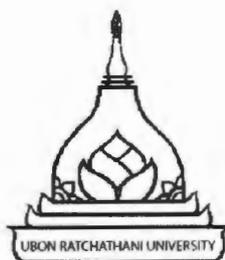


การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ขยะแก้ว CRT เป็นวัสดุกำบังรังสี



ปุณณภพ โสภภาพันธุ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



FEASIBILITY STUDY OF CRT WASTE GLASS USED AS RADIATION
SHIELDING MATERIALS

POONNAPHOB SOPAPAN

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 2016
COPYRIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

เรื่อง การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ขยะแก้ว CRT เป็นวัสดุกำบังรังสี

ผู้วิจัย นายปยุตณภพ โสภำพันธ์

คณะกรรมการสอบ

รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว	ประธานกรรมการ
รองศาสตราจารย์เรวัฒน์ เหล่าไพบุลย์	กรรมการ
รองศาสตราจารย์จินตนา เหล่าไพบุลย์	กรรมการ
ดร.สมคิด เพ็ญซารี	กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษา

.....


(รองศาสตราจารย์เรวัฒน์ เหล่าไพบุลย์)

.....


(รองศาสตราจารย์จินตนา เหล่าไพบุลย์)

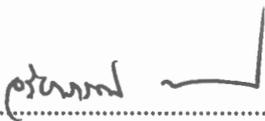
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

.....


(รองศาสตราจารย์ ดร.อุทิศ อินทร์ประสิทธิ์)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

.....


(รองศาสตราจารย์ ดร.อริยาภรณ์ พงษ์รัตน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปีการศึกษา 2559

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจาก รองศาสตราจารย์เรวัตน์ เหล่าไพบุลย์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ จินตนา เหล่าไพบุลย์ รองประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ในการนี้ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณ ที่ท่านคอยให้ความช่วยเหลือประสิทธิประสาทวิชาความรู้ รวมทั้งให้คำแนะนำปรึกษาแก้ไข ข้อผิดพลาดจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทร์ขาว และ ดร.สมคิด เพ็ญชารี ที่ได้กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะต่าง ๆ ตลอดทั้งการตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จ สมบูรณ์

ขอขอบคุณทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย (Science Achievement Scholarship of Thailand) ที่ช่วยสนับสนุนทุนการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา ดร.อัสสุภาวดี ปาทาคำ นักวิจัยประจำ ห้องปฏิบัติการกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุ แห่งชาติ (MTEC) ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สำหรับการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของแก้ว CRT โดยใช้ เทคนิค EDS อาจารย์เจ็จ เย็นใจ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือสำหรับเครื่องมือและการออกแบบการทดลองในการ ทดสอบสมบัติการกำบังรังสี ศูนย์ความเชี่ยวชาญปฏิบัติการเทคโนโลยีแก้ว (GTEC) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ สถานที่ เครื่องมือ สารเคมี และอุปกรณ์การทดลองต่าง ๆ ตลอดจน คณาจารย์ เจ้าหน้าที่ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ และผู้ที่มีส่วนช่วยสำหรับการดำเนินโครงการ พิเศษในครั้งนี้ ข้าพเจ้าต้องขอภัยที่ไม่สามารถกล่าวนามได้ทั้งหมดในที่นี้ ขอขอบคุณที่ให้การสนับสนุน ให้ความรู้ คำปรึกษาแนะนำ และให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้คอยให้การสนับสนุน ช่วยเหลือด้านการศึกษา และเป็นกำลังใจตลอดมา หากการดำเนินการโครงการพิเศษในครั้งนี้มีสิ่งใดขาดตกบกพร่อง ผู้วิจัย ต้องขอภัยเป็นอย่างสูง และหวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์นี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจใน งานด้านนี้ต่อไป


บุญณภพ ไสภาพันธ์
ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

เรื่อง : การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ขยะแก้ว CRT เป็นวัสดุกำบังรังสี
 ผู้วิจัย : ปุณณภพ โสภภาพันธุ์
 ชื่อปริญญา : วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
 สาขาวิชา : ฟิสิกส์
 อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์เรวัตน์ เหล่าไพบุลย์
 อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : รองศาสตราจารย์จินตนา เหล่าไพบุลย์
 คำสำคัญ : แก้ว, หลอดแก้วรังสีแคโทด, โมดูลัสยืดหยุ่น, วัสดุกำบังรังสี

แก้วรีไซเคิลที่ได้จากหลอดแก้วรังสีแคโทด (CRT) ถูกใช้เป็นส่วนประกอบของระบบแก้ว $(70-x)\text{CRT}-30\text{K}_2\text{O}-x\text{BaO}$ เมื่อ x มีค่าเท่ากับ 0 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ตัวอย่างแก้วได้ถูกเตรียมขึ้นด้วยกระบวนการหลอมแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว เอฟทีไออาร์สเปกโทรสโคปีเป็นเครื่องมือสำหรับตรวจสอบข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างภายในของระบบแก้ว $\text{CRT}-\text{K}_2\text{O}-\text{BaO}$ ด้วยการเปลี่ยนแปลงปริมาณ BaO ความหนาแน่นของตัวอย่างแก้วถูกวัดโดยใช้หลักการของอาร์คิมิดีส โดยใช้เอ็นเฮกเซนเป็นของเหลว การวัดความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิคตามยาวและเฉือนของตัวอย่างแก้วจะทำการอุณหภูมิห้องโดยใช้วิธีพัลส์เอคโค ความถี่ 4 MHz พบว่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิคมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณ BaO ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่า BaO ทำหน้าที่เป็นตัวปรับปรุงโครงสร้างแก้วโดยเข้าไปทำลายพันธะโครงข่ายแก้วแล้วทำให้เกิดการขาดของพันธะที่จับกับออกซิเจน (NBOs) ค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิคและความหนาแน่นของแก้วถูกนำไปคำนวณเพื่อประเมินสมบัติความยืดหยุ่น ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่าความแข็งระดับไมโครมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ BaO ส่วนค่าอัตราส่วนปัวส์ซองของแก้วมีค่าค่อนข้างคงที่อยู่ระหว่าง 0.2552 ถึง 0.2501 มากไปกว่านั้นสมบัติการกำบังรังสีได้ถูกดำเนินการในแง่ของค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนมวลและความหนาแน่นครั้งค่า ซึ่งทดสอบที่พลังงานโฟตอน 74.228, 97.143, 122, 662, 1173 และ 1332 keV โดยใช้วิธีการส่งผ่านลำรังสีแคบ ค่าทางทฤษฎีของสมบัติการกำบังรังสีเหล่านี้ถูกคำนวณด้วยโปรแกรม WinXCom และเปรียบเทียบกับคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่าสมบัติการกำบังรังสีของตัวอย่างแก้วดีกว่าคอนกรีตกำบังรังสีมาตรฐาน ในช่วงพลังงาน 74.228 ถึง 122 keV ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าแก้วที่เตรียมขึ้นจาก CRT ที่มีส่วนผสมของ BaO เป็นตัวเลือกที่มีศักยภาพสำหรับการประยุกต์ใช้งานป้องกันรังสีเอกซ์

ABSTRACT

TITLE : FEASIBILITY STUDY OF CRT WASTE GLASS USED AS RADIATION SHIELDING MATERIALS
AUTHOR : POONNAPHOB SOPAPAN
DEGREE : MASTER OF SCIENCE
MAJOR : PHYSICS
ADVISOR : ASSOCIATE PROFESSOR RAEWAT LAOPAIBOON
CO-ADVISOR : ASSOCIATE PROFESSOR JINTANA LAOPAIBOON
KEYWORDS : GLASSES, CATHODE RAY TUBE (CRT) GLASS, ELASTIC MODULI, RADIATION SHIELDING MATERIAL

Recycled glass derived from discarded cathode ray tube (CRT) was used as a composition for $(70-x)\text{CRT}-30\text{K}_2\text{O}-x\text{BaO}$ glass systems (where $x = 0$ to 20 mol%). The glass samples were prepared using the melt quenching method. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy was used to investigate information concerning the local structure of $\text{CRT}-\text{K}_2\text{O}-\text{BaO}$ glass systems modified with the variation of BaO content. The densities of the glass samples were measured by Archimedes' principle using n-hexane as the immersion liquid. The room temperature ultrasonic velocities were measured at 4 MHz frequency using a pulse echo technique. It was found that the ultrasonic velocities decrease with increasing amount of BaO content. This indicated that the BaO acts as modifier oxide by breaking network bonding and creating non-bridging oxygens (NBOs). Then the measured ultrasonic wave velocities and densities of glasses were used to estimate the elastic properties. Based on the obtained results, elastic moduli and micro hardness of the glasses increased with increasing BaO content but Poisson's ratio remained almost constant from 0.2552 to 0.2501. Moreover, radiation shielding properties have been performed in terms of mass attenuation coefficient and half value layer at photon energies 74.228, 97.143, 122, 662, 1173 and 1332 keV by using narrow beam transmission method. The theoretical values of these radiation shielding properties were also calculated by WinXCom program, and compared with standard radiation shielding concrete. The results, at 74.228 to 122 keV, showed the better radiation shielding properties of prepared glass samples in comparison to standard shielding concretes. Therefore it can be concluded that the recycled CRT glass containing BaO is a potential candidate for X-rays shielding applications.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษาค้นคว้า	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับการใช้แก้วรีไซเคิล	4
2.2 ประวัติความเป็นมาและความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวัสดุแก้ว	4
2.3 ลักษณะการเกิดเนื้อแก้วและโครงสร้างทั่วไปของแก้ว	5
2.4 ชนิดของแก้ว	7
2.5 องค์ประกอบของแก้ว	9
2.6 แก้วหลอดรังสีแคโทด	10
2.7 ความหนาแน่น	11
2.8 ปริมาตรโดยโมล	11
2.9 เทคนิคคลื่นเสียงอัลตราโซนิก	12
2.10 สมบัติยืดหยุ่นของวัสดุแก้ว	15
2.11 เทคนิคเอฟทีไออาร์สเปกโทรสโกปี	19
2.12 กัมมันตภาพรังสี	22
2.13 อันตรกิริยาระหว่างพลังงานโฟตอนกับสสาร	24
2.14 สมบัติทางรังสี	28
2.15 โปรแกรม WinXCom	30
2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 สารเคมีและวัสดุอุปกรณ์	37
3.2 วิธีการทดลอง	38

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลและวิเคราะห์ผลการวิจัย	
4.1 ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างแก้ว	43
4.2 องค์ประกอบทางเคมี ความหนาแน่น และปริมาตรโดยโมลของตัวอย่างแก้ว	44
4.3 คุณสมบัติความยืดหยุ่นของตัวอย่างแก้ว	46
4.4 สมบัติโครงสร้างของตัวอย่างแก้ว	49
4.5 สมบัติทางรังสีของตัวอย่างแก้ว	51
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	
5.1 สรุปผลการทดลอง	56
5.2 ข้อเสนอแนะ	57
เอกสารอ้างอิง	58
ภาคผนวก	
ก วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	67
ข โปรแกรม WinXCom	77
ประวัติผู้วิจัย	80

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ลักษณะการเกิดเนื้อแก้วที่มีโครงสร้างเป็นแบบผลึกและไม่เป็นผลึก	5
2.2	โครงสร้างโมเลกุลของ SiO ₄ (a) โครงสร้างโมเลกุลของ SiO ₄ ที่อยู่ในสถานะผลึก (b) โครงสร้างของ SiO ₄ ที่อยู่ในสถานะแก้วอสัณฐาน	6
2.3	โครงสร้างของ SiO ₄ Tetrahedron ในแก้วแคลเซียมเลดซิลิเกต	7
2.4	โครงสร้าง Tetrahedron ของ SiO ₄	9
2.5	โครงสร้างของแก้วที่ประกอบด้วย SiO ₂ ทำหน้าที่เป็น network former และ Na ₂ O ทำหน้าที่เป็น network modifier	9
2.6	ลักษณะหลอดรังสีแคโทด (CRT) ของคอมพิวเตอร์	10
2.7	ลักษณะการเกิดแรงลอยตัวตามหลักการของอาร์คิมิดีส	11
2.8	คลื่นตามยาวในอากาศเนื่องจากการสั่นของเมมเบรน	12
2.9	คลื่นตามขวางในเส้นเชือก	13
2.10	คลื่นเสียงตกกระทบที่ผิวยรอยต่อตัวกลางที่ 1 และ 2	13
2.11	การเกิดมุมวิกฤตที่หนึ่ง (1) และสอง (2)	14
2.12	การวัดความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิคตามยาวและเฉือน	15
2.13	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุ	16
2.14	ลักษณะแรงที่กระทำต่อวัสดุของโมดูลัสตามยาว	17
2.15	ลักษณะแรงที่กระทำต่อวัสดุของโมดูลัสเฉือน	17
2.16	ลักษณะแรงที่กระทำต่อวัสดุของโมดูลัสเชิงปริมาตร	17
2.17	ลักษณะแรงที่กระทำต่อวัสดุของอัตราส่วนปัวส์ซอง	18
2.18	ลักษณะแรงที่กระทำต่อวัสดุของยังโมดูลัส	18
2.19	รังสีอินฟราเรดในแถบ electromagnetic spectrum	20
2.20	สเปกตรัมการส่งผ่านรังสีอินฟราเรดของซิลิกอน	20
2.21	การสั่นของโมเลกุลในรูปแบบต่าง ๆ	21
2.22	เครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์	22
2.23	การเกิด Characteristic X-ray และ Bremsstrahlung	23
2.24	กระบวนการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก	24
2.25	กระบวนการกระเจิงแบบคอมป์ตัน	26
2.26	กระบวนการผลิตอนุภาคคู่	27
2.27	การดูดกลืนและการส่งผ่านรังสีในวัสดุ	28
2.28	ความเข้มของรังสีที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อใช้วัสดุกัน	29
2.29	หน้าจอแสดงผลของโปรแกรม WinXCom	30
2.30	การคำนวณสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของธาตุซิลิกอน (Si)	31

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3.1	ชุดอุปกรณ์การทดลองของ Narrow beam transmission method	40
3.2	ชุดอุปกรณ์การทดลองของ Narrow beam transmission method แบบ secondary target	41
3.3	แผนภาพขั้นตอนการจำลองด้วยโปรแกรม WinXCom	42
4.1	ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างแก้ว	43
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและปริมาตรโดยโมลกับปริมาณแบเรียมออกไซด์ของตัวอย่างแก้ว	45
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกทั้งตามยาวและเฉือนกับปริมาณแบเรียมออกไซด์ของตัวอย่างแก้ว	47
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic moduli) กับปริมาณแบเรียมออกไซด์ของตัวอย่างแก้ว	47
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งระดับไมโคร (Micro-hardness) กับปริมาณแบเรียมออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงไป	48
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืน (Absorbance) รังสีอินฟราเรดกับเลขคลื่น (Wave number) ของตัวอย่างแก้ว	49
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วและเฟอร์ไรต์คอนกรีต (Ferrite concrete) ที่พลังงานต่าง ๆ	52
4.8	การจำลองอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างรังสีกับแก้วด้วยโปรแกรม WinXCom	53
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาที่หารังสีลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง (HVL) ของตัวอย่างแก้วและเฟอร์ไรต์คอนกรีต (Ferrite concrete) ที่พลังงานต่าง ๆ	54
ก.1	เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ Denver Instrument ความละเอียด 0.0001 g	68
ก.2	ครกบดสาร Agate	68
ก.3	เบ้าหลอมเซรามิกส์ที่ทำจาก Compound Clay	68
ก.4	เตาหลอมสารอุณหภูมิ 1,800 องศาเซลเซียส ที่ใช้ในการหลอมแก้ว สร้างโดยกลุ่มวิจัยแก้ว ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	69
ก.5	เตาอบสารสำหรับอบตัวอย่างแก้วอุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส สร้างโดยกลุ่มวิจัยแก้ว ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	69
ก.6	แม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับการขึ้นรูปแก้ว	70
ก.7	เครื่องตัดชิ้นงาน ยี่ห้อ Benetec limited รุ่น labcut 1010	70
ก.8	เครื่องขัดตัวอย่างแก้ว สร้างโดยกลุ่มวิจัยแก้ว ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	70

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ก.9	เครื่อง EDS ยี่ห้อ Hitachi รุ่น S-3400N	71
ก.10	เครื่องอัลตราโซนิก SONATEST รุ่น SITESCAN 230	71
ก.11	เครื่อง FTIR Spectrometer ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Nicolet 6700	71
ก.12	เครื่องอัดไฮโดรลิก ยี่ห้อ Specac	72
ก.13	ชุดอุปกรณ์สำหรับเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ FTIR	72
ก.14	หัววัดรังสีชนิด NaI(TL) ยี่ห้อ Canberra Model 802 พื้นที่หน้าตัด 2 x 2 นิ้ว	73
ก.15	หัววัดรังสีชนิด CdTe Model XR-100T พื้นที่หน้าตัด 3 x 3 mm	73
ก.16	เครื่อง MCA และหน้าจอแสดงผลของเครื่อง MCA	74
ก.17	การจัดอุปกรณ์สำหรับการวัดสมบัติทางรังสีด้วยวิธี Narrow beam transmission	75
ก.18	กล่องสำหรับวางแผ่น Target	75
ก.19	การจัดอุปกรณ์สำหรับการวัดสมบัติทางรังสีด้วยวิธี Narrow beam transmission method แบบ secondary target	76
ข.1	หน้าหลักของโปรแกรม WinXCom	78
ข.2	การเลือกธาตุที่ต้องการศึกษา	78
ข.3	การจำลองสารประกอบในโปรแกรม WinXCom	79
ข.4	ผลการคำนวณของสารประกอบที่ต้องการศึกษา	79

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมการการหาค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุ โดยใช้เทคนิคอัลตราโซนิค	19
3.1	ข้อมูลองค์ประกอบและสูตรในการเตรียมตัวอย่างแก้ว G1 – G5	38
4.1	ข้อมูลองค์ประกอบทางเคมี (Composition) ความหนาแน่น (Density) และปริมาตรโดยโมล (Molar volume) ของแก้วในระบบ CRT-K ₂ O-BaO	44
4.2	ข้อมูลองค์ประกอบของแก้ว CRT จากหน้าจอคอมพิวเตอร์ ยี่ห้อ COMPAQ ด้วยเทคนิค EDS	44
4.3	ข้อมูลความเร็วเสียงอัลตราโซนิค (v_L , v_S) โมดูลัสยืดหยุ่น (L, G, K, E) อัตราส่วนปัวซอง (σ) และความแข็งระดับไมโคร (H)	46
4.4	ข้อมูลพันธะโครงข่ายที่พบในตัวอย่างแก้วระบบ CRT-K ₂ O-BaO	50

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ขยะอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Waste หรือ E-waste) หรือ ซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Waste from Electrical and Electronic Equipment; WEEE) หมายถึง อุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่เป็นที่ต้องการ ล้าสมัย หมดอายุการใช้งานหรือสูญเสียสภาพการใช้งาน [1] โดยเฉพาะอย่างยิ่งขยะอิเล็กทรอนิกส์จำพวกจอภาพหลอดสุญญากาศหรือหลอดรังสีแคโทด (Cathode Ray Tube; CRT) ที่พบมากในจอคอมพิวเตอร์และโทรทัศน์รุ่นเก่า พบว่ามีจำนวนเพิ่มมากขึ้นจนเริ่มเป็นปัญหาในการกำจัดหรือการจัดเก็บ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีของการผลิตจอโทรทัศน์หรือคอมพิวเตอร์ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้จอคอมพิวเตอร์แบบเดิมหรือที่เรียกว่าจอ CRT ถูกแทนที่ด้วยผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ เช่น จอแสดงผลแบบผลึกเหลว (Liquid Crystal Display; LCD) จอแสดงผลพลาสมา (Plasma Display Panel; PDP) จอแสดงผลแบบไดโอดเปล่งแสงชีวภาพ (Organic Light Emitting Diode; OLED) เป็นต้น ในขณะที่ช่วงอายุการใช้งานและความนิยมการใช้งานจอคอมพิวเตอร์แบบเดิมเริ่มลดลงไปตามกาลเวลา เนื่องจาก มีความล้าสมัยและไม่มีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้งานอีกต่อไป [2-3] ทำให้ในปัจจุบันมีขยะ CRT เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ในหลาย ๆ ประเทศพยายามจะกำจัดขยะ CRT เหล่านี้โดยการเผาหรือฝังกลบ แต่เนื่องจากจอ CRT มีองค์ประกอบของสารที่เป็นอันตราย ซึ่งจะก่อให้เกิดมลพิษส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตเป็นจำนวนมาก [4] การศึกษางานวิจัยของ Q. Xu และคณะ [5] ได้ทำการสำรวจแนวทางในการกำจัดขยะ CRT ในสาธารณรัฐประชาชนจีน ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่าการนำขยะ CRT มารีไซเคิลใหม่เพื่อให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมหรือไม่ก่อให้เกิดมลพิษ เป็นวิธีที่เหมาะสมและควรจะนำมาใช้ในการจัดการกับขยะ CRT ให้มากขึ้น ปัจจุบันทั่วโลกจึงให้ความสำคัญและพยายามที่จะหาแนวทางในการกำจัดขยะ CRT ด้วยวิธีการรีไซเคิลและทำให้เป็นวัสดุแบบใหม่ เพื่อนำไปใช้งานในด้านอื่น ๆ ได้อย่างเหมาะสม นอกจากนั้นแล้วยังมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อที่จะลดจำนวนขยะเหล่านี้ให้มีปริมาณน้อยลงและทำให้เกิดประโยชน์มากที่สุด อย่างไรก็ตามยังไม่มีวิธีการที่เหมาะสมมากนักในการกำจัดขยะเหล่านี้ให้หมดไปได้ ผู้วิจัยจึงเห็นว่าการนำขยะแก้ว CRT มารีไซเคิลเพื่อใช้เป็นวัสดุกำบังรังสี เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจอย่างมากสำหรับช่วยลดจำนวนขยะ CRT ซึ่งจะทำให้เกิดความคุ้มค่าและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม มากไปกว่านั้นยังเป็นการพัฒนาวัสดุแบบใหม่ที่ช่วยป้องกันรังสีที่เป็นอันตรายไม่ให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่งด้วย

การนำขยะแก้ว CRT มาใช้เป็นองค์ประกอบหลักสำหรับเตรียมแก้วเพื่อประยุกต์ใช้ด้านรังสีเป็นที่น่าสนใจ เพราะว่า ปัจจุบันรังสีถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในงานหลาย ๆ ด้าน ตัวอย่างเช่น ใช้ในงานทางด้านทางการแพทย์ ไม่ว่าจะเป็นการตรวจวินิจฉัยโดยวิธีการถ่ายภาพด้วยรังสีเพื่อหาความผิดปกติหรือสิ่งแปลกปลอมภายในร่างกาย การบำบัดรักษาโรคบางชนิด เช่น การฉายรังสีเพื่อทำลายหรือหยุด

การเจริญเติบโตของเซลล์มะเร็ง หรือจะใช้รังสีในการปลอดเชื้อผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ เป็นต้น ในงานทางด้านธรณีวิทยา ใช้รังสีเพื่อสำรวจทรัพยากรธรรมชาติ เช่น น้ำมัน สินแร่ หรืออาจจะใช้รังสีในการวิเคราะห์ดินเพื่อจำแนกพื้นที่เพาะปลูกหรือศึกษาการดูดซึมแร่ธาตุ เป็นต้น งานทางด้านโบราณคดี ได้มีการใช้รังสีจากคาร์บอน (C-14) เพื่อคำนวณหาอายุของวัตถุโบราณ ในภาคการเกษตรและอาหาร ได้มีการฉายรังสีเพื่อชะลอการสุกและลดการเน่าเสียในผลไม้บางชนิด ควบคุมแมลงศัตรูพืชทางการเกษตร และรังสียังสามารถยืดอายุการเก็บรักษาอาหารได้อีกด้วย ในส่วนของภาคอุตสาหกรรมได้นำรังสีมาใช้ประโยชน์ในการวัดระดับและควบคุมการผลิต การวัดความหนาและความหนาแน่นของการผลิตกระดาษ การวัดความชื้น ตรวจสอบการชำรุดของท่อกลั่นน้ำมัน เป็นต้น นอกจากนี้ไอโซโทปรังสียังถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์อีกด้วย [6] ด้วยประโยชน์ที่มหาศาลจึงทำให้รังสีมีบทบาทที่สำคัญต่อชีวิตประจำวันของประชากรโลกเป็นอย่างมาก แต่ในทางกลับกันรังสีก็สามารถเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมได้มากเช่นเดียวกัน หากไม่ระมัดระวังอย่างเคร่งครัด วิธีการหนึ่งที่จะสามารถป้องกันอันตรายจากรังสีได้ก็คือ ต้องมีวัสดุที่มีความสามารถในการกำบังรังสีที่มีประสิทธิภาพมาช่วยในการป้องกันไม่ให้ร่างกายได้รับรังสีหรือได้รับน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

