คุณสมบัติการกำบังรังสีแกมมาของแก้วในระบบ P_2O_5-BaO-Bi_2O_3

สรินทรเทพ สายเนตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

GAMMA-RAY SHIELDING PROPERTIES OF P_2O_5-BaO-Bi_2O_3 GLASS SYSTEM

SARINTHONTHEP SAINET

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
MAJOR IN PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE
UBON RATCHATHANI UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2014
COPYRIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

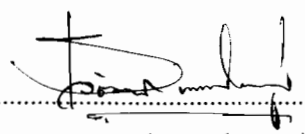
เรื่อง คุณสมบัติการกำบังรังสีแกมมาของแก้วในระบบ P_2O_5-BaO-Bi_2O_3

ผู้วิจัย นายสรินทรเทพ สายเนตร

คณะกรรมการสอบ

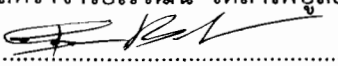
รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว	ประธานกรรมการ
รองศาสตราจารย์เรวัฒน์ เหล่าไพบูลย์	กรรมการ
ดร.เชิดศักดิ์ บุตรจอมชัย	กรรมการ
รองศาสตราจารย์จินตนา เหล่าไพบูลย์	

อาจารย์ที่ปรึกษา



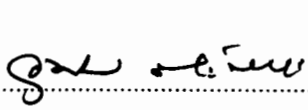
..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์เรวัฒน์ เหล่าไพบูลย์)



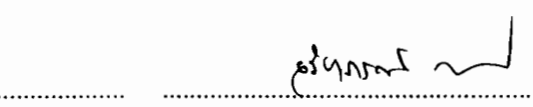
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ดร.เชิดศักดิ์ บุตรจอมชัย)



..... (รองศาสตราจารย์ ดร.อุทิศ อินทร์ประสิทธิ์)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์



..... (รองศาสตราจารย์ ดร.อริยาภรณ์ พงษ์รัตน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปีการศึกษา 2557

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ ด้วยความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ เรวัฒน์ เหล่าไพบูลย์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก อาจารย์ ดร.เชิดศักดิ์ บุตรจอมชัย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมในวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ อีกทั้งยังให้ความช่วยเหลือต่างๆจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของท่านเป็นอย่างยิ่ง จึงกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว และรองศาสตราจารย์ จินตนา เหล่าไพบูลย์ ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่าในการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ และกราบขอบพระคุณอาจารย์ จเด็จ เย็นใจ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านออกแบบการทดสอบคุณสมบัติทางรังสี จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัว ที่คอยชี้แนะแนวทางคอยให้กำลังใจในยามที่ท้อแท้และให้การสนับสนุนการเรียนต่อระดับมหาบัณฑิตตลอดจนการทำวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์และขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ทุกคน ในศูนย์ความเชี่ยวชาญเทคโนโลยีแก้ว(GTEC) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่คอยให้การสนับสนุนให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา

สรินทรเทพ สายเนตร

ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

ชื่อเรื่อง : คุณสมบัติการกำบังรังสีแกมมาของแก้วในระบบ P_2O_5-BaO-Bi_2O_3

ผู้วิจัย : สรินทรเทพ สายเนตร

ชื่อปริญญา : วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา : ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์เรวัฒน์ เหล่าไพบูลย์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : ดร.เชิดศักดิ์ บุตรจอมชัย

คำสำคัญ : กระจกกำบังรังสี, แก้วฟอสเฟต, รังสีแกมมา, ความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิค

การสร้างแก้วในระบบ (50)P_2O_5 - (50-x)BaO - (x)Bi_2O_3 ที่ x = 0, 2.5, 7.5, 12.5 และ 17.5 เปอร์เซ็นต์โดยโมล โดยใช้เทคนิคการหลอมที่อุณหภูมิสูงและเย็นตัวอย่างรวดเร็ว แก้วตัวอย่างถูกศึกษาด้วยการวัดความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคตามยาว และเฉือน ที่ความถี่ 4 เมกกะเฮิร์ทโดยใช้เทคนิคพัลส์เอคโค และหาค่าความหนาแน่นของแก้วโดยใช้หลักการของอาร์คีมีดีสและใช้เอ็นเฮ็กเซนเป็นของเหลว ค่าดังกล่าวนำมาคำนวณหาค่าคุณสมบัติเชิงกลของแก้ว คือ โมดูลัสตามยาว โมดูลัสเฉือน ยังโมดูลัส โมดูลัสเชิงปริมาตร และค่าความแข็งระดับไมโคร พบว่าเมื่อปริมาณ Bi_2O_3 17.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล มีค่าความยืดหยุ่นโมดูลัสสูงกว่าที่ Bi_2O_3 0.00 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ค่าความแข็งระดับไมโครของแก้วในระบบที่ปริมาณ Bi_2O_3 12.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมลมีค่าสูงสุด ผลการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ศึกษาด้วยฟูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟาเรดสเปกโตรมิเตอร์ มีการเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับ การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติยืดหยุ่น จากการทดสอบคุณสมบัติทางรังสีโดยใช้โปรแกรม WinXcom และต้นกำเนิดรังสีที่พลังงาน 122, 662 และ 1173 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์และเปรียบเทียบกับคอนกรีตมาตรฐาน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น และสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Bi_2O_3 ค่า HVL มีค่าลงตามปริมาณ Bi_2O_3 ที่เพิ่มขึ้นสูตรแก้วในระบบที่มีคุณสมบัติกำบังรังสีและค่าความยืดหยุ่นที่เหมาะสมคือ (50)P_2O_5 – (32.50)BaO – (17.50)Bi_2O_3 ซึ่งมีค่า HVL ดีกว่าคอนกรีตมาตรฐานประมาณ 2 เท่า

ABSTRACT

TITLE : GAMMA-RAY SHIELDING PROPERTIES OF P_2O_5-BaO-Bi_2O_3 GLASS SYSTEM
AUTHOR : SARINTHONTHEP SAINET
DEGREE : MASTER OF SCIENCE
MAJOR : PHYSICS
ADVISOR : ASSOC. PROF. RAEWAT LAOPAIBOON
CO-ADVISOR : CHERDSAK BOOTJOMCHAI, Ph. D.
KEYWORDS : GLASS SHIELDING, PHOSPHATE GLASS, GAMMA-RAY, ULTRASONIC VELOCITY

Fabrication of a $(50)P_2O_5$ - $(50-x)BaO$ - $(x)Bi_2O_3$ glass systems where x = 0, 2.5, 7.5, 12.5 and 17.5 mol% was carried out using a conventional melt-quenching method. Longitudinal and shear wave velocities were measured in glasses system at room temperature using pulse echo technique of 4 MHz. The density of glasses was measured by Archimedes' principle using n-hexane as the immersion liquid. These results were calculated to fine the elastic property; longitudinal modulus, shear modulus, Young's modulus, bulk modulus and micro-hardness. It is observed that the elastic modulus of 17.50 mol% Bi_2O_3 is higher than 0.00 mol% Bi_2O_3. The 12.50 mol% Bi_2O_3 gave the maximum micro-hardness. The results changing in elastic properties confirm with the changed of structural properties by using FTIR. The radiation shielding properties were studies by isotope source and WinXcom program. The energy of isotope source is 122, 662 and 1173 keV. Linear attenuation coefficient and mass attenuation coefficient increase with increasing the Bi_2O_3 contents. Half value layer (HVL) decrease with increasing the Bi_2O_3. It has been shown that the $(50)P_2O_5$ – $(32.50)BaO$ – $(17.50)Bi_2O_3$ glass composition has the best value for shielding properties and it has the suitable of elastic properties. Comparison of shielding properties glass sample compared to standard concrete is nearly 2 times.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	**ก**
บทคัดย่อภาษาไทย	**ข**
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	**ค**
สารบัญ	**จ**
สารบัญตาราง	**ช**
สารบัญภาพ	**ช**
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตการศึกษาค้นคว้า	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 แนวคิดพื้นฐาน	4
2.2 ความหมายแก้ว	4
2.3 ประวัติความเป็นมาของแก้ว	4
2.4 การเกิดแก้ว	6
2.5 โครงสร้างแก้ว	8
2.6 ชนิดของแก้ว	10
2.7 คุณสมบัติของแก้ว	12
2.8 การวัดคุณสมบัติความยืดหยุ่นของแก้วโดยใช้เทคนิคอัลตร้าโซนิค	13
2.9 การวัดความหนาแน่นและการคำนวณหาปริมาตรโดยโมล	14
2.10 การศึกษาโครงสร้างของสารโดยใช้ FTIR Spectrometer	15
2.11 แหล่งกำเนิดรังสี	17
2.12 ชนิดของรังสีและอนุภาค	17
2.13 อันตรกิริยาของรังสีกับวัตถุ	18
2.14 อันตรกิริยาของรังสีเมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัตถุกำบังรังสี	21
2.15 ค่าความหนาครึ่งค่า (Half Value Layer: HVL)	22
2.16 ประวัติความเป็นมาของโปรแกรม WinXcom	22
2.17 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 วัสดุและอุปกรณ์	26
3.2 สารเคมี	26
3.3 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย	27
3.4 วิธีการทดลอง	28
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	
4.1 ลักษณะทางกายภาพของแก้ว	31
4.2 ผลการหลอม	32
4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติความยืดหยุ่นของแก้ว	34
4.4 ผลการศึกษาพันธะของแก้วในระบบ P_2O_5-BaO-Bi_2O_3	38
4.5 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางรังสีของแก้วในระบบ P_2O_5-BaO-Bi_2O_3	41
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	**55**
เอกสารอ้างอิง	**56**
ภาคผนวก	
ก วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	62
ข โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง	68
ประวัติผู้วิจัย	71

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	องค์ประกอบทางเคมี ความหนา ความหนาแน่น และปริมาตรโดยโมลของแก้วระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3	32
4.2	ความเร็วคลื่นเสียงตามยาว (Longitudinal velocity: V_L) ความเร็วคลื่นเสียงเฉือน (Shear velocity: V_S) ของอัลตร้าโซนิค โมดูลัสตามยาว (L) โมดูลัสเฉือน (G) โมดูลัสเชิงปริมาตร (K) ยังโมดูลัส (E) และค่าความแข็งระดับไมโคร (H)	35
4.3	เลขคลื่น ชนิดพันธะและชนิดการสั่น	39
4.4	สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแก้วในระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3 ที่พลังงานต่างกันจากการคำนวณด้วยโปรแกรม WinXcom	42
4.5	สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของในระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3 ที่พลังงานต่างกันจากการคำนวณด้วยโปรแกรม WinXcom	42
4.6	ค่า HVL ของแก้วในระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3 จากการคำนวณด้วยโปรแกรม WinXcom	42
4.7	ชนิดต้นกำเนิดรังสี พลังงาน ชนิดหัววัด และความเข้มรังสีโดยไม่มีวัตถุกั้น	44
4.8	ความเข้มของรังสีที่ทะลุผ่านตัวอย่างแก้วที่พลังงานต่างกัน	44
4.9	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้นของตัวอย่างแก้วที่พลังงานต่างกัน	44
4.10	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วที่พลังงานต่างกัน	44
4.11	ค่า HVL ของตัวอย่างแก้วที่พลังงานต่างกัน	45
4.12	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้นของแบไรท์คอนกรีตที่พลังงานต่างกัน	45
4.13	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของแบไรท์คอนกรีตที่พลังงานต่างกัน	45
4.14	ค่า HVL ของแบไรท์คอนกรีตที่พลังงานต่างกัน	46
4.15	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นที่พลังงาน 122 keV	46
4.16	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นที่พลังงาน 662 keV	46
4.17	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นที่พลังงาน 1173 keV	46
4.18	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลที่พลังงาน 122 keV	47
4.19	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลที่พลังงาน 662 keV	47
4.20	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลที่พลังงาน 1173 keV	47
4.21	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน HVL ที่พลังงาน 122 keV	48
4.22	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน HVL ที่พลังงาน 662 keV	48
4.23	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน HVL ที่พลังงาน 1173 keV	48

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	สถานที่จัดเก็บเชื้อเพลิงใช้แล้วแบบแห้งภายนอกโรงไฟฟ้า	2
2.1	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปของการเกิดแก้ว	6
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลง $\Delta L/L_0$ ของแก้วกับอุณหภูมิ	7
2.3	การจำลอง (a) silicon-oxygen tetrahedral (b) โครงผลึกของซิลิกา (cristoblite) (c) โครงผลึกแก้ว	9
2.4	โครงสร้างของแก้วที่ประกอบด้วย network former และ network modifier	10
2.5	การวัดความเร็วตามยาวและความเร็วเฉือนด้วยเทคนิคอัลตร้าโซนิค	13
2.6	อินฟราเรด สเปคตรัมของ FTIR Spectrometer	16
2.7	การเกิดโฟโตอิเล็กตริก	19
2.8	การกระเจิงแบบคอมป์ตัน	20
2.9	การเกิดแพรโพดักชัน	21
3.1	ขั้นตอนการเตรียมแก้วและการทดสอบคุณสมบัติด้านรังสี และคุณสมบัติความยืดหยุ่น	27
3.2	การหลอม (a) การเทแก้ว (b)	28
3.3	ขั้นตอนการศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติความยืดหยุ่น	29
4.1	ลักษณะทางกายภาพของแก้วในระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3 เมื่อภาพที่ 4.1 (1) - (6) คือแก้วที่มีความเข้มข้นของ Bi_2O_3 เป็น 0.00 2.50 7.50 12.50 17.50 และ 22.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ตามลำดับ	31
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับปริมาณบิสมัทไตรออกไซด์ของแก้วระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3	33
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรโดยโมลกับปริมาณบิสมัทไตรออกไซด์ของแก้วระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3	34
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคตามยาวและเฉือนกับปริมาณบิสมัทไตรออกไซด์ของแก้วระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3	36
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติยืดหยุ่นกับกับปริมาณบิสมัทไตรออกไซด์ของแก้วระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3	37
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งระดับไมโครกับกับปริมาณบิสมัทไตรออกไซด์ของแก้วระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3	38
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ส่งผ่านกับเลขคลื่นของแก้วในระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3 ในแต่ละเปอร์เซ็นต์โดยโมลของบิสมัทไตรออกไซด์	40
4.8	รูปแบบการจัดเครื่องมือในการวัดหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน	43

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของแก้ว ระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3 ที่พลังงาน 122 keV จากโปรแกรม WinXcom และจากการทดลอง	49
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของแก้วระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3 ที่พลังงาน 662 keV จากโปรแกรม WinXcom และจากการทดลอง	49
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของแก้วระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3 ที่พลังงาน 1173 keV จากโปรแกรม WinXcom และจากการทดลอง	50
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแก้วระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3 ที่พลังงาน 122 keV จากโปรแกรม WinXcom และจากการทดลอง	50
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลแก้วระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3 ที่พลังงาน 662 keV จากโปรแกรม WinXcom และจากการทดลอง	51
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแก้วระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3 ที่พลังงาน 1173 keV จากโปรแกรม WinXcom และจากการทดลอง	51
4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า HVL ของแก้วระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3 ที่พลังงาน 122 keV จากโปรแกรม WinXcom และจากการทดลอง	52
4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า HVL ของแก้วระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3 ที่พลังงาน 662 keV จากโปรแกรม WinXcom และจากการทดลอง	52
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า HVL แก้วระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3 ที่พลังงาน 1173 keV จากโปรแกรม WinXcom และจากการทดลอง	53
ก.1	เตาหลอมไฟฟ้าอุณหภูมิสูง สร้างโดยกลุ่มวิจัย GTEC ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	63
ก.2	เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ บริษัท Denver Instrument ความละเอียด 0.0001 g	63
ก.3	เตาอบไฟฟ้าอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสสร้างโดยกลุ่มวิจัย GTEC ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	64
ก.4	เครื่องตัดชิ้นงาน ยี่ห้อ Benetec limitedรุ่น labcut 1010	64
ก.5	เครื่องขัดชิ้นงาน สร้างโดยกลุ่มวิจัย GTEC ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	65
ก.6	เครื่อง ultrasonic flaw detecter รุ่น Sitescan 230 ของบริษัท Sonatest	65

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

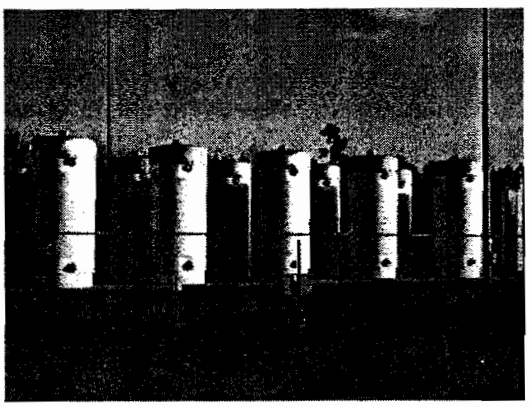
ภาพที่		หน้า
ก.7	เบ้าหลอมอลูมินา	66
ก.8	เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) รุ่น System 2000 FT-IR ของบริษัท Perkinelmer instruments ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	66
ก.9	แม่พิมพ์ขึ้นรูปแก้ว	67
ข.1	โปรแกรม WinXcom	69
ข.2	สร้างสารประกอบที่ต้องการ	69
ข.3	ผสมสารประกอบที่ต้องการ	70
ข.3	แก้วที่ถูกผสมโดยสารประกอบ	70

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่งสำหรับการดำรงชีวิตประจำวันของชนในชาติ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสื่อสาร การคมนาคม การให้ความรู้และการศึกษาโดยไฟฟ้าเป็นตัวแปรสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจต่อการเพิ่มผลผลิตทั้งเกษตรและอุตสาหกรรมที่ทันสมัย การกระจายรายได้ และการสร้างขีดความสามารถในการแข่งขันในด้านการผลิต และการขายสินค้า เป็นเป้าหมายสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขึ้นจำนวนมากเพื่อผลิตไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการ ได้มีนักวิจัยนิวเคลียร์ฝรั่งเศสเปิดเผยว่า ประชากร 4,000 ล้านคนทั่วโลกต่างได้อานิสงส์จากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ [1] หลายชาติในเอเชีย–ออสเตรเลียและแคนนาดา มียูเรเนียมเกือบครึ่งหนึ่งของโลก ในหลายประเทศสนใจก่อสร้างและขยายกำลังการผลิต รวมถึงเวียดนามและอินโดนีเซีย ส่วนไทยยังอยู่ระหว่างการศึกษาความจำเป็น นายอแลง ทูวร์โนล ดูว์ คลอส (Alain Tournyol Du Clos) อดีตนักวิจัยจากสำนักงานปรมาณูฝรั่งเศส กล่าวถึงสถานการณ์โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ทั่วโลกว่า ในกว่า 30 ประเทศที่มีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แล้วจะผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานนิวเคลียร์กว่า 21เปอร์เซ็นต์ ของความต้องการในประเทศ ทั้งนี้ โรงไฟฟ้าพลังงานไฟฟ้านิวเคลียร์ยังมีส่วนแบ่งการผลิตกระแสไฟฟ้าทั่วโลกกว่า 16เปอร์เซ็นต์ และเป็น 7เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับแหล่งพลังงานทั้งหมดของโลก โดยมีประชากรโลกที่ได้ประโยชน์จากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ประมาณ 2 ใน 3 หรือ 4,000 ล้านคนทั่วโลก ปัจจุบัน นานาชาติมีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แล้ว 440 โรง แบ่งเป็น 147 โรงใน 13 ชาติสมาชิกสหภาพยุโรป (อียู) 104 โรงในสหรัฐอเมริกา และอีก 105 โรงในเอเชีย โดยมีที่กำลังก่อสร้างเพิ่ม 30 แห่ง และมีแผนการสร้างแน่นอนแล้วอีก 35 แห่ง ด้านเชื้อเพลิงของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์คือ “ยูเรเนียม” มีปริมาณกว่า 2.6 ล้านตันทั่วโลก ในทวีปเอเชียและออสเตรเลียโดยเฉพาะประเทศออสเตรเลียครอบครองยูเรเนียมมากที่สุดของโลกที่ 27เปอร์เซ็นต์ ของทั้งหมด รองลงมาคือคาซัคสถาน 14.3เปอร์เซ็นต์ รัสเซีย 5เปอร์เซ็นต์ อุสเบกิสถาน 2.2เปอร์เซ็นต์ และมองโกเลีย 1.7 เปอร์เซ็นต์ เกาหลีจะขยายเพิ่มอีก 9 กิกะวัตต์ในปี พ.ศ.2558 ส่วนสหรัฐฯ มีแผนสร้างโรงไฟฟ้ากว่า 1,500 โรงในปี พ.ศ. 2563 ซึ่งรวมถึงโรงไฟฟ้านิวเคลียร์อย่างน้อย 50 กิกะวัตต์ ขณะที่รัสเซีย อินเดีย จีน จะขยายกำลังการผลิตไฟฟ้านิวเคลียร์อีกมากภายในปีเดียวกัน นายอแลง เผยด้วยว่า ในระยะหลังมีหลายประเทศที่เพ่งความสนใจไปที่โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ด้วยกัน ที่กำลังดำเนินการก่อสร้าง อาทิ บราซิล แอฟริกาใต้ แคนาดา ยูเครน สหราชอาณาจักร และโปแลนด์ ที่มีแผนจะสร้างเป็นแห่งแรกของประเทศเช่น โมรอคโค เวียดนาม อินโดนีเซีย และตุรกี จะเห็นได้ว่าในปัจจุบันได้มีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เกิดขึ้นจำนวนมากสิ่งที่ตามมาก็คือ เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่ใช้แล้ว การจัดการเกี่ยวกับเชื้อเพลิงใช้แล้วหลังจากเก็บไว้เป็นการชั่วคราวในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ชั่วระยะเวลาหนึ่งในบ่อน้ำ หลังจากนั้นจะจัดการเก็บในระยะยาวโดยไม่ส่งไปแปรสภาพ โดยย้ายแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้วที่อยู่ในบ่อน้ำมาเป็นการเก็บแบบแห้ง ด้วยการเก็บภายใต้บรรยากาศของแก๊สฮีเลียมเพื่อระบายความร้อนซึ่งบรรจุในภาชนะ

คอนกรีตขนาดใหญ่ที่เหมาะสมต่อการป้องกันอันตรายจากการแผ่รังสี สถานที่เก็บระยะยาวนี้ก็จะอยู่ในอาณาเขตบริเวณของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ในบางประเทศจะส่งเชื้อเพลิงใช้แล้วไปยังโรงงานแปรสภาพเชื้อเพลิง ในปัจจุบันเพื่อที่จะลดพื้นที่และสถานที่เก็บเชื้อเพลิงที่ใช้แล้ว โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ต่างๆ จึงเก็บเชื้อเพลิงใช้แล้วแบบแห้ง ซึ่งเป็นการเก็บเชื้อเพลิงใช้แล้วในภาชนะที่เป็นคอนกรีตและมีระบบป้องกันอันตรายจากการแผ่รังสี สถานที่เก็บอาจเป็นพื้นที่ภายในหรือภายนอกโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ [2] ดังภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 สถานที่จัดเก็บเชื้อเพลิงใช้แล้วแบบแห้งภายนอกโรงไฟฟ้า [2]

การใช้คอนกรีตมีข้อจำกัดหลายๆประการเช่น มีองค์ประกอบหลายชนิดและมีองค์ประกอบของน้ำอยู่ น้ำสามารถซึมผ่านองค์ประกอบต่างๆได้ง่าย อีกทั้งเมื่อคอนกรีตดูดซับพลังงานจากรังสีจะมีความร้อนเพิ่มสูงขึ้นแล้วจะเกิดการสูญเสียน้ำ การสูญเสียน้ำในคอนกรีตจะทำให้ความหนาแน่นและความแข็งแรงลดลง และจะทำให้เกิดความไม่แน่นอนในการกำบังรังสี ถึงแม้จะมีคอนกรีตชนิดพิเศษที่มีความหนาแน่นสูง แต่ก็ยังมีข้อจำกัดคือทึบแสงและน้ำซึมผ่านได้ [3] เพราะฉะนั้นจึงมีการค้นหาและพัฒนาวัสดุกำบังรังสีที่โปร่งใสและกำบังรังสีได้ดีเทียบเท่าหรือมากกว่าคอนกรีต วัสดุแก้วจึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจเนื่องจากโปร่งใส ไม่มีน้ำเป็นองค์ประกอบจึงทำให้เมื่ออยู่ในสภาวะสิ่งแวดล้อมที่อุณหภูมิสูงจะไม่ส่งผลกระทบในด้านความแข็งแรง และยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติให้แข็งแรงและกำบังรังสีได้ดีกว่าหรือเทียบเท่าคอนกรีต วัสดุแก้วที่ถูกพัฒนาสำหรับการกำบังรังสีนั้นโดยส่วนใหญ่แก้วที่ถูกพัฒนานั้นจะเป็นแก้วในระบบ SiO_2-PbO และเติมโลหะอัลคาไลน์ลงไปเล็กน้อยเพื่อช่วยในการหลอม แก้วที่ถูกพัฒนาจะเป็นแก้ว SiO_2-PbO เนื่องมาจากกระจกหน้าต่างและขวดแก้วต่างๆเหล่านี้จะอยู่ในระบบของซิลิกาและมีปริมาณโลหะอัลคาไลน์ผสมอยู่เล็กน้อย แต่แก้วฟอสเฟตเป็นที่น่าสนใจสำหรับการนำมาพัฒนาเป็นวัสดุกำบังรังสีเนื่องจาก แก้วฟอสเฟตมีแถบการดูดกลืนเลื่อนมาทางช่วงที่มีความยาวคลื่นสั้นเมื่อเปรียบเทียบกับแก้วชนิดอื่นๆ นั่นหมายความว่าช่วงการส่งผ่านของแสงจะมีความกว้างมากขึ้น [4-5] จึงทำให้แก้วฟอสเฟตมีความน่าสนใจและมีข้อได้เปรียบในเรื่องของความโปร่งใส จากการประชุมสัมมนานานาชาติเกี่ยวกับการออกแบบที่ใส่ใจต่อสิ่งแวดล้อมในปี ค.ศ. 2003 [6] ได้รณรงค์ให้มีการปรับเปลี่ยนมาใช้สารที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในผลิตภัณฑ์ต่างๆ และข้อมูลจากศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์ กรมควบคุมมลพิษพบว่า เมื่อเปรียบเทียบความเป็นพิษและ

ระดับความรุนแรง ตะกั่วจะส่งผลกระทบต่อร่างกายมากกว่า บิสมัท [7,8,9] จากเหตุผลดังกล่าวผู้วิจัยจึงสนใจที่จะเลือกใช้บิสมัสเติมเข้าไปในระบบแก้วฟอสเฟตเพื่อเพิ่มคุณสมบัติการกำบังรังสีและทดแทนตะกั่วที่มีความเป็นพิษสูง เพราะบิสมัสกับตะกั่วมีคุณสมบัติการกำบังรังสีแกมมาใกล้เคียงกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาผลของ Bi_2O_3 ที่มีต่อคุณสมบัติยืดหยุ่นและโครงสร้างของแก้วในระบบ $P_2O_5 – BaO – Bi_2O_3$

1.2.2 ศึกษาผลของ Bi_2O_3 ที่มีต่อคุณสมบัติการกำบังรังสีแกมมาของแก้วในระบบ $P_2O_5 – BaO – Bi_2O_3$

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาหาสูตรแก้วที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุกำบังรังสีแกมมา

1.3.2 ศึกษาโครงสร้าง ทดสอบสมบัติยืดหยุ่นของแก้วในระบบ $P_2O_5 — BaO — Bi_2O_3$

1.3.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติการกำบังรังสีของแก้วในระบบ $P_2O_5 — BaO — Bi_2O_3$ ที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณด้วยโปรแกรม WinXcom

1.3.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติการกำบังรังสีของแก้วในระบบ $P_2O_5 — BaO — Bi_2O_3$ ที่ได้จากการทดลองกับคอนกรีต มาตรฐาน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้วัสดุกำบังรังสีที่มีประสิทธิภาพเทียบเท่าหรือดีกว่าคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดพื้นฐาน

