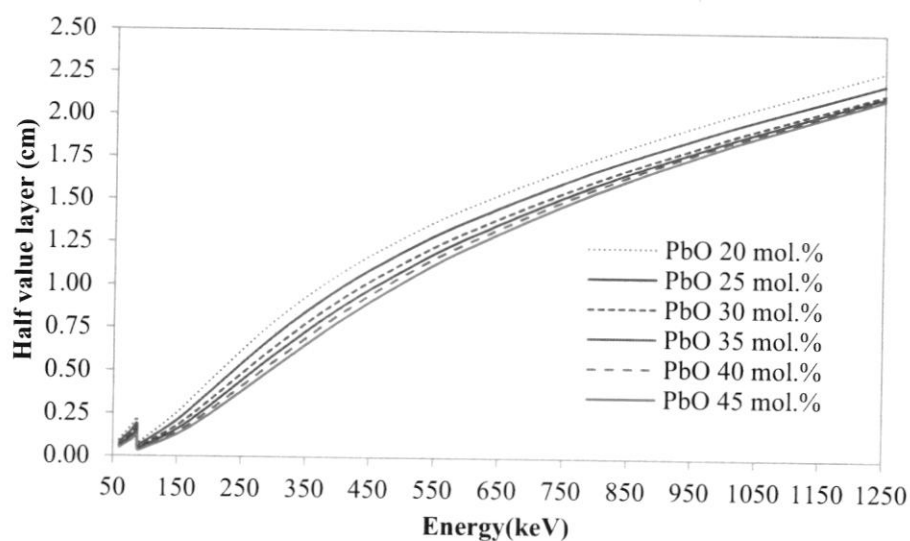
ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม WinXcom ของระบบแก้ว 10SrO - xPbO - (90-x)RSG กับพลังงานโฟตอน

จากภาพที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลที่ได้จากการทดลอง กับพลังงานโฟตอนในช่วง 74.228-1173 keV และภาพที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลจากการคำนวณทางทฤษฎีด้วยโปรแกรม WinXcom กับพลังงานโฟตอนในช่วงเดียวกัน พบว่าตัวอย่างแก้วระบบนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลระหว่างการทดลองและจาก

การคำนวณทางทฤษฎีมีแนวโน้มที่สอดคล้องกันและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่พลังงานโฟตอน 122 keV เนื่องจากเป็นผลจากตะกั่วที่เติมเข้าไปในโครงสร้างแก้วนั้นมีขอบการดูดกลืน (absorption edge) ที่พลังงาน 88 keV เมื่อพลังงานเพิ่มขึ้นเป็น 122 keV ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับขอบการดูดกลืนของตะกั่วจึงส่งผลให้สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลเพิ่มมากขึ้นด้วย และมีแนวโน้มลดลงเมื่อพลังงานของโฟตอนสูงขึ้นเป็น 662 และ 1173 keV ตามลำดับ ดังนั้นแสดงว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลขึ้นอยู่กับพลังงานของโฟตอน นอกจากนี้ยังมีอันตรกิริยาที่โฟตอนกระทำต่อตัวอย่างแก้ว เช่น ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก การกระเจิงแบบคอมป์ตัน และการผลิตอนุภาคคู่ โดยทั้ง 3 ปรากฏการณ์นี้จะขึ้นอยู่กับพลังงานของโฟตอน ความหนาแน่นของตัวอย่างแก้วและเลขอะตอม สำหรับช่วงพลังงาน 74.228 ถึง 662 keV พบว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลลดลงอย่างมาก เมื่อพลังงานโฟตอนเพิ่มขึ้น ซึ่งในช่วงพลังงานโฟตอนต่ำจะเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกมากและโอกาสการเกิดจะลดลงเมื่อมีพลังงานที่สูงขึ้น ในขณะที่ช่วงพลังงาน 662 ถึง 1173 keV พบว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลลดลงเล็กน้อย เมื่อพลังงานโฟตอนเพิ่มขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์ที่โดดเด่นคือการกระเจิงแบบคอมป์ตัน และการผลิตอนุภาคคู่ [55] โดยโอกาสการเกิดปรากฏการณ์ทั้ง 3 นี้มีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลและยังมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นครั้งค่าและระยะปลอดการชนแสดงดังภาพที่ 4.7 ถึง 4.10

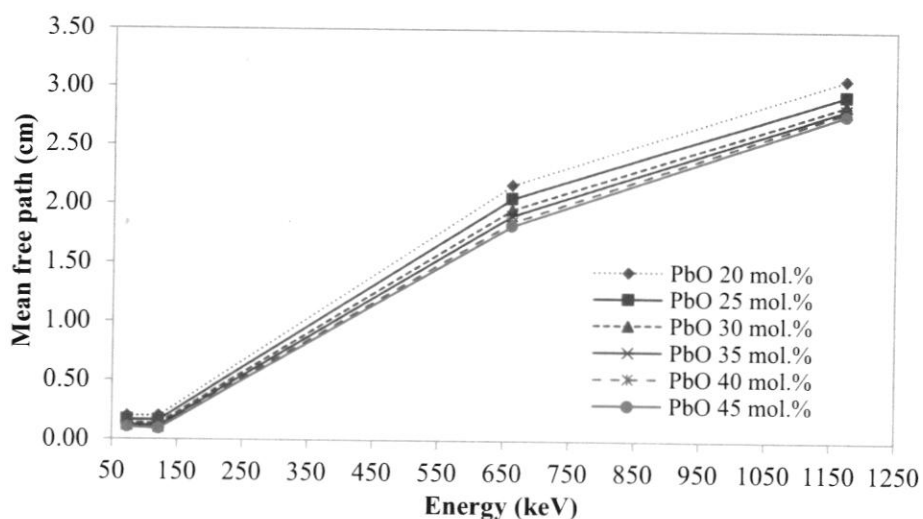


ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นครั้งค่าที่ได้จากการทดลองของระบบแก้ว 10SrO - xPbO - (90-x)RSG กับพลังงานโฟตอน

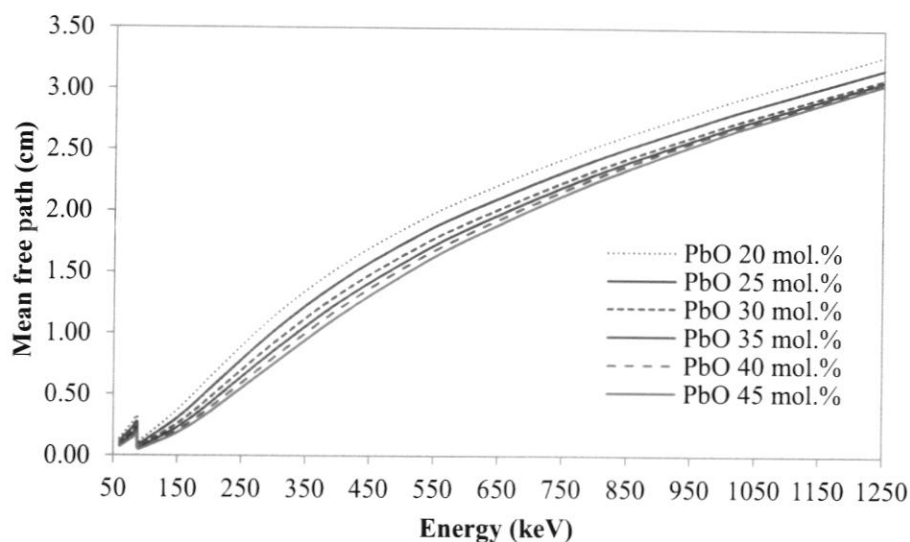


ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาครึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม WinXcom ของระบบแก้ว 10SrO - xPbO - (90-x)RSG กับพลังงานฟोटอน

จากภาพที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาครึ่งค่าที่ได้จากการทดลองกับพลังงานฟोटอนและภาพที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาครึ่งค่าจากการคำนวณทางทฤษฎีด้วยโปรแกรม WinXcom กับพลังงานฟोटอน พบว่าตัวอย่างแก้วระบบนี้มีค่าความหนาครึ่งค่าระหว่างการทดลองและจากการคำนวณทางทฤษฎีมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานของฟोटอนสูงขึ้น ดังนั้นค่าความหนาครึ่งค่าซึ่งเป็นค่าความหนาของตัวอย่างแก้วที่ทำให้ความแรงรังสีลดลงครึ่งหนึ่งจะขึ้นอยู่กับพลังงานฟोटอน ในการประยุกต์ใช้งานตัวอย่างแก้วระบบนี้จึงต้องคำนึงถึงพลังงานฟोटอนที่จะใช้งาน ซึ่งเมื่อต้องการใช้งานกับพลังงานฟोटอนต่ำ ตัวอย่างแก้วนี้สามารถกันรังสีได้แต่เมื่อพลังงานฟोटอนสูงขึ้นจะต้องเพิ่มความหนาของตัวอย่างแก้วเพื่อความเหมาะสมต่อการใช้งาน ในการลดทอนรังสีให้เหลือครึ่งหนึ่งของปริมาณเดิม



ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะปลอดการชนที่ได้จากการทดลองของระบบแก้ว 10SrO - xPbO - (90-x)RSG กับพลังงานโฟตอน

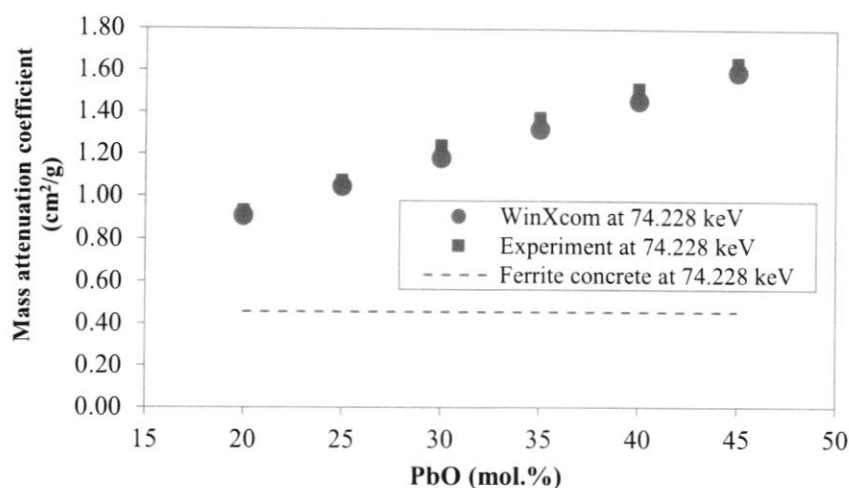


ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะปลอดการชนที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม WinXcom ของระบบแก้ว 10SrO - xPbO - (90-x)RSG กับพลังงานโฟตอน

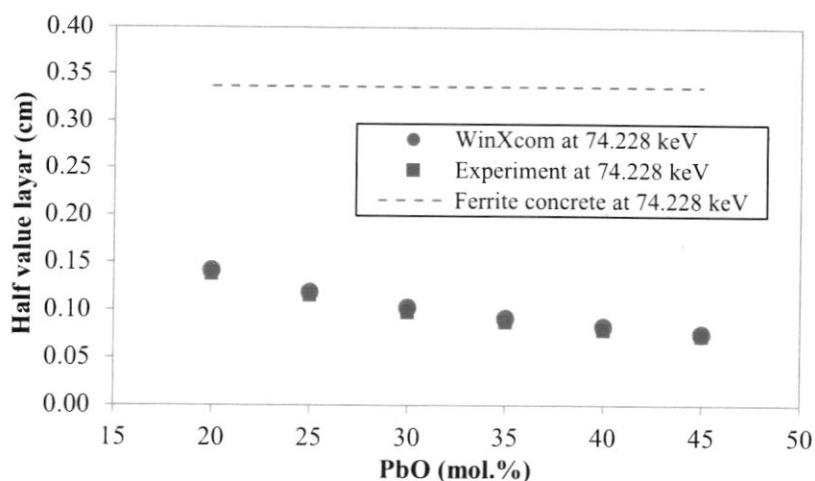
จากภาพที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะปลอดการชนจากการทดลองกับพลังงานโฟตอน และภาพที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะปลอดการชนจากการคำนวณทางทฤษฎีด้วยโปรแกรม WinXcom กับพลังงานโฟตอน พบว่าตัวอย่างแก้วระบบนี้มีระยะปลอดการชนระหว่างการทดลองและจากการคำนวณทางทฤษฎีมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานของโฟตอนสูงขึ้น ระยะปลอดการชนมีความสัมพันธ์กับความหนาครั้งค่า โดยเป็นระยะทางเฉลี่ยที่

โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้ก่อนที่จะชนกับโมเลกุลอื่นหรือเป็นระยะทางโดยเฉลี่ยที่รังสีปริมาณหนึ่งหน่วยสามารถเดินทางไปในวัสดุก่อนที่จะถูกดูดกลืน ในขณะที่ความหนาแน่นครีกราค่าเป็นปริมาณเฉลี่ยของวัสดุที่จำเป็นในการดูดกลืนรังสี 50 % ของปริมาณรังสีทั้งหมด ดังนั้นในการพิจารณาสมบัติทางด้านรังสีของตัวอย่างแก้วอาจใช้ค่าระยะปลอดการชนซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานโฟตอน โดยเมื่อพลังงานโฟตอนสูงขึ้นวัสดุจะมีค่าระยะปลอดการชนมากขึ้น