การศึกษาเบื้องต้นโดยการวิเคราะห์องค์ประกอบของ CRT ที่ได้จากหน้าจอคอมพิวเตอร์ด้วยเทคนิค EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) พบว่าใน CRT มีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งซิลิกอนไดออกไซด์สามารถทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของแก้วได้ นอกจากนี้แล้วใน CRT ยังประกอบด้วย MgO Al_2O_3 PbO CaO และ BaO ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวปรับปรุงโครงสร้างและยังสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำบังรังสีและคุณสมบัติด้านอื่นๆ ของวัสดุแก้วได้อีกด้วย ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำขยะ CRT มารีไซเคิลเป็นวัสดุแก้วที่ใช้สำหรับกำบังรังสี ซึ่งจะสามารถนำไปใช้เพื่อป้องกันรังสีได้ในงานหลาย ๆ ด้าน ดังที่กล่าวแล้วมาข้างต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำขยะ CRT มาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุสำหรับการกำบังรังสี

1.2.2 ศึกษาผลของสารตัวเติมหรือผลของ CRT ที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติยืดหยุ่น สมบัติโครงสร้าง และสมบัติทางรังสีของตัวอย่างแก้ว

1.2.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางรังสีที่คำนวณโดยใช้โปรแกรม WinXCom กับค่าที่ได้จากการทดลอง และเปรียบเทียบกับคอนกรีตมาตรฐานที่ใช้ในการกำบังรังสี

1.3 ขอบเขตการศึกษาค้นคว้า

การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ขยะแก้ว CRT เพื่อเป็นวัสดุกำบังรังสี โดยการศึกษาลักษณะทางกายภาพ สมบัติโครงสร้าง สมบัติยืดหยุ่น และสมบัติทางรังสี มีขอบเขตการทดลอง ดังนี้

1.3.1 ตัวอย่างแก้วที่เตรียมขึ้นอยู่ในระบบ $(70-x)\text{CRT}-30\text{K}_2\text{O}-x\text{BaO}$ เมื่อ $x = 0, 5, 10, 15,$ และ 20 mol\% และ CRT ได้มาจากหน้าจอคอมพิวเตอร์ ยี่ห้อ COMPAQ

1.3.2 วัดความหนาแน่นของตัวอย่างแก้วโดยใช้หลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes's principle) และใช้ n-hexane เป็นของเหลวในการทดลอง

1.3.3 ศึกษาสมบัติยืดหยุ่นและสมบัติโครงสร้างของตัวอย่างแก้วโดยใช้เทคนิคอัลตราโซนิก และ เอฟทีไออาร์ (FTIR)

1.3.4 ศึกษาสมบัติทางรังสีของตัวอย่างแก้วที่พลังงาน 74.228, 97.143, 122, 662, 1173 และ 1332 keV โดยใช้เทคนิค Narrow beam transmission และ Narrow beam transmission method แบบ secondary target

1.3.5 ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางรังสีของตัวอย่างแก้วจากการทดลองและการคำนวณด้วยโปรแกรม WinXCom รวมถึงเปรียบเทียบกับคอนกรีตมาตรฐานที่พลังงานเดียวกัน ตามลำดับ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถลดจำนวนขยะ CRT และนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุกำบังรังสีที่มีประสิทธิภาพได้

1.4.2 มีความรู้และเข้าใจในกระบวนการเตรียมตัวอย่างแก้วสำหรับใช้เป็นวัสดุกำบังรังสี

1.4.3 สามารถอธิบายผลของสารตัวเติมหรือผลของ CRT ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติยืดหยุ่น คุณสมบัติโครงสร้าง และคุณสมบัติทางรังสีของตัวอย่างแก้วได้

1.4.4 สามารถอธิบายอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างรังสีกับวัสดุแก้วที่พลังงานต่าง ๆ ได้ และเปรียบเทียบผลทางรังสีของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วยโปรแกรม WinXCom กับคอนกรีตมาตรฐานได้

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับการใช้แก้วรีไซเคิล

โดยทั่วไปแล้วการสร้างเนื้อแก้วส่วนมากจะใช้ซิลิกอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักและยังต้องใช้สารช่วยหลอมอื่น ๆ เพื่อช่วยให้เกิดเป็นเนื้อแก้ว ซึ่งสารที่ใช้เป็นองค์ประกอบของแก้วบางตัวนั้นประเทศไทยยังต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้มีต้นทุนการผลิตแก้วที่สูง แต่แนวคิดที่จะใช้แก้วรีไซเคิลจากหน้าจอ CRT จะช่วยให้ประหยัดต้นทุนการผลิต เนื่องจากแก้ว CRT ที่ได้จากหน้าจอคอมพิวเตอร์หรือหน้าจอโทรทัศน์รุ่นเก่า มีสารองค์ประกอบหลักที่เป็นซิลิกอนไดออกไซด์และมีสารตัวช่วยหลอมผสมอยู่ (ตารางที่ 4.2) ทำให้สามารถหลอมแก้วได้โดยไม่ต้องใช้อุณหภูมิในการหลอมที่สูงมากนัก นอกจากนี้แล้วแก้ว CRT เป็นแก้วที่มีความโปร่งใส ดังนั้นการนำขยะแก้ว CRT มาใช้เป็นองค์ประกอบหลักสำหรับเตรียมแก้วเพื่อเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมต่อการนำไปผลิตเป็นกระจกกำบังรังสีที่มีประสิทธิภาพได้ เนื่องจากในแก้ว CRT มีส่วนผสมของสารองค์ประกอบที่มีคุณสมบัติในการกำบังรังสีที่ดีและคุณสมบัติด้านความโปร่งใส สามารถมองเห็นผ่านได้ดี อีกทั้งการนำขยะแก้ว CRT มาใช้ยังเป็นการลดจำนวนขยะที่มีส่วนผสมของสารตะกั่วที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมอย่างมาก และยังสามารถช่วยลดต้นทุนกระบวนการผลิต เพราะมีการใช้สารเคมีน้อยลง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดขยะแก้ว CRT ทำให้ทราบว่าแนวทางในการกำจัดในปัจจุบันนั้นยังไม่ได้ประสิทธิภาพมากนัก เช่น เผาหรือฝังกลบ หรือใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตสำหรับก่อสร้างและกำบังรังสี แต่ข้อเสียของคอนกรีตก็คือดูดความชื้น ซึ่งอาจจะทำให้สารเคมีที่เป็นอันตรายสามารถซึมผ่านออกมาได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำขยะแก้ว CRT มารีไซเคิลใหม่เพื่อใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยการนำมาเป็นส่วนประกอบหลักของแก้วเพื่อใช้เป็นวัสดุสำหรับกำบังรังสี เนื่องจากการใช้สารเคมีบางชนิดมีราคาค่อนข้างสูง เพราะต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะสร้างกระจกแก้วกำบังรังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมาโดยใช้ขยะแก้ว CRT เป็นวัตถุดิบหลัก

2.2 ประวัติความเป็นมาและความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวัสดุแก้ว

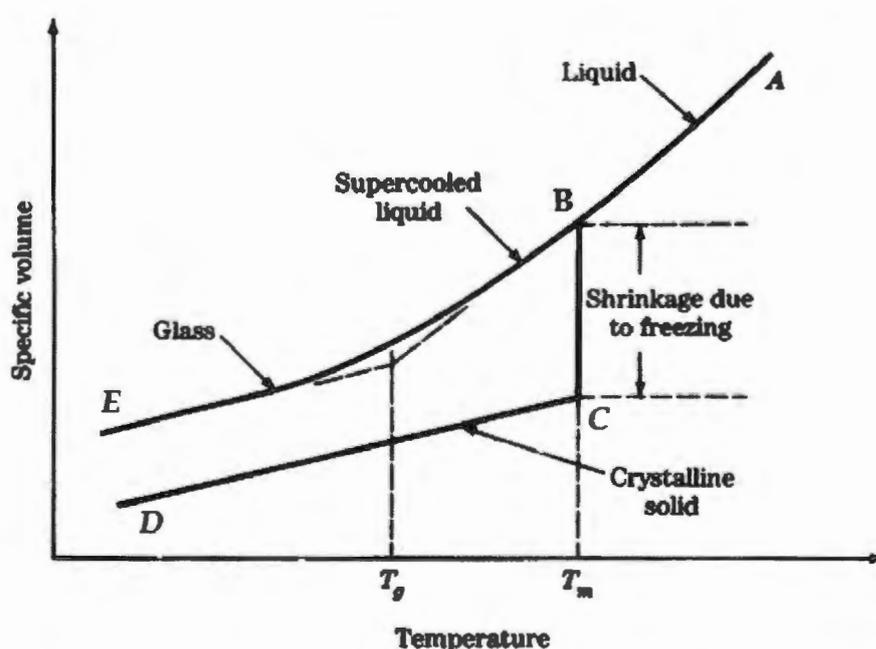
วัสดุแก้วในธรรมชาติที่เป็นที่รู้จักกันดีก็คือ "แร่อบซิเดียน (obsidian)" ซึ่งมักพบบริเวณภูเขาไฟเกิดจากลาวาที่มีการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว มนุษย์จึงมีการนำแร่ obsidian มาใช้งานตั้งแต่ยุคหินเนื่องจากแร่ Obsidian ซึ่งเป็นแร่ที่มีอยู่ในธรรมชาติ มีลักษณะเป็นของแข็ง เมื่อแตกหักจะมีลักษณะแหลมคม มนุษย์ยุคหินจึงนิยมใช้เป็นเครื่องมือในการล่าสัตว์หรือเครื่องมือในการประกอบอาหาร นอกจากนั้นแก้วจากธรรมชาติบางชนิดก็มีความสวยงาม ใช้เป็นเครื่องประดับได้ มนุษย์เริ่มรู้จักแก้วเมื่อประมาณ 5,000 ปี ก่อนคริสตศักราช นักเขียนโรมันบันทึกว่าพ่อค้าชาว phoenician ได้แวะพักที่ชายฝั่งของปาเลสไตน์และได้มีการก่อไฟ โดยใช้เนตรอน ซึ่งเป็นคาร์บอนเนตของโซดา สองก้อนแทนเตามารองหม้อชุปที่ตั้งอยู่บนไฟ ทำให้ก้อนเนตรอนหลอมละลายรวมกับพื้นทรายข้างล่างเกิดเป็นแก้วขึ้น จึงมีความเชื่อกันว่าการค้นพบโดยบังเอิญนี้เป็นจุดกำเนิดของการผลิตแก้วโดยฝีมือมนุษย์ [7-10]

“แก้ว” มาจากภาษาอังกฤษว่า “Glass” เป็นวัสดุอสัณฐานที่มีลักษณะคงรูปและเป็นเนื้อเดียว โดยปกติแล้วเกิดจากการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วของวัสดุหลอมหนืด ซึ่งทำให้การแข็งตัวนั้นไม่ก่อตัวเป็นผลึก สามารถสังเกตได้จากรอยแตกหักซึ่งมีลักษณะละเอียด (Conchoidal fracture) เนื้อแก้วที่บริสุทธิ์จะมีความโปร่งใส ผิวค่อนข้างแข็ง ทนต่อการกัดกร่อน ฉีกต่อปฏิกิริยาทางเคมีและชีวภาพ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ทำให้แก้วมีประโยชน์ต่อการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง [10-11]

วัสดุแก้วสามารถผลิตได้หลากหลายวิธี โดยวิธีการผลิตจะเลือกวัตถุดิบที่ใช้และจะต้องมีการคำนวณเพื่อหาปริมาณสารที่ต้องการใช้ในแต่ละครั้ง เนื่องจากสารที่ต้องการใช้ในแต่ละครั้งได้มาจากปฏิกิริยาเคมีของวัตถุดิบนั้น ๆ โดยในระหว่างการหลอมวัตถุดิบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางโครงสร้าง มีฟองอากาศเกิดขึ้น ซึ่งต้องกำจัดออกไป ในผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ที่ต้องการขึ้นรูปทรงที่เฉพาะจะทำโดยการใช้กระบวนการทางความร้อนเข้าช่วย เพื่อกำจัดความเค้น (Stress) ที่เกิดขึ้น เนื่องจากการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว สมบัติของแก้วสามารถปรับปรุงได้โดยการผสมสารองค์ประกอบอื่นๆลงในเนื้อแก้ว หรือการปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อน เพื่อความสะดวกในกระบวนการผลิตมีการเติมสารเคมีอื่นลงไปในส่วนผสมก่อนการหลอมแก้ว แก้วจึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ อย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

2.3 ลักษณะการเกิดเนื้อแก้วและโครงสร้างทั่วไปของแก้ว

ลักษณะการเกิดแก้วสามารถเกิดขึ้นได้ด้วยการให้ความร้อนกับวัตถุดิบที่เป็นส่วนผสมของแก้วจนกระทั่งเปลี่ยนสภาพจากของแข็งกลายเป็นของเหลว ซึ่งจะเรียกว่า “แก้วเหลว (Molten glass)” จากนั้นทำให้แก้วเหลวเกิดการแข็งตัวด้วยการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วโดยไม่ก่อให้เกิดผลึก (Non crystalline) ขึ้นในเนื้อแก้ว [12] ลักษณะการเกิดเนื้อแก้วแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 2.1



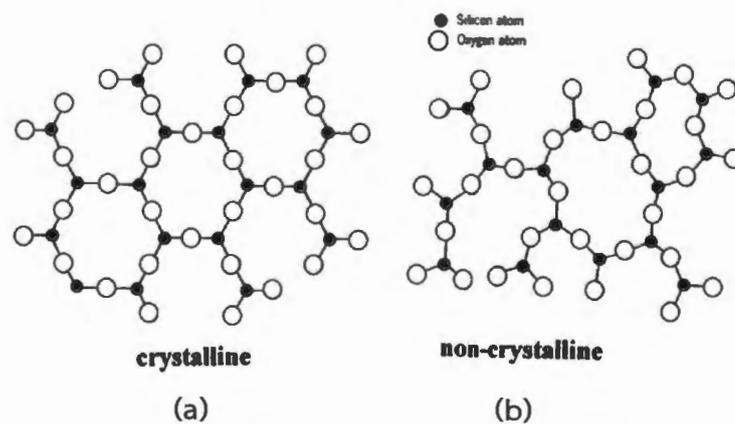
ภาพที่ 2.1 ลักษณะการเกิดเนื้อแก้วที่มีโครงสร้างเป็นแบบผลึกและไม่เป็นผลึก [10]

จากภาพที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (Temperature) กับปริมาตรจำเพาะ (Specific volume) เมื่อให้ความร้อนกับส่วนผสมของแก้ว ดังเส้นกราฟ DCBA จะทำให้ส่วนผสมที่เป็นของแข็งกลายเป็นของเหลวที่จุด C เรียกอุณหภูมิจุดนี้ว่า melting point liquid temperature (T_m) ที่ช่วง CB เป็นการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นของเหลว ซึ่งจะทำให้ของแข็งเกิดการหดตัวหรือยุบตัวและกลายเป็นแก้วเหลว (Molten glass) จากนั้นลดอุณหภูมิของแก้วเหลวลงเพื่อให้เกิดการแข็งตัวซึ่งทำได้ 2 ลักษณะ คือ

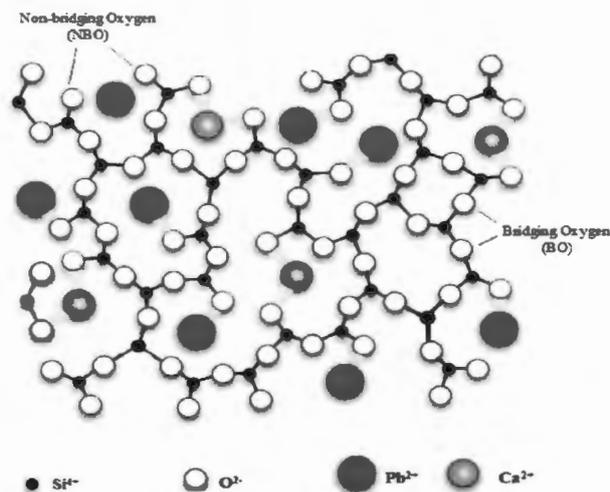
(1) ลดอุณหภูมิของแก้วเหลวลงตามเส้นกราฟ ABCD จะได้ของแข็งที่มีผลึก (Crystalline solid) เนื่องจากการลดอุณหภูมิลงตามเส้นกราฟนี้เป็นการลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ ทำให้อะตอมในแก้วเหลวเกิดการจัดเรียงตัวกลายเป็นผลึก ช่วง BC เป็นช่วงที่ผลึกเกิดขึ้น ซึ่งของแข็งเกิดการหดตัวหรือยุบตัว

(2) ลดอุณหภูมิของแก้วเหลวลงตามเส้นกราฟ ABE จะได้ของแข็งที่ไม่เป็นผลึกหรือเกิดเนื้อแก้วขึ้น เนื่องจากช่วงนี้เป็นการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้ได้ของเหลวเย็นตัวอย่างยิ่งยวด (Supercooled liquid) ตามเส้นกราฟนี้อะตอมในแก้วเหลวยังจัดเรียงตัวไม่สมบูรณ์มีพันธะที่ไม่ต่อเนื่องทำให้มีสภาพเป็นของแข็งแต่ไม่เป็นผลึก จุดที่กราฟเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความชัน เรียกอุณหภูมิที่จุดนี้ว่า glass transition temperature (T_g)

โครงสร้างแก้วโดยทั่วไปจะประกอบด้วยโมเลกุลของตัวโครงข่ายแก้วทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของแก้ว ตัวอย่างโครงสร้างแก้วซิลิเกต แสดงในภาพที่ 2.2 (a) โครงสร้างโมเลกุลของ SiO_4 ที่อยู่ในสถานะผลึกจะเห็นลักษณะโครงสร้างการเชื่อมต่อโครงข่ายแบบเฮกซะโกนอลที่เป็นระเบียบอย่างชัดเจน แต่ในภาพที่ 2.2 (b) โครงสร้างของ SiO_4 ที่อยู่ในสถานะแก้วอสัณฐานจะมีโมเลกุลเชื่อมต่อกันแบบสุ่มโดยมีออกซิเจนอะตอมเป็นตัวเชื่อมพันธะโคเวเลนต์ ซึ่งเรียกว่า Bridging Oxygen (BO) เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างที่ไม่เป็นผลึกของแก้วกับโครงสร้างแบบผลึก แก้วจะมีพลังงานที่ไม่เสถียรเท่ากับสถานะผลึกขององค์ประกอบที่เหมือนกัน ในภาพที่ 2.3 คือ โครงสร้างเมื่อมีการเติมตัวทำลายโครงข่าย (Modifier) เช่นสารประกอบอัลคาไลน์ ทำให้โครงข่ายหลักเกิดการแตกหักของพันธะโคเวเลนต์กลายเป็น Non-Bridging Oxygen (NBO) มีพันธะไอออนิกกับไอออนของโลหะอัลคาไลน์ ซึ่งช่วยลดประจุให้สมดุล [13]



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของ SiO_4 (a) โครงสร้างโมเลกุลของ SiO_4 ที่อยู่ในสถานะผลึก
(b) โครงสร้างของ SiO_4 ที่อยู่ในสถานะแก้วอสัณฐาน



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของ SiO_4 Tetrahedron ในแก้วเคลือบเคลือบซิลิเกต

2.4 ชนิดของแก้ว

การแบ่งประเภทของแก้ว สามารถแบ่งได้หลายแบบ เช่น แบ่งตามกรรมวิธีการผลิต แบ่งตามองค์ประกอบทางเคมี หรือแบ่งตามการใช้งาน แต่โดยส่วนใหญ่มักจะแบ่งประเภทตามองค์ประกอบของแก้ว ดังนี้ [14-16]

2.4.1 แก้วโซดาไลม์ (Soda-lime glass)

แก้วโซดาไลม์หรือแก้วอ่อน (soft glass) เป็นแก้วที่มีส่วนผสมของโซเดียมออกไซด์ ประมาณ 12-17% แคลเซียมออกไซด์ 8-12% นอกนั้นเป็นซิลิกา แก้วชนิดนี้พบเห็นได้ทั่วไป ยกตัวอย่างเช่น แก้วที่เป็นขวด แก้วน้ำ กระจกหน้าต่าง เป็นต้น แก้วชนิดนี้สามารถทำให้เกิดสีต่าง ๆ ได้โดยการเติมออกไซด์ของโลหะทรานซิชันที่ทำให้เกิดสีลงไปในแก้ว แก้วชนิดนี้สามารถนำไปผลิตเป็นแก้วนิรภัย (Safety Glass) ใช้เป็นกระจกรถยนต์ก็ได้เช่นกัน

2.4.2 แก้วโบโรซิลิเกต (Borosilicate glass)

แก้วโบโรซิลิเกตเป็นแก้วที่มีองค์ประกอบของซิลิกา 70-80% บอริกออกไซด์ 7-13% และมีโพแทสเซียมออกไซด์ โซเดียมออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ ผสมอยู่เล็กน้อย แก้วชนิดนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ ทนต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อน และการกัดกร่อนของสารเคมี แก้วชนิดนี้จึงเป็นแก้วที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเคมีและห้องปฏิบัติการ นำไปใช้ทำเครื่องแก้ววิทยาศาสตร์ ทำภาชนะแก้วสำหรับใช้ในเตาไมโครเวฟ เป็นต้น

2.4.3 แก้วตะกั่ว (Lead glass)

แก้วตะกั่วหรือที่มักจะเรียกว่า “แก้วคริสตัล” เป็นแก้วที่มีส่วนผสมของซิลิกา 54-65% ตะกั่วออกไซด์ 18-38% โซเดียมออกไซด์ โพแทสเซียมออกไซด์ และออกไซด์ตัวอื่น ๆ 13-15% เป็นแก้วที่มีดัชนีหักเหสูงมากกว่าแก้วชนิดอื่น การหลอมละลายแก้วจะใช้ตะกั่วเป็น Flux ทำให้หลอมละลายได้ง่าย ได้แก้วที่มีประกายแวววาวสวยงาม และสามารถแกะสลักเป็นลวดลายต่าง ๆ ได้ จึงมักนำไปใช้ทำเป็นเครื่องแก้วที่มีราคาแพง นอกจากนี้แก้วคริสตัลยังมีความต้านทานไฟฟ้าที่ดี จึงนำไปใช้ผลิตอุปกรณ์วิทยุ เรดาร์ และหลอดโทรทัศน์ เป็นต้น

2.4.4 แก้วโอปอล (Opal glass)

แก้วโอปอลเป็นแก้วที่มีการเติมสารบางตัว เช่น โซเดียมฟลูออไรด์ หรือแคลเซียมฟลูออไรด์ แล้วทำให้มีการตกผลึกหรือการแยกเฟสขึ้นในเนื้อแก้ว ทำให้แก้วชนิดนี้มีความขุ่นหรือโปร่งแสง เนื่องจากสามารถหกลอมเหลวและขึ้นรูปได้ง่าย จึงมีต้นทุนการผลิตค่อนข้างต่ำและยังสามารถทำให้มีความแข็งแรงทนทานมากขึ้นเมื่อนำไปผ่าน กระบวนการอบ (Tempering) หรือการเคลือบ (Laminating) แก้วโอปอลถูกนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ใช้ทำเป็นเครื่องประดับ ใช้ทำเป็นตัวกลางกระจายแสงเพื่อการส่องสว่างในอุปกรณ์หรือภาชนะบรรจุต่าง ๆ แก้วโอปอลที่ใช้ในวัสดุก่อสร้างมักจะมีฟลูออไรด์เป็นองค์ประกอบซึ่งจะต้องมีกรรมวิธีการผลิตแบบพิเศษ เพื่อให้ได้ผลตามต้องการ