ในการสร้างแก้วโดยทั่วไปนั้น นิยมสร้างแก้วที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกอนเพราะเป็นสารเคมีที่หาง่าย เช่น ทรายหรือขวดทั่วไปก็มีซิลิกอนเป็นองค์ประกอบหลัก จากการศึกษาแก้วชนิดต่างๆ พบว่า แก้วฟอสเฟตมีความน่าสนใจ เนื่องจากงานวิจัยของ Arbuzov และคณะในปี ค.ศ. 2005 [5] นั้นพบว่าแก้วฟอสเฟต มีข้อได้เปรียบกว่าแก้วชนิดอื่นตรงที่มีคุณสมบัติทางแสงที่ดีกว่า คือมีช่วงการส่งผ่านสเปคตรัมแสง UV ถึง IR ที่กว้างกว่า และยังเหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายประเภท เช่น ด้านการกำบังรังสีเพราะวัสดุกำบังรังสีที่เป็นแก้วกระจกนั้นต้องมีคุณสมบัติทางแสงที่ดี จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ในการพัฒนาแก้วฟอสเฟตเพื่อเพิ่มศักยภาพในการกำบังรังสีนั้นโดยส่วนใหญ่มักนิยมเติมตะกั่วเพื่อเพิ่มความหนาแน่น จากการประชุมสัมมนานานาชาติเกี่ยวกับการออกแบบที่ใส่ใจต่อสิ่งแวดล้อมในปี ค.ศ. 2003 [6] ได้รณรงค์ให้มีการปรับเปลี่ยนมาใช้สารที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในผลิตภัณฑ์ต่างๆ และข้อมูลจากศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์ กรมควบคุมมลพิษพบว่า เมื่อเปรียบเทียบความเป็นพิษและระดับความรุนแรง ตะกั่วจะส่งผลกระทบต่อร่างกายมากกว่า บิสมัท [9] จากเหตุผลดังกล่าวผู้วิจัยจึงสนใจที่จะเลือกใช้บิสมัสเติมเข้าไปในระบบแก้วฟอสเฟตเพื่อเพิ่มคุณสมบัติการกำบังรังสีและทดแทนตะกั่วที่มีความเป็นพิษสูง เพราะบิสมัสกับตะกั่วมีเลขอะตอมใกล้เคียงกันใกล้เคียงกัน

2.2 ความหมายแก้ว

ตามพจนานุกรม WEBSTER'S INTERNATIONAL กล่าวไว้ว่า แก้ว คือ วัตถุที่อยู่ในรูปของ AMORPHOUS ที่มีคุณสมบัติโปร่งใสและประกอบขึ้นจากซิลิเกต บอเรต ฟอสเฟต และอื่นๆ

ความหมายของ แก้ว ในทางวิทยาศาสตร์ ซึ่งคิดค้นในปี ค.ศ. 1945 โดย American Society for Testing Materials (ASTM) กล่าวว่า แก้ว คือ การนำวัสดุที่เป็นสารอนินทรีย์ต่างๆมาเผาให้ถึงจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง แล้วเกิดการเย็นตัวกลายเป็นของแข็งอย่างรวดเร็วโดยปราศจากการตกผลึก

แก้ว คือ วัสดุเซรามิกที่ถูกทำขึ้นจากสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิสูง แก้วแตกต่างจากวัสดุเซรามิกอื่นๆ คือ เมื่อองค์ประกอบถูกหลอมเหลวโดยให้ความร้อนและทำให้เย็นตัวลงแล้ว แก้วจะแข็งตัวโดยไม่เกิดโครงสร้างผลึก ดังนั้นแก้วจึงเป็นวัสดุที่ไม่มีผลึก หรือเรียกว่า อสัณฐาน โมเลกุลของแก้วจะไม่มีการเย็นตัวอย่างเป็นระเบียบ [10]

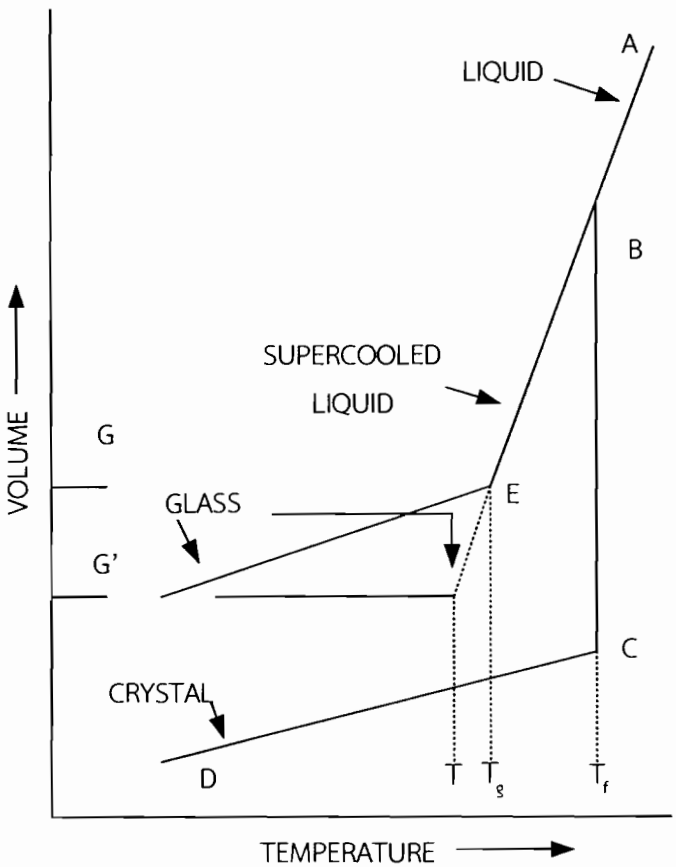
2.3 ประวัติความเป็นมาของแก้ว

มีการสันนิษฐานว่า แก้วถูกพบครั้งแรกเมื่อประมาณ 77,000 ปีมาแล้ว โดยมนุษย์สมัยโบราณได้พบชิ้นแก้วที่เกิดจากภูเขาไฟละลาย และได้นำมาใช้เป็นเครื่องมือ ต่อมามนุษย์จึงรู้จักทำแก้วขึ้นมาได้

เป็นครั้งแรกในแถบตะวันออกกลางเมื่อประมาณ 4,000 ปีมาแล้ว โดยชาวอียิปต์และชาวซีเรียได้ทำลูกปัดแก้ว (Glass Bead) เครื่องประดับอาภรณ์ (Ornaments) และขวดเล็กๆมาใช้สอยได้ ชาวโรมันได้นำช่างทำแก้วจากอียิปต์ไปยังอิตาลี เมื่อประมาณ 100 ปีก่อนคริสตศักราช ต่อมาในราว ค.ศ. 500 จึงมีการประดิษฐ์คิดค้น หลอดเป่าแก้ว (Blow Tube) หลักในการทำแก้วอย่างหนึ่งได้แก่ การที่แก้วสามารถทำให้กลวง และเป็นรูปร่างบางอย่างได้โดยอาศัยการเป่า และศิลปะการทำแก้วโดยการเป่าก็ยังคงมีการใช้งานอยู่จนปัจจุบัน ต่อมาหลังจากอารยธรรมของอาณาจักรโรมันได้เสื่อมถอยลงแล้ว การทำแก้วหลายแห่งในยุโรปก็สลายตัวลงไปด้วย ในระหว่างสมัยกลางประวัติศาสตร์ แก้วได้นำมาใช้ตกแต่งประดับประดาตามโบสถ์ต่างๆ โดยทำโมเสคส์ (Mosaics) และแก้วสี (Stained Glass) นำมาต่อรวมกันเป็นรูปภาพต่างๆตามเรื่องราวจากคัมภีร์ศาสนา นอกจากจะให้ความสวยงามแล้ว ยังนับเป็นประโยชน์สำหรับคนที่อ่านหนังสือไม่ออก ให้สามารถรับรู้เรื่องราวของคัมภีร์จากภาพเหล่านั้นได้ สมัยนั้นแก้วชั้นดีที่สุดที่ใช้ในการประดับหน้าต่างโบสถ์ เป็นแก้วที่ทำจากนอร์มันดี และลอเรน แหล่งศูนย์กลางของการทำแก้วค่อยๆเคลื่อนย้ายมาอยู่ที่กรุงเวนิซเป็นลำดับ เป็นเวลานับศตวรรษที่ชาวเวนิซได้พัฒนาแบบการตกแต่งประดับประดาแก้วเป็นเอกลักษณ์ของตนเองโดยเฉพาะมีการใช้แก้วสีใหม่ๆและกระจกเงา แก้วของชาวเวนิซเป็นที่ยอมรับนับถือว่าเป็นแก้วชั้นดีและสวยงามที่สุดในโลกติดต่อกันมาเป็นเวลา 300 ถึง 400 ปีทีเดียวจนถึงปลายศตวรรษที่ 17 ความลับและฝีมือในการทำแก้วได้แพร่เข้าสู่ยุโรปตอนเหนือ และในศตวรรษที่ 17 นี้เองพบว่า โบฮีเมีย ฝรั่งเศส อังกฤษ และเนเธอร์แลนด์ก็สามารถผลิตแก้วที่สวยงามออกมามากขึ้น ฝรั่งเศสได้พัฒนาการทำแก้วแผ่นเรียบ อังกฤษได้ค้นพบการทำแก้วเทียมผสมตะกั่ว ซึ่งเป็นการเริ่มต้นไปสู่ยุคของการเจียระไน การแกะลวดลายลงบนแก้วเจียระไน ตลอดจนการทำก้านแก้วทึบแสงบิดเกลียว และพัฒนาต่อมาในศตวรรษที่ 18 อังกฤษนับว่ามีชื่อเสียงมากในการผลิตแก้วเช่นนี้ ในปลายศตวรรษที่ 19 เครื่องจักรชุดแรกที่ใช้ในการทำแก้ว ได้ถูกประดิษฐ์ขึ้น นับเป็นการปฏิรูปการทำแก้วขึ้นอีกขั้นหนึ่ง ในศตวรรษที่ 20 มนุษย์ก็ได้เครื่องจักรอัตโนมัติในการผลิตขวดแก้ว การผลิตแก้วแผ่นเรียบแบบ Plate Glass และ Sheet Glass การผลิตแก้วแผ่นเรียบแบบ float glass ตลอดจนความก้าวหน้าของการผลิตแก้วไฟเบอร์ และคุณประโยชน์ของแก้วเหล่านี้ ในขณะเดียวกันบรรดานักออกแบบชาติต่างๆก็ได้คิดประดิษฐ์กรรมใหม่ๆ ทำให้แก้วที่ผลิตออกมาใช้มีศิลปะงดงามยิ่งขึ้น นอกจากนี้แก้วถูกพัฒนาโดยใช้ประโยชน์จากวัตถุดิบหลักและกระบวนการในการทำแก้ว ในการประดิษฐ์แก้วเพื่อใช้งานจะแบ่งได้ 2 ด้านใหญ่ๆ ระหว่างการประดิษฐ์แก้วหัตถกรรมสำหรับงานศิลปะกับอุตสาหกรรมการผลิตแก้วเพื่อใช้ประโยชน์อื่นๆ และในช่วงหลังศตวรรษที่ 19 Ernst Abbe และ Otto Schott เป็นผู้ริเริ่มพัฒนาโดยมีความต้องการแก้วชนิดใหม่และดียิ่งขึ้น การทดลองทั้งสองคนเหมือนกับแบบจำลองที่มีการศึกษาในภายหลังซึ่งมีการเปิดเผยถึงความหลากหลายในการใช้งานของแก้วนั่นเอง [11]

2.4 การเกิดแก้ว

แก้วเกิดจาก การเย็นตัวลงของของเหลวอย่างรวดเร็วผ่านสภาพของ Supercooled Liquid เมื่ออุณหภูมิต่ำลง จะอยู่ในสภาพแก้ว (Glassy State) โดยไม่เกิดผลึก ซึ่งในการพิจารณาการเกิดแก้วนั้นสามารถติดตามได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาตรกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปของการเกิดแก้ว [12]

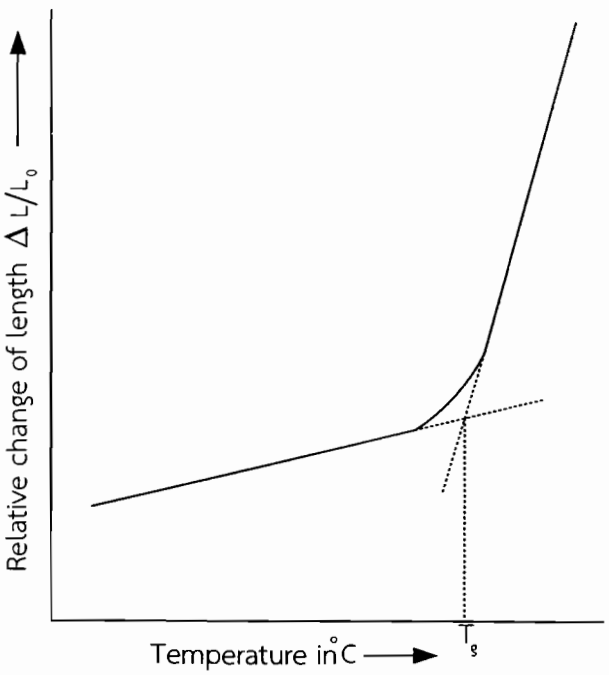
จากภาพที่ 2.1 เมื่อเริ่มพิจารณาจุด A โดยแก้วอยู่ในสภาพของเหลว เมื่ออุณหภูมิลดลงปริมาตรของของเหลวจะลดลงจากจุด A ถึงจุด B ซึ่ง ณ จุด B นี้ ถ้าทำการลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆของเหลวนั้นจะเกิดผลึกขึ้น เมื่อทำให้ปริมาตรลดลงอย่างรวดเร็วจากจุด B ถึงจุด C อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้เรียกว่า จุดเยือกแข็ง (Freezing Point; T_f) จากนั้น เมื่ออุณหภูมิลดลงปริมาตรจะเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ จากจุด C ถึงจุด D เกิดเป็นของแข็งที่มีผลึก (Crystal)

ถ้า ณ จุด B มีการเย็นตัวอย่างรวดเร็วเพียงพอ ของเหลวจะมีปริมาตรลดลงอย่างต่อเนื่อง จากจุด B ถึงจุด E ซึ่งของเหลวนี้อยู่ในสภาพของ supercooled liquid พบว่าความชันของกราฟจะคงที่จาก

จุด A ถึงจุด E เมื่ออุณหภูมิลดลง ปริมาตรลดลงอย่างช้าๆ ทำให้ความชันของกราฟมีการเปลี่ยนแปลงไป จะได้ของแข็งที่อยู่ในสภาพแก้ว (glass transition temperature; T_g)

ถ้าอุณหภูมิลดลงจากจุด T_g อย่างช้าๆ พบว่า ปริมาตรจะลดลงอย่างต่อเนื่องจากจุด E จนถึงอุณหภูมิหนึ่ง (T) ปริมาตรของแก้วจะคงที่ แม้ว่าอุณหภูมิจะลดลงอีกก็ตาม ณ ที่อุณหภูมิ T นี้เป็นอุณหภูมิที่ทำให้แก้วเกิดความเสถียร (Stabilization) แต่ถ้าพิจารณาที่อุณหภูมิสูงกว่า T_g เล็กน้อย พบว่า ปริมาตร โครงสร้าง และสมบัติอื่นๆ ของแก้วจะเปลี่ยนแปลง ซึ่งในช่วงอุณหภูมิสูงกว่าและต่ำกว่า T_g เล็กน้อย ประมาณ $T_g \pm 50^{\circ}C$ นี้ เรียกว่า ช่วงการเปลี่ยนแปลงของแก้ว (Transformation Range of Glass) เมื่อพิจารณาถึงช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงของแก้ว พบว่า แก้วจะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง หรือมีการจัดเรียงตัวอย่างช้าๆ เพื่อทำให้โครงสร้างเข้าสู่สภาวะสมดุล (Equilibrium State) เป็นผลทำให้สมบัติด้านต่างๆ ของแก้วคงที่ ซึ่งช่วงอุณหภูมิดังกล่าวนี้เป็นช่วงที่ใช้ในกระบวนการอบแก้ว (Annealing Process)

อุณหภูมิที่สำคัญและเป็นประโยชน์มากในการศึกษาเรื่องแก้วคือ อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงสภาพแก้ว (T_g) ดังแสดงในภาพที่ 2.1 ซึ่งเป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นกราฟระหว่างปริมาตรและอุณหภูมิ แต่ในความเป็นจริงแล้ว การปรากฏค่า T_g ที่ชัดเจนเกิดขึ้นได้ยาก เนื่องจากเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของแก้วและอุณหภูมิในช่วงการเปลี่ยนแปลงจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง เช่น กราฟแสดงความสำคัญระหว่างการเปลี่ยนแปลง $\Delta L/L_0$ ของแก้วกับอุณหภูมิ ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลง $\Delta L/L_0$ ของแก้วกับอุณหภูมิ [12]

จากภาพที่ 2.2 เห็นได้ว่า ช่วงที่แก้วมีอุณหภูมิสูง (สภาพแก้วเหลว) และอุณหภูมิต่ำ (สภาพแก้วแข็ง) เส้นกราฟจะเป็นเส้นตรง แต่ช่วงอุณหภูมิตรงกลาง การเปลี่ยนแปลงความยาวจะเป็นเส้นโค้ง ดังนั้น ในการหาค่า T_g ทำได้โดยต่อแนวเส้นตรง (Extrapolate) จากเส้นกราฟในสภาพแก้วเหลวและสภาพแก้วแข็งสัมผัส (Tangential) กับส่วนโค้งของกราฟ จุดตัดของเส้นตรงที่เกิดขึ้นจะได้ค่า T_g ของแก้วชนิดนั้น ในทางปฏิบัติ ช่วงการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงของ $T_g \pm 30^{\circ}C$ ถึง $T_g \pm 50^{\circ}C$ ซึ่งช่วงดังกล่าวนี้ จะเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแก้วนั่นเอง

เมื่อกล่าวถึง จุดอบแก้ว (Annealing Point) เป็นจุดที่ให้ความเครียดภายในแก้ว (Internal Stress) ลดลงหรือหมดไป หรือกล่าวได้ว่า ณ จุดอบแก้วนี้ แก้วมีความหนืด 10 $N \cdot s/m^2$ ทั้งนี้ จุดอบแก้วจะแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของแก้ว องค์ประกอบในแก้วและอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมแก้ว เป็นต้น

แก้วที่ถูกทำขึ้นเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ตามที่ต้องการแทนแก้วที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ซึ่งปรากฏตามพื้นผิวโลกค้นพบในปริมาณน้อย ไม่เพียงพอกับความต้องการใช้แก้วที่มีปริมาณมาก เครื่องมือเครื่องใช้สอยที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน จึงเป็นแก้วที่ถูกผลิตขึ้นมาทั้งสิ้น

การทำแก้วขั้นพื้นฐานเป็นการนำทรายซิลิกา (Silica Sand) มาเผาให้ร้อนจนหลอมละลายเป็นของเหลว ทรายเมื่อหลอมละลายแล้วจะมีลักษณะจับตัวหนาและเหนียว เมื่อทิ้งให้เย็นตัวลงทั้งความหนาและความเหนียวก็จะเพิ่มขึ้น แล้วจะแข็งเป็นแก้ว ซิลิกาต้องการความร้อนสูงมากจึงจะถึงจุดหลอมเหลว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใส่ส่วนประกอบบางอย่างลงไปผสมกับทรายด้วย เพื่อช่วยให้ทรายหลอมละลายได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ส่วนผสมบางชนิดยังถูกใส่เข้าไปเพื่อทำให้แก้วมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น ซึ่งจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับการนำแก้วนั้นๆ ไปใช้งาน หรืออาจผสมสารที่ให้สี (Coloring Agent) ลงไปผสมก่อนที่ส่วนประกอบต่างๆจะหลอมละลาย เมื่อส่วนประกอบต่างๆ ถูกผสม ได้ตามสัดส่วนที่ถูกต้องแล้วนำมาใส่ในเตาหลอม (Furnace) แล้วแก้วที่อยู่ในเตาจะหลอมละลาย พร้อมที่จะนำไปทำให้เป็นรูปร่างต่างๆ ต่อไป หลังจากได้แก้วเป็นรูปตามต้องการแล้ว จะต้องปล่อยทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ เพื่อให้มีความแข็งตัวและความเหนียว กรรมวิธีนี้นับเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากอันหนึ่งของการทำแก้ว แก้วบางชนิดก็ต้องการการตกแต่งหรือขัดเงาอีกครั้ง เพื่อให้ได้ผิวสัมผัสที่เรียบ [13]

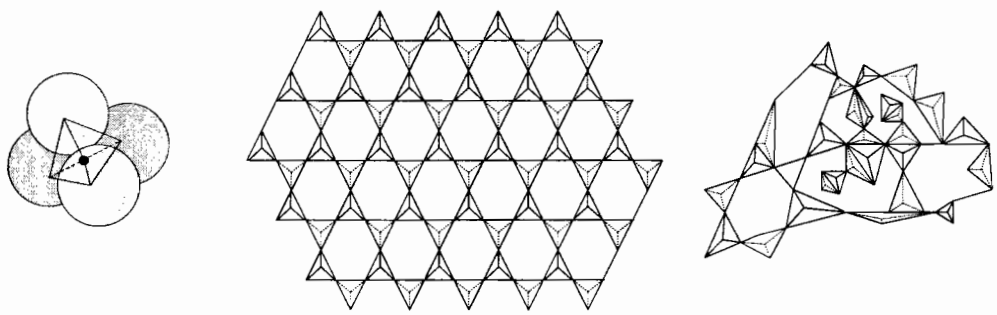
2.5 โครงสร้างของแก้ว

โครงสร้างของแก้วอาจแบ่งได้ 3 กลุ่ม ตามชนิดของแก้วดังนี้คือ

2.5.1 Glass-forming oxide

แก้วที่ทำมาจากสารอนินทรีย์ส่วนใหญ่มักจะเป็นซิลิกา (SiO_2) หน่วยย่อยพื้นฐานของซิลิกา คือ SiO_4^{4-} ซึ่งมีไอออนของซิลิกอน Si^{4+} อยู่ตรงกลางของรูปทรง tetrahedron เกิดพันธะโคเวเลนต์ไอออนิกกับไอออนของออกซิเจนอีก 4 ไอออน ดังแสดงในภาพที่ 2.3 (a) โดยปกติโครงผลึกของซิลิกา เช่น Cristobalite ซึ่ง Si-O Tetrahedra จะเกิดพันธะต่อกันอย่างมีระเบียบ ดังแสดงในภาพที่ 2.3 (b) แต่สำหรับแก้วซิลิกาแล้ว Si-O Tetrahedra จะเกิดพันธะเป็นโครงสร้างโครงข่ายอย่าง

หลวมๆ และไม่เป็นระเบียบ ดังภาพที่ 2.3 (c) โบรอนออกไซด์ (B_2O_3) ก็มีโครงสร้างเป็น Glass-Forming Oxide เช่นกัน กล่าวคือ โบรอนออกไซด์จะประกอบด้วยหน่วยย่อย Triangles โดยที่อะตอมของโบรอนขยับออกจากระนาบของออกซิเจนเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามภายในโครงสร้างของแก้ว Borosilicate ที่มีการเติมออกไซด์ของธาตุอัลคาไลน์ หรือ อัลคาไลน์เอิรท์ BO_3^{3-} Triangle สามารถเปลี่ยนโครงสร้างได้เป็น BO_4^{4-} Tetrahedra โดยที่แคตไอออนของอัลคาไลหรืออัลคาไลน์เอิรท์จำเป็นที่จะต้องทำหน้าที่ในการรักษาประจุของโครงสร้างให้เป็นกลาง โบรอนออกไซด์เป็นสารที่สำคัญที่มักถูกเติมลงในแก้วหลายชนิด เช่น แก้ว Borosilicate และ Aluminoborosilicate BO_4^{4-} [10]

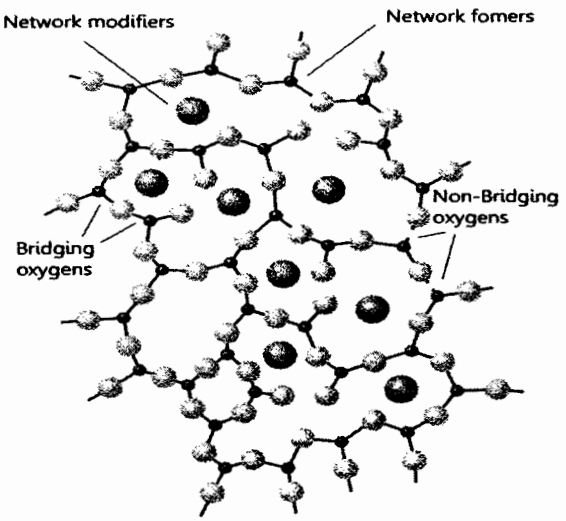


(a) (b) (c)

ภาพที่ 2.3 การจำลอง (a) silicon-oxygen tetrahedral (b) โครงผลึกของซิลิกา (c) โครงผลึกแก้ว [10]

2.5.2 Glass-Modifying Oxide

เมื่อเติมสารบางอย่างลงในแก้ว จะทำให้โครงสร้างโครงข่ายของแก้วบางส่วนถูกทำลาย เราเรียกโครงสร้างนี้ว่า Network Modifier เช่น อัลคาไลออกไซด์ คือ Na_2O และ K_2O และ อัลคาไลน์เอิรท์ออกไซด์ คือ CaO และ MgO เป็นต้น เมื่อโครงสร้างโครงข่ายบางส่วนของแก้วแตกออก ดังแสดงในภาพที่ 2.4 จะทำให้ความหนืดของแก้วลดลง และสามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น อะตอมของออกซิเจนจากออกไซด์เหล่านี้จะเข้าสู่โครงสร้างโครงข่ายของซิลิกาที่จุดเชื่อมต่อระหว่าง Tetrahedra และทำลายโครงสร้างโครงข่ายนั้น ทำให้เกิดอะตอมของออกซิเจนที่มีอิเล็กตรอนไม่มีคู่ขึ้น ดังภาพที่ 2.4 ส่วนไอออนของ Na^+ และ K^+ จาก Na_2O และ K_2O จะไม่สามารถเข้าไปในโครงสร้างโครงข่ายนี้ได้ แต่จะยังคงอยู่ในรูปไอออนและเกิดพันธะไอออนิกภายในซอกของโครงสร้างโครงข่ายนั้น ไอออนเหล่านี้จะส่งเสริมให้แก้วเกิดผลึกภายในโครงสร้างได้



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของแก้วที่ประกอบด้วย network former และ network modifier [10]

2.5.3 Intermediate Oxide

ในแก้ว ออกไซด์ของสารประกอบบางชนิดไม่สามารถเกิดโครงสร้างโคร่งข่ายแก้วได้ด้วยตัวเอง แต่สามารถเข้าไปร่วมกับโครงสร้างโครงข่ายของแก้วที่มีอยู่ ออกไซด์ของสารประกอบเหล่านี้จะถูกเรียกว่า Intermediate Oxide เช่น Al_2O_3 สามารถเข้าไปร่วมกับโครงสร้างโครงข่ายของซิลิกาได้ ในภาพที่ 2.4 glass-forming oxide อาจเป็น AlO_4^{4-} Tetrahedra แทนกลุ่ม SiO_4^{4-} บางกลุ่ม ทำให้แก้วมีสมบัติพิเศษเช่น แก้ว Alumino silicate นี้จะทนต่ออุณหภูมิที่สูงๆได้ดีกว่าแก้วธรรมดา ตะกั่วออกไซด์ก็เป็น Intermediate Oxide อีกตัวอย่างที่ถูกเติมลงไปในแก้วซิลิกาบางชนิดเช่นกัน

2.6 ชนิดของแก้ว

วัสดุแก้วอาจจำแนกออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้ [12, 14, 15]

2.6.1 แก้วทางการค้าเป็นแก้วที่มีการนำมาใช้งานโดยทั่วไปสามารถแบ่งได้ดังนี้

2.6.1.1 ควอทซ์ (Fused Quartz) เป็นแก้วที่มีเปอร์เซ็นต์ของซิลิกาสูง บางทีเรียกว่าแก้วซิลิกาบริสุทธิ์ เป็นแก้วที่มีความแข็งแกร่ง มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น (Linear Expansion Coefficient) ต่ำ มีความทนทานต่อไฟฟ้า สารเคมีแม้ในขณะที่ร้อน แก้วชนิดนี้จะโปร่งแสงสำหรับช่วงความยาวคลื่นค่อนข้างกว้างในสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Spectrum) และโปร่งแสง คือคลื่นเสียงสามารถทะลุผ่านได้ ไม่ดูดกลืนแสงอัลตร้าไวโอเลต มีน้ำหนักเบา ข้อเสียคือ แก้วชนิดนี้จุดหลอมเหลวสูงและมีราคาแพง

2.6.1.2 แก้วอ่อนหรือแก้วโซดา (Soft Glass หรือ Soda Glass) หรืออาจเรียกว่าแก้วไลม์ (Lime Glass) การผลิตแก้วชนิดนี้เกิดขึ้นเนื่องจากพบว่าเมื่อเติมโซดา อาจอยู่ในรูปของ Na_2O หรือ Na_2CO_3 หรือโปแตส (K_2O) ลงในซิลิกาจะช่วยทำให้จุดอ่อนตัวของซิลิกาลดลงกว่าเดิม มาอยู่ที่

ประมาณ 800-900 °C แต่ทำให้มีข้อเสียคือแก้วที่ได้ไม่ค่อยทนต่อสารเคมี ต่อมาพบว่าการเติมไลม์หรือปูนดิบ (CaO) หรือแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) หรืออลูมินา (Al_2O_3) จะช่วยทำให้แก้วมีความทนทานต่อสารเคมีมากขึ้น และยังช่วยให้ผิวแก้วมีความแข็งเพิ่มขึ้น ทำให้ทนทานต่อการขูดขีด มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นสูงมาก ยากต่อการทำแอนนีล