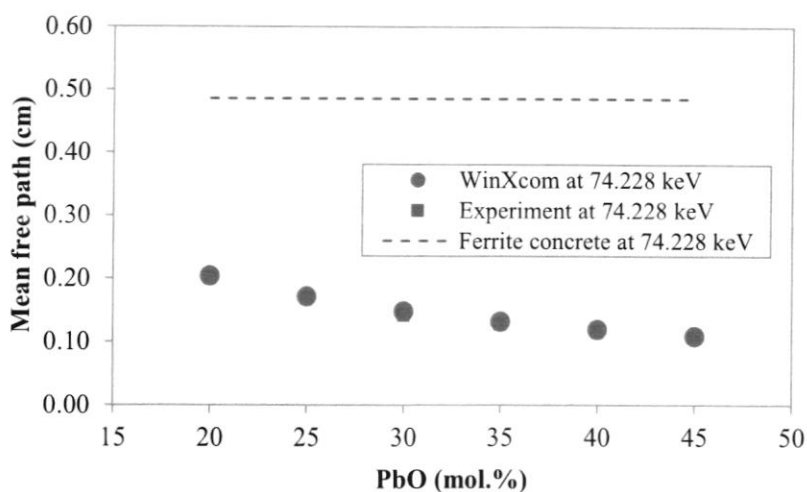
จากผลการทดลองที่กล่าวมา พบว่าที่พลังงานโฟตอนต่าง ๆ ตัวอย่างแก้วที่เติมตะกั่วออกไซด์ในปริมาณที่มากขึ้นจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลมากขึ้นด้วย ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นครีกราค่าและระยะปลอดการชนน้อยกว่าตัวอย่างแก้วที่เติมตะกั่วออกไซด์ในปริมาณที่น้อยลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณของตะกั่ว (Pb) ซึ่งมีเลขอะตอมมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบอื่น ๆ [56] นอกจากนี้ยังพบว่า ที่พลังงานโฟตอน 122 keV ให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลมากกว่าที่พลังงานอื่น จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นครีกราค่าและระยะปลอดการชนของตัวอย่างแก้วมีค่าน้อยกว่าที่พลังงานอื่นด้วย เนื่องจากที่พลังงานของโฟตอนต่ำนี้จะเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกที่มากและโอกาสการเกิดจะลดลงเมื่อมีพลังงานที่สูงขึ้น โดยโอกาสการเกิดปรากฏการณ์นี้มีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลและยังมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นครีกราค่าและระยะปลอดการชน ดังนั้นตัวอย่างแก้วระบบนี้จึงเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานที่พลังงานโฟตอน 122 keV มากกว่าพลังงานอื่น ๆ ที่ได้ศึกษาในงานวิจัยนี้



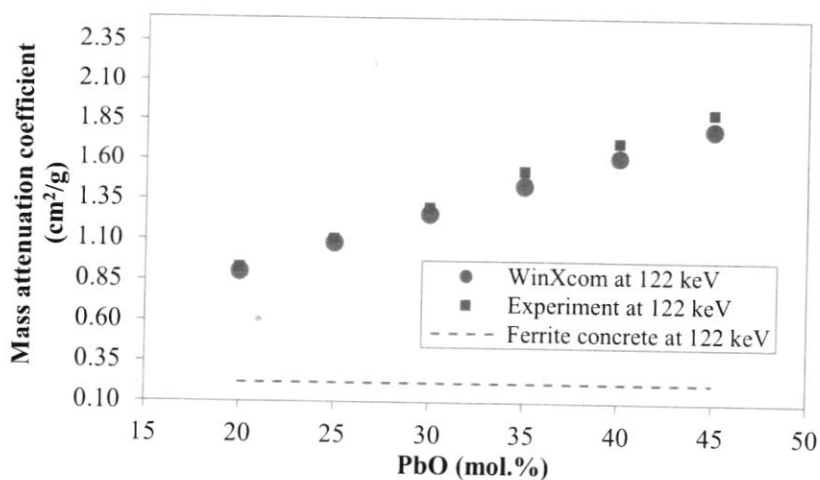
ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลอง จากการคำนวณ ตามปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ ที่พลังงาน 74.228 keV เทียบกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน



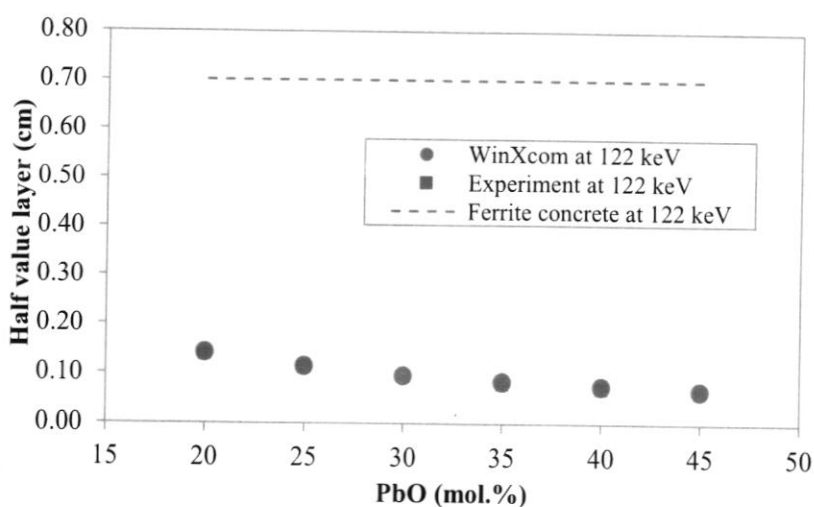
ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาครึ่งค่าของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลอง จากการคำนวณ ตามปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10\text{SrO}-x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ ที่พลังงาน 74.228 keV เทียบกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน



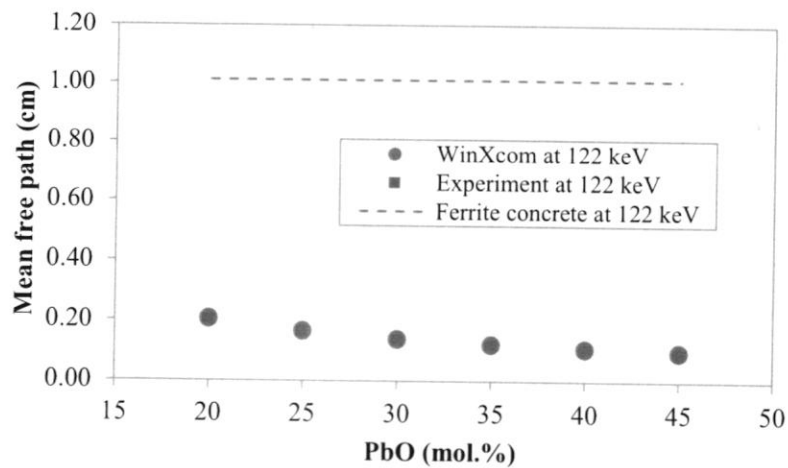
ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะปลอดการชนของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลอง จากการคำนวณ ตามปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10\text{SrO}-x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ ที่พลังงาน 74.228 keV เทียบกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน



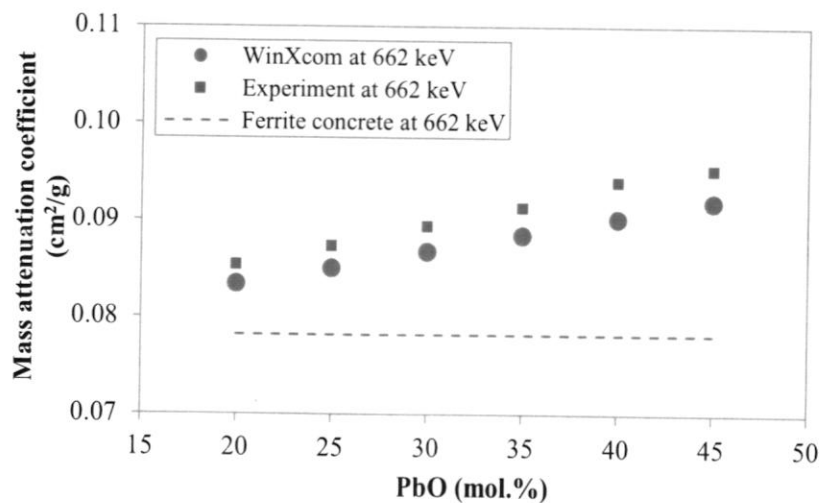
ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลอง จากการคำนวณ ตามปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ ที่พลังงาน 122 keV เทียบกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน



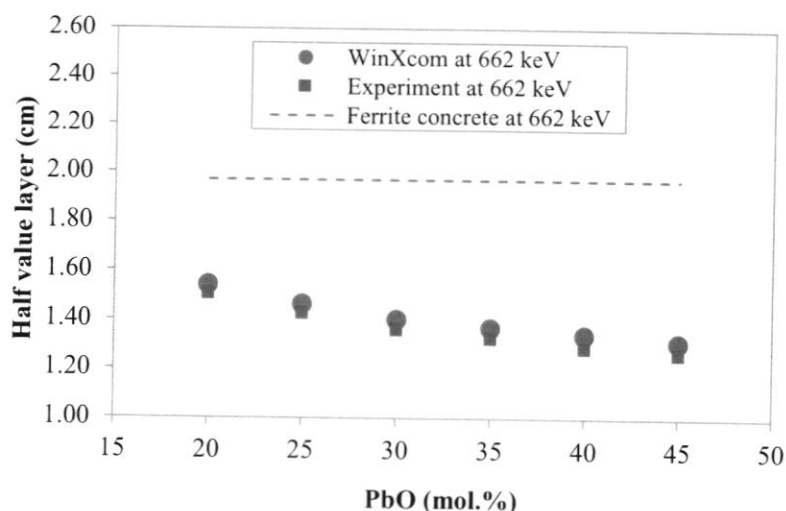
ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาครึ่งค่าของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลอง จากการคำนวณ ตามปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ ที่พลังงาน 122 keV เทียบกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน



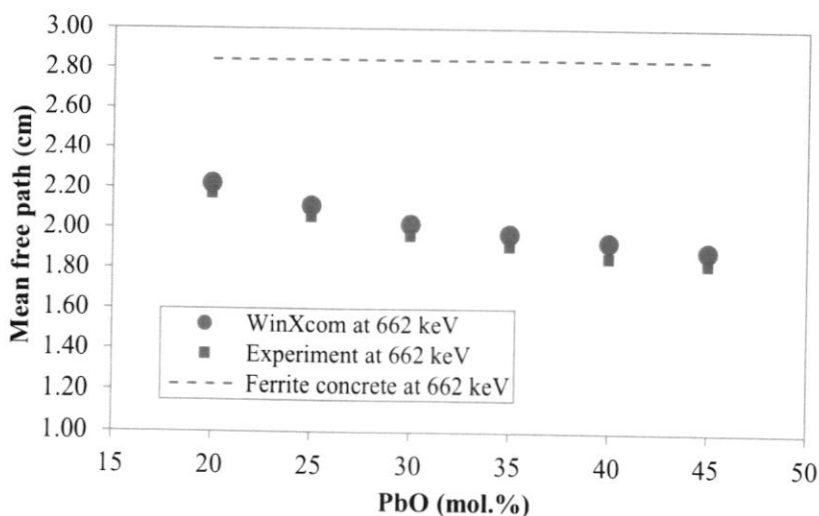
ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะปลอดการชนของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลอง จากการคำนวณ ตามปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10\text{SrO}-x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ ที่พลังงาน 122 keV เทียบกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน



ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลอง จากการคำนวณ ตามปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ ที่พลังงาน 662 keV เทียบกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน



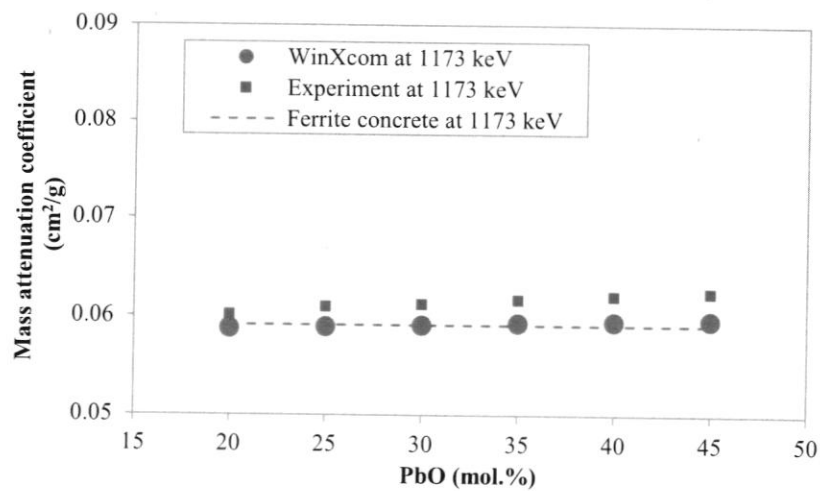
ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาครึ่งค่าของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลอง จากการคำนวณ ตามปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10\text{SrO}-x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ ที่พลังงาน 662 keV เทียบกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน



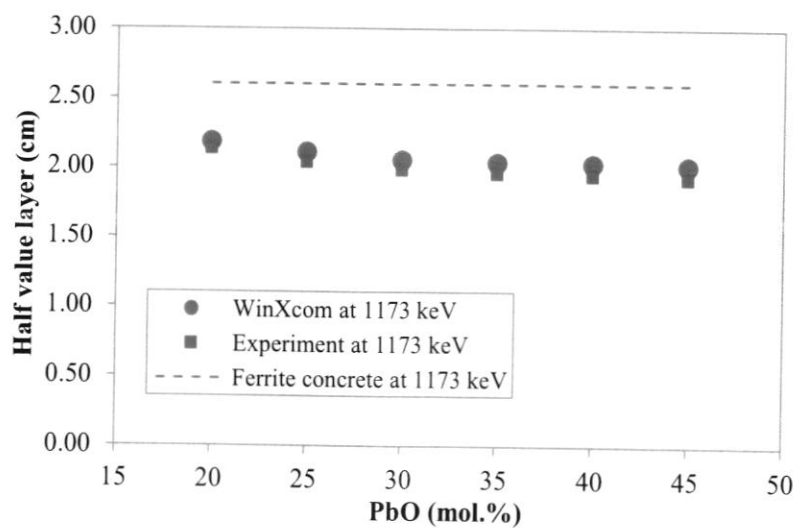
ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะปลอดการชนของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลอง จากการคำนวณ ตามปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10\text{SrO}-x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ ที่พลังงาน 662 keV เทียบกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน

จากภาพที่ 4.11, 4.14 และ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลอง จากการคำนวณโดยโปรแกรม WinXcom และคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน เทียบกับปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ ที่พลังงานโฟตอน 74.228, 122 และ 662 keV ตามลำดับ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการ

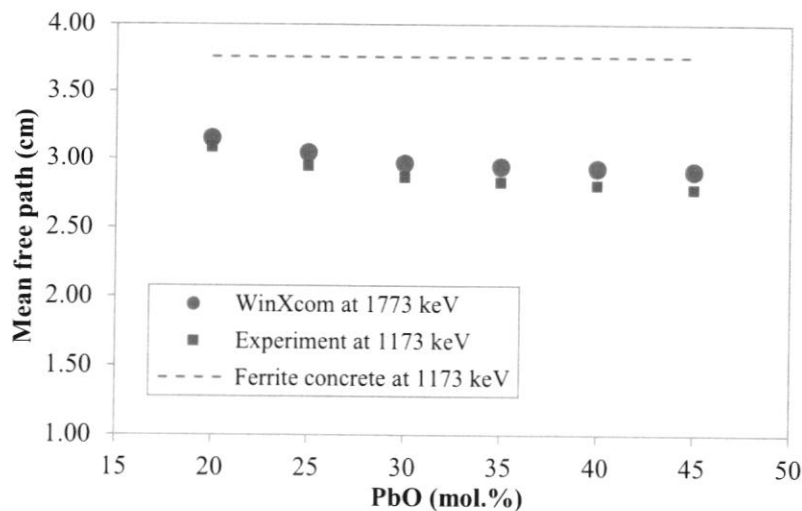
ทดลองและการคำนวณโดยโปรแกรม WinXcom มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากผลของตะกั่วซึ่งมีเลขอะตอมมากกว่าองค์ประกอบอื่น ๆ เมื่อมีปริมาณมากขึ้นจึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลมากขึ้นด้วย [56] และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน พบว่า ตัวอย่างแก้วมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลมากกว่าคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน แสดงว่าตัวอย่างแก้วระบบนี้สามารถกันรังสีได้ดีกว่าคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน จากภาพที่ 4.12, 4.15 และ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาครึ่งค่าของตัวอย่างแก้ว จากการคำนวณโดยโปรแกรม WinXcom และคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน เทียบกับปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ ที่พลังงาน 74.228, 122 และ 662 keV ตามลำดับ พบว่า ค่าความหนาครึ่งค่าของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลองและการคำนวณโดยโปรแกรม WinXcom มีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์มากขึ้น เนื่องจากความหนาครึ่งค่าเป็นปริมาณเฉลี่ยของตัวอย่างแก้วที่ใช้ในการดูดกลืนรังสีปริมาณครึ่งหนึ่งของปริมาณรังสีทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีปริมาณของตะกั่วในโครงสร้างแก้วมากขึ้นจะมีผลต่อความหนาของตัวอย่างแก้ว ซึ่งเมื่อตัวอย่างแก้วมีความหนาเพิ่มขึ้นจะมีความสามารถในการดูดกลืนรังสีไว้ได้มากขึ้นด้วย [55] และค่าความหนาครึ่งค่าของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาครึ่งค่าของตัวอย่างแก้วกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน พบว่าตัวอย่างแก้วมีค่าความหนาครึ่งค่าน้อยกว่าคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน แสดงว่าตัวอย่างแก้วที่มีความหนาสามารถกันรังสีได้ดีกว่าคอนกรีต จากภาพที่ 4.13, 4.16 และ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะปลอดการชนของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลองจากการคำนวณโดยโปรแกรม WinXcom และคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน เปรียบเทียบกับปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ ที่พลังงาน 74.228, 122 และ 662 keV ตามลำดับ พบว่า ระยะปลอดการชนของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลองและการคำนวณโดยโปรแกรม WinXcom นั้นมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์มากขึ้น เนื่องจากระยะปลอดการชนเป็นระยะทางโดยเฉลี่ยที่รังสีปริมาณหนึ่งหน่วยสามารถเดินทางไปในตัวอย่างแก้วก่อนที่จะถูกดูดกลืน แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีปริมาณของตะกั่วในโครงสร้างแก้วมากขึ้น รังสีจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในตัวอย่างแก้วได้ระยะทางที่น้อยลง [55] และระยะปลอดการชนของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ เมื่อเปรียบเทียบระยะปลอดการชนของตัวอย่างแก้วกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน พบว่า ตัวอย่างแก้วมีระยะปลอดการชนน้อยกว่าคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน ดังนั้นที่พลังงานโฟตอน 74.228, 122 และ 662 keV ตัวอย่างแก้วระบบนี้มีความสามารถในการลดทอนรังสีได้ดีกว่าคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน และตัวอย่างแก้วที่เติมตะกั่วออกไซด์ปริมาณ 45 เปอร์เซ็นต์โดยโมลมีความสามารถในการลดทอนรังสีได้ดีกว่าตัวอย่างแก้วอื่น



ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลอง จากการคำนวณ ตามปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในตัวอย่างแก้ว ที่พลังงาน 1173 keV เทียบกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน



ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาครึ่งค่าของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลอง จากการคำนวณ ตามปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในตัวอย่างแก้วที่พลังงาน 1173 keV เทียบกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน



ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะปลอดการชนของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลอง จากการคำนวณ ตามปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในตัวอย่างแก้วที่พลังงาน 1173 keV เทียบกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน

จากภาพที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลอง จากการคำนวณโดยโปรแกรม WinXcom และคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน เทียบกับปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ ที่พลังงาน 1173 keV พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณโดยโปรแกรม WinXcom มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากที่พลังงานสูงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นโดดเด่นคือ การกระเจิงแบบคอมป์ตันโดยอันตรกิริยานี้ไม่ขึ้นกับเลขอะตอมโดยตรง แต่ขึ้นกับความหนาแน่นอิเล็กตรอนของตัวกลาง และการผลิตอนุภาคคู่จะมีโอกาสการเกิดเพิ่มตามพลังงานโฟตอนและเลขอะตอมของตัวกลาง [55] แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตะกั่วในโครงสร้างแก้ว ที่พลังงานสูงจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน พบว่า ตัวอย่างแก้วมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณมากกว่าคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐานเพียงเล็กน้อย จากภาพที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นครั้งค่าของตัวอย่างแก้ว จากการคำนวณโดยโปรแกรม WinXcom และคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน เทียบกับปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ ที่พลังงาน 1173 keV พบว่า ค่าความหนาแน่นครั้งค่าของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลองและการคำนวณโดยโปรแกรม WinXcom มีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์มากขึ้น และ

ค่าความหนาครั้งค่าของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาครั้งค่าของตัวอย่างแก้วกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน พบว่า ตัวอย่างแก้วมีค่าความหนาครั้งค่าน้อยกว่าคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน จากภาพที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะปลอดการชนของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลอง จากการคำนวณโดยโปรแกรม WinXcom และคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน เทียบกับปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ ที่พลังงาน 1173 keV พบว่า ระยะปลอดการชนของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลองและการคำนวณโดยโปรแกรม WinXcom มีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์มากขึ้น และระยะปลอดการชนของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ เมื่อเปรียบเทียบระยะปลอดการชนของตัวอย่างแก้วกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน พบว่า ตัวอย่างแก้วมีระยะปลอดการชนน้อยกว่าคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน ดังนั้นที่พลังงานโฟตอน 1173 keV ตัวอย่างแก้วระบบนี้มีความสามารถในการลดทอนรังสีได้ดีกว่าคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน และตัวอย่างแก้วที่เติมตะกั่วออกไซด์ปริมาณ 45 เปอร์เซ็นต์โดยโมลมีความสามารถในการลดทอนรังสีได้ดีกว่าตัวอย่างแก้วอื่น นอกจากนี้ผลการทดลองที่พลังงานโฟตอน 1173 keV ยังมีแนวโน้มสอดคล้องกับที่พลังงานอื่นๆอีกด้วย เพียงแต่มีความสามารถในการลดทอนรังสีน้อยกว่าที่พลังงานอื่น

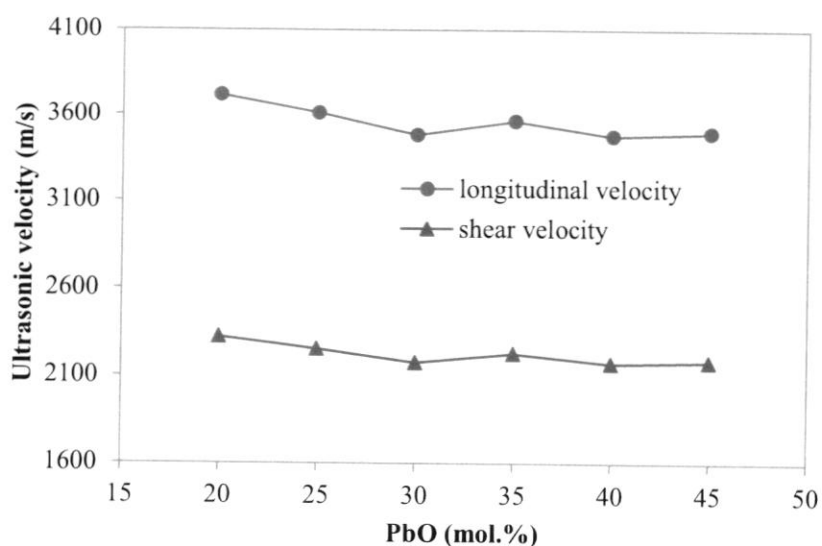
4.6 การศึกษาสมบัติยืดหยุ่น

4.6.1 การทดสอบด้วยเทคนิคอัลตราโซนิค

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่างๆ ของวัสดุแก้วจะมีความสัมพันธ์กับค่าแรงยึดเหนี่ยวและความต่างศักย์ระหว่างไอออนบวกและไอออนลบ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงชนิดของส่วนประกอบซึ่งจะมีผลต่อความแข็งแรงของพันธะทำให้โครงสร้างของแก้วเปลี่ยนไปซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับค่าโมดูลัสของยังส์ที่เป็นค่าแสดงพฤติกรรมด้านความแข็งแรง (fracture behavior) ของแก้ว ส่วนการเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสเชิงปริมาตรจะเป็นค่าที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงและค่าแรงยึดของพันธะ โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่หาด้วยเทคนิคอัลตราโซนิคจะมีค่าขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิคของตัวอย่างแก้ว [57] ส่วนค่าอัตราส่วนของปัวส์ซองส์จะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง [58] ดังนั้นจึงต้องอาศัยการวัดความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิคตามยาวและความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิคตามเฉือนของตัวอย่างแก้วระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ โดยใช้เทคนิคอัลตราโซนิค และใช้หัววัดความถี่ 4 MHz วัดที่อุณหภูมิห้อง โดยคำนวณความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิคได้จากสมการที่ (2.6) ผลที่ได้เพื่อคำนวณหาสมบัติความยืดหยุ่นของแก้ว ได้แก่ โมดูลัสตามยาว (Longitudinal modulus: L) โมดูลัสตามเฉือน (Shear modulus: G) โมดูลัสเชิงปริมาตร (bulk modulus: K) โมดูลัสของยังส์ (Young's modulus: E) อัตราส่วนปัวส์ซองส์ (Poisson's ratio: σ) และความแข็งระดับไมโคร (Micro-hardness: H) ตาม