2.4.5 แก้วอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate glass)

แก้วอะลูมิโนซิลิเกตเป็นแก้วที่มีอลูมินาและซิลิกาเป็นส่วนผสมหลัก แก้วชนิดนี้สามารถต้านทานต่อสารเคมีและไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูง ทนทานต่อสภาวะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ดี และมีจุดอ่อนตัวของแก้วสูงพอที่จะป้องกันการเสียรูปทรงเมื่อทำการอบ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ผลิตภัณฑ์ จึงนิยมใช้แก้วชนิดนี้ในการผลิต Combustion Tube ซึ่งเป็นหลอดแก้วที่ติดตั้งใน Furnace นอกจากนี้ยังใช้ทำเทอร์โมมิเตอร์ ทำหลอดสูญญากาศทางอิเล็กทรอนิกส์ ทำเครื่องครัว ทำ Combustion tube เป็นต้น

2.4.6 แก้วอัลคาไลน์-เอิร์ท อลูมิโนซิลิเกต (Alkaline-earth aluminosilicate glass)

แก้วอัลคาไลน์-เอิร์ท อลูมิโนซิลิเกตเป็นแก้วที่มีส่วนผสมคล้ายแก้วโซดาไลม์ แต่มีออกไซด์ของกลุ่มอัลคาไลน์เอิร์ท เช่น แคลเซียมออกไซด์ และแบเรียมออกไซด์ อยู่ในส่วนผสมด้วย ทำให้มีค่าดัชนีหักเหของแสงใกล้เคียงกับแก้วตะกั่ว แต่ผลิตง่ายกว่าและมีความทนทานต่อสารเคมีที่มีความเป็นกรดและต่างมากกว่าแก้วตะกั่วเล็กน้อย

2.4.7 แก้วฟอสเฟต (Phosphate glass)

แก้วฟอสเฟตเป็นแก้วที่มีฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์เป็นส่วนผสมหลัก และมีซิลิกาผสมอยู่ด้วยบางส่วน แก้วประเภทนี้มีสมบัติทนต่อการกัดกร่อนของกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งปกติเป็นสารเคมีที่สามารถละลายซิลิกาหรือกัดกร่อนแก้วได้ แก้วประเภทนี้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในงานที่มีกรดไฮโดรคลอริก เช่น ในกระบวนการเติมฟลูออรีนเข้าไปในโมเลกุลสารอินทรีย์ (fluorination) นอกจากนี้การเติมออกไซด์ของฟอสฟอรัสลงไปช่วยให้แก้วไม่ดูดกลืนแสงเหนือม่วงหรือมีการดูดกลืนน้อยที่สุด จึงใช้ทำแก้วอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet glass) นอกจากนี้ใช้กับพวกแก้วทางแสงชนิดพิเศษ เช่น แก้วดูดกลืนความร้อนและแก้วฟลูออเรสเซนต์ เป็นต้น

2.4.8 แก้วเซรามิกส์ (Glass-ceramics)

แก้วเซรามิกส์เป็นแก้วประเภทพิเศษอะลูมิโนซิลิเกตที่มีไททาเนียม หรือเซอร์โคเนีย ผสมอยู่เล็กน้อยในระหว่างกระบวนการทางความร้อนเพื่อให้มีการตกผลึกในเนื้อแก้ว ซึ่งอาจจะทำให้แก้วมีความทึบแสงหรือโปร่งแสงขึ้นอยู่กับชนิดของผลึก แก้วเซรามิกส์จะมีทนทานที่สูง และมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ สามารถนำไปใช้เป็นภาชนะหุงต้ม วัสดุตกแต่งอาคาร หรือใช้เป็นวัสดุทันตกรรม เป็นต้น

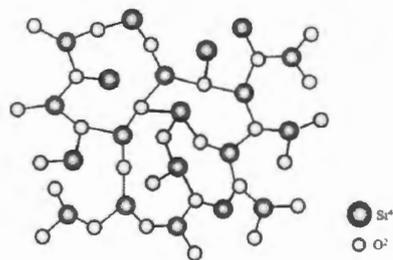
นอกจากนี้อาจมีแก้วประเภทอื่น ๆ อีกหลายประเภท ขึ้นอยู่กับส่วนผสมที่แตกต่างกันออกไป แต่เนื่องจากอาจไม่มีการใช้ที่แพร่หลายนัก จึงไม่นำมากล่าวในที่นี้

2.5 องค์ประกอบของแก้ว

ในการผลิตวัสดุแก้วสามารถจำแนกวัตถุดิบออกเป็น 4 กลุ่ม ตามสมบัติองค์ประกอบเพื่อให้วัสดุแก้วมีคุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้ [15, 17]

2.5.1 Glass forming oxide

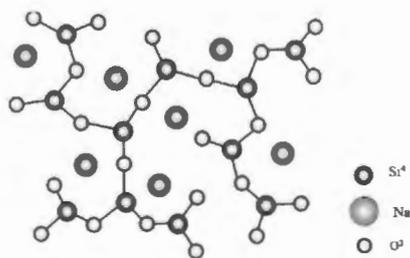
Glass forming oxide หรือ network former คือ สารที่เติมลงไปในแก้วแล้วทำให้เกิดเป็นโครงสร้างแก้ว โดยทั่วไปแล้วคือซิลิกา ซึ่งมีหน่วยย่อยพื้นฐานเป็นซิลิเกต (SiO_4) สามารถแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 2.4 นอกจากนี้ยังมีออกไซด์อื่นอีก เช่น โบรอนออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ ในโครงสร้างของแก้ว borosilicate และ aluminosilicate เป็นต้น



ภาพที่ 2.4 โครงสร้าง Tetrahedron ของ SiO_4

2.5.2 Glass modifying oxide

Glass modifying oxide หรือ network modifier คือ สารที่เติมลงไปในแก้วเพื่อทำลายโครงสร้างโครงข่ายของแก้วบางส่วน ซึ่งจะให้ความหนืดของแก้วลดลง และสามารถไปขึ้นรูปได้ง่าย ตัวอย่างของสารกลุ่มนี้ เช่น Na_2O K_2O CaO และ MgO เป็นต้น โครงสร้างของแก้วลักษณะนี้สามารถแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของแก้วที่ประกอบด้วย SiO_2 ทำหน้าที่เป็น network former และ Na_2O ทำหน้าที่เป็น network modifier

2.5.3 Intermediate oxide

Intermediate oxide คือออกไซด์ที่ไม่สามารถเกิดโครงสร้างโครงข่ายของแก้วได้ด้วยตัวเอง แต่สามารถเข้าไปร่วมกับโครงสร้างโครงข่ายที่มีอยู่ได้ เป็นองค์ประกอบที่ช่วยเพิ่มสมบัติความทนทานต่อสารเคมีและเพิ่มความแข็งแรงให้กับแก้ว ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีและสภาวะแวดล้อมได้ดี เช่น Al_2O_3 เข้าไปร่วมกับโครงข่ายซิลิกาในรูป AlO_4^{-4} แทนกลุ่มของ SiO_4^{-4} เป็นต้น

2.5.4 Minor ingredients

ตัวช่วยปรับปรุงสมบัติด้านอื่น ๆ เป็นวัตถุดิบที่ใช้ในปริมาณเพียงเล็กน้อยแต่มีความสำคัญ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของแก้วให้ดีขึ้น [17] ตัวอย่างเช่น

2.5.4.1 สารไล่ฟอง (Fining agents) เช่น โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) อาร์เซนิก (As_2O_3) แอนติโมนี (Sb_2O_3) เป็นต้น การทำงานของอาร์เซนิกและแอนติโมนีจะคล้าย ๆ กัน แต่แอนติโมนีมีประสิทธิภาพดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ จึงเหมาะต่อการใช้กับแก้วที่มีตะกั่ว โดยใช้เพียงประมาณร้อยละ 0.8 บางกรณีใช้ทั้ง 2 ชนิด อย่างละครึ่งจะให้ประสิทธิภาพดีกว่าใช้ชนิดเดียว

2.5.4.2 สารฟอกสี (Decolorizing agents) เช่น ซีลีเนียม (Se) โคบอลต์ (Co) เพื่อฟอกสีเขียวที่เกิดจากเหล็กออกไซด์ ใช้มากในการผลิตแก้วที่ต้องการความโปร่งใส รวมถึงแก้วคริสตัล โดยจะใช้น้อยมากในระดับ ppm เท่านั้น

2.5.4.3 สารทำให้เกิดสี (Coloring agents) ได้แก่ โลหะกลุ่มทรานซิชัน ที่ทำให้เกิดสีต่างๆ เช่น แมงกานีส (Mn) ทำให้เกิดสีม่วง ทังสเทน (W) และคอปเปอร์ (Cu) ทำให้เกิดสีฟ้า ยูเรเนียม (U) และตะกั่ว (Pb) ทำให้เกิดสีเหลือง เหล็ก (Fe) ทำให้เกิดสีเขียว เป็นต้น ซึ่งการเกิดสีใด ๆ ขึ้นอยู่กับสภาวะรีดอกซ์ (Redox reaction) ในแก้วเป็นหลัก นอกจากนี้ยังมีธาตุหรือออกไซด์ในกลุ่มธาตุแรเอิร์ธ (Rare Earth) ที่ทำให้เกิดสีได้ เช่น Eu_2O_3 ทำให้เกิดสีแดง Nd_2O_3 ทำให้เกิดสีม่วง เป็นต้น

2.6 แก้วหลอดรังสีแคโทด

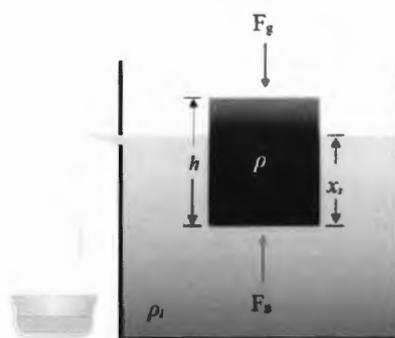
แก้วหลอดรังสีแคโทด (Cathode Ray Tubes glass; CRTs glass) เป็นแก้วที่พบมากในจอภาพของคอมพิวเตอร์และโทรทัศน์รุ่นเก่า ซึ่งลักษณะของหลอดรังสีแคโทดสามารถแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 2.6 ปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่าเทคโนโลยีการผลิตหน้าจอคอมพิวเตอร์และโทรทัศน์เจริญก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว ทำให้มีขยะที่มาจากหน้าจอคอมพิวเตอร์และโทรทัศน์รุ่นเก่านี้นับเพิ่มขึ้นจำนวนมาก ส่งผลให้ขยะเหล่านี้กลายเป็นปัญหาระดับโลกที่ต้องการกำจัดให้หมดไปอย่างรวดเร็ว โดยส่วนใหญ่แล้วจะนิยมกำจัดโดยใช้วิธีเผาหรือฝังกลบ แต่วิธีการนี้ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ในหลาย ๆ ประเทศจึงพยายามหาแนวทางอื่น ๆ ในการกำจัดขยะเหล่านี้ให้หมดไปโดยไม่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมหรือส่งผลกระทบต่อสุขภาพน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ในแก้ว CRT โดยส่วนใหญ่แล้วพบว่ามีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนั้นยังมีสารช่วยหลอมและสารช่วยปรับปรุงโครงสร้างแก้วเป็นองค์ประกอบอีกด้วย



ภาพที่ 2.6 ลักษณะหลอดรังสีแคโทด (CRT) ของคอมพิวเตอร์ [18]

2.7 ความหนาแน่น

การวัดความหนาแน่น (Density) ของตัวอย่างแก้วที่อุณหภูมิต้องโดยใช้หลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes' principle) เมื่อวัตถุจมอยู่ในของเหลวบางส่วนหรือทั้งหมด จะมีแรงดันผิวหน้าทุก ๆ ด้านของวัตถุ โดยแรงดันที่ตำแหน่งจมนลึกกว่าจะมีค่ามากกว่า แรงลัพธ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดซึ่งมีทิศพุ่งขึ้นในแนวตั้ง เรียกว่าแรงลอยตัว (Buoyant force; F_B) และขนาดของแรงลอยตัวเท่ากับน้ำหนักของของเหลวที่ถูกวัตถุแทนที่ หรืออาจกล่าวได้ว่า ถ้ามีการชั่งวัตถุในอากาศและชั่งวัตถุในของเหลว ผลต่างของการชั่งทั้งสองจะมีค่าเท่ากับน้ำหนักของของเหลวที่มีปริมาตรเท่ากับก้อนวัตถุที่จมอยู่ในของเหลว สามารถแสดงดังภาพที่ 2.7 วิธีการนี้เหมาะกับก้อนวัตถุแข็งที่จมน้ำ แต่ต้องไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำหรือละลายในน้ำ [15] ซึ่งสามารถคำนวณหาความหนาแน่นตามหลักการนี้ได้ดังสมการที่ (2.1) [19]



ภาพที่ 2.7 ลักษณะการเกิดแรงลอยตัวตามหลักการของอาร์คิมิดีส

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

- เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของตัวอย่างแก้ว (g/cm^3)
 ρ_l คือ ความหนาแน่นของของเหลว (g/cm^3)
 W_a คือ น้ำหนักของตัวอย่างแก้วที่ชั่งในอากาศ (g)
 W_s คือ น้ำหนักของตัวอย่างแก้วที่ชั่งในของเหลว (g)

2.8 ปริมาตรโดยโมล

ปริมาตรโดยโมล (Molar volume) ถูกกำหนดเป็นปริมาตรที่ถูกครอบครองของสารหนึ่งโมลในวัสดุหนึ่งหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตร สามารถหาได้จากสมการที่ (2.2) [20]

$$V_m = \left(\frac{M_g}{\rho} \right) \quad (2.2)$$

- เมื่อ V_m คือ ปริมาตรโดยโมล (cm^3)
 M_g คือ มวลโมเลกุลของแก้ว (g/mol)

2.9 เทคนิคคลื่นเสียงอัลตราโซนิค

การวัดสมบัติความยืดหยุ่นของวัสดุนั้น โดยปกติแล้วจะทำการขึ้นรูปตามมาตรฐานแล้วทำการทดสอบ เช่น ทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ การทดสอบในลักษณะนี้เป็นการทดสอบแบบทำลายวัสดุ ดังนั้นการใช้เทคนิคการทดสอบแบบไม่ทำลายวัสดุด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิค เพื่อทดสอบคุณสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุเป็นเทคนิคที่เหมาะสมกับวัสดุที่ขึ้นรูปยาก [21]

2.9.1 คลื่นเสียงอัลตราโซนิค

การจำแนกคลื่นเสียงสามารถจำแนกตามความถี่ของคลื่นได้ดังนี้

2.9.1.1 อินฟราซาวนด์ (infrasound) คลื่นเสียงชนิดนี้มีความถี่น้อยกว่า 20 Hz เป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่ที่มนุษย์จะสามารถรับรู้ได้ ยกตัวอย่างเช่น คลื่นแผ่นดินไหว การสั่นสะเทือนของอาคาร เป็นต้น

2.9.1.2 อะคูสติก (acoustics) เป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่อยู่ระหว่าง 20 Hz ถึง 20 kHz ซึ่งมนุษย์สามารถได้ยินความถี่นี้ การได้ยินจะขึ้นอยู่กับแต่ละบุคคลและอายุด้วย

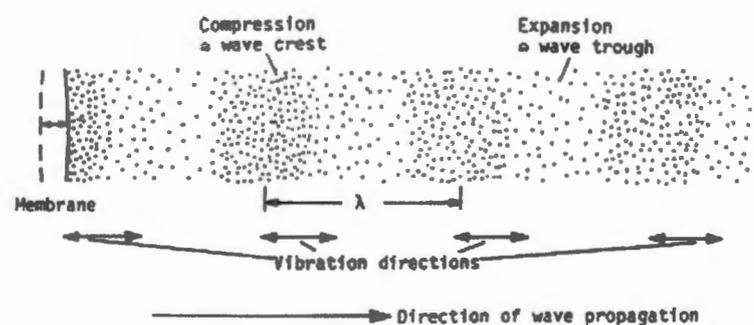
2.9.1.3 อัลตราซาวนด์ (ultrasound) เป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่มากกว่า 20 kHz ใช้ในงานตรวจสอบวัสดุแบบไม่ทำลาย ซึ่งจะเริ่มที่ประมาณ 20 kHz สำหรับทดสอบวัสดุคอนกรีต และความถี่ทั่วไปที่ใช้จะอยู่ระหว่าง 0.5 และ 10 MHz

2.9.2 ชนิดของคลื่น (Type of waves)

คลื่นสามารถจำแนกได้ 2 ชนิด ตามทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นและอนุภาค ดังนี้

2.9.2.1 คลื่นตามยาว (longitudinal waves หรือ pressure waves)

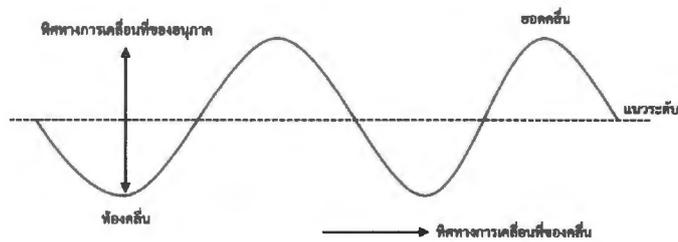
คลื่นตามยาวเป็นคลื่นที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นอยู่ในทิศเดียวกับทิศทางการสั่นสะเทือนของตัวกลาง ความเร็วของคลื่นเสียงตามยาวจะมีค่าคงที่ในวัสดุแต่ละประเภท เช่น ความเร็วคลื่นเสียงตามยาวในเหล็กกล้า (steel) มีค่าเท่ากับ 5920 m/s เป็นต้น เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ที่พบว่าการกระจายตัวและการอัดตัวของอนุภาคจะมีระยะห่างคงที่ตลอด ขณะที่การเคลื่อนที่ตามยาวในตัวกลางมีทิศทางการเคลื่อนที่ในแนวเดียวกันกับอนุภาค จึงทำให้คลื่นประเภทนี้มีค่าความเร็วค่อนข้างสูง ซึ่งคลื่นที่ถูกส่งออกจากหัววัดคลื่นเสียงอัลตราโซนิคโดยทั่วไปจะเป็นคลื่นที่มีความเร็วสูงเช่นกัน คลื่นตามยาวสามารถเกิดขึ้นได้ในตัวกลางที่เป็น ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยเป็นคลื่นเสียงที่เกิดจากการสั่นของเมมเบรน [21] ดังแสดงในภาพที่ 2.8 ซึ่งจะทำให้เกิดส่วนอัด (Compression) และส่วนขยาย (Expansion)



ภาพที่ 2.8 คลื่นตามยาวในอากาศเนื่องจากการสั่นของเมมเบรน [21]

2.9.2 คลื่นตามขวางหรือคลื่นเฉือน (Transverse waves หรือ Shear waves)

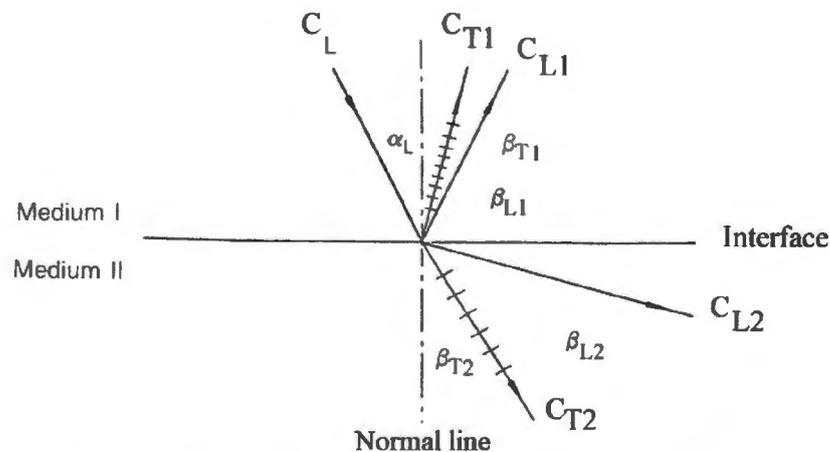
เป็นคลื่นที่มีทิศทางการสั่นของอนุภาคและทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นตั้งฉากกันทำให้คลื่นเฉือนมีค่าความเร็วช้ากว่าคลื่นตามยาว ความเร็วคลื่นเสียงเฉือนจะมีค่าคงที่ในวัสดุแต่ละประเภท เช่น ความเร็วคลื่นเสียงเฉือนในเหล็กกล้า มีค่าเท่ากับ 3250 m/s เป็นต้น [21] ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจน เช่น ใช้มือจับเชือกแล้วสับัดเชือกขึ้นลงในแนวตั้ง ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นจะตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคบนเส้นเชือก ดังแสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 คลื่นตามขวางในเส้นเชือก

2.9.3 กฎของสเนล (Snell's Law)

เมื่อคลื่นตามยาวเคลื่อนที่จากตัวกลางที่ 1 ไปยังตัวกลางที่ 2 โดยทำมุม α_L กับเส้นปกติ (Normal line) จะเป็นไปตามกฎการสะท้อนและเกิดการเปลี่ยนแปลงของคลื่น (mode conversion) เป็นคลื่นเฉือน [21] ดังภาพที่ 2.10 ซึ่งจะเกิดคลื่นตามยาวและคลื่นเฉือนในตัวกลางที่ 1 และ 2



ภาพที่ 2.10 คลื่นเสียงตกกระทบที่ผิวรอยต่อตัวกลางที่ 1 และ 2 [21]

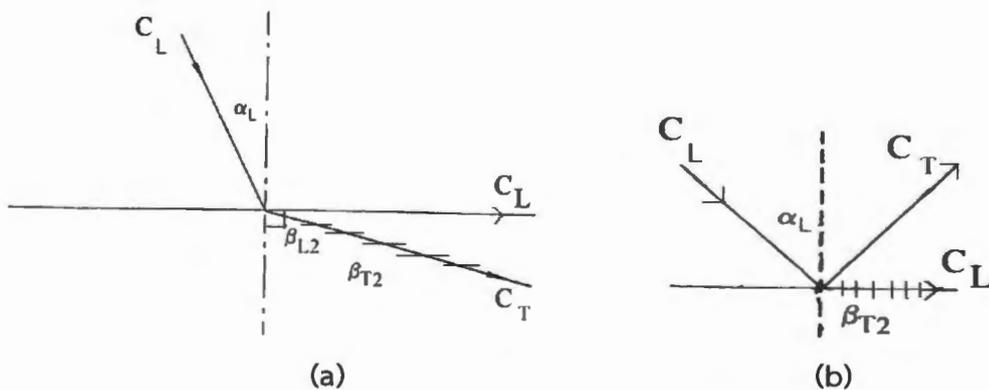
- เมื่อ C_L คือ คลื่นตามยาวที่ตกกระทบทำมุม α_L กับเส้นปกติ
 C_{L1} คือ คลื่นตามยาวที่สะท้อนในตัวกลางที่ 1 เป็นมุม β_{L1} กับเส้นปกติ
 C_{T1} คือ คลื่นตามขวางที่สะท้อนในตัวกลางที่ 1 เป็นมุม β_{T1} กับเส้นปกติ
 C_{L2} คือ คลื่นตามยาวที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางที่ 2 เป็นมุม β_{L2} กับเส้นปกติ
 C_{T2} คือ คลื่นตามขวางที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางที่ 2 เป็นมุม β_{T2} กับเส้นปกติ

การกำหนดทิศทางของคลื่นเสียงจะกำหนดกับเส้นปกติ ซึ่งการหักเหและการสะท้อนของคลื่นเสียงเป็นจะไปตามกฎของสเนล (Snell's Law) ดังสมการที่ (2.3)

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{C_1}{C_2} \quad (2.3)$$

- เมื่อ C_1 คือ ความเร็วของคลื่นเสียงในตัวกลางที่ 1
 C_2 คือ ความเร็วของคลื่นเสียงในตัวกลางที่ 2
 α_1 คือ มุมที่ C_1 ทำกับเส้นปกติ
 α_2 คือ มุมที่ C_2 ทำกับเส้นปกติ