2.6.1.3 แก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate Glass) บางครั้งเรียกว่าแก้วแข็ง แก้วชนิดนี้มีชื่อทางการค้าว่า ไพเร็กซ์ (Pyrex) หรือ Kimax เป็นแก้วที่มีส่วนผสมของโซดาและโปแตสอยู่เพียงเล็กน้อย ไม่มีไลม์อยู่เลย และจะมีบอรอนออกไซด์ (B_2O_3) อยู่ประมาณ 12เปอร์เซ็นต์ ทำให้มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นต่ำมากทนต่อความร้อนและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วได้ดี ทนต่อสารเคมีได้ดีมาก

2.6.1.4 แก้วตะกั่ว (Lead Glass) บางครั้งเราเรียกแก้วชนิดนี้ว่า Flint Glass แก้วชนิดนี้จะเติมตะกั่วออกไซด์ ซึ่งจะทำให้แก้วมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าแก้วโซดาและช่วยให้แก้วมีค่าดรรชนีหักเห (Reflective Index) สูงขึ้น มีกำลังในการกระจายแสง สูงขึ้นด้วย แก้วชนิดนี้จัดเป็นแก้วอ่อนชนิดหนึ่ง และมีสมบัติดีคือสามารถงอได้มากกว่าแก้วชนิดอื่นๆ และใช้เชื่อมต่อกับโลหะได้ดี

2.6.1.5 แก้วไวคอร์ (Vycor Glass) ประกอบด้วย SiO_2 96เปอร์เซ็นต์ B_2O_3 3เปอร์เซ็นต์ มีชื่ออีกอย่างว่าแก้วซิลิกา 96เปอร์เซ็นต์ แก้วชนิดนี้มีสมบัติที่ดีหลายอย่างคือ มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นต่ำ ต้านทานความร้อนและสารเคมีได้ดี แก้วชนิดนี้มีจุดอ่อนตัวค่อนข้างสูง

2.6.1.6 แก้วอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate Glass) ส่วนประกอบสำคัญของแก้วชนิดนี้คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ประมาณ 60เปอร์เซ็นต์ เป็นแก้วที่ทนต่อสารเคมีและไฟฟ้าได้ดี แม้แต่ที่อุณหภูมิสูงๆ มีการขยายตัวเชิงเส้นค่อนข้างสูงเมื่อได้รับความร้อน

2.6.1.7 แก้วที่ใช้สำหรับงานแสง (Optical Glass) เป็นแก้วที่ใช้ทำเลนส์หรือทัศนอุปกรณ์มีหลายชนิด และใช้งานต่างกัน สมบัติทางกายภาพที่สำคัญคือค่าดรรชนีหักเห

2.6.2 แก้วพิเศษ (Special Glass) เป็นแก้วที่ทำขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีสมบัติที่ดีตามประสงค์ แก้วประเภทนี้จึงมีสมบัติเด่นเฉพาะตัว ตัวอย่างของแก้วพวกนี้ได้แก่

2.6.2.1 แก้วปลอดซิลิกอน (Silicon-Free Glass) เป็นแก้วอีกชนิดหนึ่งที่ใช้สำหรับทำหลอดแสงโซเดียม

2.6.2.2 แก้วฟอสเฟต (Phosphate Glass) เป็นแก้วที่มีคุณสมบัติต้านทานต่อกรดกัดแก้ว (Hydro fluoric, HF) ได้ดี

2.6.2.3 แก้วที่มีตะกั่วสูง (High Lead Content Glass) เป็นแก้วที่นำไปใช้ในงานด้านรังสี เนื่องจากสามารถดูดกลืนรังสีแกมมา และรังสีเอ็กซ์ได้ดี และนอกจากนี้แก้วชนิดนี้จัดเป็น Very Dense Flint Glass ด้วยจึงทำเป็นเลนส์แว่นตาได้

2.6.2.4 Fused silica glass การผลิตแก้วชนิดนี้ใช้วิธีไพโรไลซิส (Pyrolysis) ซิลิกอนเตตระคลอไลด์ (Silicon tetra chloride) โดยใช้อุณหภูมิและความดันสูง กระบวนการนี้ทำให้ได้แก้วที่มีความบริสุทธิ์ของซิลิกาสูง แก้วที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีรูปร่างเป็นแผ่น การผลิตนี้ใช้อุณหภูมิสูงเป็นการกำจัดสารปนเปื้อนที่มีอยู่ ทำให้ Fused Silica ที่ได้บริสุทธิ์มาก คือจะมีสารปนเปื้อนในระดับเพียง

1 ในล้านส่วนเท่านั้น แก้วชนิดนี้มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นต่ำ จึงใช้ประโยชน์สำหรับทำเลนส์กล้องโทรทัศน์

2.6.2.5 High Silica Glass เป็นแก้วที่มีองค์ประกอบใกล้เคียงกับ Fused silica มีสมบัติคล้ายกัน แต่แก้วชนิดนี้มีส่วนผสมของซิลิกาสูงกว่า ทำให้มีสมบัติพิเศษคือไม่แตกง่ายแม้ว่าจะเผาแก้วนี้จนร้อนแดงแล้วจุ่มลงในน้ำที่มีน้ำแข็งอยู่ด้วยในทันที ทนต่อสารเคมีได้ดีกว่าแก้วชนิดอื่น

2.6.2.6 Glass-Ceramic หรือ Pyrocerum เป็นวัสดุที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกับการผลิตแก้ว แล้วเปลี่ยนเป็นเซรามิก ประเภทผลึก ผลึกที่เกิดขึ้นเป็นผลึกที่มีขนาดเล็กกว่าและแบบเดียวกันมากกว่าเซรามิกทั่วๆ ไป มีสมบัติใกล้เคียงเซรามิกมากกว่าแก้วที่ทำขึ้น มีสมบัติที่คงตัวทั้งในด้านอุณหภูมิและกระบวนการทางฟิสิกส์ ลักษณะเป็นผลึกทึบแสง ไม่มีรูพรุน เป็นเม็ดละเอียด มีความแข็งแรงมาก ทนต่อแรงดันได้ถึง 30,000 psi. (Pound Per Square Inch) แก้วชนิดนี้ใช้ในจรวดนำวิถี อุปกรณ์ทางอิเล็กโทรนิกส์

2.6.2.7 แก้วนิรภัย (Safety Glass) แก้วชนิดนี้แบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

1.) แก้วนิรภัย (Laminated Safety Glass) เป็นแก้วที่ประกอบแผ่นบางมีความหนา 0.125 นิ้ว 2 แผ่นประกอบกันโดยมีพลาสติกที่มีสมบัติไม่แตกเชื่อมอยู่ ลักษณะของแก้วนี้คล้ายแซนวิช พลาสติกที่ใช้เป็นพวก Poly Vinyl Butyryl Resin เป็นพลาสติกที่มีความยืดหยุ่นมาก ทำให้แก้วใสในทุกสภาวะ ไม่มีผลต่อแสงอาทิตย์และไม่ต้องใช้กาวหรือวัสดุกันน้ำเลยในขณะที่นำมาติดกัน

2.)แก้วนิรภัยแบบ Tempered แก้วชนิดนี้แข็งแรงและเหนียวมาก ใช้ทำประตู หน้าต่างรถยนต์ ท่อน้ำ สามารถทำให้โค้งงอได้ เป็นแก้วที่มีความเครียดภายในสูง ถ้าผิวหน้าแตกจะทำให้แก้วชนิดนี้แตกเป็นชิ้นเล็กๆ หลายๆ ชิ้น การทำแก้วชนิดนี้ขึ้นอยู่กับการแอนนีลเพื่อทำให้เกิดความเครียดไม่เท่ากันทั้งแผ่น

2.6.2.8 แก้วเปลี่ยนสี (Photo Chromic Silicate) เป็นแก้วที่เปลี่ยนเป็นสีดำหรือมืดลงเมื่อถูกกับแสงสว่าง แต่จะกลับคืนได้อีกเมื่อไม่มีแสงสว่างมาก สมบัติของแก้วชนิดนี้ต้องการปฏิกิริยาผันกลับได้ แก้วชนิดนี้ใช้สำหรับทำเลนส์แว่นตา

2.7 คุณสมบัติของแก้ว (Properties of Glass)

แก้วมีคุณสมบัติโดดเด่นหลายประการ ดังนี้ [16-17]

2.7.1 เป็นสารที่ไม่มีลักษณะเป็นผลึก ในบางครั้งจึงเรียกแก้วว่าเป็น Amorphous Solid

2.7.2 ไม่มีจุดหลอมเหลวที่แน่นอน ดังนั้นจึงนิยมอธิบายคุณสมบัติต่างๆ ของแก้วในเทอมของความหนืด (Viscosity) หรือความต้านทานการไหล (Resistance of flow)

2.7.3 ทำให้โปร่งแสง โปร่งใสและทึบได้ตามต้องการ

2.7.4 สามารถทำให้อ่อนตัวได้ด้วยความร้อน ทำให้สามารถทำเป็นรูปร่างต่างๆได้ง่าย

2.7.5 ล้างและทำลายเชื้อโรคได้ง่าย

2.7.6 ทนต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อน

2.7.7 ไม่ทำปฏิกิริยากับกรด และด่างเกือบทุกชนิด

2.7.8 เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี

2.7.9 ทำให้มีสีต่างๆได้

2.7.10 มีความเสถียรทางเคมีสูงที่อุณหภูมิปกติ

2.7.11 มีความแข็งแรงสูง

2.7.12 รับแรงอัดและแรงดึงได้ดี (ยกเว้นแรงกระแทก)

2.7.13 ป้องกันการซึมของน้ำหรืออากาศได้ดี

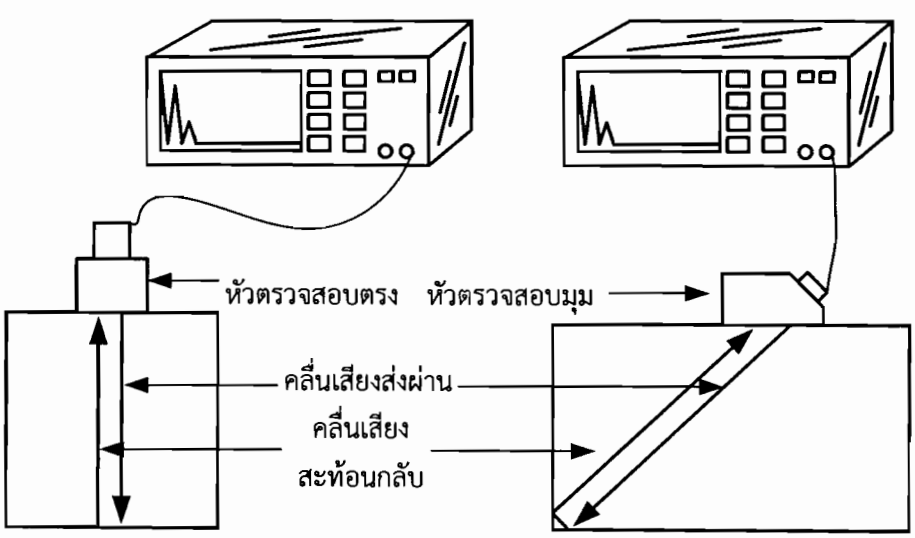
2.7.14 ทนต่ออุณหภูมิสูง

2.7.15 มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำ

2.8 การวัดคุณสมบัติความยืดหยุ่นของแก้วโดยใช้เทคนิคอัลตร้าโซนิค

ในการวัดคุณสมบัติความยืดหยุ่นนั้นโดยปกติจะทำการขึ้นรูปตามาตรฐานแล้วทำการทดสอบ เช่น ทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ และทดสอบความแข็ง เป็นต้น การทดสอบเหล่านี้ เป็นการทดสอบแบบทำลาย (Destructive Testing: DT) อีกทั้งยังเป็นการลำบากสำหรับวัสดุบางชนิด เช่น แก้ว หรือเซรามิก เพราะทำการขึ้นรูปตามมาตรฐานการทดสอบยาก จึงเกิดเทคนิคการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Testing: NDT) โดยใช้คลื่นเสียงอัลตร้าโซนิค ซึ่งเหมาะสมสำหรับวัสดุแก้ว ในการทำวิจัยครั้งนี้จึงเลือกเอาการทดสอบคุณสมบัติความยืดหยุ่นของแก้วตัวอย่างโดยใช้คลื่นเสียงอัลตร้าโซนิค

การวัดคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคนั้นจะวัดความเร็วคลื่นเสียงตามยาวโดยใช้หัวตรวจสอบตรง และความเร็วเฉือนใช้หัวตรวจสอบมุม 45° การวัดความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคทำได้ดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 การวัดความเร็วตามยาวและความเร็วเฉือนด้วยเทคนิคอัลตร้าโซนิค

เมื่อวัดความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคทั้งตามยาวและเฉือนแล้วสามารถคำนวณหาค่าคุณสมบัติความยืดหยุ่นได้ดังสมการต่อไปนี้ [18]

$$L = \rho V_L^2 \text{ (GPa)} \tag{2.1}$$

$$G = \rho V_S^2 \text{ (GPa)} \tag{2.2}$$

$$K = L - \left(\frac{4}{3}\right) G \text{(GPa)} \tag{2.3}$$

$$\sigma = \frac{L - 2G}{2(L - G)} \tag{2.4}$$

$$E = 2(1 + \sigma) G \text{(GPa)} \tag{2.5}$$

$$H = \frac{(1 - 2\sigma)E}{6(1 + \sigma)} \text{(GPa)} \tag{2.6}$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่น (kg/m^3)

V_L คือความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคตามยาว (m/s)

V_S คือความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคเฉือน(m/s)

L คือโมดูลัสตามยาว

G คือโมดูลัสเฉือน

E คือยังโมดูลัส

K คือโมดูลัสเชิงปริมาตร

σ คืออัตราส่วนปัวซอง

H คือความแข็งระดับไมโคร

2.9 การวัดความหนาแน่นและการคำนวณหาปริมาตรโดยโมล

การวัดความหนาแน่นของตัวอย่างแก้วทำได้โดยใช้หลักพื้นฐานของอาร์คีมีดีสโดยใช้เอ็นเฮ็กเซนเป็นของเหลวแล้วคำนวณดังสมการ [19]

$$\rho = \rho_L \left(\frac{W_a}{W_a - W_b}\right) \tag{2.7}$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่น (g/m^3)

ρ_L คือความหนาแน่นของของเหลว (เอ็นเฮ็กเซน) มีค่าเท่ากับ 0.66 g/cm^3

W_a คือน้ำหนักของตัวอย่างแก้วที่ชั่งในอากาศ (g)

W_b คือน้ำหนักของตัวอย่างแก้วที่ชั่งในของเหลว (g)

และคำนวณหาปริมาตรโดยโมล (Molar Volume) ของตัวอย่างแก้วสามารถคำนวณได้ดังสมการ [20]

$$V = \frac{M_{glass}}{\rho_{glass}}\left(cm^3\right) \qquad (2.8)$$

เมื่อ V คือปริมาตรโดยโมลของตัวอย่างแก้ว (cm^3)

M_{glass} คือมวลโมเลกุลของแก้ว (g)

ρ_{glass} คือความหนาแน่นของแก้วตัวอย่าง (g)

2.10 การศึกษาโครงสร้างของสารโดยใช้ FTIR Spectrometer

Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR Spectrometer) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูงที่พัฒนามาจาก เครื่อง IR Spectrometer เพื่อให้สามารถทำงานได้รวดเร็วขึ้น มีความสามารถในการแยกสูง และสภาพไวสูง สามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีในปริมาณน้อยๆ ได้ [21]

คลื่นรังสีอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้ อยู่ระหว่างย่านที่มองเห็น (Visible region) กับย่านไมโครเวฟ ความยาวของคลื่นอินฟราเรด แบ่งเป็น 3 ช่วง คือ ช่วง wave number 4,000 – 12,800 cm^{-1} (2.5 – 0.78 μm) เป็นย่านอินฟราเรดใกล้ (Near infrared region) ช่วง wave number 200 – 4,000 cm^{-1} (50-2.5 μm) เป็นย่านอินฟราเรดกลาง (Middle infrared region) ช่วง wave number 10 – 200 cm^{-1} (1,000 – 50 μm) เป็นย่านอินฟราเรดไกล (Far infrared region) นักเคมีวิเคราะห์จะให้ความสนใจ และใช้ประโยชน์คลื่นรังสีอินฟราเรดช่วงกลาง (Middle IR.) มากกว่าช่วงอื่น

คลื่นอินฟราเรดในช่วง Wave number 4,000 – 400 cm^{-1} ซึ่งจัดเป็นแสงอินฟราเรดช่วงกลาง (Middle IR.) มีความถี่ซึ่งตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะโควาเลนซ์ในโมเลกุลของสาร เมื่อสารตัวอย่างได้รับพลังงานจากคลื่นรังสีอินฟราเรดที่พอเหมาะจะเกิดการสั่นหรือการหมุนของพันธะของโมเลกุลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ขั้วคู่ของโมเลกุล ทำให้โมเลกุลเกิดการดูดกลืนแสงแล้ววัดแสงที่ส่งผ่านออกมา แสดงผลเป็นความสัมพันธ์ของความถี่หรือ Wave number กับค่าการส่งผ่านของแสง เรียกว่าอินฟราเรด สเปคตรัม (Infrared Spectrum –IR spectrum)

สเปคตรัมเป็นข้อมูลเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด ซึ่งแตกต่างจากสารชนิดอื่น โมเลกุลที่มีพันธะต่างชนิดกันจะมีความถี่ของการดูดกลืนคลื่นต่างกัน ทำให้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของโมเลกุล

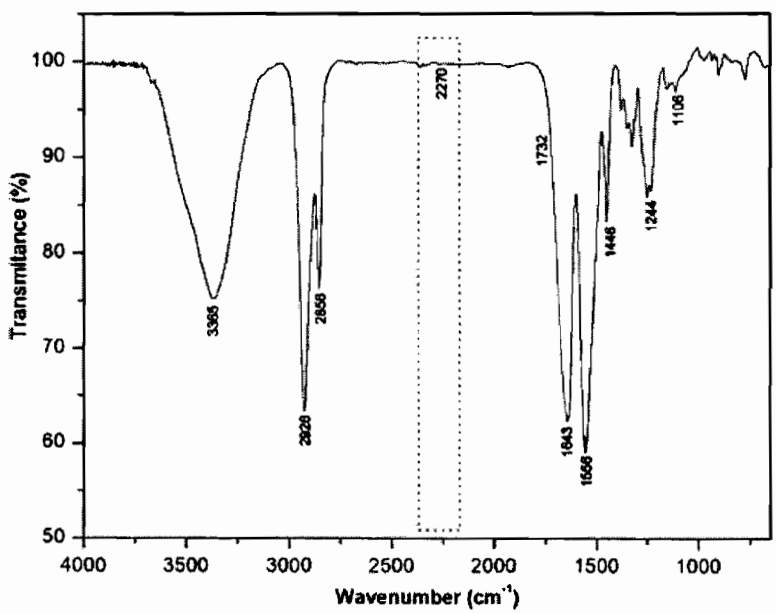
ของสารนั้นๆว่ามีหมู่ฟังก์ชันอะไรบ้าง ในตำแหน่งไหน เช่น สารกลุ่มแอลกอฮอล์ จะพีคของพันธะ O-H อยู่ที่ประมาณ 3,300-3,600 cm^{-1} หมู่เอมีน มีพีคพันธะ N-H อยู่ที่ 3,500 cm^{-1} สารเอสเทอร์ พีคของหมู่ C-O อยู่ที่ประมาณ 1,000-1,300 cm^{-1} เป็นต้น

เมื่อพิจารณาในรายละเอียดที่ปรากฏใน IR spectrum พีคในช่วง 1,350 – 4,000 cm^{-1} จะเป็นช่วงความถี่ของแถบการดูดกลืนคลื่นแสงของพันธะในของหมู่ฟังก์ชันต่างๆที่ค่อนข้างคงที่ ซึ่งกำหนดเป็นย่านความถี่ของหมู่ฟังก์ชัน (Group functional region) และในช่วงประมาณ 910 – 1,350 cm^{-1} จะได้แถบการดูดกลืนคลื่นแสง ที่มีลักษณะเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว เรียกว่าย่านรอยพิมพ์นิ้วมือ (Finger printregion)

การใช้เครื่อง FTIR Spectrometer วิเคราะห์ตัวอย่างใช้เวลาน้อยมากและไม่สิ้นเปลืองสารเคมี จึงนิยมนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการวิเคราะห์ เพื่อการตรวจสอบสารในเชิงคุณภาพ หรือเพื่อการยืนยันสูตรโครงสร้างของสารตัวอย่าง โดยการพิจารณา เปรียบเทียบจากอินฟราเรด สเปคตรัมของสารประกอบมาตรฐานกับตัวอย่าง ที่วัดในตัวกลางชนิดเดียวกัน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน พีคต่อพีคถ้าตรงกันเหมือนกันย่อมแสดงว่าเป็นสารชนิดเดียวกัน เช่น การวิเคราะห์ชนิดหมึกพิมพ์บนแผ่นกระดาษ ชนิดเส้นใยของสิ่งทอ สารเคลือบผิวภาชนะบรรจุอาหาร ตัวอย่างโพลิเมอร์ แผ่นพลาสติก เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยการเทียบ ค่า %Transmittance เช่น การหาปริมาณตัวยา และ สารออกฤทธิ์ในยาเม็ด เป็นต้น

ตำแหน่งของ IR Absorption Bands ในการบอกตำแหน่งของพีค IR สเปกตรานั้น นิยมบอกความยาวคลื่นในหน่วยไมโครเมตร (μm) หรือบอกเป็นเลขคลื่น (wave number, $\tilde{V}$)

เนื่องจากความถี่เป็นปฏิภาคโดยตรงกับเลขคลื่น จึงบอกตำแหน่งของ IR peak เป็นความถี่ซึ่งจริงๆ ควรเป็นเลขคลื่น ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 อินฟราเรด สเปคตรัมของ FTIR Spectrometer [22]

2.11 แหล่งกำเนิดรังสี

โดยทั่วไปแล้วมนุษย์ทุกคนที่อาศัยอยู่บนโลกนี้ จะได้รับรังสีจากธรรมชาติอยู่ตลอดเวลา เช่น ดวงอาทิตย์ สารกัมมันตรังสี สินแร่และสิ่งแวดล้อมจากการที่เราหายใจ ในอาหารที่เจือปนด้วยสารกัมมันตรังสี ในขณะเดียวกันพลังงานของรังสีเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์ด้วย เช่น แสงแดดที่ให้ความร้อน แสงสว่างที่ช่วยในการมองเห็นและสังเคราะห์สารต่างๆ [23, 24] ส่วนรังสีบางชนิดที่มีพลังงานสูงจะอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและอนุภาคพลังงานสูงเมื่อผ่านตัวกลาง จะสามารถทำให้ตัวกลางเกิดการแตกตัวเป็นประจุ (Ionizing radiation) และรังสีพลังงานต่ำซึ่งเมื่อผ่านตัวกลางไม่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Non ionizing radiation) [23] ซึ่งบางชนิดมีประโยชน์ และอาจมีโทษในขณะเดียวกัน เราสามารถแบ่งต้นกำเนิดรังสีที่มนุษย์ได้รับเป็น 2 ประเภท คือ

2.11.1 รังสีที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติ ได้แก่ [24]

2.10.1.1 รังสีคอสมิก (Cosmic radiation) เป็นรังสีชนิดอนุภาคพลังงานสูง ที่มีระดับ พลังงานอยู่ในช่วง 10^{3}-10^{20} อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีประจุหรือเป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น อิเล็กตรอน โปรตอน แอลฟา บีต้า และสามารถแบ่งรังสีคอสมิก ได้เป็น 2 ประเภท คือ

1) รังสีคอสมิกปฐมภูมิ (Primary cosmic radiation) ซึ่งรังสีส่วนใหญ่มาจากนอกระบบสุริยะ สามารถพบได้ทั่วไปในอวกาศ ได้แก่ อนุภาคโปรตอนและอนุภาคแอลฟา เป็นต้น

2) รังสีคอสมิกทุติยภูมิ (Secondary cosmic radiation) เกิดจากการที่รังสีทุติยภูมิวิ่งเข้าสู่ชั้นบรรยากาศของโลก แล้วเกิดการชนทำปฏิกิริยานิวเคลียร์กับนิวเคลียสของอะตอมของธาตุที่อยู่ในอากาศทำให้เกิดอนุภาคใหม่ขึ้นมา เช่น อนุภาคนิวตรอนและอนุภาคโปรตอน เป็นต้น

2.11.1.2 สารกัมมันตรังสีที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติ (Natural radioactivity) อาจพบปะปนอยู่ในรูปของสารประกอบต่างๆ เช่น ดิน หิน และทราย เป็นต้น

2.11.2 รังสีที่มนุษย์สร้างขึ้น

โดยมนุษย์ผลิตขึ้นมาเพื่อใช้ในงานด้านต่างๆ เช่น ทางด้านการแพทย์ เกษตรกรรม และอุตสาหกรรม เป็นต้น เนื่องจากรังสีเป็นพลังงานรูปหนึ่ง สามารถทำปฏิกิริยากับตัวกลางได้โดยการถ่ายเทพลังงานให้กับตัวกลาง ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยทำให้อิเล็กตรอนในอะตอมหรือโมเลกุล มีระดับพลังงานสูงขึ้น (Excitation) เมื่อระดับพลังงานสูงพอ ทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรหลุดออกมาจากอะตอมหรือโมเลกุล เรียกว่าเกิดการแตกตัวเป็นประจุ (Ionization) และเรียกรังสีที่ทำให้เกิดกระบวนการดังกล่าวว่า รังสีที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นประจุ (Ionizing radiation)

2.12 ชนิดของรังสีและอนุภาค

ชนิดรังสีและอนุภาคแบ่งได้ 2 ประเภทดังนี้

2.12.1 ชนิดที่แตกตัวเป็นประจุ [23,24]

2.12.1.1 อนุภาคแอลฟา (Alpha particle, α) เป็นอนุภาคที่ประกอบด้วย นิวตรอน 2 ตัว และโปรตอน 2 ตัว การสลายตัวของอนุภาคแอลฟามักเกิดในธาตุหนัก เพราะอนุภาคแอลฟามีประจุ +2e จึงสามารถถูกสกัดกั้นได้ง่าย ด้วยอลูมิเนียมที่มีความหนาเพียง 0.004 เซนติเมตร เท่านั้น

2.12.1.2 อนุภาคบีตา (Bata particle, β) เกิดจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี สามารถเปลี่ยนทิศทางได้จากแรงดึงดูดในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า มีความเร็วเกือบเท่าความเร็วแสงแต่มีพลังงานสูงกว่าอนุภาคแอลฟา และมีประจุ -1e จึงสามารถสกัดกั้นไม่ให้รังสีผ่านได้ ด้วยอลูมิเนียมที่หนาเพียง 0.65 เซนติเมตร

2.12.1.3 รังสีแกมมา (Gamma rays, $\gamma-$rays) เป็นรังสีที่เกิดจากนิวเคลียสของอะตอมที่อยู่ในสภาวะไม่เสถียร (Excited state) ไม่มีมวล ไม่มีประจุเป็นกลุ่มพลังงาน เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับแสง เนื่องจากรังสีแกมมาไม่มีประจุไฟฟ้า จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางในสนามแม่เหล็ก แต่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นไอออนได้น้อยกว่าอนุภาคแอลฟาและบีต้า ซึ่งรังสีแกมมามีพลังงานตั้งแต่ 100 keV เป็นต้นไป เป็นกลุ่มของพลังงานที่ส่งออกมาจากการสลายตัวของนิวเคลียส เรียกว่าโฟตอน (Photon)

2.12.1.4 รังสีเอ็กซ์ (X-ray) [25] เป็นรังสีที่เกิดจากเครื่องกำเนิดรังสี เช่น เครื่องเอกซ์เรย์ เครื่องเร่งอนุภาคพลังงานสูง เกิดจากการเร่งให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากไส้หลอด วิ่งด้วยความเร็วสูงแล้วเข้าชนเป้าหลอดที่ทำด้วยโลหะหนัก ทำให้เป้าหลอดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา

2.12.2 ชนิดที่ไม่แตกตัวเป็นประจุ (Non ionizing radiation) ได้แก่

อนุภาคนิวตรอน (Neutron particle,n) เป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ เมื่อสลายตัวจะให้อนุภาคโปรตอนและอนุภาคบีต้าที่มีพลังงานต่ำ เนื่องจากไม่มีประจุไฟฟ้า และมีอำนาจในการทะลุทะลวงสูงจึงสามารถผ่านอะตอมเข้าไปรวมกับนิวเคลียสได้ง่าย

2.13 อันตรกิริยาของรังสีกับวัตถุ

รังสีที่อยู่ในรูปของอนุภาคและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีกระบวนการในการถ่ายเทพลังงานให้กับตัวกลางได้ 3 แบบ [26] คือ