สมการที่ (2.7) - (2.12) ในงานวิจัยนี้ค่าของความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแสดงในภาพที่ 4.23 โดยความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกตามยาวจะมีค่ามากกว่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกเฉือนประมาณ 1.6 เท่า เพราะคลื่นตามยาวมีทิศการสั่นของอนุภาคตัวกลางขนานกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น ส่วนคลื่นตามแนวเฉือนมีทิศการสั่นของอนุภาคตัวกลางตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น ดังนั้นระยะทางที่คลื่นเสียงเคลื่อนที่ในตัวอย่างแก้วตามแนวยาวจึงมากกว่าตามแนวเฉือน ส่งผลให้ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกตามยาวมีค่ามากกว่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกเฉือน [23] และจากการทดลองยังพบว่า ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกทั้งตามยาวและเฉือนมีแนวโน้มลดลง ในช่วงความเข้มข้นของตะกั่วออกไซด์ 20 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตะกั่วออกไซด์เป็น 35 เปอร์เซ็นต์โดยโมล จากนั้นความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกทั้งตามยาวและเฉือนมีค่าลดลงอีกครั้งเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตะกั่วออกไซด์เป็น 40 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตะกั่วออกไซด์เป็น 45 เปอร์เซ็นต์โดยโมล สาเหตุที่ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกทั้งตามยาวและเฉือนมีแนวโน้มลดลงมีความสัมพันธ์กับความแข็งของตัวอย่างแก้วที่ลดลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของตะกั่วออกไซด์นั้นจะทำให้เกิดการแตกหักของโครงสร้างแก้ว เพราะเกิดการก่อตัวของ non-bridging oxygen และการเกิด depolymerisation ซึ่งส่งผลต่อการเชื่อมต่อพันธะของโครงข่ายแก้ว [47] ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบนี้นำไปสู่การก่อตัวของพันธะ Si-O-Pb เมื่อตะกั่วออกไซด์เข้าไปแทรกในโครงสร้าง ซึ่งจะเพิ่มความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงระหว่างโซ่ซิลิเกตในโครงข่ายแก้ว [59]

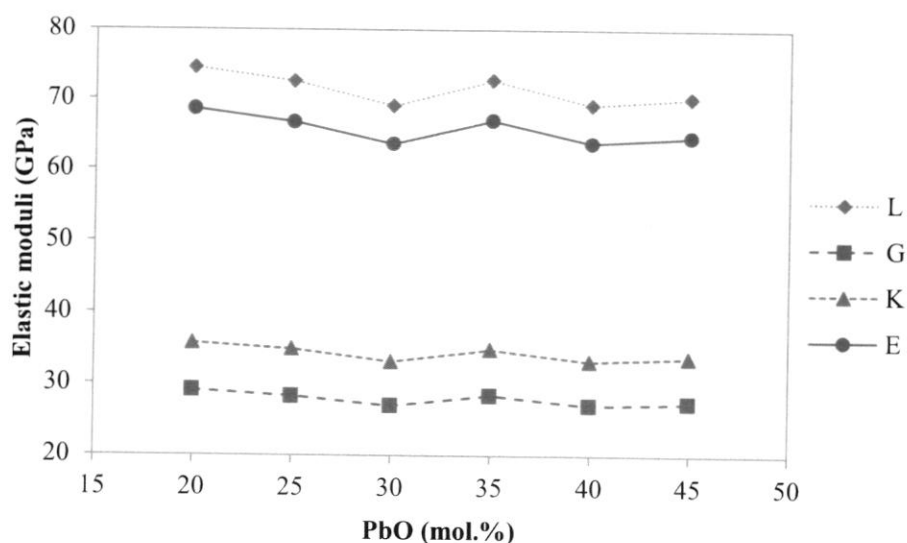
ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดลองจะแสดงในตารางที่ 4.2 และความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นเทียบกับเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในระบบแก้วนี้แสดงในภาพที่ 4.24 ซึ่งจากภาพ พบว่า ค่าโมดูลัสตามยาว โมดูลัสเฉือน โมดูลัสเชิงปริมาตร และโมดูลัสของยังส์มีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณของตะกั่วออกไซด์เพิ่มขึ้นในช่วง 20 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และโมดูลัสยืดหยุ่นเหล่านี้มีค่าเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้นของตะกั่วออกไซด์ 35 เปอร์เซ็นต์โดยโมล จากนั้นโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าลดลงที่ความเข้มข้นของตะกั่วออกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ความเข้มข้นของตะกั่วออกไซด์ 45 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่มีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงเป็นผลมาจากความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกที่มีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง แสดงว่าการเติมตะกั่วออกไซด์เป็นเปอร์เซ็นต์โดยโมลมีผลทำให้โครงสร้างภายในของแก้วเปลี่ยนแปลงไป [60] และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ลดลงนั้น เนื่องจากตะกั่วออกไซด์เข้าไปแทรกในโครงข่ายหลักของแก้วแล้วทำให้เกิดการทำลายพันธะในโครงข่ายแก้ว (NBO) เพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่าของความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกทั้งตามยาวและเฉือนลดลงเป็นผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลง สำหรับค่าโมดูลัสเชิงปริมาตรและค่าโมดูลัสของยังส์แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นของตะกั่วออกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยโมล จะทำให้แก้วระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ ทนต่อความเครียดที่มากระทำในทุกทิศทางได้ดีกว่าที่ความเข้มข้นอื่น ๆ



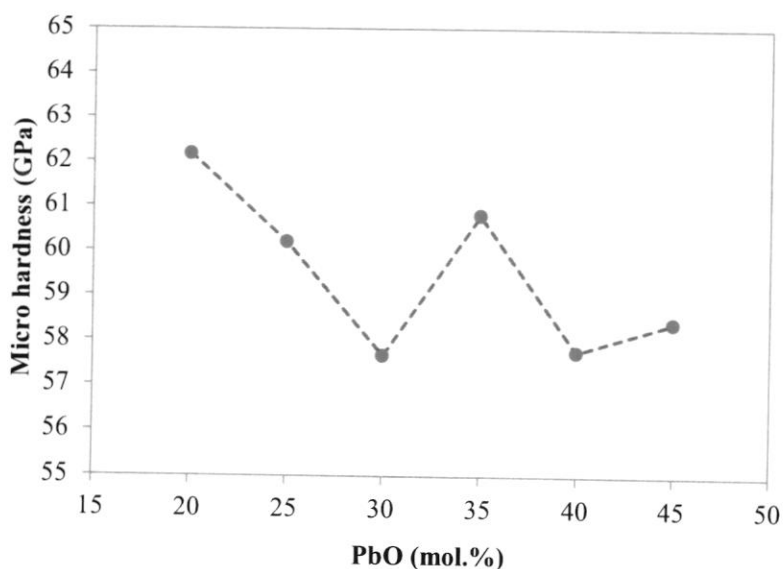
ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิคทั้งตามยาวและเฉือนเทียบกับเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$

ตารางที่ 4.2 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิคอัลตราโซนิคของระบบแก้ว $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$

PbO (mol%)	Longitudinal modulus: L (GPa) ± 0.03	Shear modulus: G (GPa) ± 0.05	Bulk modulus: K (GPa) ± 0.02	Young's modulus: E (GPa) ± 0.05	Micro-hardness: H (GPa) ± 0.14	Poisson's ratio: σ ± 0.00
20	74.5116	29.1029	35.7076	68.6564	62.1748	0.1795
25	72.6095	28.2909	34.8883	66.8131	60.1984	0.1808
30	69.1232	26.9951	33.1298	63.6871	57.6599	0.1796
35	72.7602	28.4347	34.8472	67.0633	60.8027	0.1793
40	69.2585	27.0417	33.2029	63.8037	57.7377	0.1797
45	70.2609	27.4017	33.7253	64.6860	58.3969	0.1803



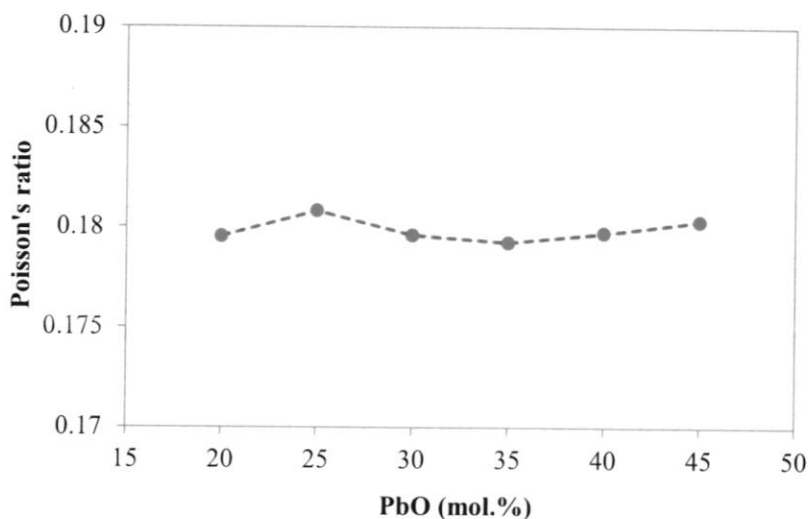
ภาพที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นเทียบกับเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$



ภาพที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งระดับไมโครเทียบกับเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$

ค่าความแข็งระดับไมโคร (Micro-hardness) คือค่าเสถียรภาพการคงรูป ซึ่งวัสดุใดที่มีค่าความแข็งระดับไมโครมาก ก็จะมีความสามารถในการต้านทานแรงกดได้มาก [61] จากภาพที่ 4.25 ค่าความแข็งระดับไมโคร มีแนวโน้มลดลงในช่วงความเข้มข้นของตะกั่วออกไซด์ 20 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยโมล โดยที่ความเข้มข้นของตะกั่วออกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยโมล มีค่าความแข็งระดับไมโครมาก

ที่สุด คือ 62.1748 GPa และที่ความเข้มข้นของตะกั่วออกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์โดยโมล มีค่าความแข็งระดับไมโครน้อยที่สุดเป็น 57.6599 GPa เนื่องจากปริมาณตะกั่วออกไซด์นั้นจะทำให้เกิด NBO และโครงข่ายของแก้วบางส่วนถูกทำลาย ส่งผลให้แก้วมีค่าความแข็งระดับไมโครน้อยลง และค่าความแข็งระดับไมโครมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้นของตะกั่วออกไซด์ 35 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากมีการเพิ่มขึ้นของไอออนที่มีขนาดใหญ่ในโครงสร้างแก้ว ในระบบแก้วนี้รัศมีไอออนของ Pb^{2+} (1.19 Å) มีขนาดใหญ่กว่ารัศมีไอออนของโครงสร้างหลักหรือ Si^{4+} (0.54 Å) ดังนั้นเมื่อไอออน Pb^{2+} เข้าไปจับกับพันธะโครงข่ายของโครงสร้างหลัก จึงส่งผลให้ความแข็งระดับไมโครของตัวอย่างแก้วมีค่าเพิ่มมากขึ้น จากนั้นค่าความแข็งระดับไมโครลดลงอีกครั้งที่ความเข้มข้นของตะกั่วออกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และค่าความแข็งระดับไมโครมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ความเข้มข้นของตะกั่วออกไซด์ 45 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ซึ่งเนื่องมาจากเหตุผลที่กล่าวข้างต้น



ภาพที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของปัวส์ซองส์เทียบกับเปอร์เซ็นต์โดยโมลของตะกั่วออกไซด์ในแก้วระบบ $10SrO - xPbO - (90-x)RSG$

จากภาพที่ 4.26 พบว่าอัตราส่วนปัวส์ซองส์มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่อยู่ระหว่าง 0.1793 ถึง 0.1808 ซึ่งมีคุณสมบัติเป็น high cross-link density ซึ่งอัตราส่วนปัวส์ซองส์ (σ) คือ อัตราส่วนของความเครียดตามขวางต่อความเครียดตามยาวที่เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึง ในวัสดุแก้วความเครียดแรงดึงที่เกิดขึ้นในโครงข่ายจะไม่ได้รับผลกระทบจากพันธะเชื่อมโยง ขณะที่ความเครียดตามขวางจะลดลงอย่างมากตามการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงในโครงข่ายแก้ว พันธะเชื่อมโยงเหล่านี้จะสร้างแรงโควาเลนต์ที่แข็งแรงเพื่อลดแรงต้านตามขวางจึงทำให้อัตราส่วนปัวส์ซองส์มีค่าลดลง จึงเป็นสาเหตุที่อัตราส่วนปัวส์ซองส์นั้นมีแนวโน้มลดลงในช่วงความเข้มข้นของตะกั่วออกไซด์ 30 ถึง