ถ้าคลื่นตามยาว C_L ในภาพที่ 2.11 ตกกระทบทำมุม α_L กับเส้นปกติ จากตัวกลางที่ 1 ผ่านเข้าไปในตัวกลางที่ 2 แล้วทำให้ C_{L2} อยู่ที่ผิวของรอยต่อ คือ β_{L2} เท่ากับ 90 องศา ดังภาพที่ 2.11 (a) จะเรียกว่า มุมวิกฤตที่หนึ่ง (first critical angle) ซึ่งเราจะพบว่าคลื่นเสียงที่ผ่านเข้าไปในวัสดุนั้นจะมีลักษณะเป็นคลื่นเฉือน ส่วนคลื่นตามยาวจะเกิดที่ผิวรอยต่อของวัสดุได้พอดี และเมื่อมุม α_L เปลี่ยนไปจนทำให้ C_{T2} อยู่ที่ผิวรอยต่อได้พอดี คือ β_{T2} เท่ากับ 90 องศา ดังภาพ 2.11 (b) จะเรียกว่า มุมวิกฤตที่สอง (Second Critical Angle) นั่นคือ คลื่นตามยาวจะสะท้อนออกจากผิววัสดุ และคลื่นเฉือนจะอยู่ที่ผิวรอยต่อได้พอดี ลักษณะที่เกิดขึ้นนี้เป็นการทำให้เกิดคลื่นเฉือนในวัสดุ ซึ่งเป็นหลักการเพื่อนำไปผลิตเป็นหัวตรวจสอบคลื่นเสียงอัลตราโซนิคชนิดหัวมุม สำหรับการวัดความเร็วคลื่นเฉือนในวัสดุชนิดต่าง ๆ



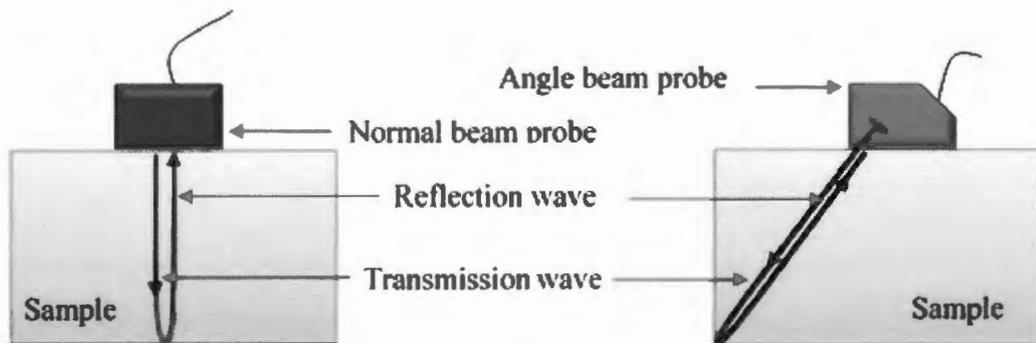
ภาพที่ 2.11 การเกิดมุมวิกฤตที่หนึ่ง (a) และสอง (b) [21]

ในทางปฏิบัติผู้ผลิตหัวตรวจสอบคลื่นเสียงอัลตราโซนิคชนิดหัวมุมมีความจำเป็นที่จะต้องทำให้เกิดเฉพาะคลื่นเสียงตามขวางหรือคลื่นเฉือนเท่านั้นในวัสดุตรวจสอบ จึงจำเป็นต้องมีการคำนวณหามุมวิกฤตที่หนึ่งและมุมวิกฤตที่สองที่ทำให้ไม่เกิดคลื่นเสียงตามยาวในวัสดุ โดยจะคำนวณใช้กฎของสเนล ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

2.9.4 เทคนิคพัลส์เอคโค (Pulse echo technique)

เทคนิคพัลส์เอคโคเป็นวิธีการหนึ่งในการตรวจสอบวัสดุโดยใช้คลื่นเสียงสวนที่สะท้อนกลับ หัวตรวจสอบจะทำหน้าที่เป็นทั้งตัวส่งและตัวรับส่งสัญญาณคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ออกไปในลักษณะพัลส์ (Pulse) คลื่นเสียงจะแผ่กระจายออกไปในวัสดุจนกระทั่งถึงอีกด้านหนึ่งของวัสดุซึ่งทำให้คลื่นเสียงสะท้อนกลับเป็นบางส่วนหรือทั้งหมด ถ้าพื้นที่สะท้อนกลับตั้งฉากกับทิศทางเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงจะทำให้คลื่นเสียงที่สะท้อนกลับนี้กลับไปทิศทางเดิมและจะถึงตัวรับด้วยระยะเวลาหนึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วของคลื่นเสียงในวัสดุแต่ละชนิดและระยะห่างของผิวตรวจสอบกับผิวสะท้อน [15]

การวัดโดยใช้เทคนิคคลื่นเสียงอัลตราโซนิกจะทำการวัดความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกตามยาว โดยใช้หัวตรวจสอบตรง (Normal beam probe) และความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกเฉียง โดยใช้หัวตรวจสอบมุม (Angle beam probe) ลักษณะการการวัดแสดงให้เห็นดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 การวัดความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกตามยาวและเฉียง

2.10 สมบัติยืดหยุ่นของวัสดุแก้ว

สภาพยืดหยุ่น (Elasticity) คือ สมบัติของวัตถุที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างได้เมื่อมีแรงกระทำ และจะกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้เมื่อหยุดออกแรงกระทำต่อวัตถุนั้น แก้วเป็น elastic material ที่สมบูรณ์แบบกล่าวคือ จะไม่เปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรแต่มีความเปราะ ซึ่งหมายถึงจะแตกเมื่อได้รับความเค้น (Stress) ที่เพิ่มขึ้น [15]

2.10.1 ความเค้น (Stress; σ)

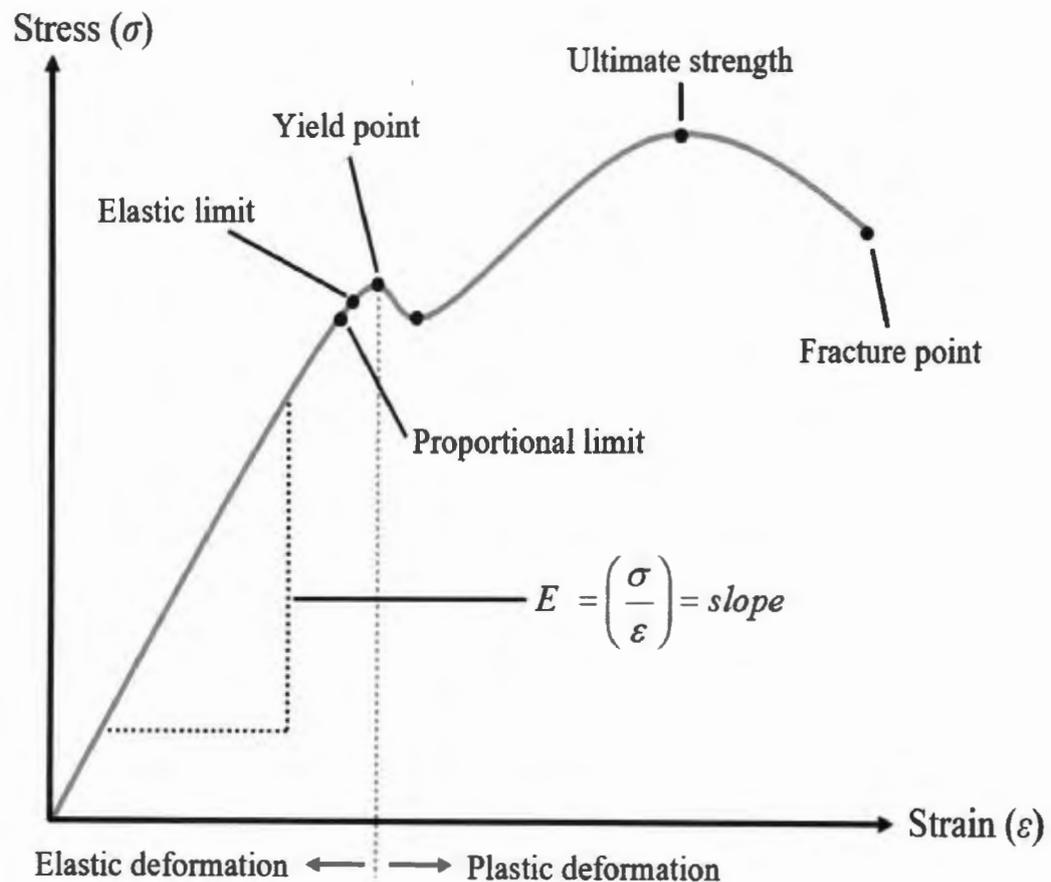
ความเค้น หมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติ และความยากในการวัดหาค่านี้ เราจึงมักจะพูดถึงความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ด้วยเหตุผลที่ว่า แรงกระทำภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านทานภายใน

2.10.2 ความเครียด (Strain; ϵ)

ความเครียด หมายถึง แรงที่มากระทำต่อเนื้อของวัสดุ จนวัสดุเกิดรับแรงนั้นไว้ไม่ไหว ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างไปในทิศทางของแรงที่มากระทำ เช่น เกิดการยืดตัวออก (Elongation) หรือหดตัวเข้า (Contraction)

สภาพยืดหยุ่นของวัสดุแต่ละชนิดอาจจะพิจารณาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ดังแสดงให้เห็นในภาพที่ 2.13 จากกราฟเมื่อออกแรงดึงวัสดุให้ยืดออกพบว่าความเค้นจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความเครียดในช่วงระยะหนึ่งจนถึงจุดที่เรียกว่าขีดจำกัดการแปรผันตรง (Proportional limit) โดยในช่วงนี้วัสดุจะมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (Elastic behavior) ซึ่งจากกราฟเราสามารถหาค่า Young's modulus (E) ได้จากความชันในช่วงนี้ นั่นคือ $E = \sigma/\epsilon$ และจุดสุดท้ายที่วัสดุจะไม่สามารถกลับมามีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นได้คือจุดที่เรียกว่า ขีดจำกัดความยืดหยุ่น (Elastic limit) หลังจากผ่านช่วงนี้ไปแล้วความสัมพันธ์ดังกล่าวจะไม่เป็นปฏิกิริยาโดยตรงต่อไปอีก และถ้าออกแรงดึงถึงจุดที่เรียกว่า จุดคราก (yield point) ซึ่งเป็นจุดที่ความยาวของวัสดุเพิ่มอย่างรวดเร็ว เมื่อออกแรงดึงต่อไปวัสดุจะขาดออกจากกันจุดนี้เรียกว่า จุดแตกหัก (Fracture point) ซึ่งจุดที่มีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงสุด เรียกว่า Ultimate Strength [22]

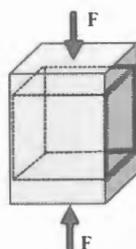
นอกจากนี้แล้วในช่วงบริเวณที่วัสดุมีการเปลี่ยนรูปร่างเมื่อมีแรงกระทำหรือดึงวัสดุให้ยืดออก และยังสามารถกลับสู่รูปร่างเดิมได้เมื่อหยุดออกแรงกระทำกับวัสดุ เรียกบริเวณนี้ว่า การผิดรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) ส่วนในช่วงที่วัสดุมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปอย่างถาวร ไม่สามารถกลับสู่รูปร่างเดิมได้ โดยวัสดุยังไม่ฉีกขาดหรือแตกหัก เรียกบริเวณนี้ว่า การผิดรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation)



ภาพที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุ

2.10.3 โมดูลัสตามยาว (Longitudinal modulus; L)

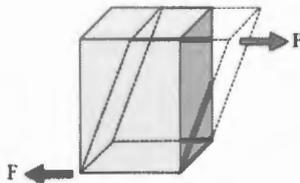
โมดูลัสตามยาว คือ อัตราส่วนความเค้นตามยาวต่อความเครียดตามยาว เป็นค่าความต้านทานต่อแรงกดในแนวตามยาวของวัสดุ แสดงได้ดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 ลักษณะแรงที่กระทำต่อวัสดุของโมดูลัสตามยาว

2.10.4 โมดูลัสเฉือน (Shear modulus; G)

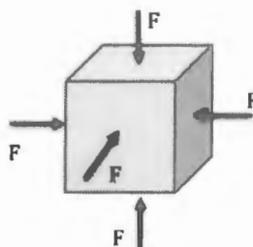
โมดูลัสเฉือน คือ อัตราส่วนความเค้นเฉือนต่อความเครียดเฉือน หรือมีแรงขนาดเท่ากันคู่หนึ่งที่อยู่บนระนาบเดียวแต่มีทิศทางสวนทางกันกระทำกับวัสดุ ทำให้ผิวของวัสดุเกิดการเลื่อนไป วัสดุที่มีโมดูลัสเฉือนสูง แสดงว่าวัสดุนั้นมีความทนต่อการเลื่อนระหว่างผิวของวัสดุที่ดี ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 ลักษณะแรงที่กระทำต่อวัสดุของโมดูลัสเฉือน

2.10.5 โมดูลัสเชิงปริมาตร (Bulk modulus; K)

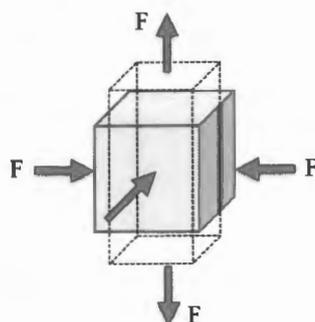
โมดูลัสเชิงปริมาตร คือ อัตราส่วนความเค้นต่อความเครียดเชิงปริมาตร หรืออัตราส่วนของการเปลี่ยนความดันต่อความเครียดเชิงปริมาตร เป็นค่าที่บ่งบอกความต้านทานของของแข็ง หรือของเหลวเมื่อมีแรงมากระทำในทุกทิศทางแล้วทำให้ปริมาตรเปลี่ยนแปลงไป สามารถแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 ลักษณะแรงที่กระทำต่อวัสดุของโมดูลัสเชิงปริมาตร

2.10.6 อัตราส่วนปัวส์ซอง (Poisson's ratio; σ)

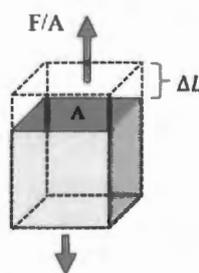
อัตราส่วนปัวส์ซอง คือ อัตราส่วนของความเครียดในแนวด้านข้างต่อความเครียดในแนวด้านยาวของวัสดุ หรืออัตราส่วนของการหดตัวตามขวางต่อหน่วยความยาวกับการขยายตัวตามยาวต่อหน่วยความยาว ค่าอัตราส่วนปัวส์ซองของแก้วจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 0.5 สำหรับ High cross-link density จะอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.2 และ Low cross-link density จะอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 0.5 [23] โดยลักษณะแรงที่กระทำกับวัตถุตามนิยามของอัตราส่วนปัวส์ซอง แสดงได้ดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 ลักษณะแรงที่กระทำต่อวัสดุของอัตราส่วนปัวส์ซอง

2.10.7 ยิงโมดูลัส (Young's modulus; E)

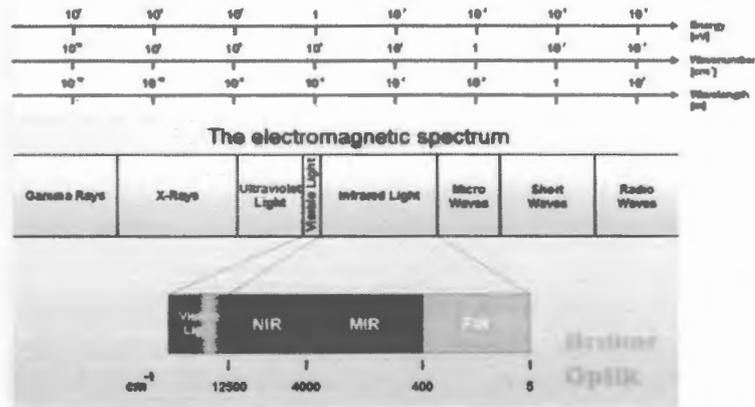
ยิงโมดูลัส คือ ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียด เป็นค่าบอกระดับความแข็งแรงของวัสดุ หรือเป็นค่าที่แสดงถึงความต้านทานต่อความเครียดที่มีแรงกระทำทิศทางเดียว วัสดุที่ยิงโมดูลัสมาก แสดงว่าวัสดุนั้นมีความทนต่อการเปลี่ยนแปลงความยาวได้มาก ดังแสดงในภาพที่ 2.18 นอกจากนี้แล้วค่ายิงโมดูลัสยังสามารถหาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุ ในช่วงที่มีพฤติกรรมเป็นแบบยืดหยุ่น (Elastic behaviour) ดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.18 ลักษณะแรงที่กระทำต่อวัสดุของยิงโมดูลัส

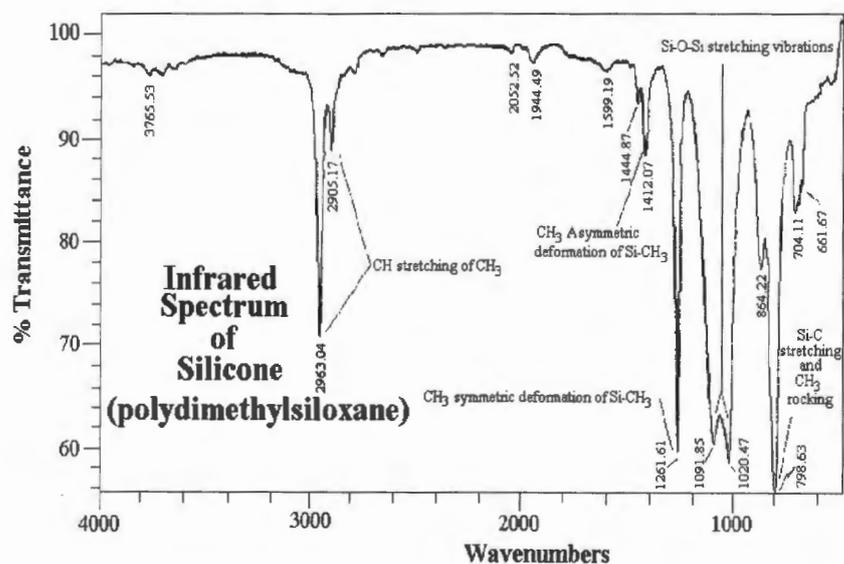
2.10.8 ค่าความแข็งระดับไมโคร (Micro-hardness; H)

ค่าความแข็งระดับไมโคร เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่สามารถต้านทานหรือทนต่อการเสียรูปแบบพลาสติก โดยปกติเกิดจากการทำให้เป็นรอยจากการกด อย่างไรก็ตามความแข็งอาจรวมถึงความต้านทานต่อการขีด การขีด รอยถลอก เป็นต้น



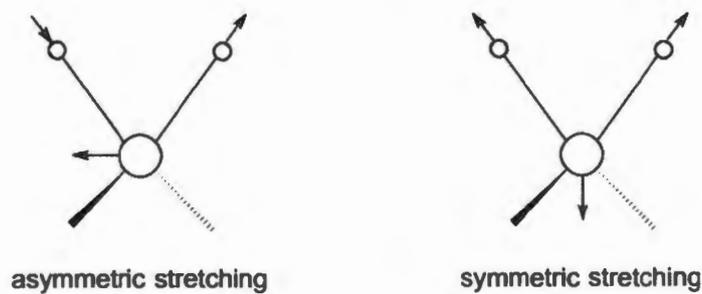
ภาพที่ 2.19 รังสีอินฟราเรดในแถบ electromagnetic spectrum [25]

ช่วงรังสีอินฟราเรดที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ทางเคมี ได้แก่ ช่วง Middle IR เนื่องจากช่วงนี้รังสีอินฟราเรดมีพลังงานค่อนข้างต่ำ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเข้าไปจะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุน จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้น ความถี่ของรังสีอินฟราเรดจะต้องมีค่าเท่ากับค่าความถี่การสั่นของโมเลกุลของสารนั้นๆ ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไป ทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์ได้ การแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่น (Wave number) กับเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านรังสี (%Transmittance) หรือเปอร์เซ็นต์การดูดกลืนรังสี (%Absorption) ซึ่งเรียกว่า Infrared spectrum และลักษณะการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดจะเป็นแถบ (band) หรือพีค (peak) [24] สามารถแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 2.20

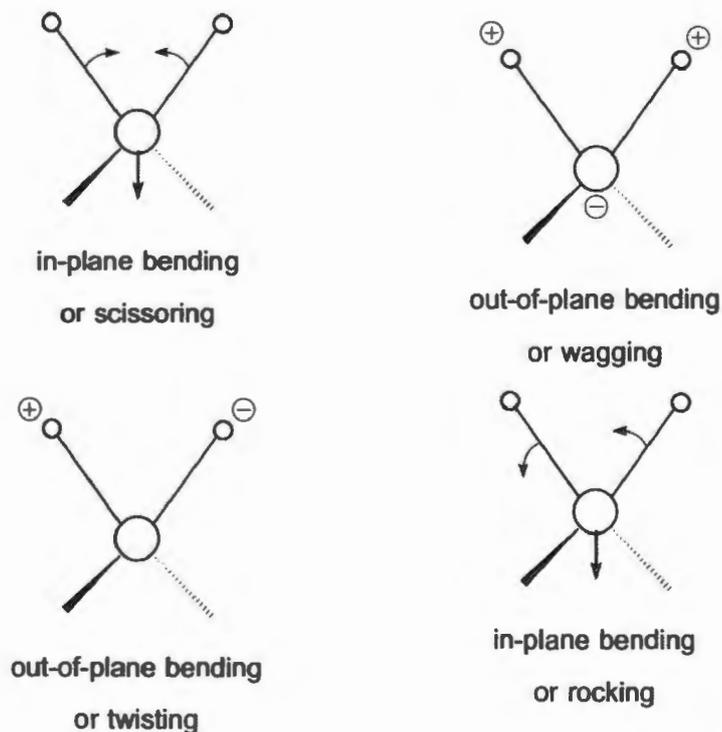


ภาพที่ 2.20 สเปกตรัมการส่งผ่านรังสีอินฟราเรดของซิลิกอน [24]

การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดตรงกับพลังงานในช่วง 2 ถึง 10 กิโลแคลอรีต่อโมล พลังงานของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านนี้ก่อให้เกิดการสั่นของพันธะในโมเลกุลของสาร 2 แบบ คือ แบบยืด (Stretching) และแบบงอ (Bending) โดยการสั่นแบบยืด เป็นการเคลื่อนที่อย่างเป็นจังหวะตามแนวแกนพันธะของอะตอมที่ต่อกันอยู่ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความยาวพันธะ ซึ่งมีได้สองรูปแบบย่อย คือ แบบสมมาตร (Symmetric) และแบบอสมมาตร (Asymmetric) ส่วนการสั่นแบบงอ เป็นการเคลื่อนที่ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมุมพันธะ ซึ่งอาจมีรูปแบบปลีกย่อยอีก ได้แก่ twisting wagging หรือ rocking และทั้งหมดนี้อาจเกิดการเคลื่อนที่ที่อยู่ในระนาบเดียวกัน (in-plane) หรือต่างระนาบ (out-of-plane) ก็ได้ รูปแบบการสั่นเหล่านี้แสดงให้เห็นดังภาพที่ 2.21 [26]



(a) Stretching vibrations



(b) Bending vibrations

ภาพที่ 2.21 การสั่นของโมเลกุลในรูปแบบต่าง ๆ [26]