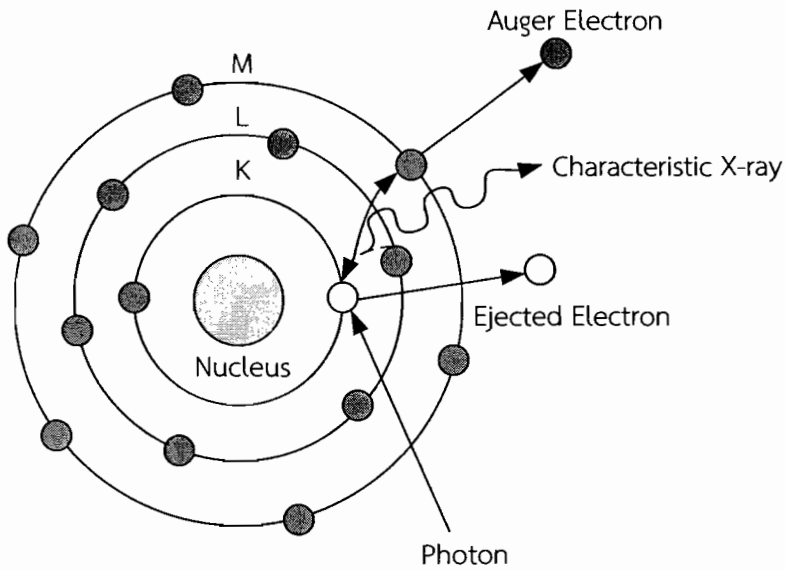
2.13.1 การเกิดโฟโตอิเล็กตริก (Photoelectric effect) ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นระหว่างโฟตอนและอิเล็กตรอน ที่อยู่รอบนิวเคลียส โดยโฟตอนที่เข้ามาชนจะถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้อิเล็กตรอน อิเล็กตรอนดังกล่าวจะถูกผลักออกจากอะตอมด้วยพลังงานจลน์ (Kinetic energy,E_k) ดังสมการ (2.9)

$$E_k = E_\gamma - E_B \tag{2.9}$$

เมื่อ E_γ คือพลังงานทั้งหมดของโฟตอน

E_B คือพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) ของอิเล็กตรอน

เรียกอิเล็กตรอนที่วิ่งออกมาว่า โฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) ส่วนใหญ่เป็นอิเล็กตรอนในชั้น K (K-Shell) ขณะเดียวกันจะมีอิเล็กตรอนจากวงโคจรถัดไปวิ่งเข้ามาแทนที่โดยถ่ายเทพลังงานส่วนเกินออกไป พลังงานบางส่วนจะถ่ายเทออกไปในรูปของรังสีเอ็กซ์เฉพาะ (Characteristic X-ray) และบางส่วนจะถ่ายเทให้แก่ อิเล็กตรอนอื่นในอะตอมและทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาเรียกว่า โอเจอิเล็กตรอน (Auger electron) ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 การเกิดโฟโตอิเล็กตริก [23]

2.13.2 การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering) อันตรกิริยาเกิดขึ้นเมื่อรังสีวิ่งชนอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจร ซึ่งเป็นอิเล็กตรอนที่จับตัวกันอย่างหลวมๆ (Free Electron) แล้วถ่ายเทพลังงานส่วนหนึ่งให้กับอิตเล็กตรอนและอิเล็กตรอนจะถูกผลักให้เบนออกไปทำมุม ϕ กับแนวโฟตอนเดิม เรียกอิเล็กตรอนคอมป์ตัน (Compton electron) ส่วนโฟตอนดังกล่าวจะเบนออกไปทำมุมกับแนวเดิมเรียกโฟตอนกระเจิง (Scatted photon) ดังสมการที่ (2.10)

$$E_c = E_\gamma - E'_\gamma - E_b \qquad (2.10)$$

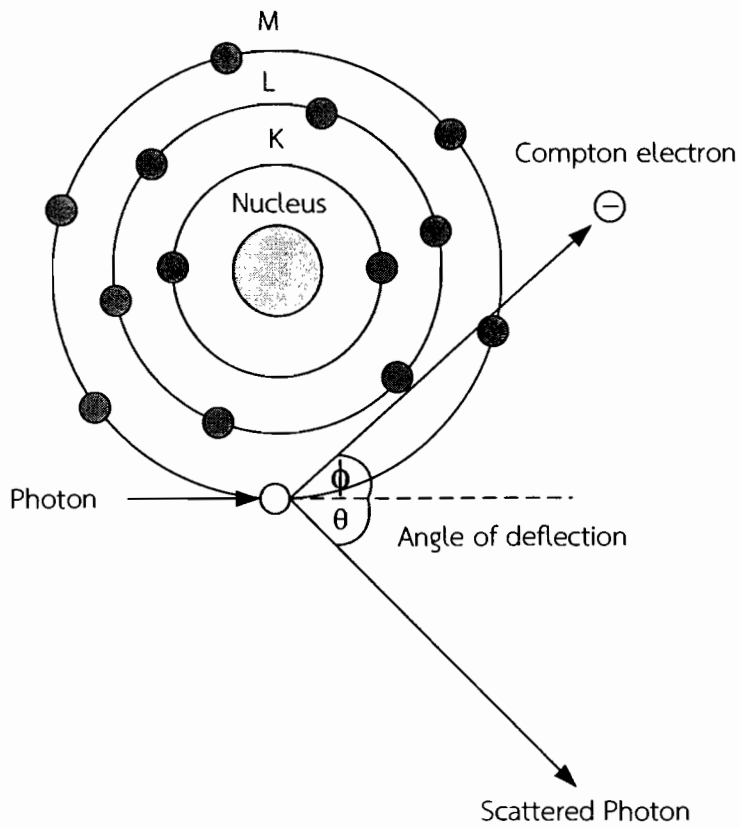
เมื่อ E_c คือพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน

E_γ คือพลังงานทั้งหมดของโฟตอน

E'_γ คือพลังงานของโฟตอนที่กระเจิง

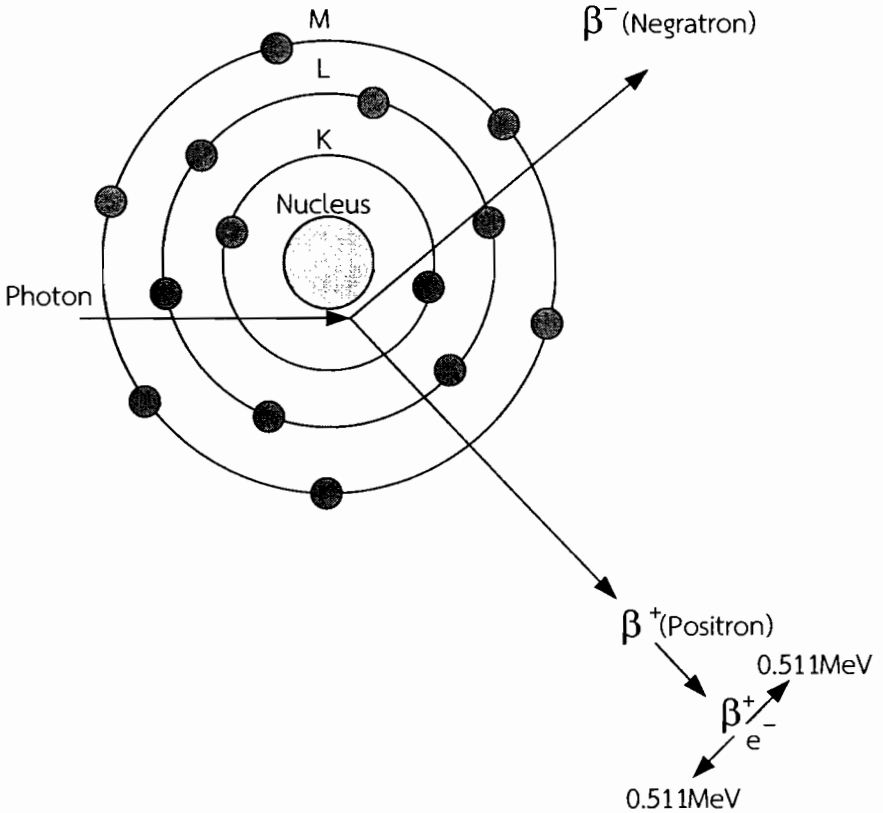
E_b คือพลังงานที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากอะตอม

ซึ่งโอกาสของการเกิดปฏิกิริยานี้จะลดลงอย่างสม่ำเสมอถ้าพลังงานเพิ่มขึ้น นั่นคือโฟตอนที่มีพลังงานมาก จะมีโอกาสกระเจิงได้มากกว่าโฟตอนที่มีพลังงานน้อย ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 การกระเจิงแบบคอมป์ตัน [23]

2.13.3 กระบวนการเกิดแพรโพดักชัน (Pair production) กระบวนการนี้เกิดขึ้นเมื่อโฟตอนวิ่งเข้าใกล้นิวเคลียสแล้วถูกดูดกลืนเข้าไปในสนามนิวเคลียสของตัวกลาง และจะเกิดอิเล็กตรอนขึ้นคู่หนึ่ง ได้แก่ เนกะตรอน (Negatron) และโพสิตรอน (Positron) ระดับพลังงานที่จะทำให้เกิดอันตรกิริยาเช่นนี้ต้องมีพลังงานเป็นสองเท่าของมวลอิเล็กตรอนขณะหยุดนิ่ง (Electron rest mass) คือ 1.02 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV) ส่วนพลังงานที่เหลือจะเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนทั้งสอง โพสิตรอน (Positron) ที่เกิดขึ้นจะทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนเรียกว่า แอนนิฮิเลชั่นโฟตอน (Annihilation photon) เกิดเป็นรังสีแกมมาพลังงาน 0.511 MeV 2 ตัวที่เคลื่อนที่ตรงกันข้าม ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 การเกิดแพรโพตักชัน [2]

2.14 อันตรกิริยาของรังสีเมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัตถุกำบังรังสี

ซึ่งในการเลือกวัตถุที่จะนำมาใช้ในการกำบังรังสีนั้น จะต้องพิจารณาคุณสมบัติดังต่อไปนี้

2.14.1 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient : μ) [24, 27] ถ้าโฟตอนถูกดูดกลืน หรือรังสีเกิดการกระเจิงจะทำให้ปริมาณรังสีทุติยภูมิน้อยกว่ารังสีปฐมภูมิ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการลดทอนรังสี (Attenuation) เมื่อความหนาของตัวกลางมากขึ้น ทำให้รังสีทุติยภูมิลดลงมากเนื่องจากมีระยะทางให้เกิดการดูดกลืนรังสีโฟตอน ซึ่งอธิบายปรากฏการณ์นี้ได้โดยสมการของ Lambert-Beer law ดังสมการที่ (2.11)

$$I = I_0 e^{-\mu x} \qquad (2.11)$$

เมื่อ I คือความเข้มรังสีเมื่อมีชิ้นงาน

I_0 คือความเข้มรังสีเมื่อไม่มีชิ้นงาน

X คือความหนาของตัวกลางที่รังสีของโฟตอนเคลื่อนที่ผ่าน

μ คือค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (linear attenuation coefficient)

2.14.2 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass attenuation coefficient: μ_m) [24, 27] เมื่อรังสีโฟตอนเดินทางผ่านตัวกลางโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาในรังสีโฟตอนกับตัวกลางขึ้นกับจำนวนอะตอมต่อปริมาตร ค่านี้ขึ้นกับความหนาแน่นของตัวกลาง (ρ) ซึ่งเป็นการหาค่าการลดทอนของตัวกลางชนิดเดียวกันแต่มีลักษณะทางกายภาพต่างกัน ซึ่งอธิบายปรากฏการณ์นี้ได้ดังสมการที่ (2.12)

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \tag{2.12}$$

เมื่อ μ_m คือค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (cm^2/g)

μ คือค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (cm^{-1})

ρ คือความหนาแน่นของตัวกลาง (g/cm^3)

ค่าความคลาดเคลื่อนสัมประสิมธิ์การลดทอนเชิงมวลจากการทดลองสามารถหาได้จากสมการที่ 2.13 [28]

$$\Delta\left(\frac{\mu}{\rho}\right) = \frac{1}{\rho X}\sqrt{\left(\frac{\Delta I_0}{I_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\ln\frac{I_0}{I}\right)^2\left[\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\Delta X}{X}\right)^2\right]} \tag{2.13}$$

2.15 ค่าความหนาครึ่งค่า (Half Value Layer: HVL)

ค่า HVL คือค่าความหนาครึ่งค่า จะหมายถึงค่าความหนาของวัสดุที่นำมากำบังรังสีแล้วทำให้ความเข้มรังสีลดลงเหลือครึ่งเดียวจากเดิม สามารถหาได้จากสมการที่ 2.12 [24, 26, 29]

$$HVL = \frac{0.693}{\mu} \tag{2.14}$$

เมื่อ HVL คือค่าความหนาครึ่งค่า Half Value Layer (cm)

μ คือค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (cm^{-1})

2.16 ประวัติความเป็นมาของโปรแกรม WinXcom

ในปี ค.ศ.1995 Hubbell and Seltzer [30] ค้นพบทางเลือกใหม่ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การ-ลดทอนเชิงมวล (μ_m) โดยแสดงในรูปแบบตารางข้อมูลของค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล เพื่อนำผลการคำนวณมาสนับสนุนงานวิจัย

ต่อมาในปี ค.ศ.1999 Berger and Hubbell [30] ได้พัฒนาตารางข้อมูลไปเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ XCOM สำหรับการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (μ_m) สามารถคำนวณได้ทั้งธาตุ สารประกอบ และสารผสมที่อยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในช่วงพลังงานจาก 1 keV- 100 GeV

ในปี ค.ศ.2001 Gerward and etal.[30] ได้พัฒนาโปรแกรม XCOM มาใช้บน windows และเปลี่ยนชื่อเป็นโปรแกรม WinXcom ใช้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (μ_m) เพื่อเป็นแนวทางในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (μ) และค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้

โปรแกรม WinXcom สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (μ_m) ผ่านอันตรกิริยาต่างๆ เช่น การกระเจิงแบบโคเฮอเรนท์ การกระเจิงแบบคอมป์ตัน การเกิดโฟโตอิเล็กทริก และกระบวนการเกิดแพร์โพดักชัน ซึ่งสามารถคำนวณได้ทั้งธาตุ สารประกอบ และสารผสมที่อยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ระดับพลังงาน 1keV ถึง 100 GeV [30]

2.17 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานที่เกี่ยวข้องกับการหลอมแก้วเพื่อทดสอบคุณสมบัติความยืดหยุ่นและคุณสมบัติทางด้านรังสีภายในประเทศไทยนั้นพบว่า ค.ศ. 2008 เชิดศักดิ์ บุตรจอมชัย และ เรวัฒน์ เหล่าไพบูลย์ [31] ได้ศึกษาแก้วในระบบ (0.798-x) recycle borosilicate (Reg) – 0.200 Na_2O – x BaO – 0.200 Sb_2O_3 โดยเพิ่มปริมาณ BaO เป็น 0, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 55 และ 55 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ โดยหลอมแก้วแต่ละความเข้มข้นที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นเทแก้วโดยใช้เทคนิค melt quenching ในแบบสแตนเลส โดยก่อนเทต้องอุ่นแบบสแตนเลสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลาครึ่งชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างแก้วที่ได้เข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมงแล้วปล่อยให้เย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้อง ผลจากนั้นนำแก้วตัวอย่างไปทดสอบคุณสมบัติความยืดหยุ่นโดยใช้เทคนิคอัลตร้าโซนิคและทดสอบคุณสมบัติทางรังสี ผลการทดลองพบว่า ความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคทั้งตามยาวและเฉือนมีค่าลดลงเมื่อปริมาณแบเรียมออกไซด์เพิ่มขึ้น และค่าคุณสมบัติความยืดหยุ่นคือ โมดูลัสตามยาว โมดูลัสเฉือน โมดูลัสเชิงปริมาตร ยังโมดูลัส และอัตราส่วนปัวซอง มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณแบเรียมออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น และการทดสอบคุณสมบัติทางรังสีโดยมีต้นกำเนิดรังสีคือ Am-241 Cs-137 และ Co-57 ที่มีพลังงานโฟตอนเป็น 60 keV 122-136 keV และ 662 keV ตามลำดับ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นและสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของแบเรียมออกไซด์ แก้วตัวอย่างที่ได้มีความเหมาะสมที่จะนำไปพัฒนาต่อเป็นกระจกกำบังรังสีคือแก้วที่มีส่วนประกอบของแบเรียมออกไซด์ 55 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีค่า HVL มีค่าเท่ากับ 0.3875 cm ที่พลังงานของรังสีเอ็กซ์ 122-136 keV เมื่อเปรียบเทียบค่า HVL กับกระจกกำบังรังสีเอ็กซ์ที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบที่ผลิตในเชิงพานิชย์จากต่างประเทศ พบว่าแก้วที่ได้จากการวิจัยมีค่า HVL มากกว่าประมาณ 3 เท่า ซึ่งแก้วที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้พัฒนาต่อเป็นกระจกกำบังรังสีเอ็กซ์ได้

สำหรับงานวิจัยในต่างประเทศก็มีการศึกษาใกล้เคียงกันดังนี้ ปี ค.ศ. 2003 Yasser B. Saddeek. [32] ได้ศึกษาสมบัติของแก้วในระบบ (75-x)B_2O_3-x Bi_2O_3-25Li_2O เมื่อ x = 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยโมล โดยใช้เทคนิคพัลซ์เอคโค เพื่อหาสมบัติยืดหยุ่นของแก้ว จากการวัดความหนาแน่น ความเร็วคลื่นตามยาวและความเร็วคลื่นตามขวางที่อุณหภูมิห้องแล้วคำนวณหาอัตราส่วนปัวซอง และ อุณหภูมิเดอบาย พบว่าความหนาแน่นของแก้วในระบบนี้เพิ่มขึ้นตามการเพิ่ม Bi_2O_3 เปอร์เซ็นต์โดยโมล แต่ความเร็วคลื่นเสียงตามยาว ความเร็วคลื่นเสียงตามขวางและ อุณหภูมิเดอบาย จะลดลง Kulwant singh and etal. [33] ได้ศึกษาคุณสมบัติการกำบังรังสีแกมมาของแก้วระบบ CaO – SrO – B_2O_3 โดยเตรียมแก้ว xCaO – (0.3-x)SrO - B_2O_3 เมื่อ x = 0.00 ถึง 0.03 สัดส่วนโดยโมล ด้วยเทคนิค melt-quenching และหา mass attenuation coefficient, effective atomic number และ effective electron densities ที่พลังงานของโฟตอนปืน 511 662 1173 และ 1332 keV เปรียบเทียบผลการทดลองกับการหาค่าที่ได้โดยใช้โปรแกรม XCOM พบว่าสามารถนำแก้วนี้ไปประยุกต์ใช้ในการป้องกันรังสีได้ ต่อมากลุ่มของ Harvinder singh และคณะได้ศึกษาสมบัติของแก้ว ZnO – PbO – B_2O_3 ในการกำบังรังสีแกมมา โดยเตรียมแก้วจาก xZnO – 2xPbO – (1-3x) B_2O_3 เมื่อ x = 0.1 ถึง 0.26 ด้วยเทคนิค melt – quenching และหา mass attenuation coefficient และ effective atomic number ที่พลังงานของโฟตอนเป็น 511, 662, 1173 และ 1332 keV ค่าดังกล่าวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มสัดส่วนโดยโมลของ ZnO แต่ค่า effective electron densities จะลดลง ซึ่งผลการทดลองกับการคำนวณโดยใช้โปรแกรม XCOM มีความสอดคล้องกัน

ต่อมา ปี ค.ศ. 2008 K.J. Singh and etal. [3] ได้ศึกษาแก้วในระบบ xPbO - (1 -x)SiO_2 (x = 0.45–0.70) ได้ถูกตรวจสอบโดยวิธีการส่งผ่านรังสีแบบลำรังสีแคบที่ระดับพลังงานโฟตอน 662 1173 และ1332 keV เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาและคำนวณด้วยโปรแกรม XCOM ผลที่ได้จะนำมาคำนวณหาค่าความหนาที่สามารถกั้นรังสีให้มีความเข้มเหลือครึ่งหนึ่ง(HVL) ของรังสีแกมมา คุณสมบัติการกำบังรังสีแกมมาของแก้วในระบบนี้ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าของคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน มีการนำค่า molar volume การวิเคราะห์ด้วย FTIR และเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิค มาใช้ในการศึกษาโครงสร้างของแก้วในระบบนี้ผลการทดลองพบว่าแก้วในระบบทุกความเข้มข้นมีศักยภาพด้านการกำบังรังสีดีกว่าคอนกรีตมาตรฐาน ต่อมาในปี ค.ศ. 2012 M.H. Kharita [34] ได้ศึกษาคุณสมบัติการกำบังรังสีของแก้วในระบบ P_2O_5-PbO-BaO โดยศึกษาผลขององค์ประกอบออกไซด์ที่เติมลงไป ผลที่ได้จะแสดงให้เห็นถึงแก้วในระบบที่มีองค์ประกอบที่เหมาะสมสำหรับการเป็นวัสดุกำบังรังสีที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับแก้วที่ใช้กำบังรังสีทั่วไป แก้วตัวอย่างที่ได้จะนำมาวัดความหนาแน่นโดยใช้หลักอาร์คิมิดีสซึ่งใช้น้ำเป็นของเหลว และทดสอบคุณสมบัติทางแสงโดยใช้เครื่อง UV-Visible photo-spectrometer จากนั้นนำไปวัดการลดทอนรังสีแกมมาจาก Cs-137 และมีการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น สามารถสรุปได้ว่า ความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน PbO และการลดลงของอัตราส่วน BaO และ P_2O_5 และความหนาแน่นจะมีค่ามากที่สุดเมื่อแก้วในระบบมีอัตราส่วนของ PbO, BaO และ P_2O_5 เป็น 65, 0 และ 35 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แก้วในระบบนี้มีความใสและมีการกำบังรังสีที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแก้ว

อัลคาไลน์ ตะกั่ว ซิลิเกต Khamirul Amin Matori and etal. [4] ได้ศึกษา คุณสมบัติความยืดหยุ่นของแก้วตะกั่วฟอสเฟตโดยใช้เทคนิคอัลตร้าโซนิค การสร้างแก้วตะกั่วฟอสเฟตในระบบ $(PbO)_x(P_2O5)_{1-x}$ โดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนโมลตั้งแต่ x = 0.1 ถึง 0.6 ถูกสร้างขึ้นด้วยเทคนิค melt-quenching method ความหนาแน่นของแก้วถูกวัดด้วยหลักการอาร์คิมิดีส ความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคทั้งตามยาวและเฉือนถูกวัดที่อุณหภูมิห้องโดยใช้เทคนิคแบบไม่ทำลายด้วยเครื่องอัลตร้าโซนิครุ่น Matec 8020 Matec Instruments USA ข้อมูลความเร็วคลื่นเสียงและความหนาแน่นที่ได้จากการทดลองนั้นจะใช้ในการหาค่าคุณสมบัติความยืดหยุ่นของแก้วตะกั่วในแต่ละชุด เช่น โมดูลัสตามยาว โมดูลัสเฉือน บัลค์โมดูลัส และยังส์โมดูลัส รวมไปถึงอัตราส่วนปัวซองและอุณหภูมิเดอบาย ผลที่ได้ทั้งหมดพบว่า โมดูลัสตามยาว โมดูลัสเฉือน บัลค์โมดูลัส และยังโมดูลัส เพิ่มขึ้นตามปริมาณตะกั่วที่เติมลงไป อัตราส่วนปัวซองที่สังเกตได้นั้นเกือบจะคงที่ ในขณะที่อุณหภูมิเดอบายนั้นลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณตะกั่วที่เติมลงไป

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.1.1 เบ้าหลอมทำจากอะลูมินา

3.1.2 เครื่องชั่งอิเลคทรอนิคส์ ความละเอียด 0.0001 กรัม ยี่ห้อ denver Instrument

3.1.3 เวอร์เนียคาลิเปอร์ ความละเอียด 0.05 mm ยี่ห้อ mitutoyo

3.1.4 เตาหลอมสารอุณหภูมิสูง 1800 องศาเซลเซียส สร้างโดยกลุ่มวิจัยแก้ว ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

3.1.5 แม่พิมพ์สแตนเลสสำหรับเทแก้ว

3.1.6 เตาอบสารอุณหภูมิสูงสุด 1200 องศาเซลเซียส สร้างโดยกลุ่มวิจัยแก้ว ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

3.1.7 เครื่องตัดแก้ว ยี่ห้อ Herberrt Arnold

3.1.8 เครื่องขัดแก้ว สร้างโดยกลุ่มวิจัยแก้ว ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

3.1.9 เครื่องอัลตร้าโซนิค บริษัท SONATEST รุ่น Sitescan 230 พร้อมหัวตรวจสอบตรงและหัวตรวจสอบมุม ความถี่ 4 MHz

3.1.10 หัววัดรังสีชนิด NaI(Tl) ยี่ห้อ BICRON Model 802-2x2

3.1.11 ต้นกำเนิดรังสีชนิด Co-57 Cs-137 และ Co-60

3.1.12 แผ่นตะกั่วสำหรับกำบังรังสี

3.1.13 เครื่อง MCA (Multichannel Analyzer) บริษัท ORTEC

3.1.14 เครื่อง FTIR Spectrometer (Fourier Transform Infrared Spectrometer) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Spectrum RXI

3.1.15 ครกบดสาร สำหรับบดผสมแก้วตัวอย่างและ KBr

3.1.16 แม่พิมพ์อัดเม็ด สำหรับอัดเม็ดตัวอย่างเพื่อทดสอบด้วย FTIR

3.1.17 เครื่องอัดไฮโดรลิค สำหรับเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบด้วย FTIR รุ่น MiniPress ยี่ห้อ PHILIPS

3.2 สารเคมี

3.2.1 ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P_2O_5) ยี่ห้อ Acros Organics ความบริสุทธิ์ 98%

3.2.2 แบเรียมออกไซด์ (BaO) ยี่ห้อ Riedel-de Haen AG ความบริสุทธิ์ 97%

3.2.3 บิสมัทไตรออกไซด์ Bi_2O_3 ยี่ห้อ Fluka ความบริสุทธิ์ 98%

3.2.4 เอ็นเฮ็กเซน ยี่ห้อ Carlo Erba ความบริสุทธิ์ 95%

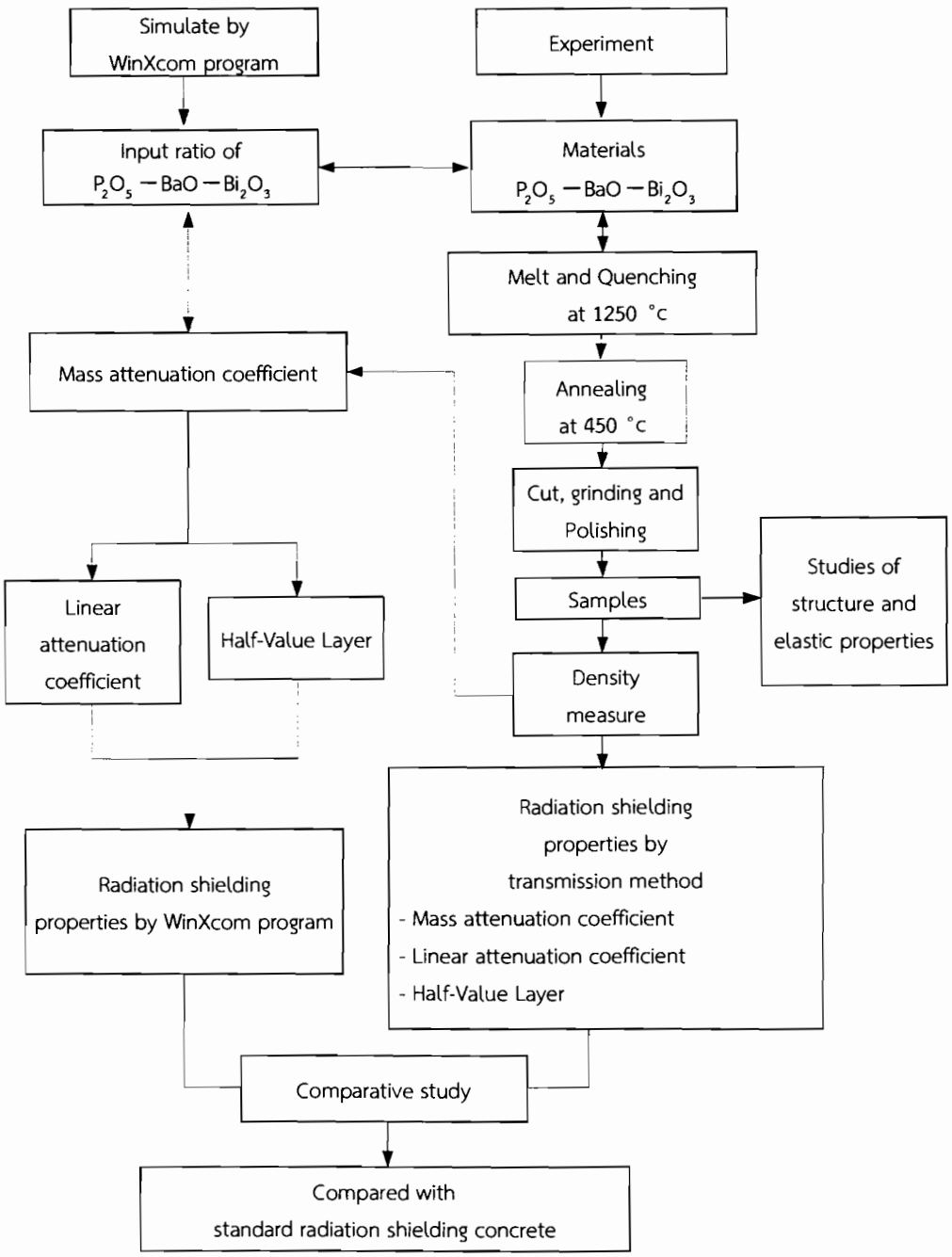
3.2.5 โพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ยี่ห้อ Riedel-de Haen AG ความบริสุทธิ์ 98%