35 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และจากผลการทดลองยังพบว่าอัตราส่วนปัวส์ของสัมประสิทธิ์ค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ความเข้มข้นของตะกั่วออกไซด์ 25 และ 45 เปอร์เซ็นต์โดยโมล เนื่องมาจากความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงในโครงข่ายแก้วลดลง [62]

4.6.2 การคำนวณโดยใช้วิธี bond compression model

วิธีการคำนวณหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นวิธีนี้จะอาศัยค่าคุณสมบัติของส่วนประกอบดังนี้

4.6.2.1 จำนวนโครงข่ายพันธะต่อหน่วยปริมาตรของแก้วและเลขโคออร์ดิเนชันของไอออนบวก

4.6.2.2 จำนวนความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงต่อไอออนบวกในออกไซด์ i

4.6.2.3 ค่าคงที่ของแรงการยืด (stretching force constant)

ในการที่จะนำค่าเหล่านี้มาคำนวณหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะอาศัยสมการและคำอธิบายต่างๆ ที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 2.1.10.5 บทที่ 2

ตารางที่ 4.3 เลขโคออร์ดิเนชันของประจุบวก (n_f), จำนวนความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงต่อประจุบวกในออกไซด์ i (n_c), ความยาวพันธะระหว่างประจุลบและประจุบวก (r) และค่าคงที่ของแรงการยืดลำดับแรกของออกไซด์ (f)

ออกไซด์	n_f	n_c	r (nm)	f (N/m)
SiO ₂	4	2	0.186	299.0596
PbO	6	4	0.229	439.3568
SrO	4	2	0.162	382.5093

ตารางที่ 4.4 จำนวนโครงข่ายพันธะต่อหน่วยปริมาตรของแก้ว (n_b), ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงโดยเฉลี่ย (\bar{n}_c), จำนวนประจุบวกต่อหน่วยสูตรแก้ว (N_c) และค่าคงที่ของแรงการยืดพันธะโดยเฉลี่ย (\bar{F})

PbO (mol.%)	n_b ($\times 10^{28} \text{ m}^{-3}$)	\bar{n}_c	N_c	\bar{F} (N/m)
20	13.3114	2.4	3	344.9088
25	13.1479	2.5	3	353.2431
30	12.9247	2.6	3	361.2150
35	12.5086	2.7	3	368.8477
40	12.0913	2.8	3	376.1624
45	11.7565	2.9	3	383.1785

จากผลการคำนวณในตารางที่ 4.4 พบว่า ระบบแก้ว $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$ เมื่อเพิ่มปริมาณของตะกั่วออกไซด์ จะทำให้ค่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงโดยเฉลี่ย (\bar{n}_c) นั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากมีการแทนที่ของไอออนบวกของตัวเติมที่มีจำนวนเลขโคออร์ดิเนชันที่มากกว่าไอออนบวกที่อยู่ในโครงสร้างเดิม และยังพบว่าจำนวนโครงข่ายพันธะต่อหน่วยปริมาตรของแก้วนั้น (n_p) มีแนวโน้มที่ลดลง เมื่อปริมาณของตะกั่วออกไซด์เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.5 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี bond compression model ของระบบแก้ว $10\text{SrO} - x\text{PbO} - (90-x)\text{RSG}$

PbO (mol.%)	L_{bc} (GPa)	G_{bc} (GPa)	K_{bc} (GPa)	E_{bc} (GPa)	σ_{bc}
20	83.6921	19.4762	57.7887	52.5277	0.3485
25	83.9759	19.1861	58.4583	51.8824	0.3521
30	83.7475	18.7855	58.7627	50.9295	0.3556
35	82.1277	18.0867	58.0724	49.1568	0.3589
40	80.3552	17.3737	57.2481	47.3329	0.3622
45	79.0052	16.7699	56.7012	45.7950	0.3654

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่คำนวณได้จากวิธี bond compression model ประกอบด้วย โมดูลัสตามยาว โมดูลัสเฉือน โมดูลัสเชิงปริมาตร โมดูลัสของยังส์ และอัตราส่วนของปัวส์ซอง ซึ่งผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่า ค่าโมดูลัสเชิงปริมาตรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของตะกั่วออกไซด์จาก 20 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของตะกั่วออกไซด์จาก 35 ถึง 45 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ซึ่งเป็นผลมาจากการลดลงของค่าจำนวนโครงข่ายพันธะต่อหน่วยปริมาตรของแก้ว (n_p) ส่วนค่าอัตราส่วนปัวส์ซองส์ของระบบแก้วนี้ พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณของตะกั่วออกไซด์เป็นเปอร์เซ็นต์โดยโมล ซึ่งค่านี้มีแนวโน้มเดียวกันกับค่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงโดยเฉลี่ยของตัวอย่างแก้ว (\bar{n}_c) สำหรับค่าโมดูลัสเฉือนพบว่า มีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณของตะกั่วออกไซด์เป็นเปอร์เซ็นต์โดยโมล โดยค่าโมดูลัสเฉือนสามารถคำนวณได้จากโมดูลัสเชิงปริมาตรและอัตราส่วนของปัวส์ซอง ค่าโมดูลัสตามยาวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของตะกั่วออกไซด์จาก 20 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของตะกั่วออกไซด์จาก 30 ถึง 45 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ทั้งนี้เป็นผลมาจากค่าโมดูลัสเชิงปริมาตรและโมดูลัสเฉือน ส่วนค่าโมดูลัสของยังส์มีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณของตะกั่วออกไซด์เป็นเปอร์เซ็นต์โดยโมล เนื่องจากผลของโมดูลัสเฉือนที่มีแนวโน้มลดลง

4.6.3 การคำนวณโดยใช้วิธี Makishima-Mackenzie model

การหาโมดูลัสยืดหยุ่นด้วยวิธีนี้อาศัยค่าความหนาแน่นของการบรรจุ (V_f) และพลังงานการสลายพันธะ (G_f) ของแต่ละองค์ประกอบของแก้ว ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.1.10.6 บทที่ 2 โดยค่าโมดูลัสของยังส์ที่หาได้ด้วยวิธีนี้จะหาได้จากค่าพลังงานของแรงดึงดูด (energy of attraction) ซึ่งในที่นี้คือ ผลคูณระหว่างค่าความหนาแน่นของการบรรจุโดยรวม (V_f) และค่าพลังงานการสลายพันธะโดยรวม (G_f) ซึ่งผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี Makishima-Mackenzie model ของระบบแก้ว 10SrO - xPbO - (90-x)RSG

PbO(mol.%)	V_f	G_f (10^6 kJ/cm ³)	E_m (GPa)	K_m (GPa)	G_m (GPa)	σ_m
20	0.6565	59.1650	77.6883	46.5311	31.7943	0.2217
25	0.6275	58.2145	73.0565	41.8200	30.2175	0.2088
30	0.5971	57.2640	68.3821	37.2478	28.6352	0.1940
35	0.5596	56.3135	63.0211	32.1704	26.8517	0.1735
40	0.5239	55.3630	58.0134	27.7290	25.1946	0.1513
45	0.4936	54.4125	53.7183	24.1904	23.7714	0.1299

จากผลการคำนวณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นด้วยวิธี Makishima-Mackenzie model ประกอบด้วย โมดูลัสเฉือน โมดูลัสเชิงปริมาตร โมดูลัสของยังส์ และอัตราส่วนของปัวส์ซอง พบว่า ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเหล่านี้มีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณของตะกั่วออกไซด์เป็นเปอร์เซ็นต์โดยโมล ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่าความหนาแน่นของการบรรจุโดยรวม (V_f) และพลังงานการสลายพันธะโดยรวม (G_f) ที่มีค่าลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณของตะกั่วออกไซด์เป็นเปอร์เซ็นต์โดยโมล ซึ่งค่าความหนาแน่นของการบรรจุโดยรวมจะแปรผกผันกับปริมาตรโดยโมลที่มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถสันนิษฐานได้ว่าการแทรกตัวของตะกั่ว (Pb) จะอยู่ในรูปของสารประกอบ PbO จึงทำให้ปริมาตรหนึ่งหน่วยมีค่าเพิ่มขึ้น โดยพิจารณาจากค่าปริมาตรโดยโมลที่มีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิคอัลตราโซนิค การคำนวณด้วยวิธี bond compression model และวิธี Makishima-Mackenzie model ของระบบแก้ว 10SrO - xPbO - (90-x)RSG

Elastic moduli		PbO 20 mol.%	PbO 25 mol.%	PbO 30 mol.%	PbO 35 mol.%	PbO 40 mol.%	PbO 45 mol.%
Young's modulus (GPa)	E	68.6564	66.8131	63.6871	67.0633	63.8037	64.6860
	E _{bc}	52.5277	51.8824	50.9295	49.1568	47.3329	45.7950
	E _m	77.6883	73.0565	68.3821	63.0211	58.0134	53.7183
Bulk modulus (GPa)	K	35.7076	34.8883	33.1298	34.8472	33.2029	33.7253
	K _{bc}	57.7887	58.4583	58.7627	58.0724	57.2481	56.7012
	K _m	46.5311	41.8200	37.2478	32.1704	27.7290	24.1904
Shear modulus (GPa)	G	29.1029	28.2909	26.9951	28.4347	27.0417	27.4017
	G _{bc}	19.4762	19.1861	18.7855	18.0867	17.3737	16.7699
	G _m	31.7943	30.2175	28.6352	26.8517	25.1946	23.7714
Poisson's ratio	σ	0.1795	0.1808	0.1796	0.1793	0.1797	0.1803
	σ_{bc}	0.3485	0.3521	0.3556	0.3589	0.3622	0.3654
	σ_m	0.2217	0.2088	0.1940	0.1735	0.1513	0.1299

จากตารางที่ 4.7 แสดงข้อมูลค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิคอัลตราโซนิค การคำนวณด้วยวิธี bond compression model และวิธี Makishima-Mackenzie model ของตัวอย่างแก้ว และผลการคำนวณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่าง ๆ ด้วยวิธีการคำนวณทั้ง 2 วิธีนั้น ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิคอัลตราโซนิค ซึ่งเป็นวิธีอ้างอิง พบว่า ค่าโมดูลัสของยังส์ ค่าโมดูลัสเชิงปริมาตร ค่าโมดูลัสเฉือน และอัตราส่วนของปัวซองส์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี Makishima-Mackenzie model มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง ส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี bond compression model มีความสัมพันธ์กับจำนวนโครงข่ายพันธะต่อหน่วยปริมาตรของแก้ว จำนวนความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง และค่าคงที่ของแรงการยึดโดยเฉลี่ย จึงทำให้ผลการทดลองและผลการคำนวณมีค่าแตกต่างกันมาก ทั้งนี้ก็เนื่องจากพื้นฐานของทฤษฎีที่อาจใช้องค์ประกอบของแก้วในการคำนวณแตกต่างกัน ส่วนวิธี Makishima-Mackenzie model มีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นของการบรรจุและพลังงานการสลายพันธะของแต่ละองค์ประกอบของแก้ว ซึ่งค่าเหล่านี้ในทางทฤษฎีอาจมีความแตกต่างกับค่าจากการทดลองของตัวอย่างแก้ว เนื่องจากตัวอย่างแก้วในงานวิจัยนี้ผลิตจากขยะซิลิกาเจลซึ่งไม่ได้เป็นสารบริสุทธิ์ จึงทำให้ผลการทดลองและผลการคำนวณมีค่าแตกต่างกันได้

บทที่ 5

สรุปผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการทดลองพบว่า ซิลิกาเจลที่เสื่อมสภาพมีองค์ประกอบหลักคือ ออกซิเจน (O) และซิลิกอน (Si) จึงสามารถนำไปใช้เป็นโครงสร้างหลักในการหลอมแก้วได้ ตัวอย่างแก้วมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ตัวอย่างแก้วมีสีเขียวยิ่งเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณตะกั่วออกไซด์เป็นเปอร์เซ็นต์โดยโมล จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าปรากฏส่วนโค้งรัศมีกว้างที่มุมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในช่วง 25-35 องศา ซึ่งเป็นลักษณะของวัสดุอสัณฐาน ความหนาแน่นและปริมาตรโดยโมลของตัวอย่างแก้วจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณการเติมตะกั่วออกไซด์ เนื่องจากผลของความหนาแน่นและรัศมีไอออนของตะกั่วออกไซด์และสตรอนเทียมออกไซด์ที่มีค่ามากกว่าซิลิกอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของแก้วนี้