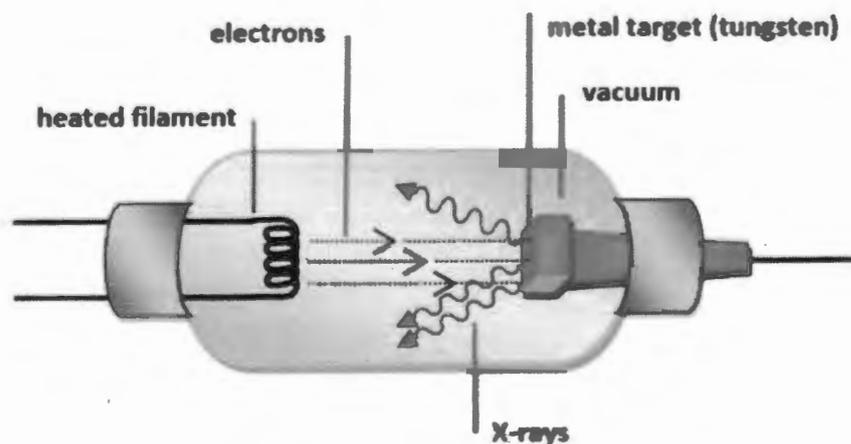
2.12 กัมมันตภาพรังสีและรังสี

กัมมันตภาพรังสีเป็นปรากฏการณ์การสลายตัวที่เกิดขึ้นเองของนิวเคลียสในอะตอมที่ไม่เสถียรตามปกติแล้วการที่อะตอมสลายตัวมักจะมีการแผ่รังสีติดตามมาด้วย เช่น รังสีแอลฟา บีตา และแกมมา เป็นต้น ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี โดยสารนี้จะปลดปล่อยกัมมันตภาพรังสีออกมา และได้มีการกำหนดความแรงรังสีของสารกัมมันตรังสีไว้ในหน่วยวัดเป็นเบคเคอเรล (Becquerel) โดยที่ 1 เบคเคอเรล จะเท่ากับการสลายตัวของสารรังสีหนึ่งอะตอมในหนึ่งหน่วยวินาที (1 Disintegration/second) ผู้ที่ค้นพบปรากฏการณ์กัมมันตภาพรังสี คือ อ็องตวน อ็องรี เบ็กแรล ชาวฝรั่งเศส ซึ่งได้ค้นพบเมื่อปี ค.ศ. 1896 [27]

รังสีเป็นพลังงานรูปหนึ่ง สามารถทำปฏิกิริยากับตัวกลางได้โดยการถ่ายเทพลังงานให้กับตัวกลางซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยทำให้อิเล็กตรอนในอะตอมหรือโมเลกุลมีระดับพลังงานสูงขึ้น (Excitation) เมื่อระดับพลังงานสูงพอ ทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรหลุดออกมาจากอะตอมหรือโมเลกุลเรียกว่า เกิดการแตกตัวเป็นประจุ (Ionization) และเรียกรังสีที่ทำให้เกิดกระบวนการดังกล่าวว่า รังสีที่ทำให้ตัวกลางเกิดการแตกตัวเป็นประจุ [28] รังสีแบ่งออกเป็นหลายชนิด ซึ่งในการทำวิจัยครั้งนี้จะศึกษาถึงวัสดุแก้วที่ใช้สำหรับกำบังรังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมา จึงขอจะกล่าวถึงเฉพาะคุณสมบัติพื้นฐานเกี่ยวกับรังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมา มีรายละเอียดดังนี้

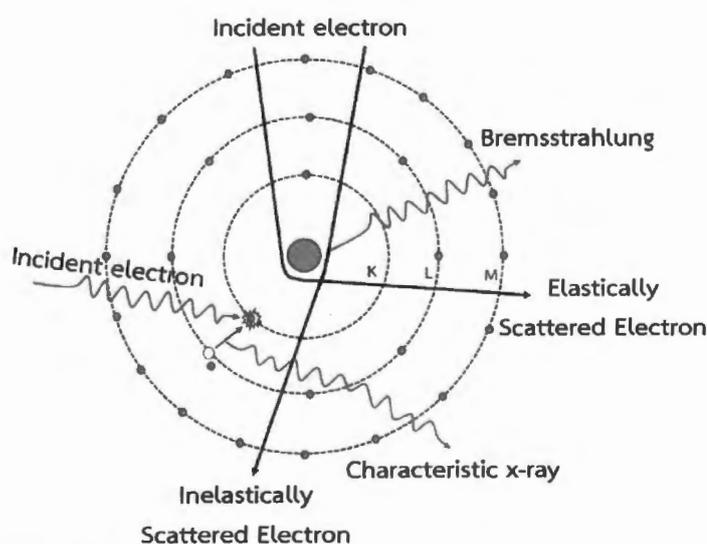
2.12.1 รังสีเอ็กซ์ (X-rays)

รังสีเอ็กซ์ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1895 โดยนักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อ วิลเฮล์ม คอนราด เรินต์เกน (Wilhelm Konrad Roentgen) ซึ่งพบรังสีนี้โดยบังเอิญในขณะที่เขาทำการทดลองเกี่ยวกับรังสีแคโทดในห้องมืดสนิท เขาสังเกตเห็นว่า แร่แบเรียมแพลททินไฮไดรด์เกิดการเรืองแสงขึ้น ทำให้คิดว่าจะต้องมีรังสีบางอย่างเกิดขึ้นจากหลอดรังสีแคโทดและมีอำนาจทะลุทะลวงสูงจนสามารถผ่านผนังหลอดแคโทดไปยังก้อนแร่ได้ เรินต์เกน เรียกรังสีนี้ว่า รังสีเอ็กซ์ ซึ่งรังสีเอ็กซ์นี้เป็นรังสีที่เกิดจากเครื่องกำเนิดรังสี เช่น เครื่องเอ็กซ์เรย์ เครื่องเร่งอนุภาคพลังงานสูง โดยเกิดจากการเร่งให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากไส้หลอดวิ่งด้วยความเร็วสูงแล้วไปชนเป้าหลอดที่ทำด้วยโลหะหนัก ทำให้เป้าหลอดปล่อยรังสีเอ็กซ์ออกมา [10, 29] แสดงให้เห็นดังภาพที่ 2.22



ภาพที่ 2.22 เครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์ [30]

รังสีเอ็กซ์เกิดจากการชนกันของอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรของเป้า ถ้าพลังงานที่ส่งให้อิเล็กตรอนมากกว่าพลังงานที่ยึดอิเล็กตรอนไว้ จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม อิเล็กตรอนจากวงโคจรอื่นที่มีพลังงานมากกว่าจะวิ่งเข้าไปแทนที่พร้อมกับคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอ็กซ์ รังสีเอ็กซ์ชนิดนี้ เรียกว่า Characteristic X-ray ซึ่งจะมีพลังงานเฉพาะบางค่าเท่านั้น โดยมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานดึงดูดของอิเล็กตรอนในวงโคจรเริ่มต้นและวงโคจรสุดท้าย ถ้าอิเล็กตรอนวิ่งผ่านเข้าไปใกล้นิวเคลียสจะถูกดึงดูดโดยสนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุบวกที่มีอยู่ในนิวเคลียส ทำให้เกิดการเปลี่ยนทิศทางแล้วคายพลังงานออกมา กระบวนการนี้ทำให้พลังงานของอิเล็กตรอนลดลงโดยจะคายออกมาในรูปรังสีเอ็กซ์ รังสีเอ็กซ์ชนิดนี้ เรียกว่า Bremsstrahlung พลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่มีการกำเนิดแบบนี้จะมีค่าตั้งแต่มากกว่าศูนย์เล็กน้อยถึงค่าสูงสุดเท่าที่จะมีได้ [10, 29-30] ลักษณะการเกิดรังสีเอ็กซ์ทั้งสองแบบสามารถแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 2.23



ภาพที่ 2.23 การเกิด Characteristic X-ray และ Bremsstrahlung

2.12.2 รังสีแกมมา (Gamma rays)

รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีพลังงานสูง มีช่วงความยาวคลื่นสั้นกว่ารังสีเอ็กซ์ เป็นรังสีที่เกิดจากนิวเคลียสของอะตอมที่อยู่ในสภาวะไม่เสถียร (Excited state) ไม่มีมวล ไม่มีประจุ เป็นกลุ่มพลังงานที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสง เนื่องจากรังสีแกมมาไม่มีประจุไฟฟ้าจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางในสนามแม่เหล็ก แต่มีการแตกตัวเป็นไอออนได้น้อยกว่าอนุภาคแอลฟาและบีตา ซึ่งรังสีแกมมาเป็นกลุ่มของพลังงานที่ส่งออกมาจากการสลายตัวของนิวเคลียสที่เรียกว่า โฟตอน (Photon) [10] และเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงมาก การสลายตัวให้รังสีแกมมาเป็นการสลายตัวของนิวเคลียสของอะตอมในขณะที่มีการเปลี่ยนสถานะจากสถานะพลังงานสูงไปเป็นสถานะที่ต่ำกว่า แต่ก็อาจเกิดจากกระบวนการอื่น ๆ ด้วย เช่น เกิดต่อเนื่องจากการสลายตัวให้รังสีแอลฟา หรือ บีตา เป็นต้น รังสีแกมมามีอำนาจทำให้เกิดการแตกตัวได้น้อยมาก แต่มีความสามารถทะลุทะลวงที่สูงมาก [31-32]

2.13 อันตรกิริยาระหว่างพลังงานโฟตอนกับสสาร

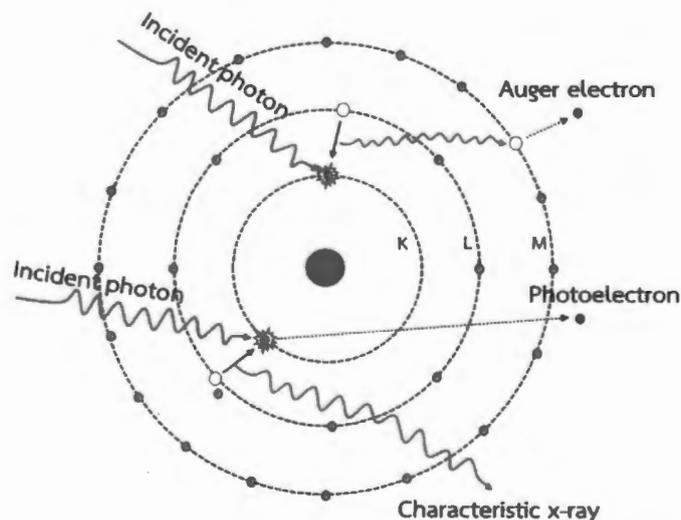
อันตรกิริยาระหว่างโฟตอนกับสสารจะแตกต่างจากอนุภาคที่มีประจุ เนื่องจากโฟตอนไม่มีประจุ และไม่สูญเสียพลังงานขณะเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง โอกาสการเกิดอันตรกิริยาต่อระยะทางที่เคลื่อนที่เป็นพฤติกรรมทางสถิติ ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลางและพลังงานของโฟตอน เมื่อโฟตอนทำอันตรกิริยากับสสารอาจจะถูกดูดกลืนหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางโดยมีทั้งสูญเสียพลังงานและไม่สูญเสียพลังงาน อันตรกิริยาของโฟตอนกับสสาร มีดังนี้ [10, 33-34]

2.13.1 การกระเจิงแบบทอมสันและเรย์ลี (Thomson and Rayleigh scattering)

การกระเจิงแบบทอมสัน (Thomson scattering) เป็นการกระเจิงของโฟตอนกับอิเล็กตรอนอิสระ (free electron) หรือนิวเคลียส ส่วนการกระเจิงแบบเรย์ลี (Rayleigh scattering) เป็นการกระเจิงของโฟตอนกับอะตอมทั้งอะตอม โดยกระบวนการนี้อิเล็กตรอนทุกตัวในอะตอมจะมีส่วนร่วมในการเกิด (coherent manner) ซึ่งทั้ง 2 กระบวนการจะไม่มี การถ่ายเทพลังงาน (elastic scattering) อะตอมที่ถูกชนจะไม่เกิดการ excitation หรือ ionization สำหรับโฟตอนจะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางเท่านั้น

2.13.2 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect)

ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเป็นกระบวนการที่โฟตอนถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนของอะตอม (bond electron) ทั้งหมดและทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม ดังแสดงในภาพที่ 2.24 อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะเรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) ซึ่งส่วนมากจะเป็นอิเล็กตรอนชั้น K (K-shell) ในขณะที่เดียวกันอิเล็กตรอนในระดับพลังงานถัดมาจะลดระดับพลังงานเข้ามาแทนที่อิเล็กตรอนตัวที่หลุดไป ซึ่งจะต้องมีการปลดปล่อยพลังงานบางส่วนออกไปเพื่อเข้ามาแทนที่พลังงานที่ปลดปล่อยออกมานั้นจะอยู่ในรูปของรังสีเอ็กซ์ และรังสีเอ็กซ์บางส่วนมีโอกาที่จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนตัวอื่น ถ้าพลังงานที่ถ่ายเทมีมากพอที่จะสามารถทำให้อิเล็กตรอนตัวนั้นหลุดออกมาได้จะเรียกว่า โอเจอิเล็กตรอน (Auger electron) โดยพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนจะมีค่าตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.10)



ภาพที่ 2.24 กระบวนการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

$$E_k = h\nu - B.E. \quad (2.10)$$

เมื่อ E_k คือ พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน
 $h\nu$ คือ พลังงานทั้งหมดของโฟตอน
 $B.E.$ คือ พลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) ของอิเล็กตรอน

เมื่อรังสีทำอันตรกิริยากับวัสดุแล้วทำให้เกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ซึ่งโอกาสในการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\sigma_{pe} \propto \frac{Z^3}{(h\nu)^3}$$

เมื่อ σ_{pe} คือ โอกาสการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก
 Z คือ เลขอะตอมของธาตุ

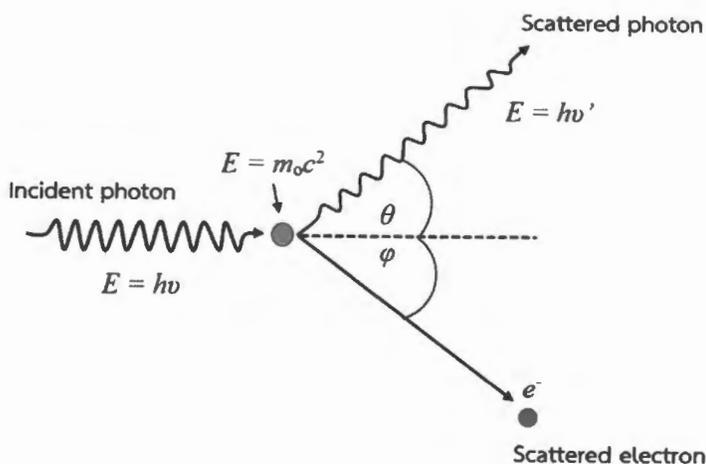
กระบวนการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกจะมีโอกาสการเกิดมากในกรณีที่โฟตอนหรือรังสีแกมมาที่มีพลังงานต่ำและตัวกลางเป็นธาตุโลหะหนัก โฟตอนจะสูญเสียพลังงานทั้งหมดไปในกระบวนการเกิดอันตรกิริยาและพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนมีค่าประมาณ 150 eV ซึ่งสามารถวิ่งผ่านน้ำได้เพียง 0.03 cm ดังนั้นพลังงานของโฟโตอิเล็กตรอนจึงถูกดูดกลืนทั้งหมดในชั้นของเนื้อเยื่อ นั่นแสดงให้เห็นว่าพลังงานของโฟโตอิเล็กตรอนจะมีผลโดยตรงต่อปริมาณรังสีในสิ่งมีชีวิตที่มีเนื้อเยื่อ [19]

2.13.3 การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering)

การกระเจิงแบบคอมป์ตันเป็นกระบวนการที่โฟตอนเกิดการกระเจิง (Scattering) กับอิเล็กตรอนอิสระ (free electron) เมื่อโฟตอนวิ่งชนกับอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจร โฟตอนจะมีการถ่ายเทพลังงานบางส่วนให้กับอิเล็กตรอนและทำให้อิเล็กตรอนเบนออกทำมุม φ กับทิศทางเดิมของโฟตอน เรียกว่า Scattered electron ส่วนโฟตอนจะเบนทำมุม θ กับทิศทางเดิมของโฟตอน เรียกว่า Scattered photon แสดงให้เห็นดังภาพที่ 2.25 และพลังงานจลน์ของการกระเจิงแบบคอมป์ตันสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.11)

$$E_k = h\nu - h\nu' \quad (2.11)$$

เมื่อ E_k คือ พลังงานจลน์ของการกระเจิงคอมป์ตัน
 $h\nu$ คือ พลังงานทั้งหมดของโฟตอน
 $h\nu'$ คือ พลังงานของโฟตอนที่กระเจิง



ภาพที่ 2.25 กระบวนการกระเจิงแบบคอมป์ตัน

ดังนั้นการเกิดอันตรกิริยาแบบคอมป์ตันจะเป็นการชนแบบยืดหยุ่น พลังงานของโฟตอนที่กระเจิงจะมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.12)

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)} \quad (2.12)$$

เมื่อ m_0c^2 คือ พลังงานมวลนิ่งของอิเล็กตรอน (0.511 MeV)
 θ คือ มุมการกระเจิงของโฟตอน

เมื่อโฟตอนชนกับอิเล็กตรอนจะทำให้โฟตอนเปลี่ยนทิศทางและพลังงานจะลดลง ทั้ง Scattered photon และ Scattered electron ยังสามารถทำให้เกิดอันตรกิริยาต่อเนื่องได้อีก การกระเจิงแบบคอมป์ตันส่วนมากจะเกิดจากการชนกับอิเล็กตรอนวงนอก ซึ่งจะยึดเกาะกันอย่างหลวม ๆ โอกาสการเกิดจะลดลงเมื่อโฟตอนมีพลังงานที่สูงขึ้น การกระเจิงของ Scattered photon สามารถทำมุมได้ ตั้งแต่ 0 ถึง 180 องศา ซึ่งจะขึ้นกับพลังงานของโฟตอน ถ้าโฟตอนกระเจิงทำมุม 180 องศา เรียกว่า Backscatter radiation ส่วนการกระเจิงของ Scattered electron สามารถทำมุมได้ตั้งแต่ 0 - 90 องศา การกระเจิงแบบคอมป์ตันยังสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

2.13.3.1 การกระเจิงแบบโคฮีเลนต์ (Coherent scattering)

การกระเจิงแบบโคฮีเลนต์เป็นการชนแบบยืดหยุ่นซึ่งไม่มีการสูญเสียพลังงานของโฟตอนทำให้โฟตอนเปลี่ยนทิศทางเท่านั้น การกระเจิงแบบโคฮีเลนต์มีโอกาสดังกล่าวได้มากในธาตุที่มีเลขอะตอมสูงๆ เนื่องจากอิเล็กตรอนจะถูกดึงดูดไว้โดยนิวเคลียสทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกได้ยาก แต่ปรากฏการณ์นี้จะเกิดเฉพาะช่วงที่พลังงานโฟตอนต่ำเท่านั้น โดยจะเกิดเมื่อพลังงานของโฟตอนมีค่าน้อยกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน โอกาสการเกิดปรากฏการณ์การกระเจิงแบบโคฮีเลนต์มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\sigma_{co} \propto \frac{Z^2}{(h\nu)^2}$$

เมื่อ σ_{co} คือ โอกาสการเกิดการกระเจิงแบบโคฮีเลนต์

2.13.3.2 การกระเจิงแบบอินโคฮีเลนต์ (Incoherent scattering)

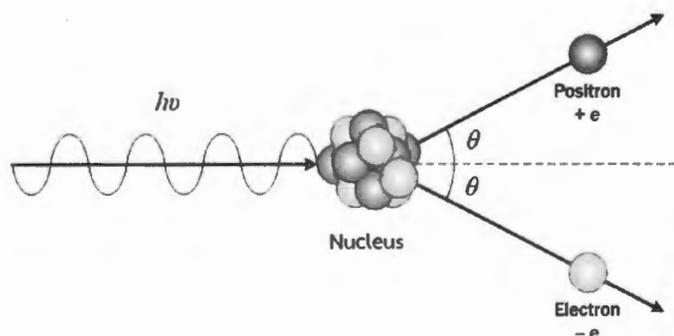
การกระเจิงแบบอินโคฮีเลนต์เป็นการชนแบบไม่ยืดหยุ่นจะมีการสูญเสียพลังงานของโฟตอนเมื่อโฟตอนชนกับอิเล็กตรอนในอะตอมของวัสดุ การกระเจิงแบบอินโคฮีเลนต์มีโอกาสเกิดได้มากในธาตุที่มีเลขอะตอมสูง ๆ และเกิดที่พลังงานของโฟตอนต่ำ โอกาสการเกิดปรากฏการณ์การกระเจิงแบบอินโคฮีเลนต์ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\sigma_{inco} \propto \frac{Z^2}{(h\nu)^2}$$

เมื่อ σ_{inco} คือ โอกาสการเกิดการกระเจิงแบบอินโคฮีเลนต์

2.13.4 การผลิตอนุภาคคู่ (Pair production)

โฟตอนที่มีพลังงานสูงมากพอ ตั้งแต่ 1.022 MeV เป็นต้นไป สามารถทำอันตรกิริยากับสนามไฟฟ้ารอบๆ นิวเคลียสของอะตอม พลังงานโฟตอนทั้งหมดจะเปลี่ยนเป็นมวลและพลังงานจลน์ของโพสิตรอน (Positron) และอิเล็กตรอน (Electron) อย่างละ 1 ตัว เรียกกระบวนการนี้ว่า การผลิตอนุภาคคู่ (Pair production) ดังแสดงในภาพที่ 2.26 อนุภาคโพสิตรอนที่เกิดขึ้นไม่สามารถอยู่ได้ตามธรรมชาติ ในขณะที่เคลื่อนที่จะมีการสูญเสียพลังงานไปเรื่อย ๆ ทำให้การเคลื่อนที่ช้าลง ก่อนที่โพสิตรอนจะรวมกับอิเล็กตรอนอิสระตัวหนึ่งที่หยุดนิ่ง มวลของโพสิตรอนและอิเล็กตรอนจะเปลี่ยนไปเป็นโฟตอน 2 ตัว เคลื่อนที่ออกในทิศตรงข้าม โดยโฟตอนแต่ละตัวจะมีพลังงานเท่ากับมวลนิ่ง (rest mass ~ 0.511 MeV) เรียกกระบวนการนี้ว่า Annihilation



ภาพที่ 2.26 กระบวนการผลิตอนุภาคคู่

สำหรับโอกาสในการเกิดกระบวนการผลิตอนุภาคคู่ (Pair production) มีแปรผันตรงกับเลขอะตอมกำลังสอง และพลังงานของโฟตอนสามารถหาได้ตามสมการที่ (2.13)

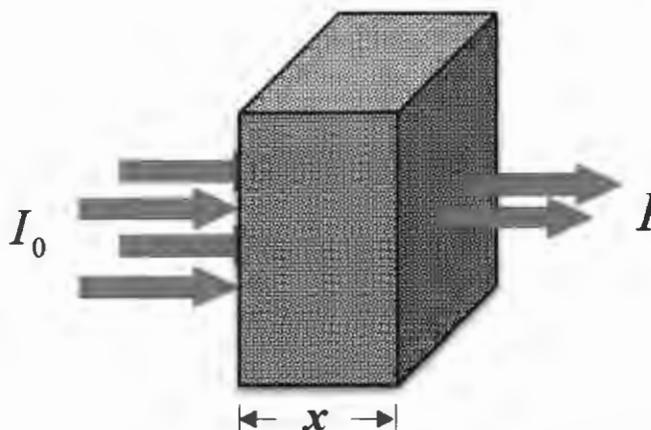
$$\sigma_{pp} \propto Z^2 \ln(h\nu / m_e c^2)$$

$$h\nu = 2m_e c^2 + E_{k_{electron}} + E_{k_{positron}} \quad (2.13)$$

เมื่อ σ_{pp} คือ โอกาสการเกิดกระบวนการผลิตอนุภาคคู่
 $m_e c^2$ คือ พลังงานมวลรวมของอิเล็กตรอนและโพซิตรอน

2.14 สมบัติทางรังสี [35]

เมื่อมีวัสดุทึบรังสีที่มีค่าพลังงานค่าเดียว (Mono-energetic source) จะมีการดูดกลืนรังสีนั้นไว้ในเนื้อวัสดุส่วนหนึ่งและอาจจะมีรังสีอีกส่วนหนึ่งที่สามารถทะลุผ่านวัสดุนั้นไปได้ ซึ่งรังสีที่ผ่านไปได้ นั้นจะมีความเข้มลดลง ดังแสดงในภาพที่ 2.27