3.3 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย

โปรแกรม WinXcom

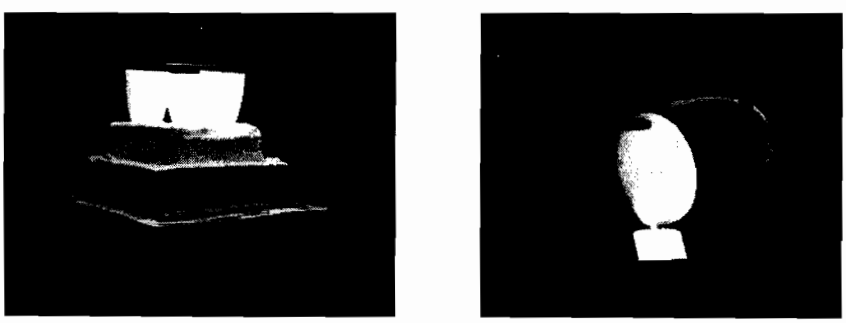
3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 กระบวนการผลิตแก้วและการทดสอบคุณสมบัติการกำบังรังสี



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมแก้วและการทดสอบคุณสมบัติด้านรังสีและคุณสมบัติความยืดหยุ่น

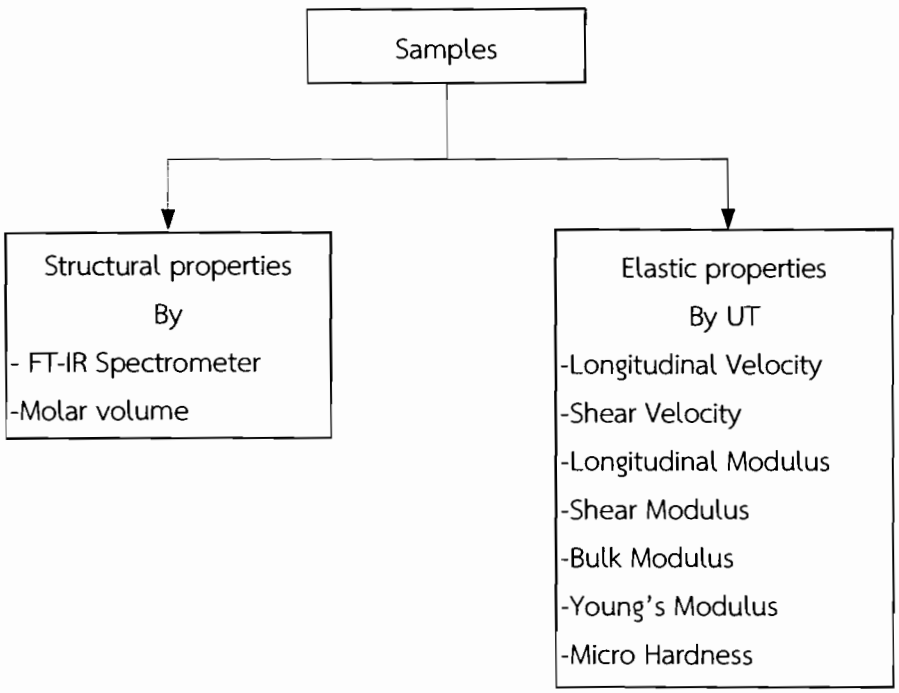
ภาพที่ 3.1 ในงานวิจัยนี้ขั้นตอนแรกจะจำลองสูตรแก้วในระบบ $P_2O_5 - BaO - Bi_2O_3$ โดยใช้โปรแกรม WinXcom เพื่อหาสูตรแก้วที่เหมาะสมสำหรับการกำบังรังสีโดยปรับเปลี่ยนสัดส่วน Bi_2O_3 จากนั้นนำสัดส่วนแก้วที่ได้ไปหลอมเพื่อเป็นการยืนยันว่าแก้วในสัดส่วนนี้สามารถสร้างขึ้นได้จริง ซึ่งในกระบวนการหลอมจะดำเนินการดังนี้ เตรียมสารเคมีแต่ละชนิดตามสัดส่วนที่ได้ ผสมให้เข้ากันในเบ้าหลอมอะลูมินา เสร็จแล้วนำไปหลอมที่อุณหภูมิ 1250 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังภาพที่ 3.2 (a) จากนั้นเทแก้วใส่แม่พิมพ์สแตนเลสโดยใช้เทคนิค melt quenching ดังภาพที่ 3.2 (b) เมื่อแก้วเริ่มขึ้นรูปจะนำไปอบเพื่อลดความเครียดที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง จากนั้นจะนำชิ้นงานแก้วที่ได้ไปทำการตัดและขัดเพื่อให้รูปร่างเหมาะสมต่อการทดสอบต่างๆ จากการทดลองนี้จะได้สัดส่วนแก้วที่เหมาะสมดังนี้ $(50)\,P_2O_5 - (50-x)\,BaO - (x)\,Bi_2O_3$ โดย X = 0 2.5 7.5 12.5 และ 17.5 เปอร์เซ็นต์โดยโมล เมื่อได้แก้วตัวอย่างในสัดส่วนต่างๆจะทำการหาความหนาแน่นโดยใช้หลักพื้นฐานอาร์คิมิดีส และศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้างและความยืดหยุ่น ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อที่ 3.4.2 จากนั้นจะนำค่าความหนาแน่นมาใช้ในการคำนวณหาคุณสมบัติการกำบังรังสีต่างๆ การศึกษาคุณสมบัติการกำบังรังสีโดยโปรแกรม WinXcom จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล ความหนาแน่นที่ได้จากการทดลองจะนำมาใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นโดยใช้สมการที่ (2.11) จากนั้นจะคำนวณหาค่า HVL โดยใช้สมการ (2.12) การศึกษาคุณสมบัติการกำบังรังสีโดยการทดลองใช้เทคนิคการส่งผ่านลำรังสี จะใช้ต้นกำเนิดรังสี 3 ชนิดคือ Co-57 พลังงาน 112 keV Cs-137 พลังงาน 662 keV และ Co-60 พลังงาน 1173 keV ซึ่งจะคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล และค่า HVL โดยใช้สมการ (2.10 - 2.12) จากนั้นจะเปรียบเทียบคุณสมบัติการกำบังรังสีจากโปรแกรม WinXcom จากการทดลอง และคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน



(a) (b)

ภาพที่ 3.2 การหลอมแก้ว (a) การเทแก้ว (b)

3.4.2 การศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติความยืดหยุ่นโดยใช้ FTIR Spectrometerและเทคนิคอัลตร้าโซนิค

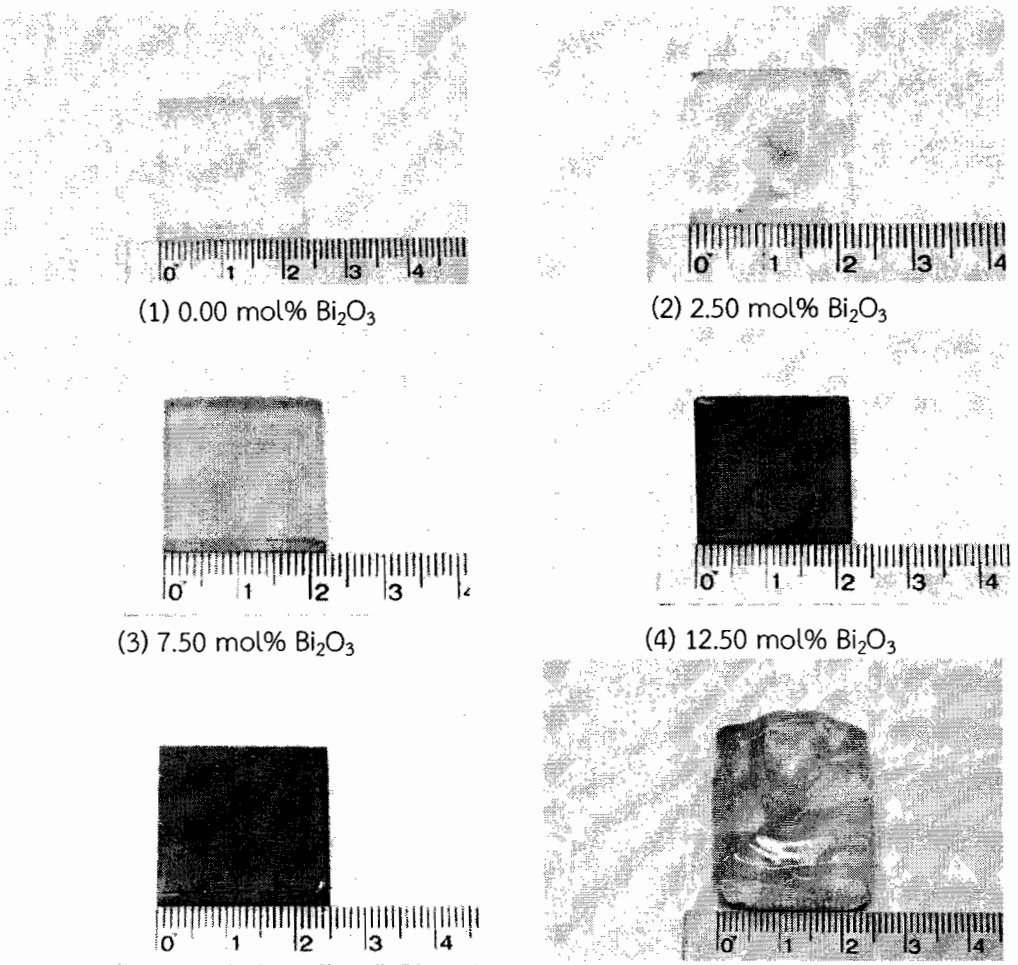


ภาพที่ 3.3 ขั้นตอนการศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติความยืดหยุ่น

ภาพที่ 3.2 การศึกษาโครงสร้างโดย หาการหาค่า Molar Volume โดยใช้สมการที่ (2.7) และศึกษาพันธะโดยใช้เครื่อง FT-IR Spectrometer การศึกษาโดยเครื่องนี้จะต้องทำการเตรียมตัวอย่างดังนี้ นำแก้วตัวอย่างผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ บดผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยครกบดสารอัตราส่วนของแก้วต่อ KBr คือ 1 ต่อ 100 นำเนื้อสารที่ได้ใส่แม่พิมพ์เฉพาะอัดเป็นเม็ดโดยเครื่องอัดไฮโดรลิค และนำเม็ดสารที่ได้ไปศึกษาโดย FTIR spectrometer วิธีการศึกษาคุณสมบัติความยืดหยุ่นหาได้โดยวัดความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคตามยาว และความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคเฉือน โดยใช้เครื่องอัลตร้าโซนิค จากนั้นนำความเร็วคลื่นเสียงตามยาวและเฉือนมาคำนวณหา โมดูลัสตามยาว โมดูลัสเฉือน บัลค์โมดูลัส ยังโมดูลัส อัตราส่วนปัวซอง และความแข็งระดับไมโคร จากสมการที่ (2.1) – (2.6)

บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ลักษณะทางกายภาพของแก้ว



(1) 0.00 mol% Bi_2O_3 (2) 2.50 mol% Bi_2O_3

(3) 7.50 mol% Bi_2O_3 (4) 12.50 mol% Bi_2O_3

(5) 17.50 mol% Bi_2O_3 (6) 22.50 mol% Bi_2O_3

ภาพที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของแก้วในระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3 เมื่อภาพที่ 4.1 (1) - (6) คือ แก้วที่มีความเข้มข้นของ Bi_2O_3 เป็น 0.00 2.50 7.50 12.50 17.50 และ 22.50 เปอร์เซ็นต์ โดยโมล ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าลักษณะทางกายภาพของแก้วตัวอย่างมีความเป็นเนื้อเดียวกันและไม่มีฟองโดยที่ปริมาณ Bi_2O_3 น้อยๆ แก้วจะมีความใสและมีสีเหลืองเข้มขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณ Bi_2O_3

ที่เพิ่มขึ้น และที่ Bi_2O_3 22.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล แก้วจะเกิดการหลอมที่ไม่สมบูรณ์โดยเนื้อแก้วบางส่วนไม่สามารถหลอมได้

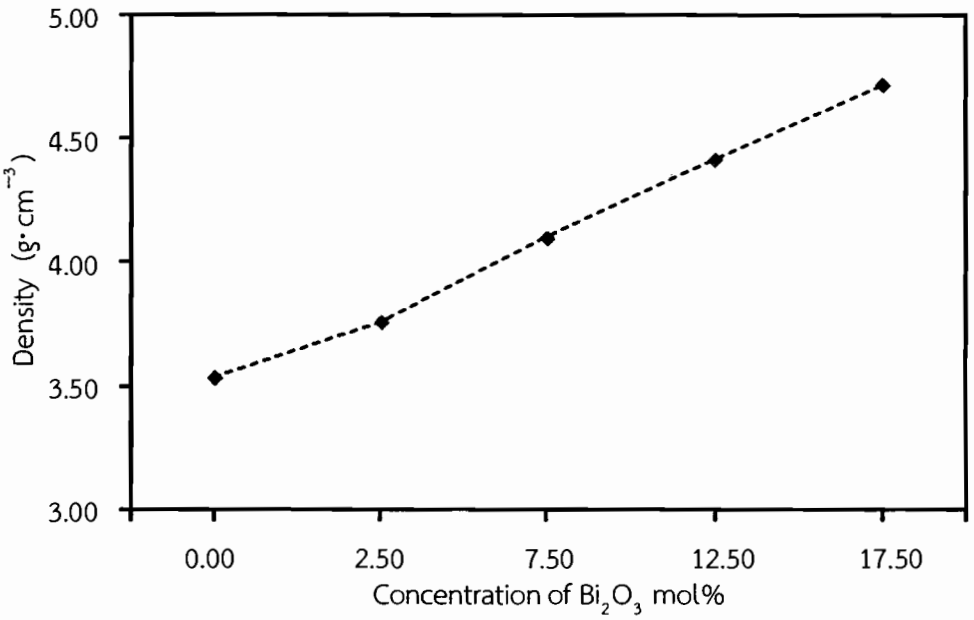
4.2 ผลการหลอม

จากการหลอมแก้วระบบ (50) P_2O_5 - (50-x) BaO – x Bi_2O_3 ได้ตัวอย่างทั้งหมด 6 ตัวอย่าง องค์ประกอบทางเคมี ความหนา ความหนาแน่น และปริมาตรโดยโมล ของตัวอย่างแก้วแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมี ความหนา ความหนาแน่น และปริมาตรโดยโมลของแก้วระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3

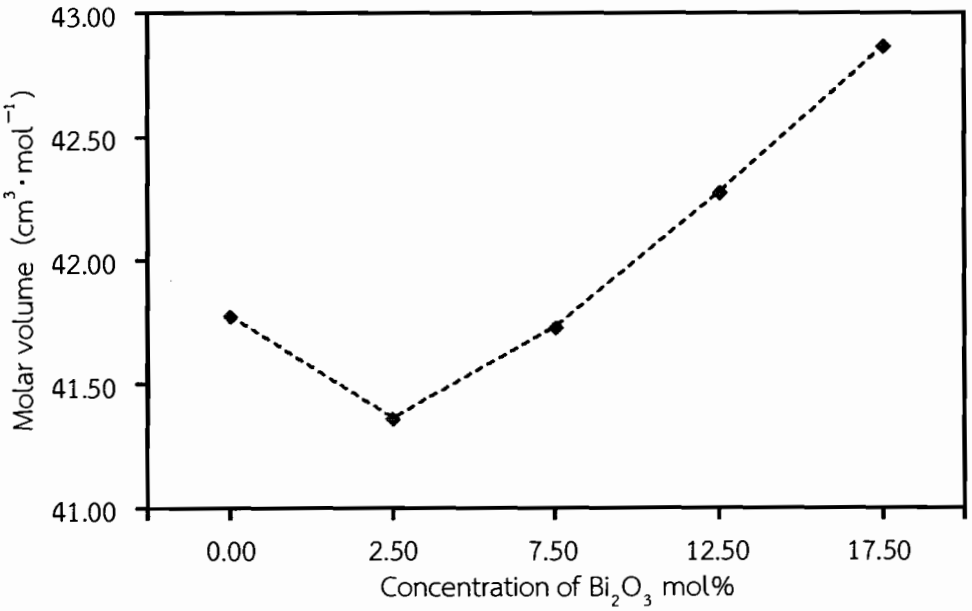
Sample	Composition (mol %)			Thickness (mm)	Density (g/cm^3)	Molar volume (cm^3)
	P_2O_5	BaO	Bi_2O_3			
1	50.00	50.00	0.00	7.40	3.5342	41.7755
2	50.00	47.50	2.50	5.75	3.7585	41.3620
3	50.00	42.50	7.50	5.75	4.0997	41.7315
4	50.00	37.50	12.50	5.85	4.4168	42.2750
5	50.00	32.50	17.50	6.00	4.7204	42.8669
6	50.00	27.50	22.50	-	-	-

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าเมื่อปริมาณของ Bi_2O_3 เพิ่มขึ้นค่าของความหนาแน่น และปริมาตรโดยโมลก็จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Bi_2O_3 ที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ เนื่องจากตัวอย่างที่ 6 ของแก้วในระบบนี้ที่เติม Bi_2O_3 22.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล เกิดการหลอมที่ไม่สมบูรณ์ จึงไม่นำมาพิจารณาในการทดสอบต่างๆ



ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับปริมาณบิสมัทไตรออกไซด์ของแก้วระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3

จากกราฟในภาพที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของแก้วมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Bi_2O_3 ที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจาก สูตรแก้วในระบบนี้จะลดปริมาณแบเรียมและเพิ่มปริมาณ Bi_2O_3 และพบว่ามวลอะตอมของ Bi นั้นมากกว่าแบเรียม โดยมวลอะตอมของ Bi นั้นมีค่าเท่ากับ208.98 g/mol [35] และมวลอะตอมของ Ba มีค่าเท่ากับ 137.32 g/mol [36] ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ความหนาแน่นของแก้วเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรโดยโมลกับปริมาณบิสมัทไตรออกไซด์ของแก้วระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3

ปริมาตรโดยโมลเป็นค่าที่กำหนดปริมาตรที่ถูกครอบครองโดยหนึ่งหน่วยมวลของแก้วและปริมาตรโดยโมลยังเป็นค่าที่ระบุลักษณะของโครงสร้างแก้ว [37] จากภาพที่ 4.3 จะพบว่าปริมาตรโดยโมลจะลดลงที่ปริมาณ Bi_2O_3 2.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงปริมาณ Bi_2O_3 2.50 - 17.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล จากภาพปริมาตรโดยโมลที่ลดลงในตอนต้นเนื่องมาจาก Bi_2O_3 เข้าไปแทรกในช่องของโครงข่ายแก้วส่งผลให้ปริมาตรที่ถูกครอบครองนั้นลดลงหรือปริมาตรโดยโมลลดลง เมื่อปริมาณ Bi_2O_3 เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ช่องว่างในโครงสร้างแก้วนั้นเต็มและนำไปสู่การสลายของพันธะวงแหวนในโครงข่ายแก้ว [37] ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ปริมาตรโดยโมลมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงถัดมา

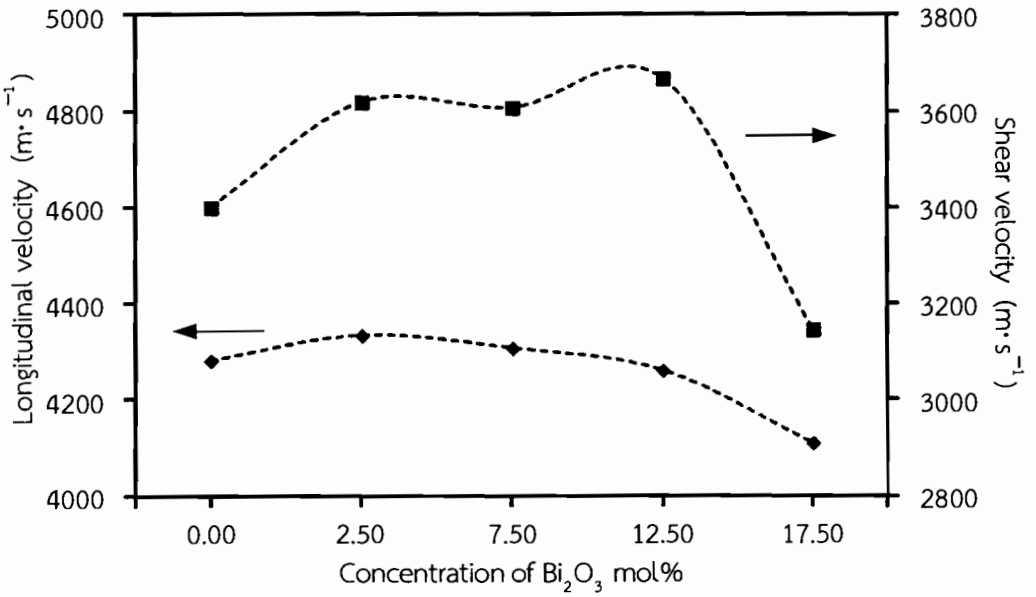
4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติความยืดหยุ่นของแก้ว

นำตัวอย่างที่ได้มาวัดความเร็วคลื่นเสียงตามยาวและเฉือนด้วยเทคนิคอัลตร้าโซนิค แล้วคำนวณหาสมบัติยืดหยุ่นของแก้วได้แก่ โมดูลัสตามยาว (Longitudinal modulus: L) โมดูลัสเฉือน (Shear modulus: G) โมดูลัสเชิงปริมาตร (Bulk modulus: K) ยังโมดูลัส (Young's modulus: E) และค่าความแข็งระดับไมโคร (Micro hardness: H) ตามสมการที่ (2.1) - (2.6)

ตารางที่ 4.2 ความเร็วคลื่นเสียงตามยาว (Longitudinal velocity: V_L) ความเร็วคลื่นเสียงเฉือน (Shear velocity: V_S) ของอัลตร้าโซนิค โมดูลัสตามยาว (L) โมดูลัสเฉือน (G) โมดูลัสเชิงปริมาตร (K) ยังโมดูลัส (E) และค่าความแข็งระดับไมโคร (H)

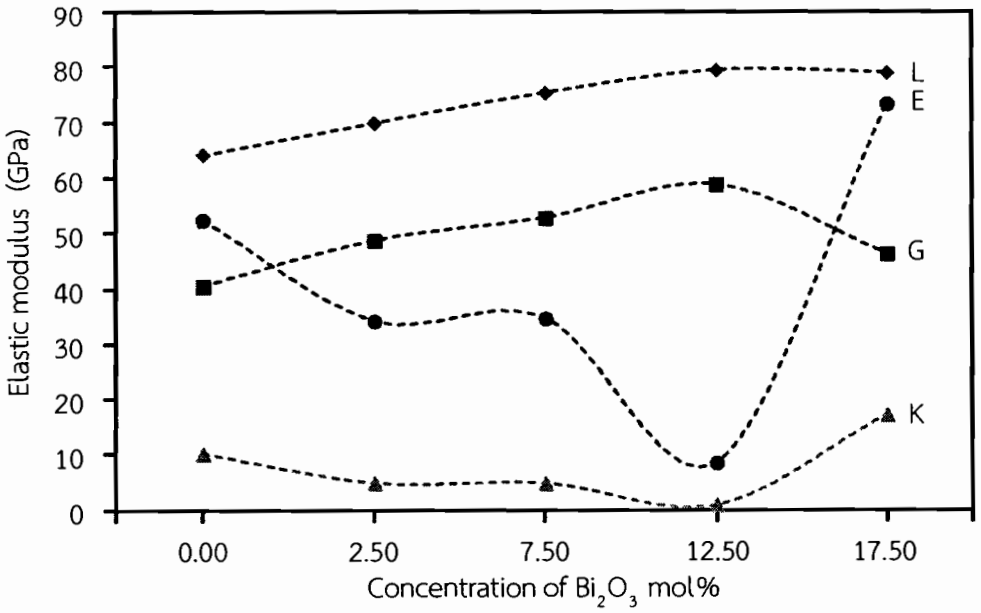
Sample	V_L ($m\ s^{-1}$)	V_S ($m\ s^{-1}$)	L (GPa)	G (GPa)	K (GPa)	E (GPa)	H (GPa)
1	4281	3399	64.27	40.51	10.25	52.45	23.03
2	4333	3617	70.02	48.79	4.96	34.22	37.39
3	4307	3606	75.45	52.89	4.93	34.68	41.32
4	4260	3666	79.52	58.89	0.99	8.56	56.03
5	4109	3145	79.07	46.34	17.27	73.4	21.87

จากตารางที่ 4.2 ค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคตามยาวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงของปริมาณ Bi_2O_3 2.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และหลังจากนั้นจะลดลงตามปริมาณ Bi_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคเฉือนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Bi_2O_3 ที่เพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มลดลงในช่วง Bi_2O_3 17.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ค่าคุณสมบัติความยืดหยุ่นต่างๆ เช่น ค่าโมดูลัสตามยาวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Bi_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น ค่าโมดูลัสเฉือนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Bi_2O_3 ที่เพิ่มขึ้นและลดลงในที่ปริมาณ Bi_2O_3 17.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ค่าโมดูลัสเชิงปริมาตรและยังโมดูลัสมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ Bi_2O_3 ที่เพิ่มขึ้นและเพิ่มขึ้นที่ปริมาณ Bi_2O_3 17.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ค่าความแข็งระดับไมโครมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Bi_2O_3 ที่เพิ่มขึ้นและลดลงที่ปริมาณ Bi_2O_3 17.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ดังแสดงในภาพที่ 4.4 – 4.6 ตามลำดับ



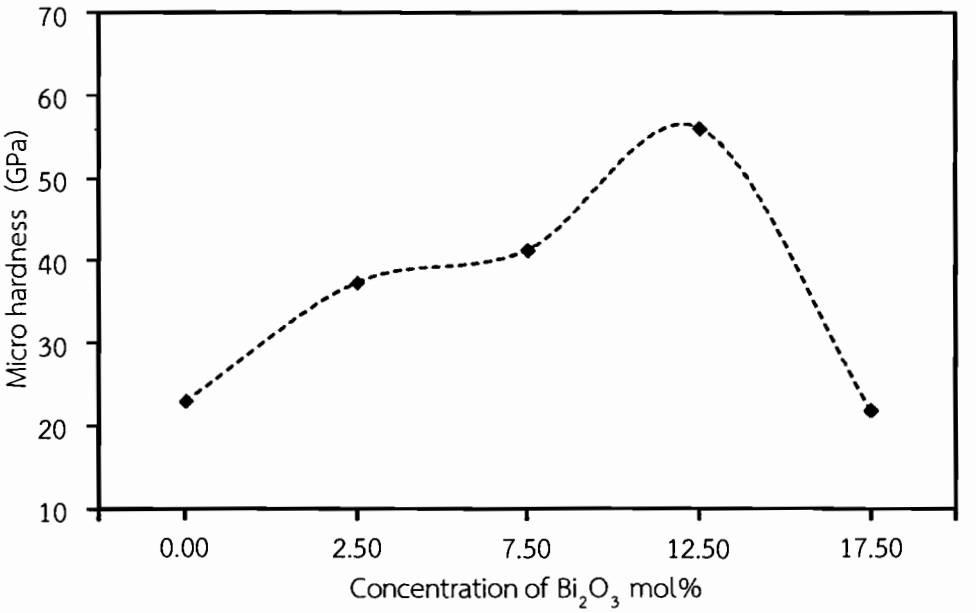
ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคตามยาวและเฉือนกับปริมาณบิสมัทไตรออกไซด์ของแก้วระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3

ความเร็วคลื่นเสียงเป็นพลังงานรูปหนึ่งที่อาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ โดยทั่วไปแล้วการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคนั้นจะสัมพันธ์กับจำนวนพันธะที่เชื่อมกับออกซิเจนหรือจำนวนการขาดกันของพันธะที่เชื่อมกับออกซิเจนและการเชื่อมกันของพันธะในโครงข่ายแก้ว และการลดลงของความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคนั้นจะแสดงให้เห็นว่ามีจำนวนการขาดกันของพันธะที่เชื่อมกับออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นและการลดลงของการเชื่อมต่อของโครงข่ายแก้ว[38] จากภาพที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคตามยาวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงของปริมาณ Bi_2O_3 2.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล นั่นแสดงว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ Bi_2O_3 2.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมลจะทำให้แก้วในระบบมีการเชื่อมต่อของโครงข่ายแก้วตามยาวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และหลังจากนั้นความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคตามยาวจะลดลงตามปริมาณ Bi_2O_3 ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ Bi_2O_3 ขึ้นเป็น 7.50 12.50 17.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมลตามลำดับซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่ามีจำนวนการเชื่อมต่อของโครงข่ายแก้วตามยาวที่ลดลง สำหรับความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคเฉือนจากภาพที่ 4.4 จะพบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงปริมาณ Bi_2O_3 2.50 7.50 12.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และลดลงที่ปริมาณ Bi_2O_3 17.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมลนั่นแสดงว่าเมื่อเพิ่มปริมาณบิสมัทที่ 2.50 7.50 12.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมลจะส่งผลให้มีจำนวนการเชื่อมต่อของโครงข่ายแก้วเฉือนที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณ Bi_2O_3 เป็น 17.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมลจะส่งผลให้มีจำนวนการเชื่อมต่อของโครงข่ายแก้วเฉือนลดลง



ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติยืดหยุ่นกับกับปริมาณบิสมัทไตรออกไซด์ของแก้วระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3

ค่าโมดูลัสตามยาวและโมดูลัสเฉือนจากภาพที่ 4.5 จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงปริมาณ Bi_2O_3 0.00 – 12.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และมีแนวโน้มลดลงที่ปริมาณ Bi_2O_3 17.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ค่าโมดูลัสตามยาวและโมดูลัสเฉือนนี้จะแปรผันตามความหนาแน่นและความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิค การเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสตามยาวและโมดูลัสเฉือนในช่วงแรกนั้นเป็นผลเนื่องมาจากค่าความหนาแน่นที่โดดเด่นกว่าค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิค และการลดลงในช่วงปลายเป็นผลมาจากค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคโดดเด่นกว่าค่าความหนาแน่น จากภาพโดยรวมพบว่าค่าความยืดหยุ่นโมดูลัสทั้งหมดเมื่อเพิ่มปริมาณ Bi_2O_3 เป็น 17.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล จะมีค่าสูงกว่าแก้วในระบบที่มีปริมาณ Bi_2O_3 0.00 เปอร์เซ็นต์โดยโมล [18] โดยค่าความยืดหยุ่นโมดูลัสทั้งหมดนี้จะสัมพันธ์กับความแข็งแรงของพันธะโดยเฉลี่ย และนี่แสดงให้เห็นว่าแก้วในระบบเมื่อเพิ่มปริมาณ Bi_2O_3 ที่ 17.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล โดยเฉลี่ยแล้วความแข็งของพันธะจะเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งระดับไมโครกับกับปริมาณบิสมัทไตรออกไซด์ของแก้วระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3

จากภาพที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งระดับไมโครมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Bi_2O_3 ที่เพิ่มขึ้นและลดลงที่ปริมาณ Bi_2O_3 17.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และค่าความแข็งระดับไมโครนั้นจะสัมพันธ์กับความต้านทานการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรของโครงข่ายแก้ว [18] ด้วยเหตุนี้จึงสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ Bi_2O_3 ที่ 17.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมลจะมีการเปลี่ยนของความต้านทานการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรเพียงเล็กน้อย

4.4 ผลการศึกษาพันธะของแก้วในระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3

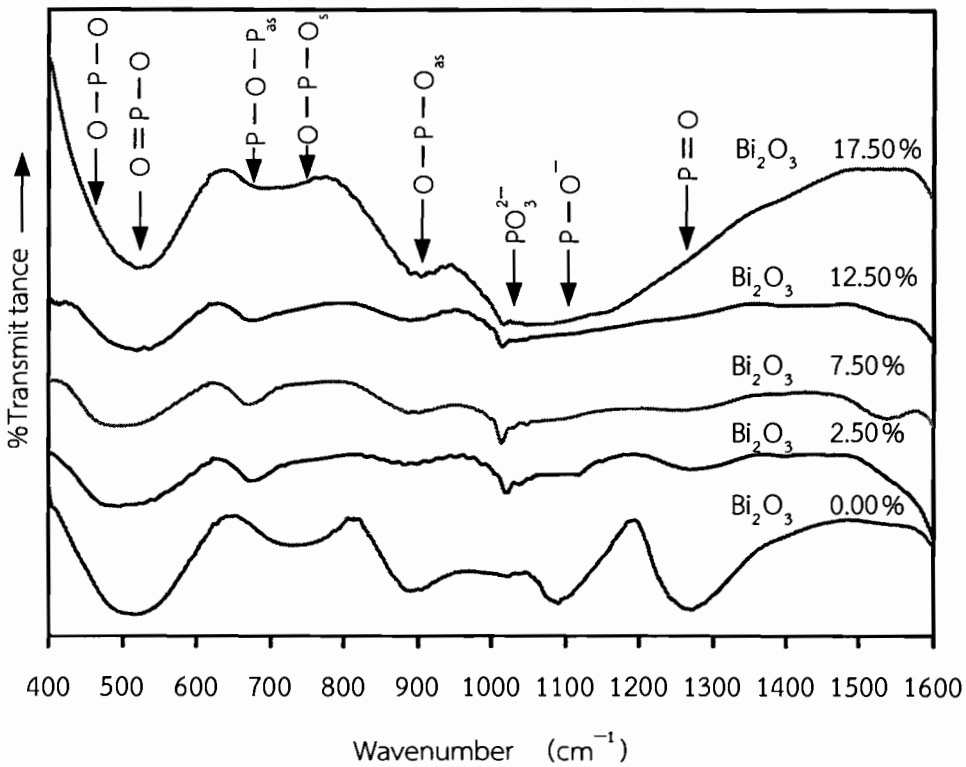
การศึกษาพันธะของแก้วในระบบนั้นจะศึกษาโดยใช้ฟูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟาเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR-Spectrometer) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบ โครงสร้างของสาร โดยการวัดการดูดกลืนรังสีในช่วงอินฟราเรดอยู่ในช่วงเลขคลื่น (Wave number) ประมาณ 12800 – 10 cm^{-1} ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้ง ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ แต่ช่วงที่เราสนใจคือ 400 – 1600 cm^{-1} การดูดกลืนรังสีอินฟาเรดนั้น ความถี่ของรังสีที่ถูกดูดกลืนจะต้องตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะเท่านั้น และความถี่ของรังสีที่ถูกดูดกลืนและพันธะต่างๆ จะแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 เลขคลื่น ชนิดพันธะและชนิดการสั่น [39, 40, 41]

เลขคลื่น (cm^{-1})	พันธะ	ชนิดการสั่น
470	O—P—O	แบบงอ
530	O=P—O	-
680	P—O—P_{as}	สั่นอสมมาตร
750	O—P—O_s	แบบยืดสมมาตร
900	O—P—O_{as}	แบบยืดอสมมาตร
1040	PO_3^{2-}	-
1100	P—O^-	-
1270	P=O	แบบยืดอสมมาตร

หมายเหตุ: ไม่ได้ระบุไว้ในเอกสารอ้างอิง

ตารางที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่นกับพันธะที่สั่นและชนิดการสั่นของพันธะ จากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าที่เลขคลื่น 470 cm^{-1} จะเป็นการสั่นของพันธะ O—P—Oซึ่งเป็นการสั่นแบบงอ ที่เลขคลื่น 530 cm^{-1} จะเป็นการสั่นของพันธะ O=P—O ที่เลขคลื่น 680 cm^{-1} จะเป็นการสั่นของพันธะ P—O—P_{as} ซึ่งเป็นการสั่นแบบอสมมาตร ที่เลขคลื่น 750 cm^{-1} จะเป็นการสั่นของพันธะ O—P—O_s ซึ่งเป็นการสั่นแบบยืดที่สมมาตร ที่เลขคลื่น 900 cm^{-1} จะเป็นการสั่นของพันธะ O—P—O_{as} ซึ่งเป็นการสั่นแบบยืดที่อสมมาตร ที่เลขคลื่น 1040 cm^{-1} จะเป็นการสั่นของพันธะ PO_3^{2-} และที่เลขคลื่น 1100 cm^{-1} จะเป็นการสั่นของพันธะ P—O^- ผลที่ได้จากการศึกษาพันธะของแก้วในระบบโดยใช้ฟูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟาเรดสเปกโตรมิเตอร์จะแสดงในภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ส่งผ่านกับเลขคลื่นของแก้วในระบบP_2O_5 - BaO – Bi_2O_3 ในแต่ละเปอร์เซ็นต์โดยโมลของบิสมัทไตรออกไซด์

จากภาพที่ 4.7 แสดงให้เห็นพีคตำแหน่งการสั่นของพันธะต่างๆ การพิจารณาผลที่ได้จากฟูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟาเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) นี้ดูจากลักษณะของพีคเมื่อมีการดูดกลืนเกิดขึ้น แสดงว่ามีความถี่การสั่นของพันธะที่ตรงกับความถี่ของอินฟาเรด (IR) ที่บริเวณนั้นจึงเกิดการดูดกลืนขึ้นและเมื่อมีพีคที่ลึกนั่นหมายถึงมีพันธะเกิดขึ้นจำนวนมาก ซึ่งผล FTIR นี้จะสอดคล้องกับผลของความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคด้วยเนื่องจาก ความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคนั้นเป็นพลังงานรูปหนึ่งที่ต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ เมื่อมีพันธะเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ความเร็วคลื่นเสียงมีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง และถ้ามีพีคที่ตื้นขึ้นหมายถึงมีจำนวนพันธะลดลงจึงส่งผลให้ความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคที่ลดลงตามไปด้วย และพบว่าที่เลขคลื่นประมาณ 470 cm^{-1} และ 680 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งการสั่นของพันธะ O—P—Oแบบงอและเป็นการสั่นของพันธะ P—O—P_{as} แบบอสมมาตรตามลำดับ ซึ่งมีลักษณะของพีคที่สอดคล้องกับผลของความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิค เมื่อพิจารณาเลขคลื่นประมาณ 470 cm^{-1} ที่เส้น Bi_2O_3 2.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล เมื่อเทียบกับเส้น Bi_2O_3 0.00 เปอร์เซ็นต์โดยโมล มีการดูดกลืน IR เกิดขึ้นนั่นหมายความว่ามีพันธะ O—P—Oเพิ่มขึ้น เมื่อมีพันธะเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคเพิ่มขึ้น ซึ่งความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคที่สอดคล้องกับพีคที่เลขคลื่นนี้คือความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคตามยาว หลังจากนั้นที่เส้น Bi_2O_3 7.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล มีพีคการดูดกลืนที่เลขคลื่นนี้ลดลงเมื่อเทียบกับเส้น Bi_2O_3 2.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ซึ่งสอดคล้องกับ

ความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคตามยาวที่ลดลงเมื่อเทียบกับความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคตามยาวของแก้วในระบบที่เพิ่มปริมาณ Bi_2O_3 เป็น 2.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล หลังจากนั้นที่เส้น Bi_2O_3 12.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล พีคการดูดกลืนที่บริเวณนี้ก็จะเริ่มหายไปและที่เส้น Bi_2O_3 17.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล พีคการดูดกลืนก็จะหายไปในที่สุดซึ่งสอดคล้องกับความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคตามยาวที่ลดลงที่เลขคลื่นประมาณ 680 cm^{-1} จะพบว่าที่เส้น Bi_2O_3 2.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล 7.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และที่ 12.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล จะมีพีคการดูดกลืน IR เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับเส้น Bi_2O_3 0.00 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ซึ่งสอดคล้องกับค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคเฉือนที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแก้วในระบบที่มีปริมาณ Bi_2O_3 0.00 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และที่เส้น Bi_2O_3 17.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล พีคการดูดกลืนจะหายไปและตื้นขึ้นเมื่อเทียบกับเส้น Bi_2O_3 0.00 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ซึ่งสอดคล้องกับความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคเฉือนที่ลดลงอย่างชัดเจนและลดลงต่ำกว่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตร้าโซนิคเฉือนของแก้วในระบบที่มีปริมาณ Bi_2O_3 0.00 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ที่เลขคลื่นประมาณ 530 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคการสั่นของพันธะ O = P — O และพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ Bi_2O_3 เป็น 2.50 7.50 และที่ 12.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล จะมีพีคที่ตื้นขึ้นเมื่อเทียบกับพีคของ Bi_2O_3 0.00 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และกลับมาลึกลงอีกครั้งที่ Bi_2O_3 17.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ที่เลขคลื่นประมาณ 750 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคการสั่นของพันธะ $O-P-O_s$ ที่ยืดแบบสมมาตรพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ Bi_2O_3 เป็น 2.50 7.50 และที่ 12.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล พีคจะหายไปเมื่อเทียบกับพีคของ Bi_2O_3 0.00 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และกลับมาลึกลงเล็กน้อยที่ Bi_2O_3 17.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ที่เลขคลื่นประมาณ 900 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคการสั่นของพันธะ $O-P-O_{as}$ ที่ยืดแบบอสมมาตร พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ Bi_2O_3 เป็น 2.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล 7.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และที่ 12.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล จะมีพีคที่ตื้นขึ้น และกลับมาลึกลงอีกครั้งที่ Bi_2O_3 17.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ซึ่งลึกใกล้เคียงกับพีคของ Bi_2O_3 0.00 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ที่เลขประมาณ 1040 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคการสั่นของพันธะ PO_3^{2-} พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ Bi_2O_3 เป็น 2.50 7.50 12.50 และที่ 17.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล จะมีพีคเกิดขึ้นเมื่อเทียบกับพีคของ ของ Bi_2O_3 0.00 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ที่เลขประมาณ 1100 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นของพันธะ $P-O^-$ พบว่าที่ Bi_2O_3 0.00 เปอร์เซ็นต์โดยโมล จะมีพีคของพันธะนี้อยู่แต่ที่ Bi_2O_3 2.50 7.50 12.50 และที่ 17.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล พีคที่ตำแหน่งนี้จะหายไป และที่เลขคลื่นประมาณ 1270 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นของพันธะ P = O ที่ยืดแบบอสมมาตรซึ่งพบว่าที่ตำแหน่งนี้เมื่อเพิ่มปริมาณ Bi_2O_3 พีคจะเริ่มลดลงและหายไปในที่สุด

4.5 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางรังสีของแก้วในระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3

การศึกษาคุณสมบัติทางรังสีในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาจากโปรแกรมจำลองซึ่งชื่อโปรแกรม WinXcom ที่ถูกพัฒนาโดย Gerward พร้อมคณะ [30] และจากการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น และค่า HVL ของแก้วในระบบที่ได้จากโปรแกรม WinXcom ที่ระดับพลังงานต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.4 -4.6

ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแก้วในระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3 ที่พลังงานต่างกันจากการคำนวณด้วยโปรแกรม WinXcom

Sample	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล (Mass Attenuation coefficient: μ_m $cm^2.g^{-1}$)		
	122 keV	662 keV	1173 keV
1	0.7920	0.0779	0.0558
2	0.8500	0.0785	0.0561
3	0.9600	0.0802	0.0565
4	1.0750	0.0819	0.0570
5	1.1900	0.0836	0.0575

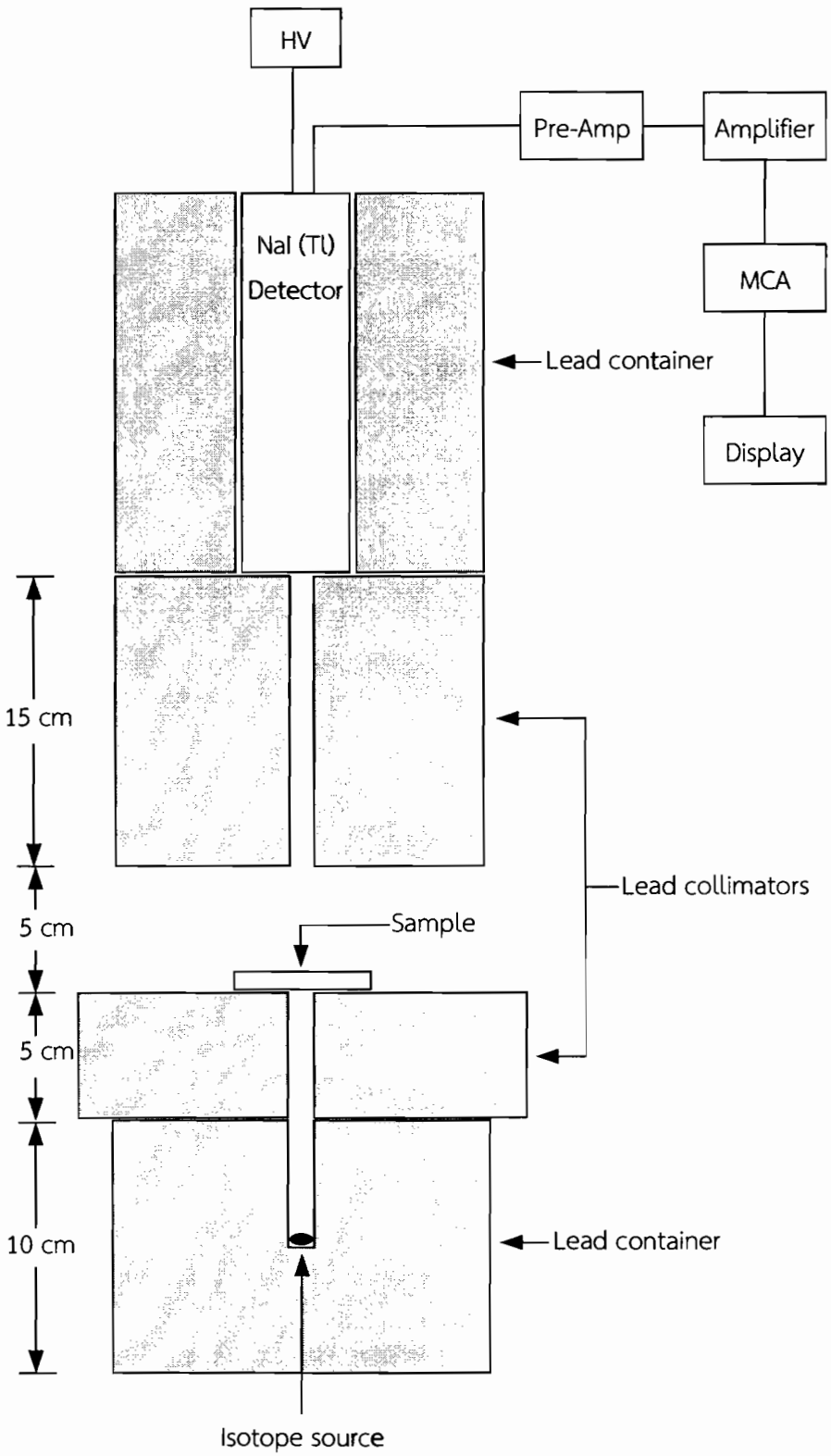
ตารางที่ 4.5 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของในระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3ที่พลังงานต่างกันจากการคำนวณด้วยโปรแกรม WinXcom

Sample	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น (Linear Attenuation coefficient: μ cm^{-1})		
	122 keV	662 keV	1173 keV
1	2.7991	0.2753	0.1972
2	3.1947	0.2950	0.2108
3	3.9357	0.3288	0.2316
4	4.7480	0.3617	0.2517
5	5.6173	0.3946	0.2714

ตารางที่ 4.6 ค่า HVL ของแก้วในระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3จากการคำนวณด้วยโปรแกรม WinXcom

Sample	HVL (cm)		
	122 keV	662 keV	1173 keV
1	0.2475	2.5171	3.5140
2	0.2169	2.3488	3.2866
3	0.1760	2.1076	2.9917
4	0.1459	1.9157	2.7526
5	0.1233	1.7560	2.5531

สำหรับการทดลองวัดคุณสมบัติทางรังสีจะทำการจัดอุปกรณ์วัดทางรังสีดังแสดงในภาพที่ 4.8 แสดงการจัดสมมาตรเพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของวัสดุแก้วโดยการวัดรังสีที่ทะลุผ่านตัวอย่าง ค่าความคลาดเคลื่อนสัมประสิทธ์การดูดกลืนเชิงมวลหาได้จากสมการที่ (2.13) ค่าที่ได้แสดงในตารางที่ 4.7 - 4.11



ภาพที่ 4.8 รูปแบบการจัดเครื่องมือในการวัดหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน

ตารางที่ 4.7 ชนิดต้นกำเนิดรังสี พลังงาน ชนิดหัววัด และความเข้มรังสีโดยไม่มีวัดถุกั้น

ต้นกำเนิดรังสี	พลังงาน (keV)	ชนิดหัววัด	ความเข้มรังสีโดยที่ไม่มีวัตถุกั้น (I_0) (cps)
Co-57	122	NaI(Tl)	50446±757
Cs-137	662	NaI(Tl)	46628±702
Co-60	1173	NaI(Tl)	32850±485

ตารางที่ 4.8 ความเข้มของรังสีที่ทะลุผ่านตัวอย่างแก้วที่พลังงานต่างกัน

Sample	ความเข้มรังสีที่ทะลุผ่านตัวอย่าง I (cps)		
	122 keV	662 keV	1173 keV
1	26705±315	43808±657	31412±572
2	24422±385	43610±654	31315±572
3	21934±438	43498±651	31278±586
4	18180±485	43142±646	31120±581
5	15286±497	42868±642	31004±583

ตารางที่ 4.9 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้นของตัวอย่างแก้วที่พลังงานต่างกัน

Sample	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น (Linear Attenuation coefficient: μ cm^{-1})		
	122 keV	662 keV	1173 keV
1	2.8911±0.0867	0.2836±0.0085	0.2033±0.0061
2	3.2974±0.0989	0.3040±0.0091	0.2175±0.0065
3	4.0628±0.1218	0.3387±0.0101	0.2391±0.0071
4	4.8987±0.1469	0.3729±0.0111	0.2595±0.0077
5	5.7931±0.1737	0.4067±0.0123	0.2797±0.0083

ตารางที่ 4.10 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วที่พลังงานต่างกัน

Sample	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล (Mass Attenuation coefficient: μ_m $cm^2.g^{-1}$)		
	122 keV	662 keV	1173 keV
1	0.8180±0.0245	0.0802±0.0024	0.0575±0.0017
2	0.8773±0.0263	0.0809±0.0024	0.0578±0.0017
3	0.9909±0.0297	0.0826±0.0024	0.0583±0.0017
4	1.1091±0.0332	0.0844±0.0025	0.0587±0.0017

ตารางที่ 4.10 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วที่พลังงานต่างกัน (ต่อ)

Sample	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล (Mass Attenuation coefficient: μ_m $cm^2.g^{-1}$)		
	122 keV	662 keV	1173 keV
5	1.2272±0.0368	0.0861±0.0025	0.0592±0.0017

ตารางที่ 4.11 ค่า HVL ของตัวอย่างแก้วที่พลังงานต่างกัน

Sample	HVL (cm)		
	122 keV	662 keV	1173 keV
1	0.2397	2.4439	3.4079
2	0.2102	2.2795	3.1867
3	0.1706	2.0461	2.8979
4	0.1415	1.8587	2.6706
5	0.1196	1.7039	2.4779

โดยทั่วไปในทางปฏิบัติการกำบังรังสีจะใช้วัสดุคอนกรีตซึ่งมีหลายชนิด เช่น แบไรท์คอนกรีต โครไมท์คอนกรีต และเซอเพ็นไทท์คอนกรีต จากคอนกรีตที่กล่าวมานั้น [3] แบไรท์คอนกรีตจะเป็นคอนกรีตที่มีศักยภาพในการกำบังรังสีที่ดีกว่าคอนกรีตชนิดอื่น ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น และค่า HVL ที่พลังงานต่างกันจะแสดงในตารางที่ 4.12 – 4.14

ตารางที่ 4.12 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้นของแบไรท์คอนกรีตที่พลังงานต่างกัน

Type concrete	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น (Linear Attenuation coefficient: μ cm^{-1})		
	122 keV	662 keV	1173 keV
Barite	2.6764	0.2728	0.1976

ตารางที่ 4.13 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของแบไรท์คอนกรีตที่พลังงานต่างกัน

Type concrete	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล (Mass Attenuation coefficient: μ_m $cm^2.g^{-1}$)		
	122 keV	662 keV	1173 keV
Barite	0.5461	0.0690	0.0518

ตารางที่ 4.14 ค่า HVL ของแบไรท์คอนกรีตที่พลังงานต่างกัน

Type concrete	HVL (cm)		
	122 keV	662 keV	1173 keV
Barite	0.25	2.54	3.50

จากผลสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล HVL ที่ได้จากการทดลองและโปรแกรม WinXcom สามารถหาค่าความคลาดเคลื่อนได้ดังตารางที่ 4.15-4.23

ตารางที่ 4.15 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นที่พลังงาน 122 keV

Sample	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นที่พลังงาน 122 keV		
	การทดลอง	WinXcom	ความคลาดเคลื่อน (%)
1	2.8911	2.7991	3.2894
2	3.2974	3.1947	3.2138
3	4.0628	3.9357	3.2271
4	4.8987	4.7480	3.1727
5	5.7931	5.6173	3.1291

ตารางที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นที่พลังงาน 662 keV

Sample	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นที่พลังงาน 662 keV		
	การทดลอง	WinXcom	ความคลาดเคลื่อน (%)
1	0.2836	0.2753	3.0149
2	0.3040	0.2950	3.0628
3	0.3387	0.3288	3.0255
4	0.3729	0.3617	3.0905
5	0.4067	0.3946	3.0796

ตารางที่ 4.17 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นที่พลังงาน 1173 keV

Sample	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นที่พลังงาน 1173 keV		
	การทดลอง	WinXcom	ความคลาดเคลื่อน (%)
1	0.2033	0.1972	3.1355
2	0.2175	0.2108	3.1561
3	0.2391	0.2316	3.2582
4	0.2595	0.2517	3.0935

ตารางที่ 4.17 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นที่พลังงาน 1173 keV (ต่อ)

Sample	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นที่พลังงาน 1173 keV		
	การทดลอง	WinXcom	ความคลาดเคลื่อน (%)
5	0.2797	0.2714	3.0581

ตารางที่ 4.18 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลที่พลังงาน 122 keV

Sample	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลที่พลังงาน 122 keV		
	การทดลอง	WinXcom	ความคลาดเคลื่อน (%)
1	0.8181	0.7920	3.2894
2	0.8773	0.8500	3.2139
3	0.9910	0.9600	3.2271
4	1.1091	1.0750	3.1727
5	1.2272	1.1900	3.1292

ตารางที่ 4.19 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลที่พลังงาน 662 keV

Sample	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลที่พลังงาน 662 keV		
	การทดลอง	WinXcom	ความคลาดเคลื่อน (%)
1	0.0802	0.0779	3.0149
2	0.0809	0.0785	3.0628
3	0.0826	0.0802	3.0255
4	0.0844	0.0819	3.0906
5	0.0862	0.0836	3.0796

ตารางที่ 4.20 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลที่พลังงาน 1173 keV

Sample	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลที่พลังงาน 1173 keV		
	การทดลอง	WinXcom	ความคลาดเคลื่อน (%)
1	0.0575	0.0558	3.1356
2	0.0579	0.0561	3.1562
3	0.0583	0.0565	3.2582
4	0.0588	0.0570	3.0935
5	0.0593	0.0575	3.0582

ตารางที่ 4.21 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน HVL ที่พลังงาน 122 keV

Sample	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน HVL ที่พลังงาน 122 keV

	การทดลอง	WinXcom	ความคลาดเคลื่อน (%)
1	0.2397	0.2476	3.1847
2	0.2102	0.2170	3.1138
3	0.1706	0.1761	3.1263
4	0.1415	0.1460	3.0752
5	0.1196	0.1234	3.0342

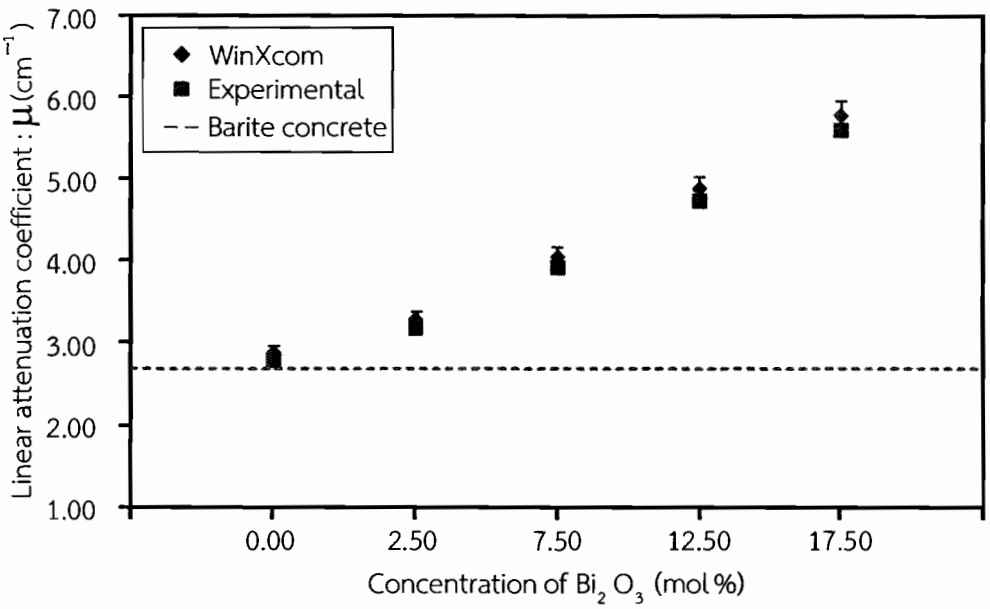
ตารางที่ 4.22 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน HVL ที่พลังงาน 662 keV