จากการศึกษาสมบัติทางรังสีของตัวอย่างแก้วด้วยเทคนิคการส่งผ่านแบบลำรังสีแคบ (Narrow beam transmission) ที่พลังงาน 74.228, 122, 662 และ 1173 keV เปรียบเทียบกับการคำนวณโดยโปรแกรม WinXcom และคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน พบว่า ตัวอย่างแก้วระบบที่ถูกศึกษานี้มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลระหว่าง การทดลองและจากการคำนวณทางทฤษฎีมีแนวโน้มที่สอดคล้องกันและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่พลังงานโฟตอน 122 keV และมีแนวโน้มลดลงเมื่อพลังงานของโฟตอนสูงขึ้นเป็น 662 และ 1173 keV ตามลำดับ และที่พลังงานโฟตอนต่าง ๆ ตัวอย่างแก้วที่เติมตะกั่วออกไซด์ในปริมาณที่มากขึ้นจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลมากขึ้นด้วย ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นค่าและระยะปลอดการชนน้อยกว่าตัวอย่างแก้วที่เติมตะกั่วออกไซด์ในปริมาณที่น้อยลง นอกจากนี้ยังพบว่า ที่พลังงานโฟตอน 122 keV ให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลมากกว่าที่พลังงานอื่น ดังนั้นตัวอย่างแก้วระบบนี้จึงเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานที่พลังงานโฟตอน 122 keV มากกว่าพลังงานอื่น ๆ ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ และยังพบว่าตัวอย่างแก้วระบบนี้มีความสามารถในการลดทอนรังสีได้ดีกว่าคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน และตัวอย่างแก้วที่เติมตะกั่วออกไซด์ปริมาณ 45 เปอร์เซ็นต์โดยโมลมีความสามารถในการลดทอนรังสีได้ดีกว่าตัวอย่างแก้วอื่น

จากการศึกษาสมบัติยืดหยุ่นของตัวอย่างแก้วทั้งจากการทดลองด้วยเทคนิคอัลตราโซนิคและจากการคำนวณด้วยวิธี Makishima-Mackenzie model และวิธี bond compression model พบว่าจากการทดลอง ค่าโมดูลัสตามยาว โมดูลัสเฉือน โมดูลัสเชิงปริมาตร และโมดูลัสของยังส์มีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณของตะกั่วออกไซด์เพิ่มขึ้นในช่วง 20 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และโมดูลัสยืดหยุ่นเหล่านี้มีค่าเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้นของตะกั่วออกไซด์ 35 เปอร์เซ็นต์โดยโมล จากนั้นโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าลดลงที่ความเข้มข้นของตะกั่วออกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ความเข้มข้นของตะกั่วออกไซด์ 45 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่มีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงเป็นผลมาจากความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิคที่มีความสอดคล้องกันในแนวมโน้มที่เพิ่มขึ้นและลดลง สำหรับค่าโมดูลัสเชิงปริมาตรและค่าโมดูลัสของยังส์ที่ความเข้มข้นของตะกั่วออกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยโมล จะทำให้แก้วระบบนี้ทนต่อความเครียดที่มากระทำในทุกทิศทางได้ดีกว่าที่ความเข้มข้นอื่น ๆ ค่าความแข็งแรงระดับไมโครมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณตะกั่วออกไซด์เป็นเปอร์เซ็นต์โดยโมล ที่ความเข้มข้นของ PbO 20 เปอร์เซ็นต์โดยโมล จะมีค่าความแข็งแรงระดับไมโครมากที่สุดที่ 62.1748 GPa อัตราส่วนปัวส์ของสมีแนวมโน้มค่อนข้างคงที่อยู่ระหว่าง 0.1793 ถึง 0.1808 ซึ่งมีคุณสมบัติเป็น high cross-link density จากผลการคำนวณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นด้วยวิธี bond compression model พบว่าค่าโมดูลัสเชิงปริมาตรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของตะกั่วออกไซด์จาก 20 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของตะกั่วออกไซด์จาก 35 ถึง 45 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ส่วนค่าอัตราส่วนปัวส์ของสมีแนวมโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเพิ่มปริมาณของตะกั่วออกไซด์เป็นเปอร์เซ็นต์โดยโมล สำหรับค่าโมดูลัสเฉือนและค่าโมดูลัสของยังส์มีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณของตะกั่วออกไซด์เป็นเปอร์เซ็นต์โดย ค่าโมดูลัสตามยาวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของตะกั่วออกไซด์จาก 20 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และค่าโมดูลัสตามยาวมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณของตะกั่วออกไซด์จาก 30 ถึง 45 เปอร์เซ็นต์โดยโมล จากผลการคำนวณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นด้วยวิธี Makishima-Mackenzie model พบว่า ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเหล่านี้มีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณของตะกั่วออกไซด์เป็นเปอร์เซ็นต์โดยโมล เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองพบว่า ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และอัตราส่วนปัวส์ของสมีที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี Makishima-Mackenzie model มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง ส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนของปัวส์ของสมีที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี bond compression model มีค่าแตกต่างกับค่าที่ได้จากการทดลองมาก อาจเนื่องมาตัวอย่างแก้วในงานวิจัยนี้ผลิตจากขยะซิลิกาเจลซึ่งไม่ได้เป็นสารบริสุทธิ์ ซึ่งอาจจะมืองค์ประกอบบางชนิดที่วิธีการตรวจหาค่าประกอบไม่สามารถหาได้ ดังนั้นจึงส่งผลกระทบต่อผลการคำนวณด้วยวิธี bond compression model ที่ต้องใช้ค่าความยาวของพันธะมาคำนวณ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของตัวอย่างแก้วด้วยเทคนิคหรือวิธีการใหม่ ๆ ที่หลากหลายมากขึ้น เพื่อให้ผลการทดลองที่ชัดเจนขึ้น ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการนำตัวอย่างแก้วไปประยุกต์ใช้งานได้กว้างขวางมากขึ้น เช่น การศึกษาของ Raman ใช้เพื่อระบุการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในโครงสร้างด้วยการระบุการปรากฏตัวของโหมดต่าง ๆ (การยืดหรือการสั้นสะเทือน) การศึกษาสมบัติทางแสงของตัวอย่างแก้วโดยการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนของแสงในช่วง UV-visible และการศึกษาอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงเฟสของแก้วโดยใช้เทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมพร จงงค์. “ประโยชน์ของพลังงานนิวเคลียร์ในกิจการต่างๆ”, การใช้ประโยชน์จากพลังงานนิวเคลียร์ในประเทศไทย. <http://www.rmutphysics.com/PHYSICS/oldfront/65/nuclear1/nuceng.html>. 2 มีนาคม, 2560.
- [2] ยุทธชัย เรืองรัตน์. (2558). “ชนิดของรังสี”, รังสีในชีวิตประจำวัน. <http://share.psu.ac.th/blog/service-engineer/39353>. 2 มีนาคม, 2560.
- [3] รุ่งทิพย์ อุดมวิเศษสันต์. “การป้องกันอันตรายจากรังสี”, การป้องกันอันตรายจากรังสี. <http://www.vibhavadi.com/health183.html>. 3 มีนาคม, 2560.
- [4] พิสิทธ์ราชมงคล. “กัมมันตภาพรังสี...คืออะไร?”, นิวเคลียร์. <http://www.rmutphysics.com/PHYSICS/oldfront/65/nuclear1/item3.html>. 4 มีนาคม, 2560.
- [5] Issa, S.A.M. “Effective atomic number and mass attenuation coefficient of PbO–BaO–B₂O₃ glass system”, *Radiation Physics and Chemistry*. 120: 33–37; March, 2016.
- [6] โครงการบริการข้อมูลวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุแก้ว. “วัตถุดิบในการหลอมแก้ว”, ข้อมูลแก้ว. <http://www2.mtec.or.th/th/research/GSAT/Glassweb/rawmat.html>. 6 มีนาคม, 2560.
- [7] บริษัท รุ่งพัฒนา อิมพอร์ต เอ็กซ์พอร์ต จำกัด. “ซิลิกาเจลคืออะไร”, ผลิตภัณฑ์ดูดความชื้นซิลิกาเจล. http://www.silicathai.com/product_silicagel.html. 6 มีนาคม, 2560.
- [8] บจก.เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น. “สินค้าหรือผลิตภัณฑ์ใดที่ควรใช้ Silica Gel”, Silica gel (สารดูดความชื้น). <https://www.chemipan.com/home/index.php/635.html>. 6 มีนาคม, 2560.
- [9] นิภาธร วานม่วง. พฤติกรรมการบริโภคขนมขบเคี้ยวของวัยรุ่น กรณีศึกษานิสิตสาขา สุขศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน. ปริญญาศึกษาศาสตรบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2557.
- [10] บริษัท ชอบธรรม จำกัด. “ประโยชน์ของซิลิกาเจล”, คู่มือการใช้ซิลิกาเจล. http://www.chobtham.com/attachments/view/?attach_id=24728. 10 มีนาคม, 2560.
- [11] Kaundal R.S. and et al. “Investigation of structural properties of lead strontium borate glasses for gamma-ray shielding applications”, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 71(9): 1191–1195; September, 2010.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [12] Glassware Chemical, เครื่องแก้ว สารเคมี อุปรกรณ์วิทยาศาสตร์. (2010). “แก้วพิเศษ (special glasses)”, **ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแก้ว**. <http://glasswarechemical.com/category/introduction-of-glass/>. 10 มีนาคม, 2560.
- [13] Khamirul A. M. and et al. “Study of the elastic properties of $(\text{PbO})_x(\text{P}_2\text{O}_5)_{1-x}$ lead phosphate glass using an ultrasonic technique”, **Journal of Non-Crystalline Solids**. 361: 78–81; February, 2013.
- [14] บริการข้อมูลวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุแก้ว. “ประวัติของแก้ว”, **ข้อมูลแก้ว**. <http://www2.mtec.or.th/th/research/GSAT/Glassweb/history.html>. 15 มีนาคม, 2560.
- [15] ฤดี นิยมรัตน์. “ความหมายของแก้ว”, **แก้ว**. www.teacher.ssru.ac.th/reudee_ni/file.php/1/.../c1-glass.pdf. 15 มีนาคม, 2560.
- [16] สำนักพัฒนาศักยภาพนักวิทยาศาสตร์ห้องปฏิบัติการศูนย์เชี่ยวชาญทางด้านแก้ว. (2556). “ทฤษฎีเกี่ยวกับโครงสร้างแก้ว”, **ความรู้เบื้องต้นทางด้านแก้ว**. lib3.dss.go.th/fulltext/.../Glass_structure_and_raw_materials.pdf. 16 มีนาคม, 2560.
- [17] EckertPossible, H. “Structure Element”, **Insights into the Structure of Network Glasses by NMR-Methods**. <http://www.uni-muenster.de/Chemie.pc/eckert/glass.html>. March 17, 2017.
- [18] คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม. “โครงสร้างของแก้ว”, **แก้ว**. <http://www.elecnet.chandra.ac.th/courses/ELEC2101/termwork/glass/glass.ppt>. 20 มีนาคม, 2560.
- [19] ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. “วัตถุดิบในการหลอมแก้ว”, **วัตถุดิบในการหลอมแก้ว**. <http://www.mne.eng.psu.ac.th/knowledge/student/BOY/Rowmat.HTM>. 20 มีนาคม, 2560.
- [20] มยุรา จันทรเพ็ชร. การทดสอบสมบัติทางกลของแก้วบิสมาท - เลดโบโรซิลิเกต และแก้วแบบเรียบ-เลดโบโรซิลิเกต ที่ถูกฉายรังสีด้วยเทคนิคคลื่นเสียงอัลตราโซนิค. โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2549.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [21] นวลละออง สระแก้ว. สมบัติทางกลของแก้วโบโรซิลิเกตที่ถูกเติมด้วย Ti Ba Pb และ Bi. โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- [22] มนัสชัย คุณาเศรษฐ์ และคณะ. “เครื่องแสดงภาพโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก”, ใน งานโครงการหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, 2548.
- [23] เรวัตน์ เหล่าไพบูลย์. **Selected Topic in Material Science 1**. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 2556.
- [24] Gaafar, M.S. and et al. “Structural studies and mechanical properties of some borate glasses doped with different alkali and cobalt oxides”, **Current Applied Physics**, 13(1): 152-158; January, 2013.
- [25] Bootjomchai, C. and et al. “Structural investigation of borosilicate recycled-barium–bismuth glasses under the influence of gamma-irradiation through ultrasonic and FTIR studies”, **Nuclear Engineering and Design**. 248: 28–34, July, 2012.
- [26] Arulmozhi, K. T. and Sheelarani, R. “ANN modeling for the prediction of elastic moduli of ternary glass systems using physicochemical properties of the oxide components”, **Journal of Non-Crystalline Solids**. 357(16-17): 3272-3277; August, 2011.
- [27] Halimah, M.K. and et al. “Ultrasonic Study and Physical Properties of Boro-tellurite Glasses”, **American Journal of Applied Sciences**. 2 (11): 1541-1546; November, 2005.
- [28] Sidek, H.A.A. and et al. “Effect of PbO on the elastic behavior of ZnO–P₂O₅ glass systems”, **Results in Physics**. 6: 449–455; 2016.
- [29] Saddeek, Y. B. “Structural analysis of alkali borate glasses”, **Physica B**. 344(1-4): 163–175; February, 2004.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [30] Bootjomchai, C. “Comparative studies between theoretical and experimental of elastic properties and irradiation effects of soda lime glasses doped with neodymium oxide”, *Radiation Physics and Chemistry*. 110: 96–104; May, 2015.
- [31] Elkhoshkhanya, N. and et al. “Elastic properties of quaternary TeO_2 - ZnO - Nb_2O_5 - Gd_2O_3 glasses”, *Ceramics International*. 41(8): 9862–9866; September, 2015.
- [32] Michal Plucinski. **limitations and extensions of the makishima mackenzie model**. Master’s Thesis: Dalhousie University Halifax, Nova Scotia, 2014.
- [33] Saddeek, Y. B. and Abd El Latif, L. “Effect of TeO_2 on the elastic moduli of sodium borate glasses”, *Physica B*. 348(1-4): 475–484; May, 2004.
- [34] Zou, X. and Toratani, H. “Compositional design of high modulus glasses for disk substrates”, *Journal of Non-Crystalline Solids*. 290(2-3): 180-188; September, 2001.
- [35] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. “รังสีคืออะไร”, *ถาม-ตอบปัญหาวัสดุศาสตร์*.
[https://www.mtec.or.th/academic-services/mtec-question-answer/1950-รังสี](https://www.mtec.or.th/academic-services/mtec-question-answer/1950-รังสีคืออะไร)
 คืออะไร มีกี่ชนิด วัดได้อย่างไร มีผลกระทบต่อสุขภาพมากน้อยแค่ไหน. 24 มีนาคม, 2560.
- [36] สมพร จงงค์. **พลังงานนิวเคลียร์กับการพัฒนาประเทศ**. กรุงเทพฯ: สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2542
- [37] สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย. “ชนิดของรังสี”, *รังสีในชีวิตประจำวัน*.
<http://www.nst.or.th/article/article5101/article5101e.htm>. 24 มีนาคม, 2560.
- [38] อัมพร ฝนเขียน. “อันตรกิริยาของรังสีต่อสสาร”, *อันตรายจากรังสีและการควบคุม*.
http://kmcenter.rid.go.th/kcresearch/article_out/article_out_02.pdf.
 25 มีนาคม, 2560.
- [39] ชาลิต วงษ์เอก. **Interaction of radiation with matter**. นครปฐม: มหาวิทยาลัยมหิดล, 2557.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [40] เยาวลักษณ์ วาหารักษ์ และอุดร ยังช่วย. “วัสดุกำบังรังสี (SHIELDING)”, แหล่งเรียนรู้ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์. <http://www0.tint.or.th/nkc/nkc5004/nkc5004h.html>. 28 มีนาคม, 2560.
- [41] คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพปาง. “การหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของรังสีแกมมา”, เอกสารประกอบการสอนฟิสิกส์ทั่วไป. www.physics.scilpru.in.th. 29 มีนาคม, 2560.
- [42] Gerward, L. and et al. “x - ray absorption in matter reengineering XCOM”, **Radiation physics and chemistry**. 60(1-2): 23 – 24; January, 2001.
- [43] อภิชาติ พานิชชีวลักษณ์. (2554). “รู้จักกับสารกัมมันตรังสี”, เรื่องของกัมมันตภาพรังสีที่คุณควรรู้. <https://www.bumrungrad.com/th/betterhealth/2554/cancer-treatments/radiation>. 29 มีนาคม, 2560.
- [44] Singh, K. J. and et al. “Gamma-ray shielding and structural properties of PbO SiO₂ glasses”, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**. 266: 944–948; March, 2008.
- [45] Laopaiboon, R. and Bootjomchai, C. “Influence of CeO₂ on structural properties of glasses by using ultrasonic technique: Comparison between the local sand and SiO₂”, **Ultrasonics**. 53(4): 907-912; April, 2013.
- [46] Kaur, S. and Singh, K. J. “Investigation of lead borate glasses doped with aluminium oxide as gamma ray shielding materials”, **Annals of Nuclear Energy**. 63: 350–354; January, 2014.
- [47] Singh, K. J., Kaur, S. and Kaundal, R.S. “Comparative study of gamma ray shielding and some properties of PbO–SiO₂–Al₂O₃ and Bi₂O₃–SiO₂–Al₂O₃ glass systems”, **Radiation Physics and Chemistry**. 96: 153–157; March, 2014.
- [48] คลังความรู้สู่ความเป็นเลิศทางวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์และเทคโนโลยีสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.). (2555). “ตาและการมองเห็นสี”, แสงกับทัศนอุปกรณ์. <http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin/1289-ตาและการมองเห็นสี?groupid258>. 1 เมษายน, 2560.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)