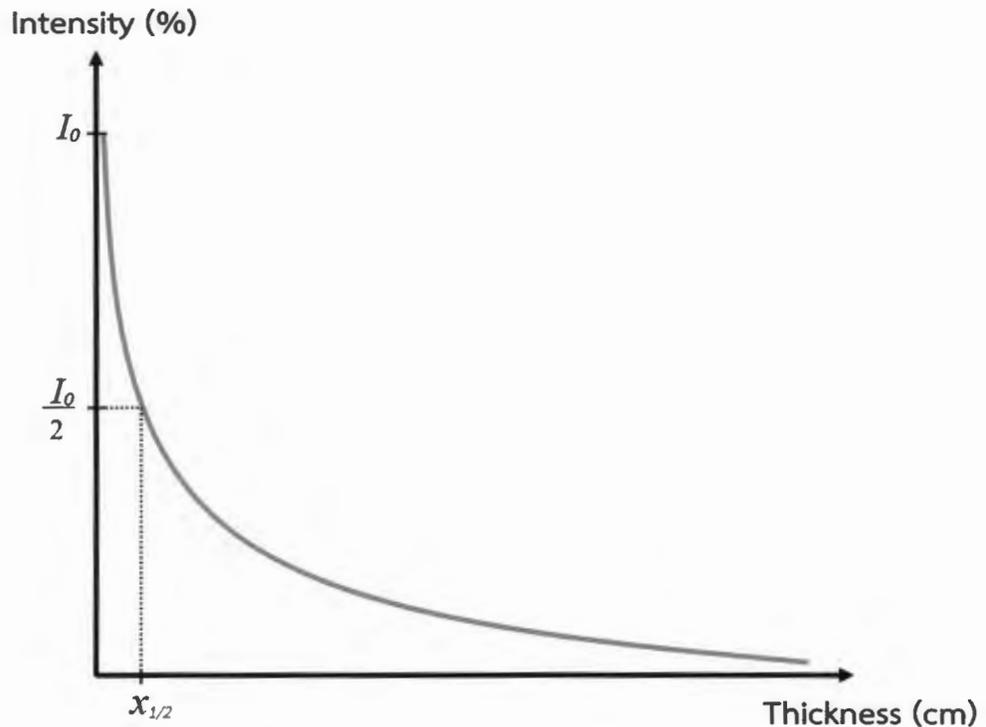
ภาพที่ 2.27 การดูดกลืนและการส่งผ่านรังสีในวัสดุ

จากรูปพิจารณารังสีที่มีความเข้ม I_0 ผ่านเข้าไปในวัสดุที่มีความหนา x ทำให้ความเข้มรังสีลดลง I โดยที่ความเข้มของรังสีที่ลดลงขึ้นอยู่กับความหนาของวัสดุที่ถึ้น นั่นคือ

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.14)$$

เมื่อ μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient)
 I_0, I คือ ค่าความเข้มของรังสีก่อนและหลังผ่านวัสดุถึ้น
 x คือ ความหนาของวัสดุถึ้น

จากสมการที่ (2.18) เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีกับความหนาของวัสดุ ซึ่งพบว่าความเข้มรังสีที่สามารถทะลุผ่านวัสดุที่มีความหนา x ได้นั้น จะมีค่าความเข้มรังสีลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (exponential) โดยสามารถแสดงให้เห็นได้ด้วยกราฟดังภาพที่ 2.28



ภาพที่ 2.28 กราฟความเข้มของรังสีเมื่อใช้วัสดุกัน

พิจารณาความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.18) ถ้าให้ $x_{1/2}$ เป็นความหนาของวัสดุกันที่ทำให้ความเข้มของรังสีลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง หรือที่เรียกว่า Half Value Thickness หรือ Half Value Layer (HVL) บางครั้งเรียกว่า ความหนาครึ่งค่า

เมื่อ แทนค่า $x = x_{1/2} = HVL$ และ $I = \frac{I_0}{2}$ จะความสัมพันธ์ใหม่เป็นดังสมการที่ (2.15) ถึง (2.17)

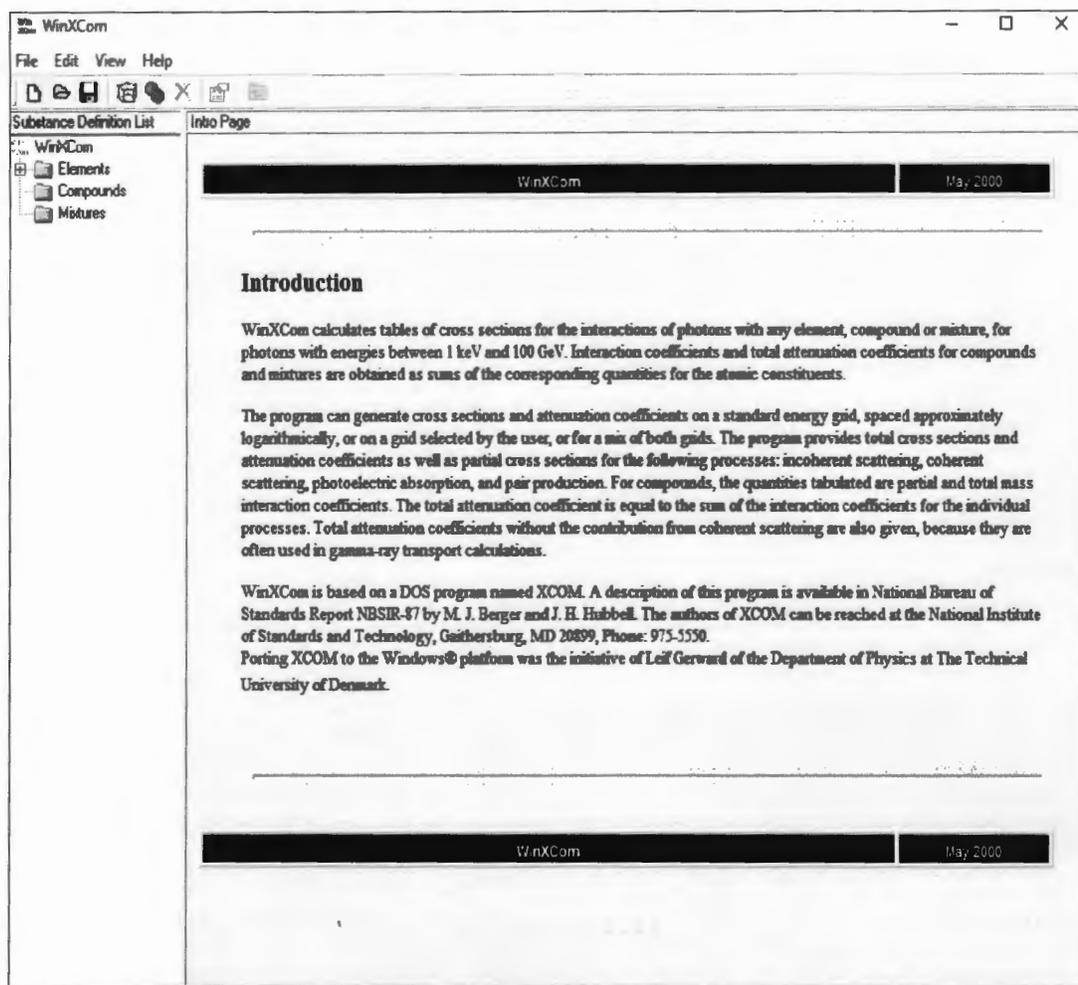
$$\frac{I_0}{2} = I_0 e^{-\mu \cdot (HVL)} \quad (2.15)$$

$$\mu \cdot (HVL) = 0.693 \quad (2.16)$$

$$HVL = \frac{0.693}{\mu} \quad (2.17)$$

2.15 โปรแกรม WinXCom [36]

ในปี ค.ศ. 1995 Hubbell และ Seltzer ได้ค้นพบวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (μ_m) โดยสามารถแสดงในรูปแบบของตารางข้อมูลเพื่อนำมาสนับสนุนงานวิจัย ต่อมาในปี ค.ศ. 1999 Berger และ Hubbell ได้มีการพัฒนาการแสดงผลตารางข้อมูลเป็นโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ “XCom” สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (μ_m) ซึ่งสามารถคำนวณได้ทั้งธาตุและสารประกอบ ในช่วงพลังงาน 1 keV – 100 GeV ในปี ค.ศ. 2001 L. Gerward และคณะ [36] ได้มีการพัฒนาโปรแกรม XCom ให้สามารถใช้งานระบบปฏิบัติการแบบ windows และเปลี่ยนชื่อเป็น WinXCom โดยโปรแกรม WinXCom นี้ใช้สำหรับการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล ซึ่งสามารถคำนวณได้ทั้งธาตุและสารประกอบ ในช่วงพลังงานตั้งแต่ 1 keV – 100 GeV นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาต่าง ๆ ระหว่างโฟตอนกับสสาร เช่น ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก การกระเจิงแบบคอมป์ตัน และการผลิตอนุภาคคู่ สำหรับปัจจุบันโปรแกรม WinXCom มีหน้าจอแสดงผลดังภาพที่ 2.29 และภาพที่ 2.30 เป็นการแสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลและอันตรกิริยาต่าง ๆ ของธาตุซิลิกอน



ภาพที่ 2.29 หน้าจอแสดงผลของโปรแกรม WinXCom

WinXCom - D:\Program Files\WinXcom\WinXcom\0 BaO.wnc

File Edit View Help

Substance Definition List Cross Sections [b/atom] = 10⁻²⁴ cm²

Elements	Energy (MeV)	Coherent (b/atom)	InCoherent (b/atom)	Photo Electric (b/atom)	PAIR Nuclear (b/atom)	PAIR Electron (b/atom)	Sum (b/atom)	Sum NonCoherent (b/atom)
H (Hydrogen)								
He (Helium)								
Li (Lithium)								
Be (Beryllium)	1.000E-003	1.18E+002	6.14E-001	7.31E+004	0	0	7.32E+004	7.31E+004
B (Boron)	1.500E-003	1.07E+002	1.12E+000	2.49E+004	0	0	2.50E+004	2.49E+004
C (Carbon)	1.839E-003	9.89E+001	1.44E+000	1.43E+004	0	0	1.44E+004	1.43E+004
N (Nitrogen)	1.839E-003	9.89E+001	1.44E+000	1.49E+005	0	0	1.49E+005	1.49E+005
O (Oxygen)	1.839E-003	9.89E+001	1.44E+000	1.29E+005	0	0	1.29E+005	1.29E+005
F (Fluorine)	2.000E-003	9.55E+001	1.58E+000	1.29E+005	0	0	1.29E+005	1.29E+005
Ne (Neon)	3.000E-003	7.78E+001	2.31E+000	4.56E+004	0	0	4.56E+004	4.56E+004
Na (Sodium)	4.000E-003	6.55E+001	2.86E+000	2.11E+004	0	0	2.11E+004	2.11E+004
Mg (Magnesium)	5.000E-003	5.64E+001	3.32E+000	1.14E+004	0	0	1.14E+004	1.14E+004
Al (Aluminum)	6.000E-003	4.90E+001	3.72E+000	6.80E+003	0	0	6.85E+003	6.81E+003
Si (Silicon)	8.000E-003	3.75E+001	4.43E+000	2.98E+003	0	0	3.02E+003	2.98E+003
P (Phosphorus)	1.000E-002	2.90E+001	5.02E+000	1.55E+003	0	0	1.58E+003	1.55E+003
S (Sulfur)	1.500E-002	1.67E+001	6.01E+000	4.59E+002	0	0	4.82E+002	4.65E+002
Cl (Chlorine)	2.000E-002	1.09E+001	6.54E+000	1.91E+002	0	0	2.08E+002	1.97E+002
Ar (Argon)	3.000E-002	5.85E+000	7.00E+000	5.41E+001	0	0	6.70E+001	6.11E+001
K (Potassium)	4.000E-002	3.68E+000	7.16E+000	2.19E+001	0	0	3.27E+001	2.90E+001
Ca (Calcium)	5.000E-002	2.52E+000	7.17E+000	1.08E+001	0	0	2.04E+001	1.79E+001
Sc (Scandium)	6.000E-002	1.83E+000	7.12E+000	6.01E+000	0	0	1.50E+001	1.31E+001
Ti (Titanium)	8.000E-002	1.08E+000	6.92E+000	2.39E+000	0	0	1.04E+001	9.31E+000
V (Vanadium)	1.000E-001	7.17E-001	6.68E+000	1.17E+000	0	0	8.56E+000	7.84E+000
Cr (Chromium)	1.500E-001	3.32E-001	6.11E+000	3.17E-001	0	0	6.75E+000	6.42E+000
Mn (Manganese)	2.000E-001	1.91E-001	5.63E+000	1.28E-001	0	0	5.95E+000	5.76E+000
Fe (Iron)	3.000E-001	8.60E-002	4.92E+000	3.68E-002	0	0	5.04E+000	4.96E+000
Co (Cobalt)	4.000E-001	4.87E-002	4.42E+000	1.59E-002	0	0	4.48E+000	4.43E+000
Ni (Nickel)	5.000E-001	3.12E-002	4.04E+000	8.62E-003	0	0	4.08E+000	4.05E+000
Cu (Copper)	6.000E-001	2.17E-002	3.74E+000	5.39E-003	0	0	3.77E+000	3.75E+000
Zn (Zinc)	8.000E-001	1.22E-002	3.29E+000	2.73E-003	0	0	3.30E+000	3.29E+000
Ga (Gallium)	1.000E+000	7.84E-003	2.96E+000	1.70E-003	0	0	2.97E+000	2.96E+000
Ge (Germanium)	1.022E+000	7.50E-003	2.93E+000	1.60E-003	0	0	2.94E+000	2.93E+000

Modified

ภาพที่ 2.30 การคำนวณสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของธาตุซิลิกอน (Si)

เมื่อโฟตอนเคลื่อนที่ผ่านสสารซึ่งประกอบด้วยอะตอมต่าง ๆ อะตอมแต่ละตัวล้วนมีค่าพื้นที่ภาคตัดขวาง (cross section) จึงทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างโฟตอนกับสสาร ซึ่งจะลดทอนความเข้มรังสีลงโดยแสดงในเทอมสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้น (linear attenuation coefficient) มักใช้สัญลักษณ์ μ หรือสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลเชิงมวล (mass attenuation coefficient) ใช้สัญลักษณ์ μ/ρ หรือ μ_m

เมื่อโฟตอนเดินทางผ่านตัวกลางหรือสสาร โอกาสในการเกิดปฏิกิริยาของโฟตอนกับตัวกลาง ขึ้นกับจำนวนอะตอมต่อปริมาตรซึ่งค่านี้ ขึ้นกับความหนาแน่นของตัวกลาง (ρ) สามารถแสดงความสัมพันธ์ให้เห็นได้ดังสมการที่ (2.18)

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.18)$$

เมื่อ μ_m คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (cm²/g)

μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (cm⁻¹)

ρ คือ ความหนาแน่นของตัวกลาง (g/cm³)

ในโปรแกรม WinXCOM สามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลรวม (Total mass attenuation coefficient) ของสารทั้งในรูปของธาตุและสารประกอบ โดยสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลรวมจะมีค่าเท่ากับผลรวมของสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแต่ละอันตรกิริยาสามารถแสดงให้เห็นได้ดังสมการที่ (2.19) และ (2.20)

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum w_i \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \quad (2.19)$$

$$\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i = \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{pe} + \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{com} + \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{pp} \quad (2.20)$$

- เมื่อ $\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลรวมของสารองค์ประกอบ
 $\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{pe}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก
 $\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{com}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของปรากฏการณ์กระเจิงคอมป์ตัน
 $\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{pp}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของปรากฏการณ์การผลิตอนุภาคคู่

เนื่องจากกลไกการเกิดอันตรกิริยาของโฟตอนในวัสดุมีความเป็นไปได้หลายกลไก แต่มีกลไกหลักอยู่ 3 แบบ คือ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก กระเจิงแบบคอมป์ตัน และการผลิตอนุภาคคู่ กระบวนการทั้งหมดนี้ทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานบางส่วนหรือทั้งหมดจากรังสีไปเป็นพลังงานของอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นผลให้รังสีหายไปหรือกระเจิงไปที่มุมต่าง ๆ ในบางกรณีที่รังสีถูกพิจารณาในรูปของอนุภาคอาจถูกเรียกว่า “โฟตอน” (photon)

2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้มุ่งเน้นแนวทางในการกำจัดขยะแก้ว CRT และสามารถนำขยะแก้วนี้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้สูงสุด โดยจะทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ขยะแก้ว CRT เป็นวัสดุแก้วกำบังรังสี และคาดหวังว่าวิธีการนี้จะเป็แนวทางหนึ่งในการกำจัดขยะ CRT ที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันมีการศึกษาเกี่ยวกับการรีไซเคิลวัสดุแก้ว CRT เป็นจำนวนมาก โดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้วัสดุแก้ว CRT เพื่อเป็นองค์ประกอบสำหรับเตรียมคอนกรีต เพื่อนำใช้ในงานทางด้านการก่อสร้าง หรือคอนกรีตความหนาแน่นสูงที่ใช้ในงานทางด้านการกำบังรังสีเอ็กซ์ เป็นต้น ซึ่งมีการศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดและการรีไซเคิลขยะ CRT เป็นจำนวนมาก เนื่องจากขยะเหล่านี้เริ่มกลายเป็นปัญหาที่มีความต้องการในการจัดการหรือกำจัดอย่างเร่งด่วน ในปี ค.ศ. 2012 Q. Xu และคณะ [5] ได้ทำการสำรวจข้อมูลการกำจัดขยะหน้าจอ CRT ในสาธารณรัฐประชาชนจีน พบว่าในแต่ละปีการผลิตหน้าจอ CRT ที่มาจากโทรทัศน์ประมาณ 6,000,000 ชิ้น และคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลประมาณ 10,000,000 ชิ้น ซึ่งคาดการณ์ได้ว่าอนาคตในไม่ช้าจะมีขยะ

หน้าจอบ CRT เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ยังมีการสำรวจข้อมูลในประเทศอื่น ๆ อีก พบว่าเครื่องคอมพิวเตอร์และโทรศัพท์ที่สำรองไว้ในปี 2006 ในอเมริกาเหนือคาดว่าจะกลายเป็นขยะ ประมาณ 163,420 ตัน ในรัฐแคลิฟอร์เนียเพียงที่เดียวประมาณ 2,900,000 ชิ้นของจอทีวี (74,000 ตัน) และ 3,200,000 ชิ้นของจอคอมพิวเตอร์ (48,000 ตัน) ในสหราชอาณาจักรก็คาดว่าจะมีขยะ CRT เกิดขึ้นประมาณ 104,532 ตัน ซึ่งมีไม่กี่ตัวเลือกสำหรับวิธีที่จะนำขยะ CRT เหล่านี้กลับใช้ใหม่ได้ จากมุมมองของทั่วโลกก็เป็นที่น่าตกใจว่ามีเพียง 26.75% ของขยะ CRT จะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ ประมาณ 59% จะได้รับการฝังกลบ และ 14.75% จะถูกเผา ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ในการสำรวจครั้งนี้พบว่า การนำขยะหน้าจอบ CRT มาคัดแยกและนำไปรีไซเคิลให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ให้ผลลัพธ์ที่ดีและคุ้มค่ามากขึ้น ต่อมา P. Walczak และคณะ [37] ได้นำขยะแก้ว CRT มาใช้เพื่อเป็นส่วนประกอบในการทำคอนกรีต โดยจะใช้แก้ว CRT บดละเอียดแทนการใช้ทราย เพื่อเตรียมคอนกรีตตัวอย่างขึ้นมาและเปรียบเทียบสมบัติทางกลของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของทรายและแก้ว CRT ที่มีการบ่มเป็นเวลา 2 และ 28 วัน ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่า คอนกรีตที่มีส่วนผสมของแก้ว CRT มีความต้านทานต่อแรงอัดและแรงดึงมากกว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของทรายประมาณ 16% และ 14% ตามลำดับ และยังพบอีกว่า การบ่มคอนกรีตไว้ 28 วันให้ความแข็งแรงมากกว่าบ่มไว้ 2 วัน ในปี 2013 H. Zhao, C.S. Poon และ T.C. Ling [38] ได้ใช้แก้ว CRT ส่วน funnel มาใช้ร่วมกับการใช้ทรายแม่น้ำ ที่ 0% 25% 50% และ 75% เพื่อทำเป็นคอนกรีตความหนาแน่นสูง (High density concrete) โดยทำการศึกษาคสมบัติเชิงกล ความคงทน (Durability properties) และสมบัติของคอนกรีตในสถานะคอนกรีตสด (Fresh properties) ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ CRT มากขึ้น จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตในสถานะคอนกรีตสด แต่สมบัติเชิงกล เช่น แรงอัด แรงดึง และความยืดหยุ่น จะมีค่าลดลง นอกจากนี้คอนกรีตที่มีส่วนผสมของ CRT ยังสามารถลดการหดตัวของการอบแห้งและเพิ่มการขยายตัว alkali-silica reaction (ASR) ของคอนกรีต โดยในช่วงเวลาการอบแห้ง 56 วัน ค่าการหดตัว (drying shrinkage) ของคอนกรีตผสมทุกตัวอย่างมีน้อยกว่า 0.075% ในช่วงเวลา 14 วัน คอนกรีตที่มีส่วนผสมของแก้ว CRT มีการขยายตัวน้อยกว่า 0.1% นั้นแสดงให้เห็นว่า CRT สามารถใช้เป็นส่วนประกอบสำหรับทำคอนกรีตความหนาแน่นสูงได้ ทั้งยังเป็นแนวทางหนึ่งที่ช่วยลดจำนวนขยะ CRT ให้หมดไปด้วย ในปี ค.ศ. 2014 C.S. Poon และ T.C. Ling [39] ได้ทำการศึกษาคความเป็นไปได้ในการใช้ขยะแก้ว CRT เพื่อใช้ทำคอนกรีตอิฐบล็อกปูพื้น ซึ่งผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่า คอนกรีตบล็อกที่มีส่วนผสมของ CRT เพิ่มมากขึ้นมีความต้านทานต่อแรงอัดในระดับที่ดีและการขยายตัว alkali-silica reaction (ASR <0.1%) แต่ต้องปรับปรุงความสามารถในการต้านทานการดูดความชื้น และเมื่อเพิ่ม CRT มากขึ้นอาจจะมีผลทำให้ตะกั่วที่อยู่ในคอนกรีตถูกชะล้างออกมาได้ง่ายขึ้น ดังนั้นจึงแนะนำให้เตรียมคอนกรีตบล็อกที่มีส่วนผสมของแก้ว CRT น้อยกว่า 25% จะเห็นได้ว่าการนำขยะแก้ว CRT มาใช้เป็นส่วนประกอบของคอนกรีตอิฐบล็อกเป็นการรีไซเคิลขยะ CRT ได้ในปริมาณที่น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนขยะ CRT ที่เพิ่มมากขึ้นทุก ๆ ปี

นอกจากจะใช้ขยะแก้ว CRT เป็นส่วนผสมในวัสดุคอนกรีตกำบังรังสีแล้ว วัสดุแก้วเป็นอีกหนึ่งวัสดุที่น่าสนใจสำหรับใช้เป็นวัสดุกำบังรังสี เนื่องจากมีความได้เปรียบด้านความโปร่งใส มีความแข็งแรง และสามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้ด้วยการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบ ซึ่งมีหลายงานวิจัยได้ศึกษาคสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุแก้ว เพื่อประยุกต์ใช้ด้านการกำบังรังสี มีรายละเอียดที่น่าสนใจดังต่อไปนี้ ในปี