Sample	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน HVL ที่พลังงาน 662 keV		
	การทดลอง	WinXcom	ความคลาดเคลื่อน (%)
1	2.4440	2.5176	2.9267
2	2.2795	2.3493	2.9718
3	2.0462	2.1081	2.9366
4	1.8587	1.9162	2.9979
5	1.7040	1.7564	2.9876

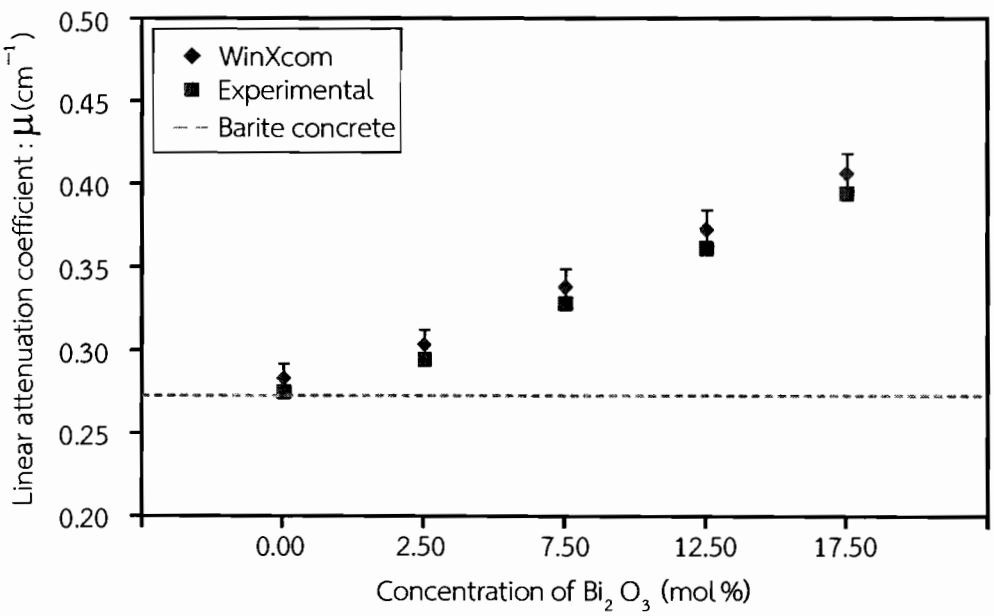
ตารางที่ 4.23 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน HVL ที่พลังงาน 1173 keV

Sample	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน HVL ที่พลังงาน 1173 keV		
	การทดลอง	WinXcom	ความคลาดเคลื่อน (%)
1	3.4079	3.5148	3.0402
2	3.1868	3.2874	3.0596
3	2.8980	2.9924	3.1554
4	2.6706	2.7532	3.0007
5	2.4779	2.5537	2.9674

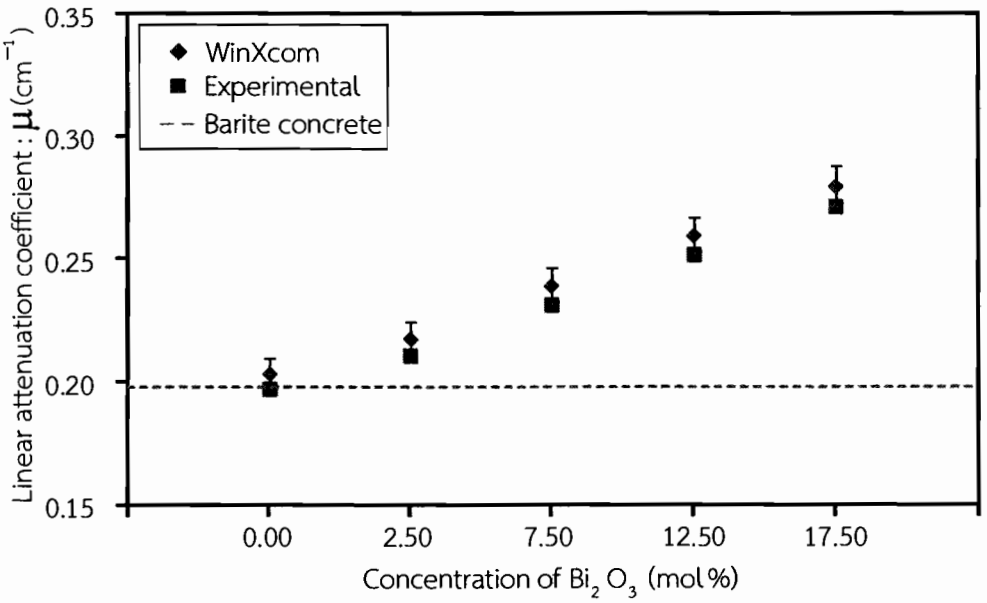
จากตารางผลสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล และค่า HVL ที่พลังงานต่างๆ เราสามารถเขียนกราฟดังแสดงในภาพที่ 4.9 – 4.17



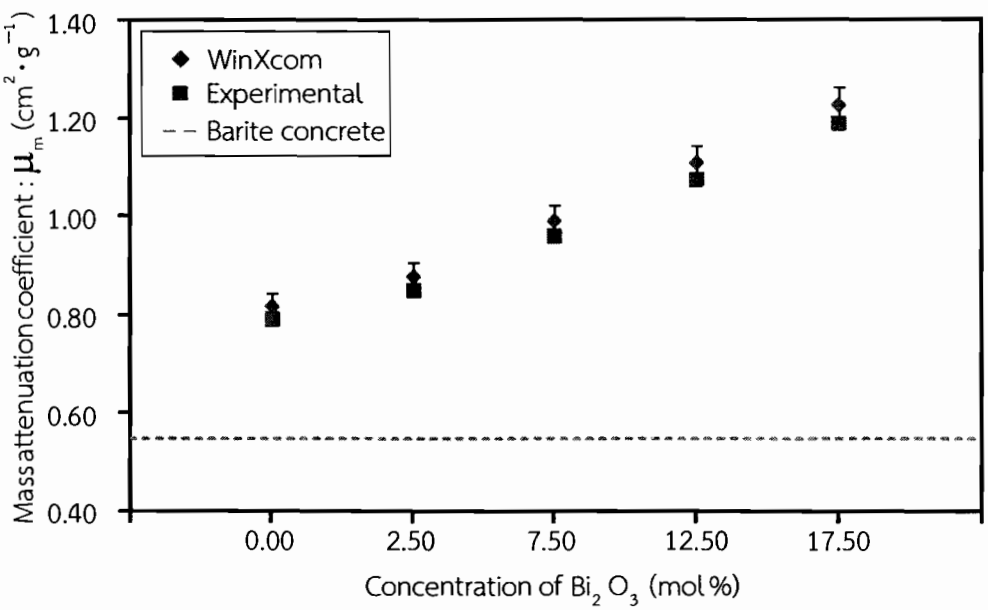
ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของแก้วระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3 ที่พลังงาน 122 keV จากโปรแกรม WinXcom และจากการทดลอง



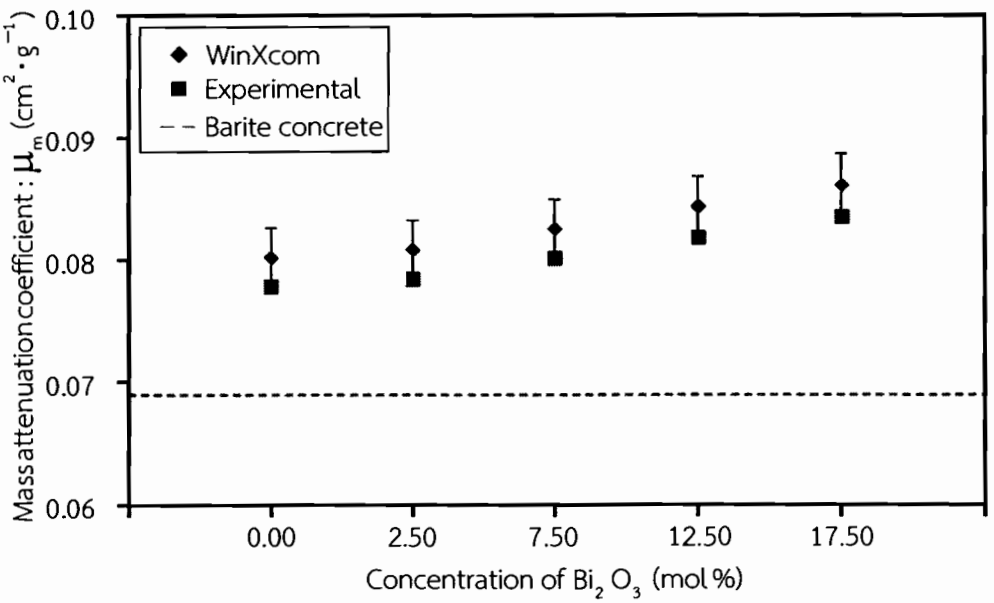
ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของแก้วระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3 ที่พลังงาน 662 keV จากโปรแกรม WinXcom และจากการทดลอง



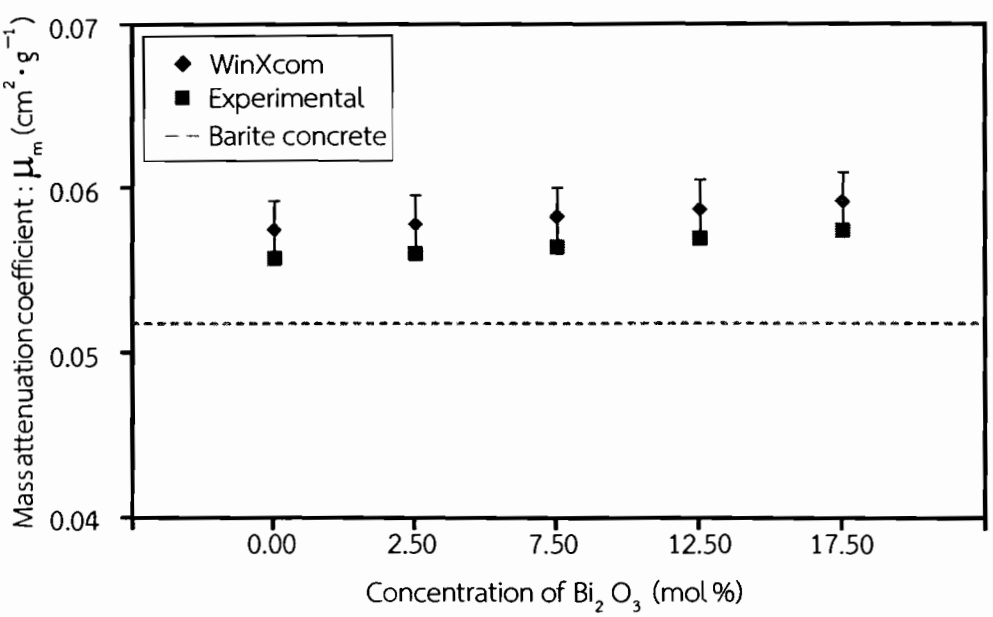
ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของแก้วระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3 ที่พลังงาน 1173 keV จากโปรแกรม WinXcom และจากการทดลอง



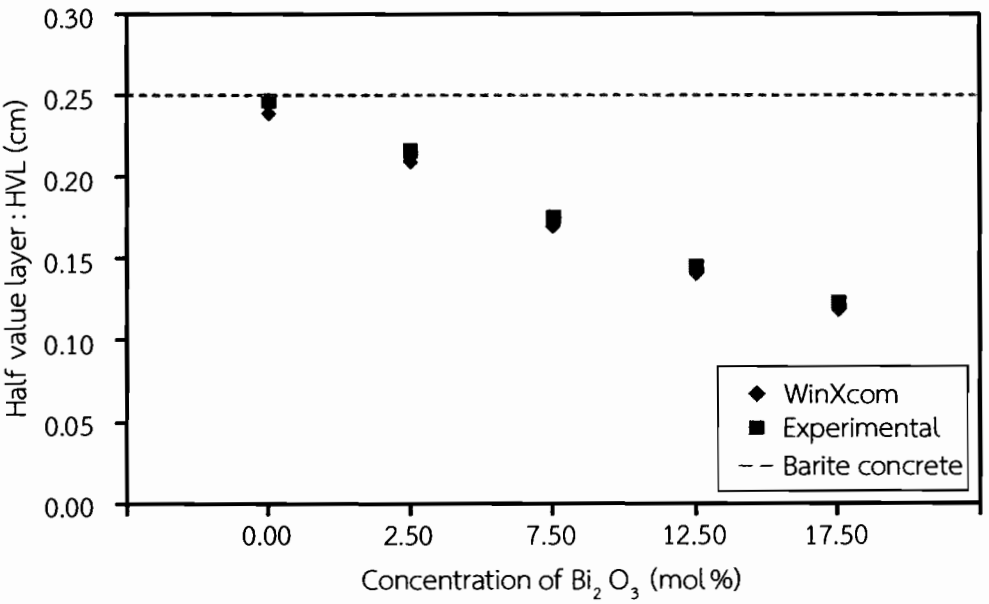
ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแก้วระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3 ที่พลังงาน 122 keV จากโปรแกรม WinXcom และจากการทดลอง



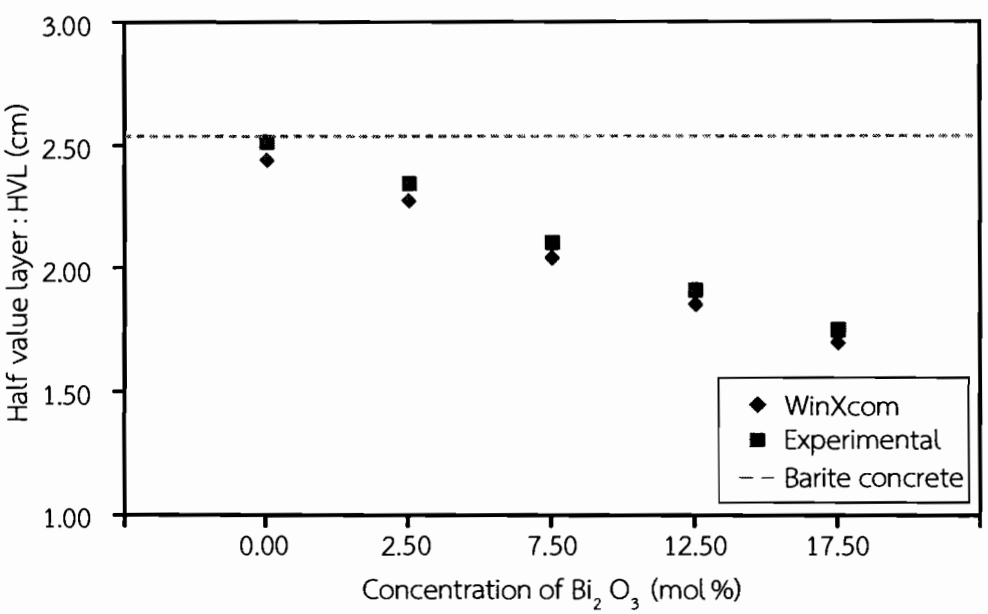
ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลแก้วระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3 ที่พลังงาน 662 keV จากโปรแกรม WinXcom และจากการทดลอง



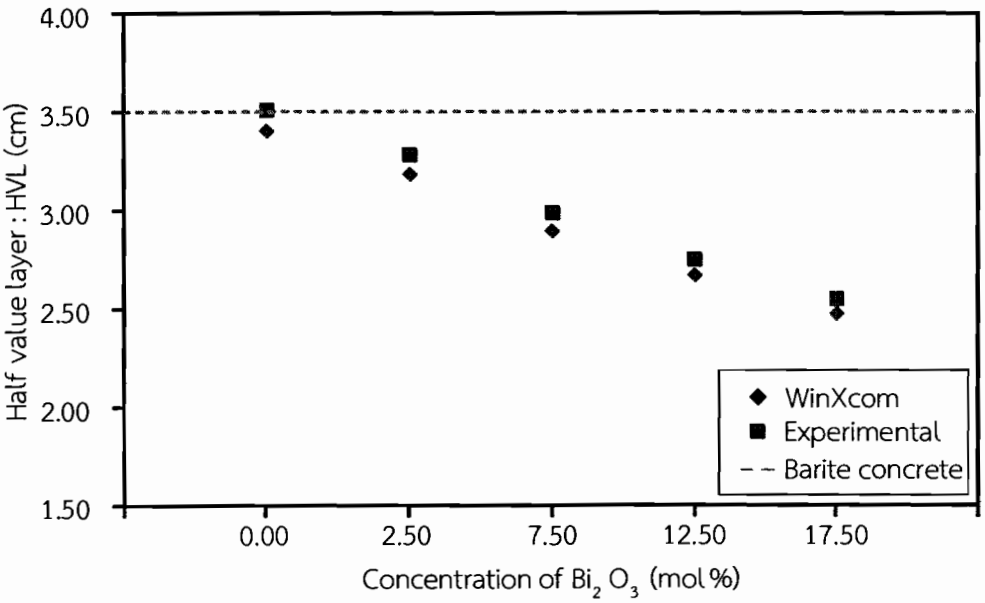
ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแก้วระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3 ที่พลังงาน 1173 keV จากโปรแกรม WinXcom และจากการทดลอง



ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า HVL ของแก้วระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3 ที่พลังงาน 122 keV จากโปรแกรม WinXcom และจากการทดลอง



ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า HVL ของแก้วระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3 ที่พลังงาน 662 keV จากโปรแกรม WinXcom และจากการทดลอง



ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า HVL แก้วระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3 ที่พลังงาน 1173 keV จากโปรแกรม WinXcom และจากการทดลอง

จากภาพที่ 4.9 – 4.11 จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นจากการทดลองและจากการคำนวณด้วยโปรแกรม WinXcom มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Bi_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น เพราะตัวอย่างแก้วมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจะทำให้การลดทอนรังสีเชิงเส้นดีขึ้น เป็นเช่นเดียวกันทั้งสามพลังงาน และเมื่อเปรียบเทียบ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของแบไรท์คอนกรีตซึ่งเป็นคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐานทั้งสามพลังงานพบว่า แก้วในระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3 จะมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นที่สูงกว่าแบไรท์คอนกรีตที่ชัดเจนตั้งแต่ที่ Bi_2O_3 2.50 เปอร์เซ็นโดยโมลเป็นต้นไป เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นจากการทดลองและการคำนวณด้วยโปรแกรม WinXcom แสดงในตารางที่ 4.15- 4.17 พบว่ามีค่าระหว่าง 3.0-3.3 %

จากภาพที่ 4.12- 4.14 จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลจากการทดลองและจากการคำนวณด้วยโปรแกรม WinXcom มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Bi_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น เพราะตัวอย่างแก้วมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้นที่เพิ่มขึ้น เป็นเช่นเดียวกันทั้งสามพลังงาน และเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลกับสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแบไรท์คอนกรีตพบว่า แก้วในระบบ P_2O_5 - BaO – Bi_2O_3 จะมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลที่สูงกว่าแบไรท์คอนกรีตตั้งแต่ที่ Bi_2O_3 2.50 เปอร์เซ็นโดยโมลเป็นต้นไป เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลจากการทดลองและการคำนวณด้วยโปรแกรม WinXcom แสดงในตารางที่ 4.18- 4.20 พบว่ามีค่าระหว่าง 3.0-3.3 %

จากภาพที่ 4.15- 4.17 จะเห็นได้ว่าค่า HVL จากการทดลองและจากการคำนวณด้วยโปรแกรม WinXcom มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ Bi_2O_3 เพิ่มขึ้น เพราะแก้วตัวอย่างมีความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นจึงสามารถลดทอนรังสีลงเหลือครึ่งหนึ่งได้ด้วยความหนาที่ลดลงในทุกๆพลังงาน และเมื่อทำการ

เปรียบเทียบค่า HVL จากการทดลองและจากการคำนวณด้วยโปรแกรม WinXcom กับค่า HVL ของแบไรท์คอนกรีตพบว่า แก้วในระบบจะมีค่า HVL ที่ต่ำกว่าแบรไรท์คอนกรีตชัดเจนเมื่อเติมปริมาณ Bi_2O_3 2.50 เปอร์เซ็นโดยโมลเป็นต้นไป เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน HVL จากการทดลองและการคำนวณด้วยโปรแกรม WinXcom แสดงในตารางที่ 4.15- 4.17 พบว่ามีค่าระหว่าง 2.9-3.3 %

ดังนั้นหากเรานำแก้วในระบบนี้ที่เติม Bi_2O_3 17.50 เปอร์เซ็นโดยโมลไปพัฒนาขึ้นรูปเป็นวัสดุกำบังรังสีแทนแบไรท์คอนกรีต จะใช้ความหนาที่ลดลงและกำบังรังสีได้ดีเทียบเท่าแบไรท์คอนกรีต ดังนั้นแก้วในระบบ $50.00P_2O_5$ – 32.50BaO – $17.50Bi_2O_3$ จึงเป็นแก้วที่มีมีศักยภาพในการกำบังรังสีดีกว่าแบไรท์คอนกรีต

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าสูตรแก้วที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้คือ $(50)P_2O_5$-(50-X)BaO-(X)Bi_2O_3 ค่าความหนาแน่นและปริมาตรโมลาร์ของตัวอย่างแก้วเพิ่มขึ้นตามปริมาณบิสมัทไตรออกไซด์

ความเร็วอัลตร้าโซนิคตามยาวและเฉือนมีค่าต่ำสุดที่ปริมาณบิสมัทไตรออกไซด์ 17.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาพันธะโดย FTIR-Spectrometer ค่าความยืดหยุ่นโมดูลัส คือ โมดูลัสตามยาว โมดูลัสเฉือน โมดูลัสเชิงปริมาตร และยังโมดูลัส ซึ่งความยืดหยุ่นโมดูลัสนี้จะสัมพันธ์กับความแข็งแรงของพันธะโดยเฉลี่ย จากผลการทดลองแก้วในระบบที่ปริมาณบิสมัท 17.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล มีค่าความยืดหยุ่นโมดูลัสเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแก้วในระบบที่ปริมาณบิสมัท 0.00 เปอร์เซ็นต์โดยโมล จึงสรุปได้ว่าความแข็งของพันธะเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งระดับไมโครมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณบิสมัทไตรออกไซด์และมีค่าสูงสุดที่ปริมาณบิสมัทไตรออกไซด์ 12.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล จากนั้นจะลดลงใกล้เคียงค่าเริ่มต้นที่ปริมาณบิสมัทไตรออกไซด์ 17.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล

จากการศึกษา ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแก้วตัวอย่าง โดยโปรแกรม WinXcom และการทดลองที่พลังงานโฟตอน 122 662 และ 1173 keV ตามลำดับ เปรียบเทียบกับแบไรท์คอนกรีต จากการศึกษาโดยโปรแกรมและการทดลองพบว่าทุกระดับพลังงาน ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นและค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณบิสมัทไตรออกไซด์ จากโปรแกรมและการทดลองมีแนวโน้มสอดคล้องกัน ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นและค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแก้วตัวอย่างทั้ง 3 ระดับพลังงานพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณบิสมัทไตรออกไซด์ตั้งแต่ 2.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ขึ้นไปจะมีค่าเทียบเท่าและมีแนวโน้มสูงกว่าแบไรท์คอนกรีต ตามปริมาณบิสมัทไตรออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น จึงสามารถสรุปได้ว่า แก้วในระบบที่ปริมาณบิสมัทไตรออกไซด์ 17.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นและค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลสูงที่สุด

จากการศึกษาค่าความหนาครึ่งค่า (HVL) ของแก้วในระบบพบว่า แก้วในระบบมีค่าความหนาครึ่งค่าที่เทียบเท่าและดีกว่าแบไรท์คอนกรีตทั้ง 3 ระดับพลังงาน ที่ปริมาณบิสมัทไตรออกไซด์ 2.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ขึ้นไป และพบว่าแก้วในระบบที่มีค่าความหนาครึ่งค่าดีที่สุด คือ แก้วในระบบที่ปริมาณบิสมัทไตรออกไซด์ 17.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล

จากการศึกษาคุณสมบัติการกำบังรังสีแกมมาและคุณสมบัติความยืดหยุ่นพบว่า แก้วในระบบที่ปริมาณบิสมัทไตรออกไซด์ 17.50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล มีศักยภาพในการกำบังรังสีที่ดีกว่าแบไรท์คอนกรีตมากที่สุดและสามารถทนต่อแรงกระทำที่ทำให้แก้วผิดรูปได้สูงกว่าแก้วในระบบที่ปริมาณบิสมัทไตรออกไซด์ 0.00 เปอร์เซ็นต์โดยโมล

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

[1] ASTV ผู้จัดการออนไลน์. (2550). "ชี้ 4,000 ล้านคนทั่วโลกได้อานิสงส์ใช้ไฟ โรงไฟฟ้านิวเคลียร์", **พลังงานทางเลือก**. http://www.manager.co.th/Science/ViewNews.aspx?NewsID=9500000105967. 15 มกราคม, 2558.

[2] ฝ่ายวิศวกรรมนิวเคลียร์ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2557). "การจัดการของเสียของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์"**โรงไฟฟ้า**. http://www3.egat.co.th/ned/index.php?option=com_content&view=article&id=97&Itemid=136. 15 มกราคม, 2558.

[3] K.J. Singh and et al. "Gamma-ray shielding and structural properties of PbO-SiO_2 glasses", **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**. 266: 944–948, 2008.

[4] K.A. Matori and et al. ":Study og the elastic properties of $(PbO)_x(P2O5)_{1-x}$ lead phosphate glass using an ultrasonic technique", **Journal of Non-crystalline Solids**. 361: 78-81, 2013.

[5] V.I. Arbuzov and et al. "Optical spectral and radiation-shielding properties of high-lead phosphate glasses", **Glass Phys. Chem**. 31 (5): 583-590, 2005.

[6] K.Serizawan and et al. "Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing", **in 3rd International Symposium on Environmentally conscious Design and Inverse Manufacturing Tokyo**. P 817. Tokyo: union of ecodesigners.

[7] กรมควบคุมมลพิษ. "ศูนย์รวบรวมข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์", **เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์**. http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?vID=1592. 15 มกราคม, 2558.

[8] กรมควบคุมมลพิษ. "ศูนย์รวบรวมข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์", **เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์**. http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?vID=1482. 15 มกราคม, 2558.

[9] N.Singh and et al. "Comparative study of lead borate and bismuth lead borate glass systems as gamma-radiation shielding materials", **Am J Nuclear instrument and methods in physics research section B: Beam interactions with materials and atoms**. 225: 305-309, 2004.

[10] El-Mallawany. "Ultrasonic studies of $(TeO_2)_{50}$-$(V_2O_5)_{50-x}$-$(TiO_2)_x$ glasses", **Journal of Materials Chemistry and Physics**. 95: 321-327, 2006.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[11] จิราพันธ์ ดรรชนีเพชร. **สมบัติทางกายภาพและโครงสร้างของแก้วบิสมัทเจือด้วยโครเมียม.** เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2554.

[12] A. Paul. **Chemistry of glass.** New York: Chapman and hall, 1982.

[13] จิราพันธ์ ดรรชนีเพชร. **สมบัติทางกายภาพและโครงสร้างของแก้วบิสมัทเจือด้วยโครเมียม.** เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2554.

[14] โกศล สาระเวก และสุนทร หาญวงศ์. **การเป่าแก้วเบื้องต้น.** เชียงใหม่: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2534.

[15] **พันธุ์ทิพย์ ทิมสุกใส. การเป่าแก้ว.** นครราชสีมา: สถาบันราชภัฏนครราชสีมา, 2542.

[16] บริษัทกระจกไทยอาซาฮีจากัด. **กระจก ชัยชนะที่มีต่อแสงของมนุษยชาติ.** กรุงเทพฯ : พริกหวานกราฟฟิค, 2543.

[17] อรรจน์ ประภาพิทยากร. **ที่สุดของวัสดุช่าง.** กรุงเทพฯ: โอ.เอส.พริ้นติ้ง เฮ้าส์, 2531.

[18] C. Bootjomchai and et al. "Elastic moduli of borosilicate glasses doped with heavy metal oxides", **Journal of Non-Crystalline Solids.** 388: 37–45, 2014.

[19] S.Y. Marxouk and M.S. Gaafar. "Ultrasonic study on some borosilicate glasses doped with different transition metal oxides", **Journal of Solid State Communications.** 144: 478-483, 2007.

[20] El-Mallawany. "Ultrasonic studies of $(TeO_2)_{50}$-$(V_2O_5)_{50-x}$-$(TiO_2)_x$ glasses", **Journal of Materials Chemistry and Physics.** 95: 321-327, 2006.

[21] ดนัยศักดิ์ เจริญเขต. **การศึกษาสมบัติทางกลและทางแสงของแก้วโพแทสเซียมโบโรซิลิเกตและโซเดียมโบโรซิลิเกตที่เติมด้วยออกไซด์ของธาตุทรานซิชัน.** โครงการพิเศษ: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2550.

[22] Sofia N. Rodrigues and et al. "Microencapsulation of Limonene for Textile Application", **Ind Eng Chem** Res. 47(12): 4142–4147, 2008.

[23] Jerrold T. and et al.. "Ionizing Vs Nonionizing radiation". in **The essential physics of medical imaging.** 2nd ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2002.