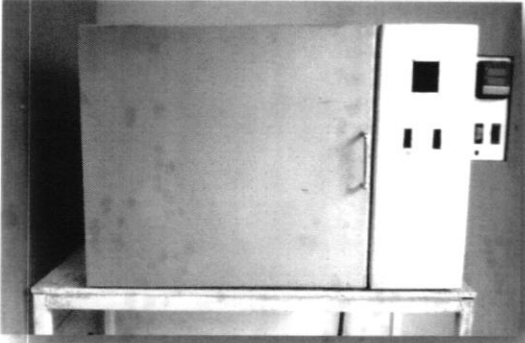
- [49] Wikipidea. (2015). "Lead(II) oxide". [http://en.wikipedia.org/wiki/Lead\(II\)_oxide](http://en.wikipedia.org/wiki/Lead(II)_oxide). 1 เมษายน, 2560.
- [50] Wikipidea. (2015). "Silica-Silicon Dioxide (SiO₂)". <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1114>. 1 เมษายน, 2560
- [51] Singh, S. and et al. "Barium-borate-flyash glasses: As radiation shielding materials, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**. 226(1): 140-146; January, 2008.
- [52] "Lead: radii of atoms and ions", **WebElements**. https://www.webelements/lead/atom_sizes.html. 1 เมษายน, 2560.
- [53] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. "เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันและเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์", ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์เชิงฟิสิกส์. <https://www.mtec.or.th/mcu/phcl/index.php/th/2014-09-04-06-23-37/14-uncategorised/28-x-ray>. 4 เมษายน, 2560.
- [54] Kaur, K., Singh, K.J. and Anand, V. "Structural properties of Bi₂O₃-B₂O₃-SiO₂ Na₂O glasses for gamma ray shielding applications", **Radiation Physics and Chemistry**. 120: 63-72; March, 2016.
- [55] Kaur, P., Singh, D. and Singh, T. "Heavy metal oxide glasses as gamma rays shielding material", **Nuclear Engineering and Design**. 307: 364-376; October, 2016.
- [56] Bootjomchai, C. and et al. "Gamma-ray shielding and structural properties of barium-bis-muth-borosilicate glasses", **Radiation Physics and Chemistry**. 81(7): 785-790; July, 2012.
- [57] Saddeeka, Y. B. and et al. "Fabrication and physical characteristics of new glasses from wastes of limestone and phosphorite rocks", **Bulletin of Materials Science**. 39(7): 1791-1799; December, 2016.
- [58] Afifa, H. and Marzoukb, S. "Ultrasonic velocity and elastic moduli of heavy metal tellurite glasses", **Materials Chemistry and Physics**. 80(2): 517-523; May, 2003.


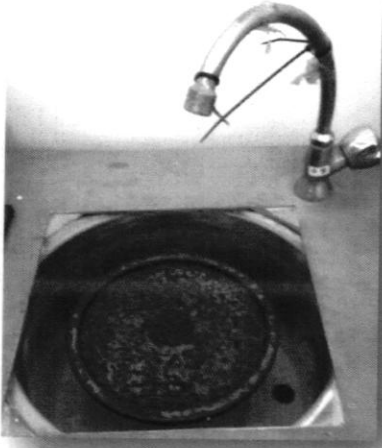

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [59] Laopaiboon, R. and et al. "Elastic properties investigation of gamma-radiated barium lead borosilicate glass using ultrasonic technique", **Annals of Nuclear Energy**. 38(11): 2333–2337; November, 2011.
- [60] Gur, C.H. and Ozturk, A. "Determination of the influence of TiO_2 on the elastic properties of a mica based glass ceramic by ultrasonic by ultrasonic velocity measurements", **Journal of Non-Crystalline Solids**. 351(46-48): 3655-3662; November, 2005.
- [61] Abdelghany, A.M. and et al. "Optical and FTIR structural studies of CoO-doped sodium borate, sodium silicate and sodium phosphate glasses and effects of gamma irradiation-a comparative study", **Journal of Molecular Structure**. 1074: 503–510; September, 2014.
- [62] Abd El-Moneim, A. "Bond compression bulk modulus and Poisson's ratio of the polycomponent silicate glasses", **Materials Chemistry and Physics**. 70(3): 340–343; June, 2001.




ภาคผนวก

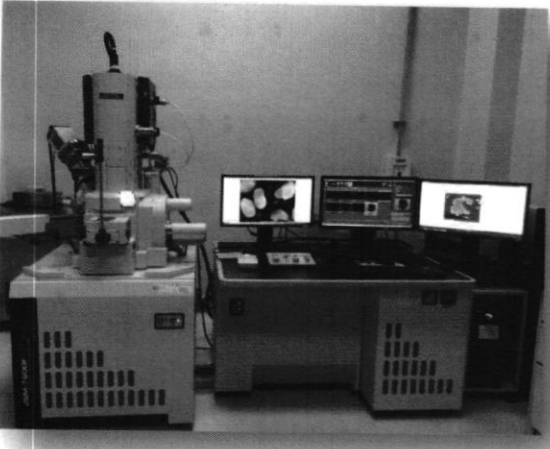

ภาคผนวก ก
วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่	ชื่อเครื่องมือ
 <p data-bbox="545 842 586 875">ก.1</p>	<p data-bbox="947 589 1353 741">เตาหลอมไฟฟ้าอุณหภูมิสูง สร้างโดย กลุ่ม GTEC ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี</p>
 <p data-bbox="534 1447 581 1480">ก.2</p>	<p data-bbox="923 1178 1361 1279">เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ บริษัท Denver Instrument ความละเอียด 0.0001 g</p>
 <p data-bbox="529 1944 577 1977">ก.3</p>	<p data-bbox="950 1715 1326 1868">เตาอบไฟฟ้า สร้างโดยกลุ่ม GTEC ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี</p>

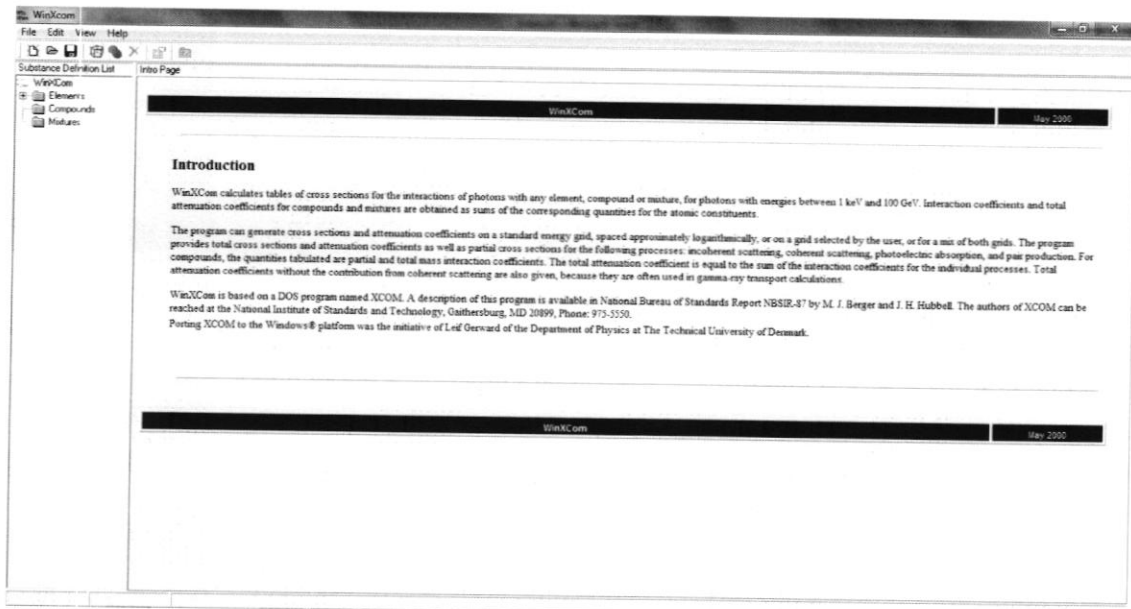
รูปที่	ชื่อเครื่องมือ
 <p data-bbox="539 801 581 835">ก.4</p>	<p data-bbox="969 577 1334 689">เครื่องตัดชิ้นงาน ยี่ห้อ Benetec limited รุ่น labcut 1010</p>
 <p data-bbox="545 1373 588 1406">ก.5</p>	<p data-bbox="931 1070 1354 1227">เครื่องขัดชิ้นงาน สร้างโดยกลุ่ม GTEC ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี</p>
 <p data-bbox="545 1973 588 2007">ก.6</p>	<p data-bbox="931 1664 1345 1776">เครื่อง Ultrasonic Flaw Detector ยี่ห้อ SONATAST รุ่น Sitescan 230</p>