ค.ศ. 2008 K.J. Singh และคณะ [40] ได้ศึกษาแก้วในระบบ $x\text{PbO}-(1-x)\text{SiO}_2$ ($x = 0.45-0.70$) และตรวจสอบสมบัติทางรังสีโดยวิธีการส่งผ่านรังสีแบบลำรังสีแคบ (narrow beam transmission) ที่ระดับพลังงานโฟตอน 662, 1173 และ 1332 keV วิเคราะห์โครงสร้างแก้วด้วย FTIR และใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เพื่อหาสมบัติยืดหยุ่น ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าแก้วในระบบนี้มีศักยภาพในการกำบังรังสีที่ดีเมื่อเทียบกับคอนกรีตมาตรฐาน (Iron concrete) ส่วนสมบัติยืดหยุ่นพบว่ามีความลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณ PbO แก้วที่น่าสนใจอีกระบบ คือ $\text{P}_2\text{O}_5\text{-PbO-BaO}$ ที่ศึกษาโดย M.H. Kharita และคณะ [41] เพื่อทดสอบศักยภาพในการใช้เป็นวัสดุกำบังรังสี โดยการศึกษาผลกระทบของแต่ละสารประกอบออกไซด์ พบว่า ความหนาแน่นของแก้วระบบนี้เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน PbO ที่เพิ่มขึ้นและอัตราส่วน BaO และ P_2O_5 ที่ลดลง อัตราส่วนที่มากที่สุดของ PbO คือ 65 wt% ขณะที่อัตราส่วนที่น้อยสุดของ BaO คือ 0 wt% และอัตราส่วนที่น้อยที่สุดสำหรับ P_2O_5 คือ 35 wt% ผลลัพธ์แสดงว่าระบบแก้วนี้เหมาะที่จะเป็นวัสดุกำบังรังสีและมีข้อดีด้านความโปร่งใสและมีความต้านทานผลของรังสีที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแก้วทั่วไปที่ใช้เพื่อเป็นแก้วกำบังรังสี นอกจากนี้ยังมีการศึกษาสมบัติยืดหยุ่นของแก้ว barium-lead borosilicate ทั้งก่อนและหลังการฉายรังสีแกมมาด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกโดย R. Laopaiboon และคณะ [42] ซึ่งการวัดดำเนินการที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้เทคนิค pulse echo ความถี่ 4 MHz ข้อมูลความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของตัวอย่างแก้วจะนำไปคำนวณหาค่าความยืดหยุ่นโมดูลัส และความแข็งระดับไมโคร สำหรับความหนาแน่นของตัวอย่างแก้วจะถูกวัดโดยใช้หลักการของ Archimedes และใช้ n-hexane เป็นของเหลว ซึ่งพบว่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ความยืดหยุ่นโมดูลัส และความแข็งระดับไมโคร มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ BaO และปริมาณรังสีแกมมาที่ฉายให้กับตัวอย่างแก้ว จะเห็นได้ว่า BaO มีผลที่น่าสนใจต่อคุณสมบัติยืดหยุ่นของแก้ว ต่อมา A.B. Edathazhe และ H.D. Shashikala [43] จึงมีความสนใจทำการเตรียมตัวอย่างแก้วในระบบฟอสเฟสที่มีส่วนผสมของสารประกอบ BaO ซึ่งมีสูตรแก้วเป็น $(26-x)\text{Na}_2\text{O}-x\text{BaO}-29\text{CaO}-45\text{P}_2\text{O}_5$ ($x = 0, 5, 10, 15$ mol%) แก้วในระบบนี้เตรียมขึ้นโดยใช้วิธี melt-quenching โดยศึกษาสมบัติโครงสร้างและสมบัติยืดหยุ่นของแก้วที่ใช้อุณหภูมิหลอมแตกต่างกันที่ 1000, 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นการตามเพิ่มของปริมาณ BaO ที่อุณหภูมิหลอมเดียวกัน แต่เมื่อใช้อุณหภูมิในการหลอมมากขึ้นความหนาแน่นมีค่าน้อยกว่าเล็กน้อย ลักษณะที่เป็นแบบอสัณฐานของแก้วสามารถยืนยันได้ด้วยผลของการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ ผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค FTIR พบว่าสเปกตรัมแสดงโครงสร้างของหน่วยหลักคือฟอสเฟสที่มี three non-bridging oxygen (Q^1) และ two non-bridging oxygen (Q^2) รอยแตกหักของการวัดความแข็งมีความเป็นอิสระตามองค์ประกอบ ซึ่งลักษณะการก่อตัวของรอยแตกจะถูกตรวจสอบโดยใช้ SEM การเปราะแตกและระยะเวลาที่มีความสัมพันธ์กับการไหลแบบพลาสติก (plastic flow) ในวัสดุนั้น แก้วในกลุ่มบอเรตก็มีความน่าสนใจเช่นกัน เนื่องมาจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ S.Y. Marzouk [44] จึงสนใจศึกษาคุณสมบัติยืดหยุ่นของแก้วระบบ $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-B}_2\text{O}_3$ ที่เติมด้วย Gd_2O_3 ที่ mol% แตกต่างกัน ซึ่งแก้วถูกขึ้นเตรียมด้วยเทคนิค rapid quenching ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกตามยาวและตามขวางถูกวัดด้วยเทคนิค pulse echo ความถี่ 4 MHz ที่อุณหภูมิห้อง ความยืดหยุ่นโมดูลัส อุณหภูมิเดอบาย อุณหภูมิอ่อนตัว และอัตราส่วนปัวส์ซองของระบบแก้วที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ Gd_2O_3 พบว่าค่อนข้างจะ

ไวต์ดองค์ประกอบแก้ว และยังมีการเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลค่าพารามิเตอร์ความยืดหยุ่นที่ได้จากการทดลองและค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎีโดยใช้แบบจำลอง “bond compression” นอกจากนี้แล้ว M.S. Gaafa และ S.Y. Marzouk [45] ได้ทำการศึกษาแก้ว sodium borosilicate ที่เติมด้วย Er_2O_3 ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน แก้วถูกเตรียมขึ้นโดยใช้เทคนิค rapid quenching การวัดความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกทั้งตามยาวและตามขวางได้ดำเนินการที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ความถี่ 4 MHz ความยืดหยุ่นโมดูลัส อุณหภูมิเดอบาย อุณหภูมิอ่อนตัว และอัตราส่วนปัวส์ซองของแก้วที่เติมด้วย Er_2O_3 แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์ข้างต้นมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่อความเข้มข้นของ Er_2O_3 เพิ่มขึ้น การศึกษา FTIR spectroscopy และแบบจำลองทางทฤษฎี (bond compression) เป็นการวิเคราะห์เชิงปริมาณเพื่อให้ได้ข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับโครงสร้างของแก้วในระบบนี้ การศึกษาชี้ให้เห็นว่าโครงสร้างของแก้วเหล่านี้ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยหน่วย SiO_4 ที่มี four bridging oxygen (Q^4) และ three bridging หรือ one non-bridging oxygen (Q^3) แก้วที่มีการเติมออกไซด์ของโลหะหนักถูกศึกษาโดย C. Bootjomchai และคณะ [46] ซึ่งทำการศึกษาแก้วโบโรซิลิเกตที่มีส่วนประกอบของออกไซด์ธาตุโลหะหนัก (HMO) ในระบบ $x\text{Bi}_2\text{O}_3-50\text{BaO}-(50-x)\text{SiO}_2$ เมื่อ $x = 0, 5, 10, 15$ และ 20 mol% ตามลำดับ ทำการศึกษาด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกด้วยวิธี pulse echo จะได้ข้อมูลค่าความยืดหยุ่นโมดูลัส อุณหภูมิเดอบาย อัตราส่วนปัวส์ซอง และความแข็งระดับไมโคร และศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโดยใช้ FTIR จากการศึกษาโดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีแกมมา Co-60 พบว่าค่าความหนาแน่นของแก้วมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณ Bi_2O_3 ค่าอุณหภูมิเดอบาย ความเร็วคลื่นเสียงทั้งตามยาวและตามขวาง ลดลงตามความเข้มข้นของ Bi_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น ทั้งก่อนและหลังการฉายรังสี และการศึกษาแก้วด้วย FTIR พบว่าโครงสร้างแก้วเปลี่ยนไปหลังจากมีการฉายรังสีกับแก้ว แสดงให้เห็นว่าปริมาณรังสีมีผลต่อโครงสร้างแก้วโบโรซิลิเกต จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติโครงสร้างของแก้วก่อนและหลังการฉายรังสีก็มีความน่าสนใจด้วยเช่นกัน ต่อมา M.A. Marzouk, Y.M. Hamdy และ H.A. ElBatal [47] จึงสนใจศึกษาสมบัติโครงสร้างและสมบัติทางรังสีของแก้วในระบบโซเดียมซิลิโคฟอสเฟส ซึ่งทำการวัดสเปกตรัมทางแสง และ FTIR กับตัวอย่างแก้วโซเดียมซิลิโคฟอสเฟสที่เจือด้วย WO_3 (0, 0.5, 0.75, 1.0 และ 1.25 mol%) เพื่อศึกษาลักษณะสถานะ valence ของทั้งสแตนไอออนที่ผสมอยู่ในรูปของแก้วออกไซด์ และตัวอย่างแก้วได้ถูกศึกษาสเปกตรัมอีกครั้งหลังจากที่มีการฉายด้วยรังสีแกมมาปริมาณ 8×10^4 Gy ตัวอย่างแก้วที่ไม่ได้เจือด้วย WO_3 จะแสดงการดูดกลืนของแถบ UV ที่มีความเด่นชัด ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับเหล็กไอออน (Fe^{3+}) คาดว่าจะเป็นผลจากขั้นตอนการเตรียมแก้วแก้วที่เจือด้วย WO_3 จะมีสีฟ้า และแสดงให้เห็นถึงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่แตกต่างกัน ซึ่งน่าจะมาจากไอออน W^{6+} และ W^{5+} การศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดจากตัวอย่างแก้ว แสดงให้เห็นถึงแถบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่แตกต่างกัน ซึ่งน่าจะมาจากรูปแบบการสั่นของโครงข่ายฟอสเฟส และซิลิเกต นอกจากนี้แก้วที่เจือด้วย WO_3 (0.5–1.25%) ไม่ได้ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการสั่นของแถบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด และการฉายรังสีแกมมาไม่ได้ทำให้จำนวนหรือตำแหน่งหลักของแถบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเปลี่ยนแปลง เนื่องมาจากความเสถียรของโครงข่ายแก้วที่มีกลุ่มโครงสร้างร่วมกันกับไอออนทั้งสแตน สเปกตรัม ESR ของตัวอย่างแก้วที่เจือด้วย WO_3 แสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของอิเล็กตรอนโดดเดี่ยวของไอออนทั้งสแตน และสนับสนุนผลทางแสงด้วย

จากรายละเอียดที่กล่าวมาข้างต้น เราจะเห็นได้ว่าวัสดุแก้วเป็นอีกหนึ่งวัสดุที่น่าสนใจอย่างมาก สำหรับนำมาประยุกต์ใช้ด้านรังสี ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่าการนำขยะ CRT มารีไซเคิลเป็นวัสดุแก้วที่ใช้เพื่อ กำบังรังสีเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับช่วยลดจำนวนขยะ CRT ที่อาจก่อให้เกิดมลพิษต่อ สิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม และยังเป็น การนำขยะแก้ว CRT มารีไซเคิลให้เกิดประโยชน์ได้สูงสุดอีกด้วย

บทที่ 3 วิธีการทดลอง

3.1 สารเคมีและวัสดุอุปกรณ์

3.1.1 สารเคมี

- 3.1.1.1 เศษแก้ว CRT ที่ได้จากหน้าจocomพิวเตอร์ ยี่ห้อ COMPAQ
- 3.1.1.2 Potassium Oxide (K₂O) ความบริสุทธิ์ 99.0% บริษัท Ajax Finechem
- 3.1.1.3 Barium Oxide (BaO) ความบริสุทธิ์ 99.0% บริษัท Ajax Finechem
- 3.1.1.4 Potassium bromide (KBr) ความบริสุทธิ์ 99.0% บริษัท Loba Chemie
- 3.1.1.5 n-hexane ของบริษัท Merck Millipore ความบริสุทธิ์ 95.0 %
- 3.1.1.5 กลีเซอริน

3.1.2 วัสดุ อุปกรณ์

- 3.1.2.1 กระดาษขึงสารและซ้อนตักสาร
- 3.1.2.2 ครกบดสาร Agate
- 3.1.2.3 ปีกเกอร์ ขนาด 250 ml
- 3.1.2.4 กระดาษทราย เบอร์ 400 800 และ 1,200
- 3.1.2.5 เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ ยี่ห้อ Denver Instrument ความละเอียด 0.0001 g
- 3.1.2.6 เบ้าหลอมเซรามิกส์
- 3.1.2.7 แม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม
- 3.1.2.8 เตาหลอมไฟฟ้า อุณหภูมิสูงสุด 1,400 องศาเซลเซียส สร้างโดยกลุ่มวิจัยแก้ว
ภาควิฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
- 3.1.2.9 เตาอบไฟฟ้า อุณหภูมิสูงสุด 1,000 องศาเซลเซียส สร้างโดยกลุ่มวิจัยแก้ว
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
- 3.1.2.10 เครื่องตัดแก้ว ยี่ห้อ Benetec limited รุ่น labcut 1010
- 3.1.2.11 เครื่องขัดแก้ว สร้างโดยกลุ่มวิจัยแก้ว ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
- 3.1.2.12 เวอร์เนียคาลิเปอร์ ความละเอียด 0.05 mm
- 3.1.2.13 แท่งปรับเทียบมาตรฐานชนิด K1 (DIN 54120) และ K2 (DIN 54122)
- 3.1.2.14 หัววัดคลื่นเสียงอัลตราโซนิคชนิดหัวตรง ความถี่ 4 MHz
- 3.1.2.15 หัววัดคลื่นเสียงอัลตราโซนิคชนิดหัวมุม 45 องศา ความถี่ 4 MHz
- 3.1.2.16 เครื่องอัลตราโซนิค ยี่ห้อ Sonatest รุ่น SITESCAN 230
- 3.1.2.17 หัววัดรังสีชนิด NaI(Tl) ยี่ห้อ Canberra Model 802
- 3.1.2.18 หัววัดรังสีชนิด CdTe Model XR-100T

- 3.1.2.19 ต้นกำเนิดรังสีชนิด Cs-137 Co-60 และ Co-57
- 3.1.2.20 แผ่น Target (แผ่นยูเรเนียม และแผ่นตะกั่ว)
- 3.1.2.21 แท่งตะกั่วและทองแดงสำหรับกำบังรังสี
- 3.1.2.22 เครื่อง MCA (Multichannel Analyzer) บริษัท ORTEC
- 3.1.2.23 เครื่อง FTIR Spectrometer ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Nicolet 6700
- 3.1.2.24 เครื่อง EDS ยี่ห้อ Hitachi รุ่น S-3400N
- 3.1.2.25 โปรแกรม WinXCom

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การเตรียมเข้าหลอมเซรามิกส์

นำดินเหนียวสำเร็จรูป (Compound Clay) ผสมกับน้ำในปริมาณที่เหมาะสมแช่ทิ้งไว้ประมาณ 2 วัน จากนั้นกรองเอาเฉพาะส่วนที่ละเอียดแล้วเทลงบนแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์รูปทรงกระบอกที่เตรียมไว้ รอให้ได้ความหนาตามที่ต้องการแล้วเทดินเหลวออก ทิ้งไว้สักพักแล้วนำออกจากแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ นำไปตากแดดให้แห้ง หลังจากนั้นนำไปเผาในเตาเผาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้องจะได้เข้าหลอมเซรามิกส์ (Ceramic Crucible) ที่ใช้สำหรับหลอมแก้ว

3.2.2 การเตรียมตัวอย่างแก้ว

ตัวอย่างแก้วเตรียมขึ้นจากสูตรแก้วพื้นฐาน $(70-x)\text{CRT}-30\text{K}_2\text{O}-x\text{BaO}$ เมื่อ $x = 0, 5, 10, 15$ และ $20 \text{ mol}\%$ โดยสารเคมีที่ใช้มีความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูง และแก้ว CRT ได้มาจากหน้าจอกอมพิวเตอร์ยี่ห้อ COMPAQ นำมาบดให้ละเอียดและวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิค EDS ดังแสดงในตารางที่ 4.2 นำสารเคมีมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ ความละเอียด 0.0001 g ตามองค์ประกอบแก้วที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 จากนั้นผสมสารเคมีให้เป็นเนื้อเดียวกันในเข้าหลอมเซรามิกส์ แล้วนำไปหลอมในเตาหลอมไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ขึ้นรูปแก้วที่หลอมเหลวบนแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม จากนั้นนำแก้วไปอบในเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เพื่อลดความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อแก้ว ทิ้งไว้ประมาณ 2 ชั่วโมง ปิดเตาอบไฟฟ้าแล้วปล่อยให้อุณหภูมิภายในเตาลดลงถึงอุณหภูมิห้อง แล้วนำตัวอย่างแก้วที่ได้ไปตัดและขัดให้ได้ระนาบเพื่อใช้ในการหาค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกและคุณสมบัติการกำบังรังสี

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลองค์ประกอบและสูตรในการเตรียมตัวอย่างแก้ว G1 – G5

ตัวอย่าง	องค์ประกอบ (mol%)			สูตรแก้ว
	CRT	K ₂ O	BaO	
G1	70	30	0	70CRT-30K ₂ O-0BaO
G2	65	30	5	65CRT-30K ₂ O-5BaO
G3	60	30	10	60CRT-30K ₂ O-10BaO
G4	55	30	15	55CRT-30K ₂ O-15BaO
G5	50	30	20	50CRT-30K ₂ O-20BaO

3.2.3 การหาความหนาแน่นและปริมาตรโดยโมล

ความหนาแน่นของตัวอย่างแก้วกวดที่อุณหภูมิห้องโดยใช้หลักการของอาร์คิมิดีส ซึ่งหลักการนี้สามารถหาความหนาแน่นของวัสดุรูปทรงใดๆ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 การหาค่าความหนาแน่นของตัวอย่างแก้วสามารถทำได้โดยการชั่งมวลของตัวอย่างแก้วอย่างละเอียดในอากาศ และชั่งมวลของตัวอย่างแก้วในสารละลายที่ทราบความหนาแน่น ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ n-hexane เป็นสารละลาย เนื่องจากไม่ทำปฏิกิริยากับตัวอย่างแก้ว และทราบค่าความหนาแน่นที่แน่นอน โดยมีความหนาแน่น เท่ากับ 0.6548 g/cm^3 จากนั้นคำนวณหาความหนาแน่นของตัวอย่างแก้วตามสมการที่ (2.1) แล้วนำค่าความหนาแน่นของตัวอย่างแก้วไปคำนวณต่อเพื่อหาปริมาตรโดยโมลตามสมการที่ (2.2)

3.2.4 ทดสอบสมบัติยืดหยุ่นโดยใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิค

ก่อนจะทำการวัดความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิคของตัวอย่างแก้วจำเป็นต้องมีการปรับเทียบเครื่องอัลตราโซนิคก่อนเสมอ โดยที่หัววัดความเร็วคลื่นเสียงชนิดหัวตรง ความถี่ 4 MHz จะปรับเทียบกับแท่งมาตรฐานชนิด K2 (DIN 54122) และหัววัดความเร็วคลื่นเสียงชนิดหัวมุม 45 องศา ความถี่ 4 MHz จะปรับเทียบกับแท่งมาตรฐานชนิด K1 (DIN 54120) [20]

3.2.4.1 การวัดความเร็วคลื่นเสียงตามยาว (v_l)

การวัดความเร็วคลื่นเสียงตามยาวของตัวอย่างแก้วโดยใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิคสามารถทำได้โดยทำการวัดความหนาของแก้วตัวอย่างโดยใช้เวเนียร์คาลิเปอร์ แล้วใช้หัววัดคลื่นเสียงชนิดหัวตรงกดลงบนตัวอย่างแก้ว โดยจะใช้กลีเซอรินเป็นตัวกลางในการส่งผ่านคลื่นเสียงอัลตราโซนิกลงไปในตัวอย่างแก้ว ทั้งนี้จะต้องตั้งค่าเครื่องอัลตราโซนิคให้เหมาะสมกับชนิดหัววัดชนิดหัวตรง [20] จากนั้นปรับหาความเร็วคลื่นเสียงตามยาวของตัวอย่างแก้ว ซึ่งจะมีความเกี่ยวเนื่องกันกับความหนาของตัวอย่างแก้ว

3.2.4.2 การวัดความเร็วคลื่นเสียงเฉือน (v_s)

การวัดความเร็วคลื่นเสียงเฉือนของตัวอย่างแก้วโดยใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิคสามารถทำได้โดยการใช้หัววัดคลื่นเสียงชนิดหัวมุม 45 องศา กดลงบนกดลงบนตัวอย่างแก้ว โดยใช้กลีเซอรินเป็นตัวกลางในการส่งผ่านคลื่นเสียงลงไปในตัวตัวอย่าง โดยจะต้องตั้งค่าเครื่องอัลตราโซนิคให้เหมาะสมกับชนิดหัววัดชนิดหัวมุม 45 องศา [20] ปรับหาความเร็วคลื่นเสียงตามขวางของแก้วตัวอย่าง ซึ่งมีความเกี่ยวเนื่องกันกับระยะที่คลื่นเสียงอัลตราโซนิคสะท้อนเป็นมุม 45 องศา ในตัวอย่างแก้วถึงหัววัดได้พอดี

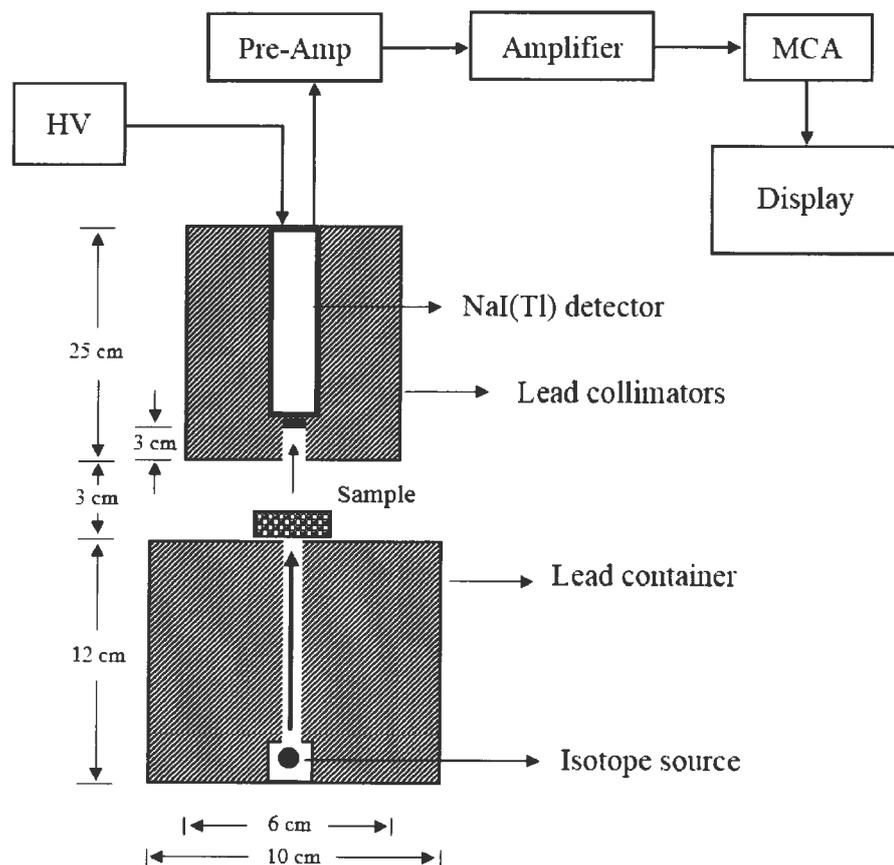
3.2.5 ทดสอบสมบัติโครงสร้างด้วยเทคนิคเอฟทีไออาร์ (FTIR)

การวิเคราะห์โครงสร้างของตัวอย่างแก้วด้วยเทคนิค FTIR เพื่อยืนยันผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคคลื่นเสียงอัลตราโซนิค โดยเทคนิคนี้สามารถบอกหมู่ฟังก์ชันของพันธะ หรือลักษณะการเปลี่ยนแปลงของพันธะที่เกิดขึ้นในตัวตัวอย่างแก้ว ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างแก้วเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ทำได้โดยการนำตัวอย่างแก้วมาบดผสมกับ Potassium bromide (KBr) โดยใช้อัตราส่วนตัวอย่างแก้วต่อ KBr เท่ากับ 1 ต่อ 100 บดเป็นผงให้ละเอียดจนกลายเป็นเนื้อเดียวกัน นำไปอัดเป็นเม็ดบางๆ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.2 cm โดยใช้แรงดัน 8 tons/cm^3 จากนั้นนำตัวอย่างแก้วไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR Spectrometer