[24] สุมาลัย วังวรรณรัตน์. **รังสีชีววิทยา.** เชียงใหม่: แม็กซ์พรินติ้ง 2003, 2553.

[25] บรรจง เขื่อนแก้ว. **คุณภาพของภาพรังสี.** ขอนแก่น: คลังนานาวิทยา, 2551.

[26] นคร ไพศาลกิตติสกุล. **ฟิสิกส์เชิงรังสี.** กรุงเทพฯ: อักษรโสภณ, 2553.

[27] จิราภรณ์ โตเจริญชัย, ภาวนา ภูสุวรรณ และ ธวัชชัย ชัยวัฒนรัตน์. **เทคนิคทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์.** พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: พี.เอ.ลีฟวิ่ง, 2545.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[28] C. Bootjomchai and et al. "Gamma-ray shielding and structural properties of barium–bismuth–borosilicate glasses", **Radiation Physics and Chemistry**. 88(7): 785–790, 2012.

[29] National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). **Recent Applications of the NCRP Public Dose Limit Recommendation for Ionizing Radiation.** New York: NCRP Publication 116, 2004.

[30] L. Gerward and et al. "X-ray absorption in matter. Reengineering XCOM", **Radiation Physics and Chemistry**. 60: 23–24, 2001

[31] เชิดศักดิ์ บุตรจอมชัย. **การผลิตแก้วกำบังรังสีเอ็กซ์โดยการรีไซเคิลแก้วโบโรซิลิเกต.** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2008.

[32] Yasser B. Saddeek. "Ultrasonic study and Physical Properties of some borate glass", **Materials Chemistry and Physics**. 83: 222-228, 2003

[33] K. Singh snd et al. "Gamma-ray Shielding properties of CaO-SrO-B_2O_3 glass", **Radiation Physics and Chemistry**. 72: 225-228, 2003.

[34] M.H. Kharita and et al. "Shielding properties of lead and barium phosphate glasses", **Radiation Physics and Chemistry**. 81:1568-1571, 2012.

[35] www.webqc.com. "Bi_2O_3", **Molecular Weight and Elemental Composition Calculator**. http://www.webqc.org/molecular-weight-of-Bi2O3.html. 20 March, 2015.

[36] www.webqc.com. "BaO", **Molecular Weight and Elemental Composition Calculator**. http://www.webqc.org/mmcalc.php. 20 March, 2015.

[37] R. Laopaiboon and C. Bootjomchai. "Radiation effects on structural properties of glass by using ultrasonic techniques and FTIR spectroscopy: A comparison between local sand and SiO_2", **Annals of Nuclear Energy**. 68: 220-227, 2014.

[38] M.S. Gaafar and S.Y. Marzouk. "Mechanical and structural studies on sodium borosilicate glasses doped with Er_2O_3 using ultrasonic velocity and FTIR spectroscopy", **Physica B: Condensed Matter**. 388: 294-302, 2007.

[39] E. Mansour and G. El-Damrawi. "Electrical properties and FTIR spectra of ZnO–PbO–P_2O_5 glasses", **Physica B**. 405: 2137-2143, 2010.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

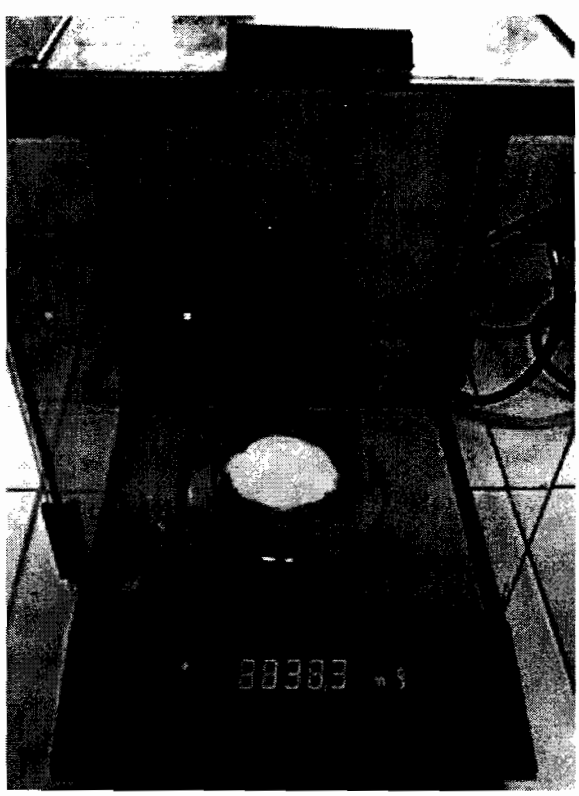
[40] Y. B. Saddeek, M.A. Kaid and M.R. Ebeid. "FTIR and physical features of Al_2O_3–La_2O_3–P_2O_5–PbO glasses", **Journal of Non-Crystalline Solids**. 387: 30-35, 2014.

[41] Y. Sun and et al. "FTIR, Raman and NMR investigation of CaO–SiO_2–P_2O_5 and CaO–SiO_2–TiO_2–P_2O_5 glasses", **Journal of Non-Crystalline Solids**. 420: 26-33, 2015.

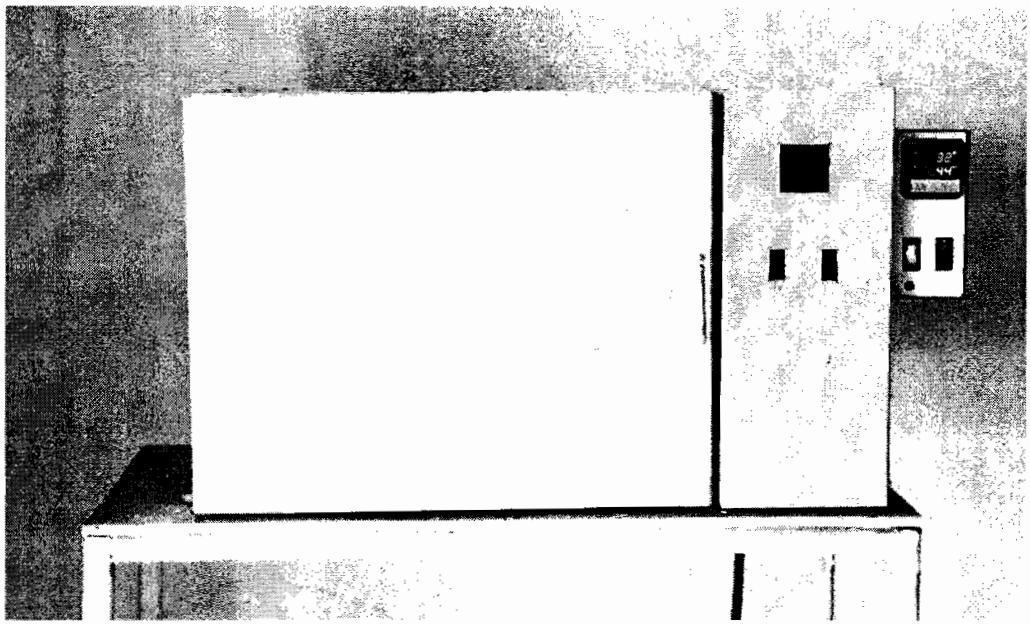
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

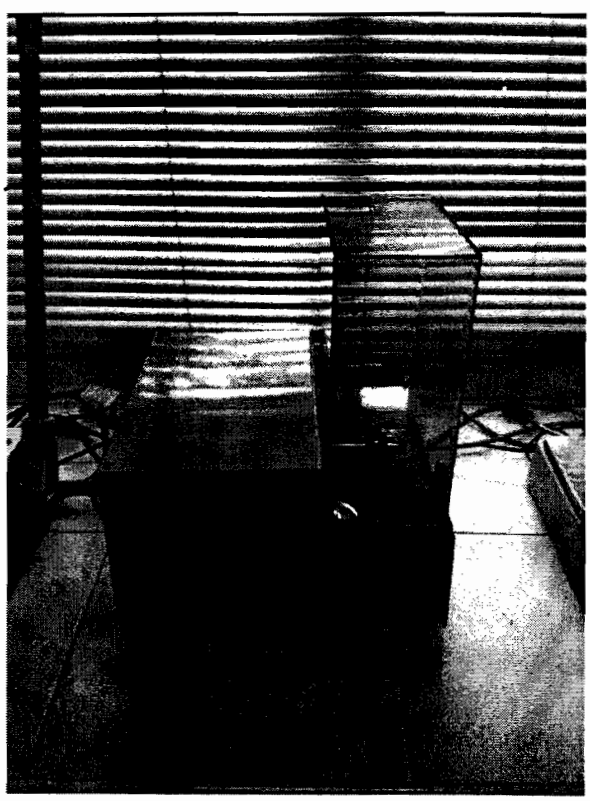
ภาพที่ ก.1 เตาหลอมไฟฟ้าอุณหภูมิสูง สร้างโดยกลุ่มวิจัย GTEC ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



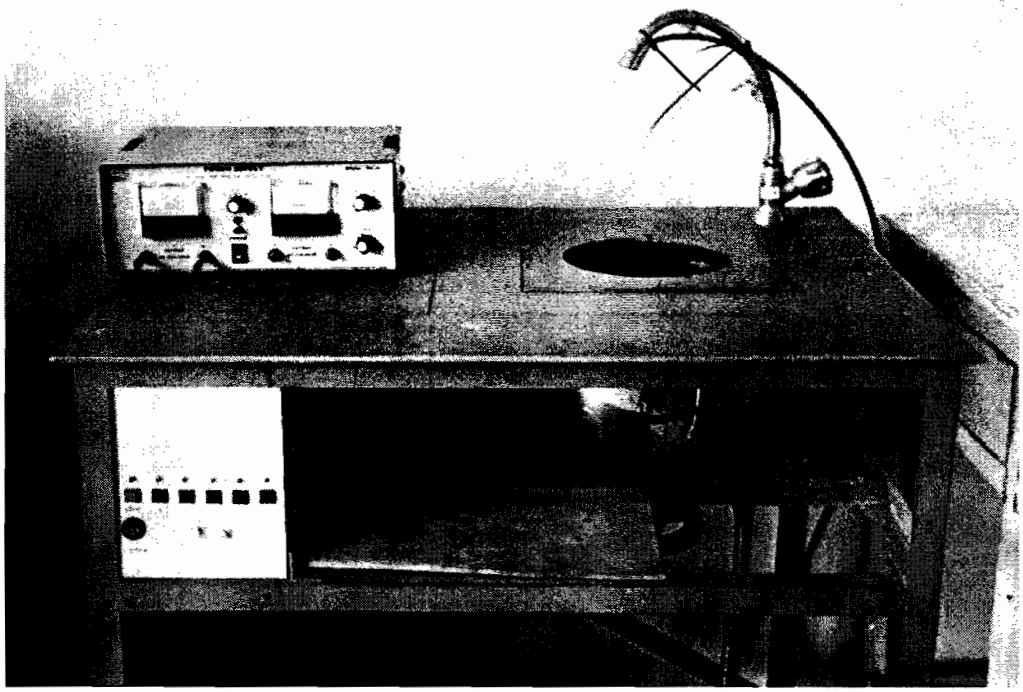
ภาพที่ ก.2 เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ บริษัท Denver Instrument ความละเอียด 0.0001 g



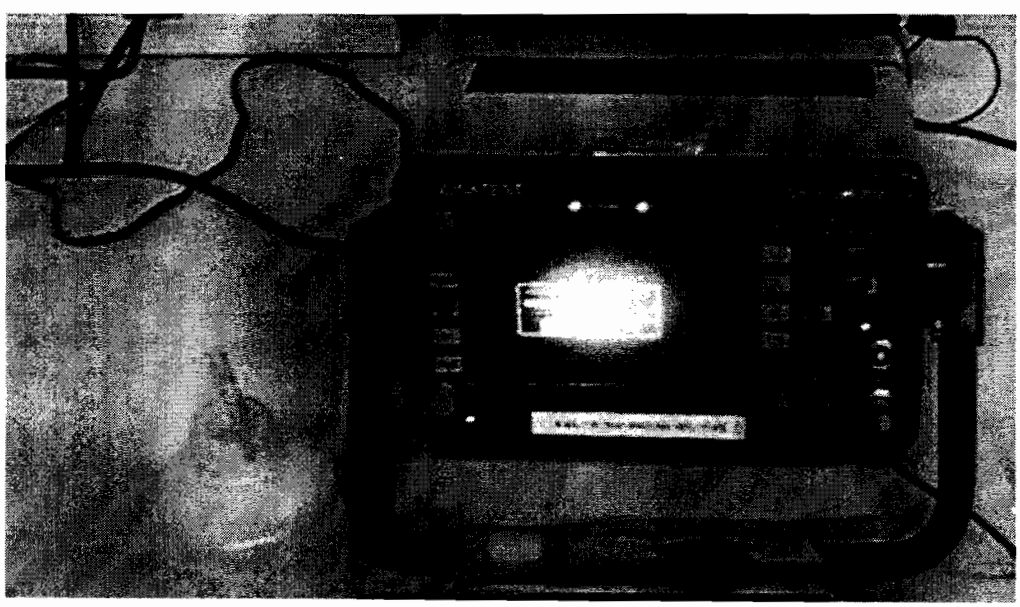
ภาพที่ ก.3 เตาอบไฟฟ้าอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสสร้างโดยกลุ่มวิจัย GTEC ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



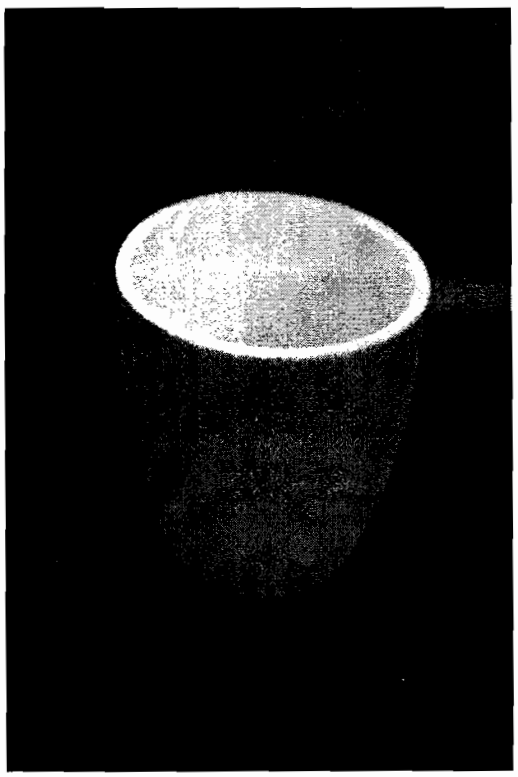
ภาพที่ ก.4 เครื่องตัดชิ้นงาน ยี่ห้อ Benetec limited รุ่น labcut 1010



ภาพที่ ก.5 เครื่องขัดชิ้นงาน สร้างโดยกลุ่มวิจัย GTEC ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

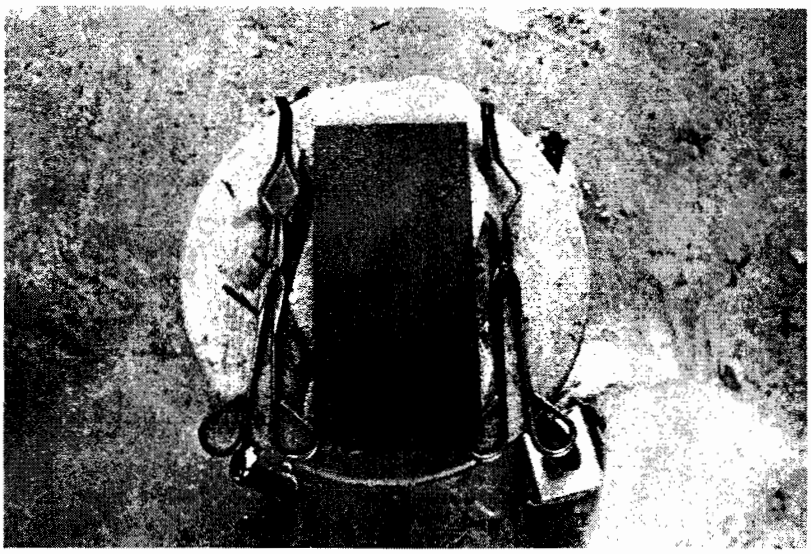


ภาพที่ ก.6 เครื่อง ultrasonic flaw detecter รุ่น Sitescan 230 ของบริษัท Sonatest



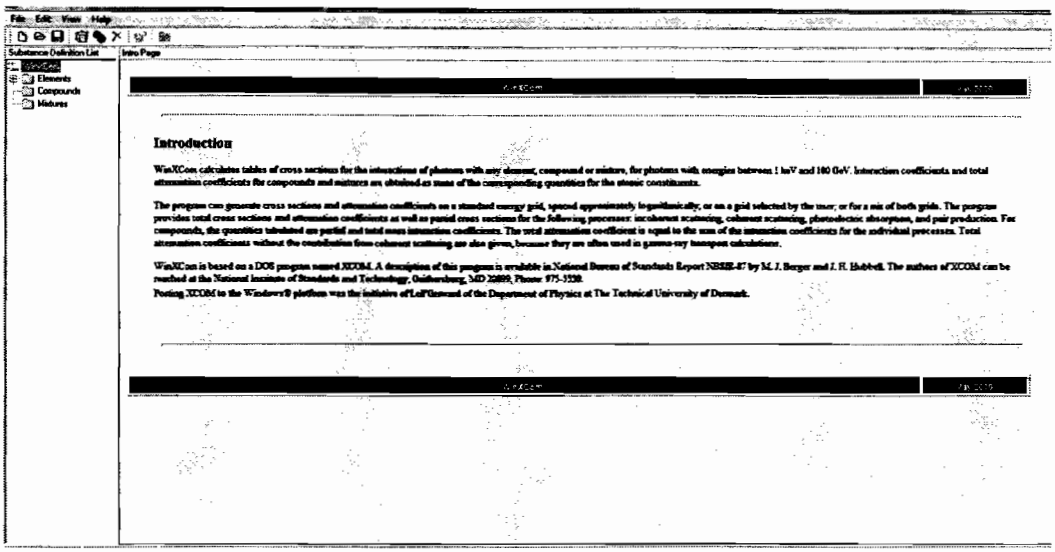
ภาพที่ ก.7 เบ้าหลอมอลูมินา

ภาพที่ ก.8 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) รุ่น System 2000 FT-IR ของบริษัท Perkinelmer instruments

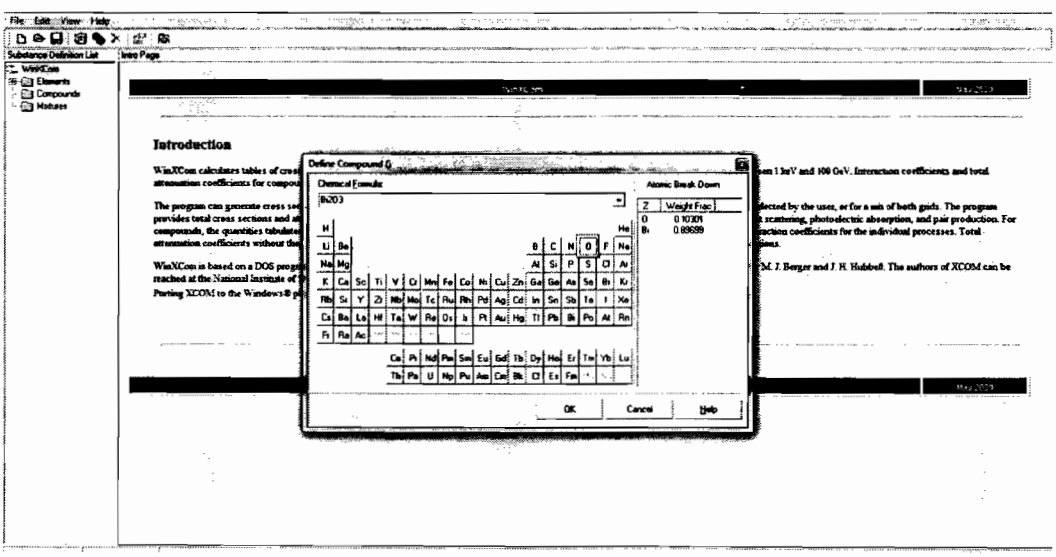


ภาพที่ ก.9 แม่พิมพ์ขึ้นรูปแก้ว

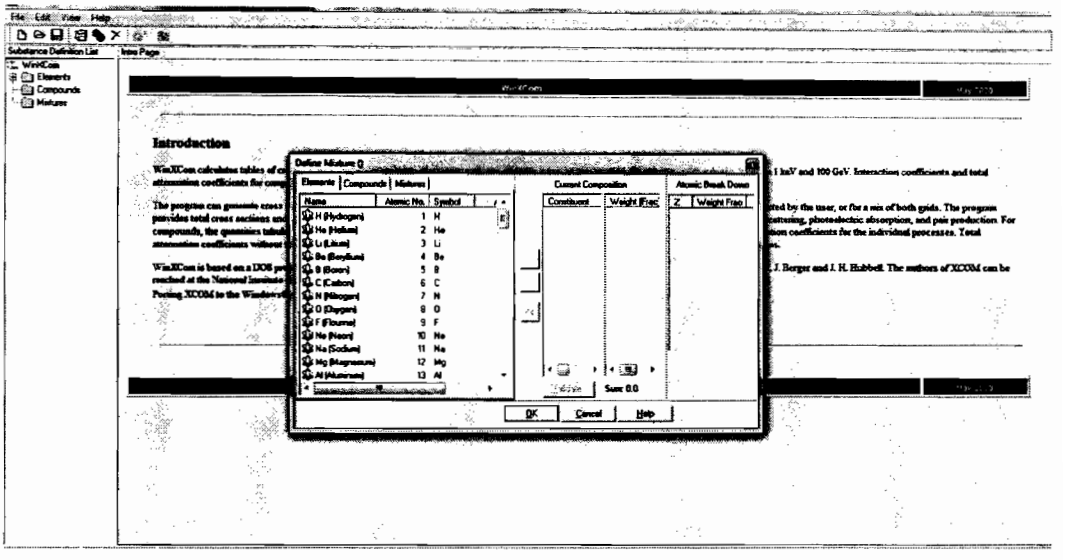
ภาคผนวก ข
ขั้นตอนการใช้โปรแกรม WinXcom



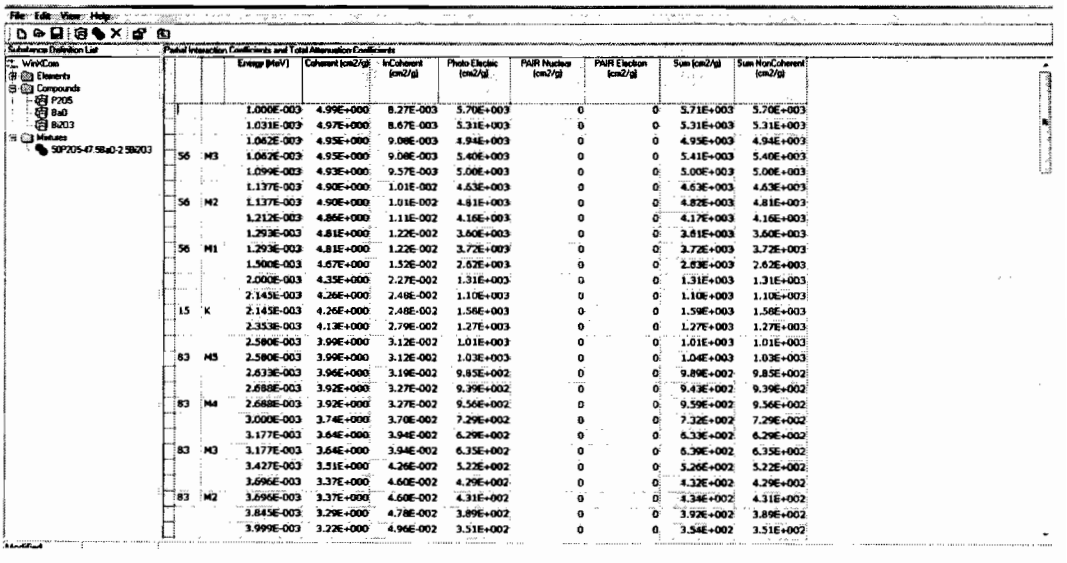
ภาพที่ ข.1 โปรแกรมWinXcom



ภาพที่ ข.2 เลือกธาตุที่ต้องการในระบบ



ภาพที่ ข.3 นำธาตุที่เลือกนำมาสร้างสารประกอบและสัดส่วนของธาตุ



		Energy (MeV)	Coherent (cm2/g)	InCoherent (cm2/g)	Photo Electric (cm2/g)	PAIR Nuclear (cm2/g)	PAIR Electron (cm2/g)	Sum (cm2/g)	Sum NonCoherent (cm2/g)
		1.000E-003	4.99E+000	8.27E-003	5.70E+003	0	0	5.71E+003	5.70E+003
		1.031E-003	4.97E+000	8.67E-003	5.31E+003	0	0	5.31E+003	5.31E+003
		1.062E-003	4.95E+000	9.08E-003	4.94E+003	0	0	4.95E+003	4.94E+003
56	M3	1.062E-003	4.95E+000	9.08E-003	5.40E+003	0	0	5.41E+003	5.40E+003
		1.099E-003	4.93E+000	9.57E-003	5.00E+003	0	0	5.00E+003	5.00E+003
		1.137E-003	4.90E+000	1.01E-002	4.63E+003	0	0	4.63E+003	4.63E+003
56	M2	1.137E-003	4.90E+000	1.01E-002	4.81E+003	0	0	4.82E+003	4.81E+003
		1.212E-003	4.86E+000	1.11E-002	4.16E+003	0	0	4.17E+003	4.16E+003
		1.293E-003	4.81E+000	1.22E-002	3.60E+003	0	0	3.61E+003	3.60E+003
56	M1	1.293E-003	4.81E+000	1.22E-002	3.72E+003	0	0	3.72E+003	3.72E+003
		1.500E-003	4.67E+000	1.52E-002	2.62E+003	0	0	2.63E+003	2.62E+003
		2.000E-003	4.35E+000	2.27E-002	1.31E+003	0	0	1.31E+003	1.31E+003
		2.145E-003	4.26E+000	2.48E-002	1.10E+003	0	0	1.10E+003	1.10E+003
15	K	2.145E-003	4.26E+000	2.48E-002	1.56E+003	0	0	1.59E+003	1.56E+003
		2.353E-003	4.13E+000	2.79E-002	1.27E+003	0	0	1.27E+003	1.27E+003
		2.580E-003	3.99E+000	3.12E-002	1.01E+003	0	0	1.01E+003	1.01E+003
83	M5	2.580E-003	3.99E+000	3.12E-002	1.03E+003	0	0	1.04E+003	1.03E+003
		2.633E-003	3.96E+000	3.19E-002	9.85E+002	0	0	9.89E+002	9.85E+002
		2.688E-003	3.92E+000	3.27E-002	9.39E+002	0	0	9.43E+002	9.39E+002
83	M4	2.688E-003	3.92E+000	3.27E-002	9.56E+002	0	0	9.59E+002	9.56E+002
		3.000E-003	3.74E+000	3.70E-002	7.29E+002	0	0	7.32E+002	7.29E+002
		3.177E-003	3.64E+000	3.94E-002	6.29E+002	0	0	6.33E+002	6.29E+002
83	M3	3.177E-003	3.64E+000	3.94E-002	6.35E+002	0	0	6.39E+002	6.35E+002
		3.427E-003	3.51E+000	4.26E-002	5.22E+002	0	0	5.26E+002	5.22E+002
		3.696E-003	3.37E+000	4.60E-002	4.29E+002	0	0	4.32E+002	4.29E+002
83	M2	3.696E-003	3.37E+000	4.60E-002	4.31E+002	0	0	4.34E+002	4.31E+002
		3.845E-003	3.29E+000	4.78E-002	3.89E+002	0	0	3.92E+002	3.89E+002
		3.999E-003	3.22E+000	4.96E-002	3.51E+002	0	0	3.54E+002	3.51E+002

ภาพที่ ข. 4 นำสารประกอบที่ได้นำมาสร้างระบบแก้ว

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นายสรินทรเทพ สายเนตร
เกิดวันที่	2 เมษายน พ.ศ. 2534
E-mail	sarinthonthep@gmail.com
ประวัติการศึกษา	มัธยมศึกษาปีที่ 3 โรงเรียนเบ็ญจะมะมหาราช อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี มัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนนารีนุกูล อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี ปริญญาตรี วิทยาศาสตรบัณฑิตฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี
ประวัติการวิจัย	Sainet, S. and et al. "Optical and mechanical properties of alkaline borosilicate glasses doped with TiO_2 and Bi_2O_3". In the NESTC. Ubon Ratchathani, Ubon Ratchathani University, 2013. Sainet, S. and et al. "Study of radiation shielding and elastic properties of $(50)P_2O_5$ - $(50\text{-}x)BaO$ - $(x)Bi_2O_3$ glass systems using an ultrasonic technique". In the SACT 2014, Pakse, Lao People,s Democratic Republic, 2014. Sainet, S. and et al. "Gamma-ray shielding and structural properties of P_2O_5-BaO-Bi_2O_3 glass system". In the Siam Physics Congress 2015, Krabi, Thailand, 2015.