รูปที่	ชื่อเครื่องมือ
 <p data-bbox="562 853 608 887">ก.7</p>	<p data-bbox="987 595 1268 689">เบ้าหลอมที่ใช้เป็นภาชนะ ในการหลอมแก้ว</p>
 <p data-bbox="540 1350 586 1384">ก.8</p>	<p data-bbox="987 1167 1253 1200">แม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม</p>
 <p data-bbox="517 1955 563 1989">ก.9</p>	<p data-bbox="940 1675 1290 1776">เทคนิคการลดทอนรังสีเอกซ์ (X-ray attenuation method)</p>

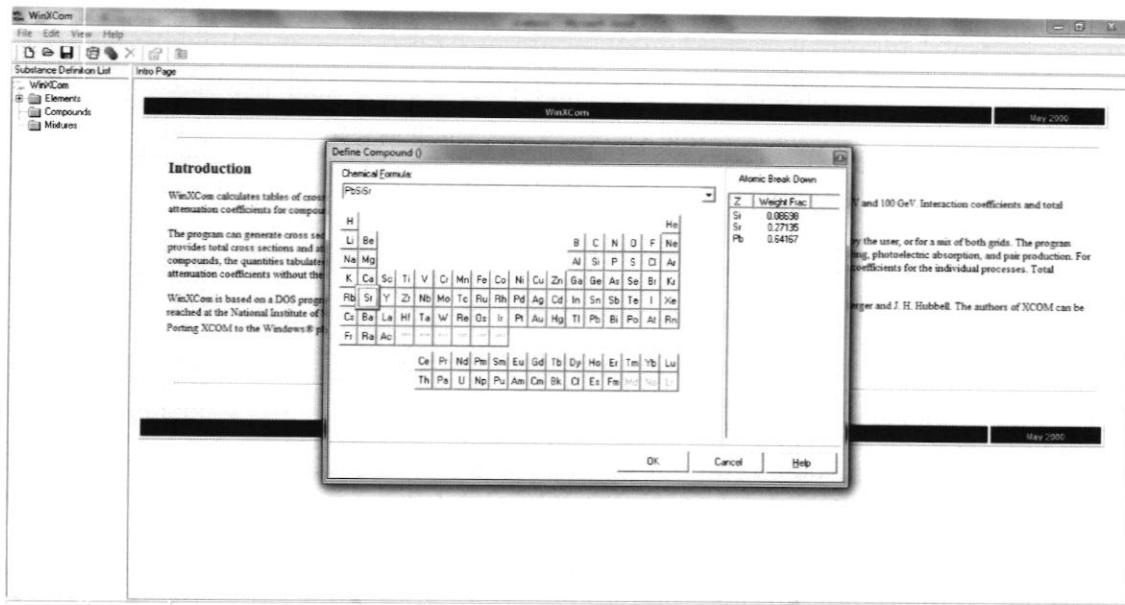
รูปที่	ชื่อเครื่องมือ
 <p data-bbox="545 898 608 931">ก.10</p>	<p data-bbox="969 645 1335 745">เทคนิคการส่งผ่านแบบรังสีแคบ (Narrow beam transmission)</p>
 <p data-bbox="545 1451 608 1485">ก.11</p>	<p data-bbox="1055 1238 1227 1272">ตะกั่วกำบังรังสี</p>
 <p data-bbox="545 1966 608 2000">ก.12</p>	<p data-bbox="961 1720 1306 1821">เครื่อง Power supply (model PX2T-CdTe บริษัท)</p>

รูปที่	ชื่อเครื่องมือ
 <p data-bbox="548 974 619 1019">ก.13</p>	<p data-bbox="948 571 1364 795">เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) ยี่ห้อ HITACHI รุ่น S-3400N Type II</p>
 <p data-bbox="540 1590 611 1635">ก.14</p>	<p data-bbox="972 1288 1324 1444">เครื่อง X-ray Diffractometer ยี่ห้อ PANalytical รุ่น X'Pert High score</p>

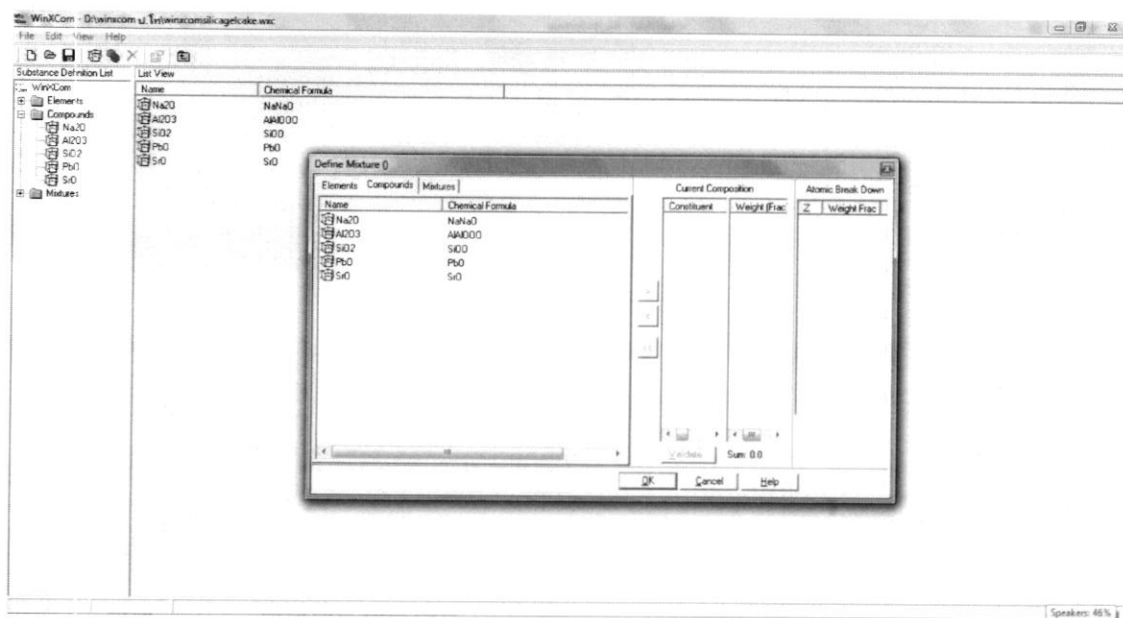
ภาคผนวก ข
โปรแกรม WinXcom



ภาพที่ ข.1 หน้าต่างโปรแกรม WinXCom



ภาพที่ ข.2 การเลือกธาตุที่ต้องการศึกษา



ภาพที่ ข.3 การสร้างสารประกอบ

	Energy (MeV)	Coherent (cm ² /g)	InCoherent (cm ² /g)	Photo Electric (cm ² /g)	PAIR Nuclear (cm ² /g)	PAIR Electron (cm ² /g)	Sum (cm ² /g)	Sum NonCoherent (cm ² /g)
	1.000E-003	1.94E+000	1.11E-002	2.88E+003	0	0	2.88E+003	2.88E+003
	1.035E-003	1.92E+000	1.17E-002	2.63E+003	0	0	2.63E+003	2.63E+003
	1.072E-003	1.91E+000	1.24E-002	2.40E+003	0	0	2.40E+003	2.40E+003
11 K	1.072E-003	1.91E+000	1.24E-002	2.88E+003	0	0	2.88E+003	2.88E+003
	1.500E-003	1.77E+000	2.07E-002	1.22E+003	0	0	1.22E+003	1.22E+003
	1.560E-003	1.75E+000	2.19E-002	1.10E+003	0	0	1.10E+003	1.10E+003
13 K	1.560E-003	1.75E+000	2.19E-002	1.72E+003	0	0	1.72E+003	1.72E+003
	1.694E-003	1.70E+000	2.46E-002	1.40E+003	0	0	1.41E+003	1.40E+003
	1.839E-003	1.65E+000	2.75E-002	1.14E+003	0	0	1.14E+003	1.14E+003
14 K	1.839E-003	1.65E+000	2.75E-002	1.89E+003	0	0	1.90E+003	1.89E+003
	2.000E-003	1.60E+000	3.06E-002	1.58E+003	0	0	1.58E+003	1.58E+003
	3.000E-003	1.30E+000	4.90E-002	5.38E+002	0	0	5.40E+002	5.38E+002
	4.000E-003	1.07E+000	6.47E-002	2.44E+002	0	0	2.45E+002	2.44E+002
	5.000E-003	8.90E-001	7.80E-002	1.30E+002	0	0	1.31E+002	1.30E+002
	6.000E-003	7.51E-001	8.90E-002	7.69E+001	0	0	7.77E+001	7.69E+001
	8.000E-003	5.51E-001	1.06E-001	3.31E+001	0	0	3.38E+001	3.32E+001
	1.000E-002	4.19E-001	1.18E-001	1.70E+001	0	0	1.76E+001	1.72E+001
	1.500E-002	2.40E-001	1.37E-001	4.99E+000	0	0	5.36E+000	5.12E+000
	2.000E-002	1.58E-001	1.46E-001	2.05E+000	0	0	2.35E+000	2.20E+000
	3.000E-002	8.43E-002	1.55E-001	5.75E-001	0	0	8.14E-001	7.30E-001
	4.000E-002	5.25E-002	1.57E-001	2.30E-001	0	0	4.40E-001	3.87E-001
	5.000E-002	3.57E-002	1.56E-001	1.13E-001	0	0	3.05E-001	2.69E-001
	6.000E-002	2.58E-002	1.54E-001	6.38E-002	0	0	2.43E-001	2.17E-001
	8.000E-002	1.52E-002	1.49E-001	2.48E-002	0	0	1.89E-001	1.74E-001
	1.000E-001	1.00E-002	1.43E-001	1.21E-002	0	0	1.66E-001	1.55E-001
	1.500E-001	4.63E-003	1.31E-001	3.27E-003	0	0	1.38E-001	1.34E-001
	2.000E-001	2.65E-003	1.20E-001	1.31E-003	0	0	1.24E-001	1.21E-001
	3.000E-001	1.19E-003	1.05E-001	3.75E-004	0	0	1.06E-001	1.05E-001

ภาพที่ ข.4 ผลการคำนวณของสารประกอบที่ต้องการศึกษา

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นางสาวภัทรนิภา กันหะคุณ
ที่อยู่	เลขที่ 36 หมู่ 2 ตำบลนาหมอม้า อำเภอเมือง จังหวัดอำนาจเจริญ 37000
E-mail:	yimyindee@gmail.com
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2547-2550 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนจุฬารัตนราชวิทยาลัย มุกดาหาร 281 หมู่ 6 บ้านหนองหอย ตำบลบางทรายใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดมุกดาหาร 49000 พ.ศ. 2550-2553 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนจุฬารัตนราชวิทยาลัย มุกดาหาร 281 หมู่ 6 บ้านหนองหอย ตำบลบางทรายใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดมุกดาหาร 49000 พ.ศ. 2554-2558 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ประวัติการได้รับทุน	ทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย (Science Achievement Scholarship of Thailand)
ประวัติการวิจัย	1. การศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้างและคุณสมบัติยืดหยุ่นของระบบแก้ว Strontium lead silicate ที่เตรียมจากซิลิกาเจล ในงานประชุมวิชาการ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีภาคตะวันออกเฉียงเหนือครั้งที่ 4 (NESTC 2015) ณ อาคารวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี วันที่ 21 ก.พ. 2558 2. The effect of lead to structural and elastic properties of recycle silica gel glass (RSG) ในงานประชุมวิชาการ Siam Physics Congress 2015 (SPC 2015) ณ โซฟีเทล กระบี่ โภคีธรา กอล์ฟ แอนด์ สปา รีสอร์ท ระหว่างวันที่ 20 - 22 พฤษภาคม 2558 3. Investigation of strontium lead silicate glass prepared from silica gel used as gamma ray shielding materials ในงานประชุม วิชาการ The 4th International Scientific Conference on Engineering and Applied Sciences (ISCEAS 2016) ณ กรุงปักกิ่ง ประเทศจีน วันที่ 24-26 พฤษภาคม 2559

4. Investigation of lead silicate glass prepared from silica gel for used as gamma-ray shielding materials: A comparison between CaO and SrO ในงานประชุมวิชาการ Siam Physics Congress 2016 (SPC 201) ณ โรงแรมบ้านสวนคุณตา กอล์ฟ รีสอร์ท อุบลราชธานี ระหว่างวันที่ 8 - 10 มิถุนายน 2559
5. Gamma-ray shielding and structural properties of strontium-lead-silicate glasses ในงานประชุมวิชาการ Siam Physics Congress 2017 (SPC 2017) ณ ระยอง แมริออท รีสอร์ท ระหว่างวันที่ 24 - 26 พฤษภาคม 2560