3.2.6 ทดสอบสมบัติการกำบังรังสี

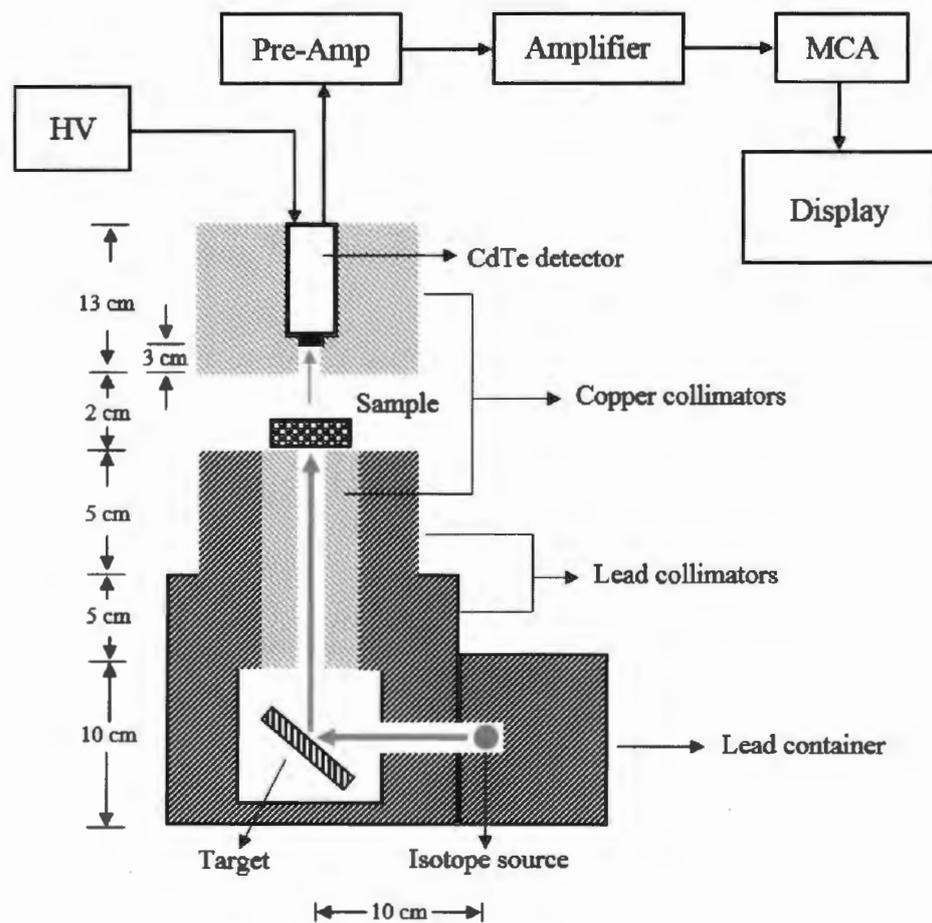
สำหรับการทดสอบสมบัติการกำบังรังสีของตัวอย่างแก้ว ที่ระดับพลังงานต่าง ๆ จะทำการวัดโดยใช้เทคนิค Narrow beam transmission method ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Narrow beam transmission method เป็นเทคนิคที่ใช้ทดสอบสมบัติการกำบังรังสีของวัสดุ ซึ่งจะบังคับลำรังสีจากไอโซโทปรังสีให้ผ่านตัวอย่างโดยตรง เมื่อรังสีกระทบวัสดุตัวอย่างจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีกับวัสดุตัวอย่าง ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 โดยจะมีรังสีส่วนหนึ่งที่ถูกวัสดุดูดกลืนไว้ และรังสีอีกส่วนหนึ่งทะลุผ่านไปได้นั้นคำนวณหาสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของวัสดุตามกฎของ Beer-Lambert ดังสมการที่ (2.14) วิธี Narrow beam transmission ที่ใช้พลังงานโฟตอนหรือรังสีจากไอโซโทปรังสีผ่านตัวอย่างแก้วโดยตรงจะวัดได้ที่ระดับพลังงาน 122, 662 1173 และ 1332 keV สำหรับการจัดชุดอุปกรณ์ทดสอบการกำบังรังสีของตัวอย่างแก้วด้วยวิธี narrow beam transmission แบบให้ไอโซโทปรังสีทะลุผ่านวัสดุตัวอย่างโดยตรง สามารถแสดงให้เห็นดังภาพที่ 3.1 โดยไอโซโทปรังสีจะถูกผนึกอยู่ในบล็อกที่ทำจากตะกั่ว (Lead container) ซึ่งจะช่วยป้องกันไม่ให้รังสีทะลุผ่านออกมาข้างนอก และรังสีถูกบังคับให้เป็นลำเล็ก ๆ ผ่านแก้วตัวอย่าง ซึ่งจะใช้หัววัด NaI(Tl) เป็นตัวนับวัดสัญญาณ จากนั้นสัญญาณที่ได้จะถูกแปลงและแสดงผลออกมาผ่านทางหน้าจอ (Display) โดยกำหนดระยะห่างจากไอโซโทปรังสีถึงหัววัดมีค่าประมาณ 18 cm



ภาพที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์การทดลองของ Narrow beam transmission method

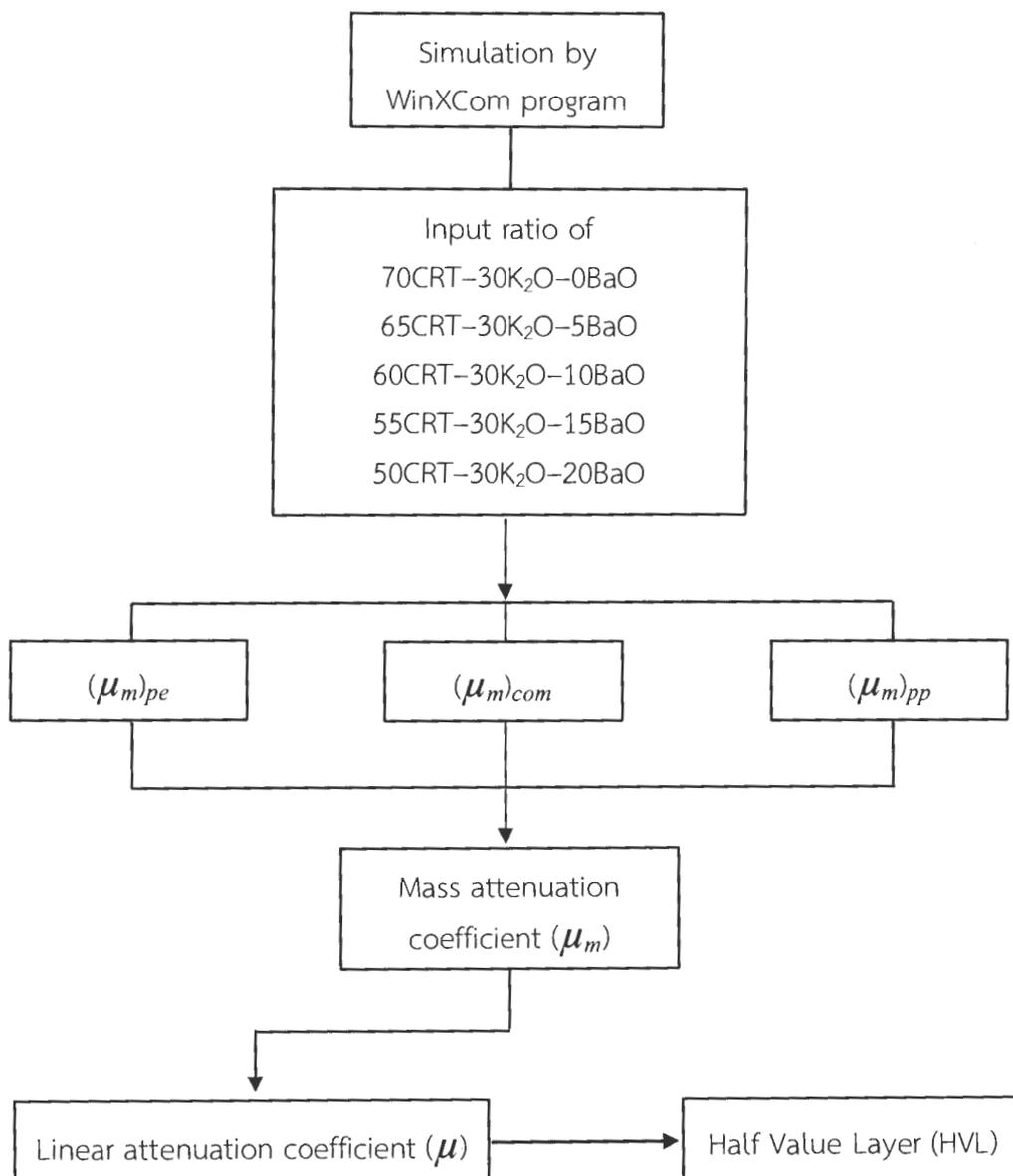
นอกจากนี้ถ้าต้องการวัดคุณสมบัติการกำบังรังสีที่ระดับพลังงานต่ำกว่าที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นจะใช้เทคนิค Narrow beam transmission method แบบ secondary target โดยใช้ทดสอบสมบัติการกำบังรังสีของวัสดุที่ให้พลังงานในย่านรังสีเอ็กซ์ (X-ray) ซึ่งจะมีหลักการ คือ การบังคับให้ต้นกำเนิดรังสีหรือโฟตอนจากไอโซโทปรังสีไปกระทบที่แผ่น Target แล้วกระตุ้นให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานออกมา โดยพลังงานที่ได้ออกมาอาจจะมีได้หลายพลังงานขึ้นอยู่กับชนิดของแผ่น Target และต้นกำเนิดรังสี ทั้งนี้จะใช้ Decay scheme เป็นตัวบอกพลังงานที่ได้ออกมา จากนั้นจะบังคับลำรังสีที่ได้จากการกระตุ้นแผ่น Target ซึ่งอยู่ในย่านรังสีเอ็กซ์ ให้เคลื่อนที่ไปชนกับตัวอย่างแก้ว รังสีส่วนที่ผ่านตัวอย่างแก้วจะถูกนับวัดโดยใช้หัววัด CdTe ที่บริเวณหัววัดรังสีจะใช้แท่งทองแดงประกบเพื่อป้องกันรังสีรบกวนจากภายนอก สัญญาณที่นับวัดได้จากหัววัดรังสีจะถูกแปลงและแสดงผลออกมาผ่านทางหน้าจอ (Display) โดยระยะทางจากไอโซโทปรังสีจนถึงหัววัดรังสีมีค่าประมาณ 25 cm สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้แผ่นตะกั่ว และแผ่นยูเรเนียมเป็น Target และใช้ Co-57 เป็นต้นกำเนิดไอโซโทปรังสี ซึ่งจะกระตุ้นให้แผ่นตะกั่ว และแผ่นยูเรเนียมปลดปล่อยพลังงานออกมาที่ 74.228 และ 97.143 keV ตามลำดับ ลักษณะการจัดชุดอุปกรณ์การทดลองแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ชุดอุปกรณ์การทดลองของ Narrow beam transmission method แบบ secondary target

3.2.7 การจำลองสมบัติทางรังสีด้วยโปรแกรม WinXCom

โปรแกรม WinXCom เป็นโปรแกรมที่ใช้การจำลองพารามิเตอร์สมบัติการกัมมันตรังสีของวัสดุแก้ว โดยจะทำการป้อนข้อมูลองค์ประกอบของแก้วเข้าไปในตัวโปรแกรม จากนั้นโปรแกรมจะทำการคำนวณพารามิเตอร์ออกมา ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 โปรแกรม WinXCom เป็นฐานข้อมูลที่สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (μ_m) และอันตรกิริยาต่างๆ ที่คำนวณได้ทั้งธาตุสารประกอบ และสารผสม ที่ระดับพลังงานตั้งแต่ 1 keV ถึง 100 GeV และสามารถอธิบายโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาของโฟตอนกับตัวกลางของวัสดุ ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอมต่อปริมาตร และความหนาแน่นของตัวกลาง ขั้นตอนการจำลองด้วยโปรแกรม WinXCom แสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนภาพขั้นตอนการจำลองด้วยโปรแกรม WinXCom

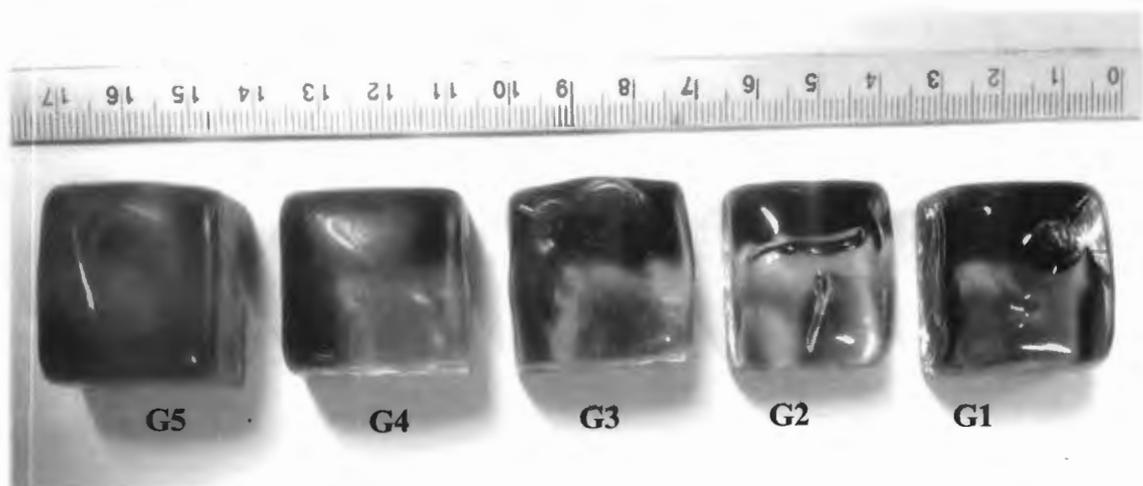
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์ข้อมูลคุณสมบัติของตัวอย่างแก้ว เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการใช้ขี้เถ้าแก้ว CRT เป็นวัสดุสำหรับกำบังรังสี ซึ่งจะประเมินคุณสมบัติทางด้านทางกายภาพ โครงสร้าง ความยืดหยุ่น และสมบัติทางรังสีของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการรีไซเคิลแก้ว CRT ด้วยการหลอมผสมกับ K_2O และ BaO โดยมีสูตรแก้วเป็น $(70-x)CRT-30K_2O-xBaO$ เมื่อ $x = 0, 5, 10, 15$ และ 20 mol\% ตามลำดับ ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.1 ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างแก้ว

จากการหลอมแก้วที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส และทำการอบที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เพื่อลดความเครียดตกค้างในเนื้อแก้วเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ตัวอย่างแก้วที่ได้หลังการหลอมมีลักษณะโปร่งแสง เป็นเนื้อเดียวกัน ไม่มีฟองอากาศเกิดขึ้น ยกเว้นในตัวอย่างที่มีปริมาณ BaO 0 mol% มีฟองอากาศเกิดขึ้นในเนื้อแก้วเล็กน้อย เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณ BaO และ CRT จะมีผลทำให้สีของตัวอย่างแก้วเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยสีของตัวอย่างแก้วจะเปลี่ยนจากสีฟ้าไปเป็นสีเหลืองมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณ BaO หรือตามการลดลงของปริมาณ CRT โดยตัวอย่างแก้ว G1 (BaO 0%) แสดงให้เห็นเป็นสีฟ้า และตัวอย่างแก้ว G5 (BaO 20%) แสดงให้เห็นสีเหลืองที่เข้มกว่าตัวอย่างแก้วอื่น ๆ ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่างแก้วมีผลเนื่องมาจากองค์ประกอบที่เปลี่ยนแปลงไปในตัวอย่างแก้ว ในแก้วระบบนี้ BaO จะทำหน้าที่เป็นสารช่วยหลอมเหลวส่งผลให้เมื่อเพิ่มปริมาณ BaO มากขึ้น ตัวอย่างแก้วจะสามารถหลอมเหลวได้ง่ายขึ้น สำหรับแก้วในระบบนี้ปริมาณ BaO มากที่สุดและปริมาณ CRT น้อยที่สุดที่สามารถทำให้เกิดเป็นเนื้อแก้วได้คือ 20 และ 50 mol% ตามลำดับ



ภาพที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างแก้ว

4.2 องค์ประกอบทางเคมี ความหนาแน่น และปริมาตรโดยโมลของตัวอย่างแก้ว

ตัวอย่างแก้วที่ได้จากการหลอมมีทั้งหมด 5 ตัวอย่าง แต่ละตัวอย่างจะมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบระหว่าง CRT กับ BaO ซึ่งกำหนดให้ปริมาณ K_2O คงที่ โดยองค์ประกอบทางเคมี ความหนาแน่น และปริมาตรโดยโมลของตัวอย่างแก้ว แสดงให้เห็นในตารางที่ 4.1 และการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก้ว CRT ที่ได้จากหน้าจอกอมพิวเตอร์ ยี่ห้อ COMPAQ ด้วยเทคนิค EDS พบว่าในแก้ว CRT มีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนั้นยังมีสารช่วยหลอมและสารช่วยปรับปรุงโครงสร้างแก้วเป็นองค์ประกอบอีกด้วย ดังที่แสดงในตารางที่ 4.2

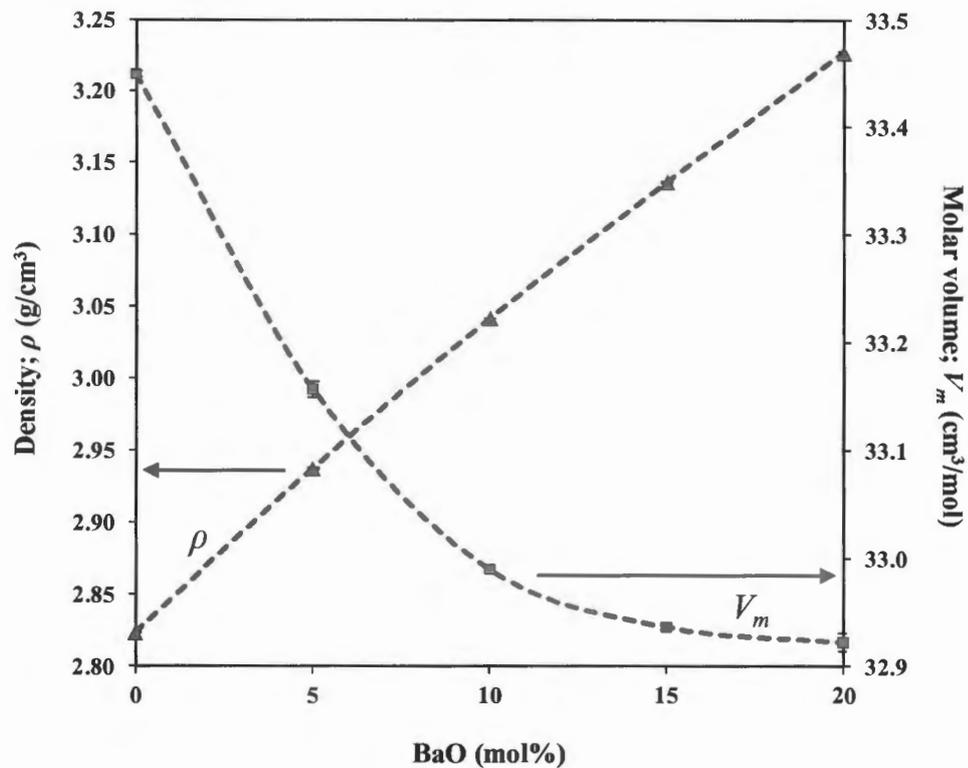
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลองค์ประกอบทางเคมี (Composition) ความหนาแน่น (Density) และปริมาตรโดยโมล (Molar volume) ของตัวอย่างแก้ว

Sample	Composition (mol%)			Density (g/cm^3) ± 0.0007	Molar volume (cm^3/mol) ± 0.0075
	CRT	K_2O	BaO		
G1	70	30	0	2.8232	33.3990
G2	65	30	5	2.9372	33.1062
G3	60	30	10	3.0416	32.9398
G4	55	30	15	3.1362	32.8863
G5	50	30	20	3.2266	32.8791

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลองค์ประกอบของแก้ว CRT จากหน้าจอกอมพิวเตอร์ ยี่ห้อ COMPAQ ด้วยเทคนิค EDS

No.	Compound	mol%
1	SiO_2	37.61
2	Al_2O_3	16.55
3	Na_2O	13.04
4	K_2O	8.80
5	BaO	6.47
6	CaO	6.10
7	MgO	5.72
8	PbO	5.71
Total		100.00

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของ BaO มากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างแก้วเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนปริมาตรโดยโมลจะมีค่าลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของ BaO สามารถแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและปริมาตรโดยโมลกับปริมาณแบเรียมออกไซด์ของตัวอย่างแก้ว

ในภาพที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของตัวอย่างแก้วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ BaO โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 2.8232 ถึง 3.2266 g/cm³ ทั้งนี้ความหนาแน่นของตัวอย่างแก้วจะขึ้นอยู่กับมวลโมเลกุลขององค์ประกอบแก้วตามสัดส่วน เนื่องจากมวลโมเลกุลของ BaO ($M_w = 153.3264$ g/mol) มีค่ามากกว่ามวลโมเลกุลของ SiO₂ ($M_w = 60.0843$ g/mol) [48-49] ซึ่ง SiO₂ ทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบหลักในแก้ว ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณ BaO มากขึ้นจึงมีผลทำให้ความหนาแน่นของตัวอย่างแก้วมีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ R. Laopaiboon และคณะ [42] และ N. Singh และคณะ [50] ปริมาตรโดยโมล คือปริมาตรที่ถูกครอบครองหนึ่งหน่วยมวลของตัวอย่างแก้ว โดยทั่วไปแล้วความหนาแน่นและปริมาตรโดยโมลจะแสดงพฤติกรรมตรงกันข้าม จะเห็นว่าปริมาตรโดยโมลของตัวอย่างแก้วที่ศึกษานี้มีค่าลดลงจาก 33.3990 ถึง 32.8791 cm³/mol โดยพบว่ามีแนวโน้มตรงกันข้ามกับความหนาแน่น ซึ่งอาจจะมีหลายเหตุผลที่ส่งผลให้ปริมาตรโดยโมลของแก้วมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง สำหรับการลดลงที่เห็นได้ในตัวอย่างแก้วครั้งนี้ อาจจะเป็นผลเนื่องมาจากรัศมีไอออนของแบเรียม ($Ba^{2+} = 1.35$ Å) มีขนาดใหญ่กว่ารัศมีไอออนของซิลิกอนซึ่งทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักในตัวอย่างแก้ว ($Si^{4+} = 0.4$ Å) เมื่อมีการแทนที่ของ BaO ในโครงสร้างแก้วมากขึ้น จะส่งผลให้ความยาวพันธะหรือระยะห่างระหว่างอะตอมกับอะตอมเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้มวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของแก้วระบบนี้มีค่าลดลง นอกจากนี้แล้วการแทนที่ของ BaO ในตัวอย่างแก้วจะทำให้พันธะในโครงสร้างแก้วถูกทำลาย และพันธะที่จับกับออกซิเจนบางส่วนจะขาดหายไปหรือที่เรียกว่าการเกิด non-bridging oxygens (NBOs) ขึ้นในตัวอย่างแก้ว ซึ่งมีงานวิจัยหลายชิ้นได้ชี้ให้เห็นว่า เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณ BaO

ในแก้วจะส่งผลให้เกิดการขาดของพันธะในโครงสร้างแก้ว [51-53] ซึ่งการขาดของพันธะนี้อาจนำไปสู่การเกิดพันธะไอออนิกระหว่าง Ba^{2+} กับอะตอมของออกซิเจนเดี่ยวได้มากขึ้น ดังนั้นถ้าสมมติว่าการเพิ่มไอออนของ Ba เข้าไปในโครงสร้างแก้วเพื่อทำลายพันธะบางส่วนของโครงข่ายหลัก ในแก้วระบบนี้คือ Si-O-Si จะทำให้ปริมาตรโดยโมลของตัวอย่างแก้วที่ศึกษาทั้งหมดมีค่าลดลง [54-55]

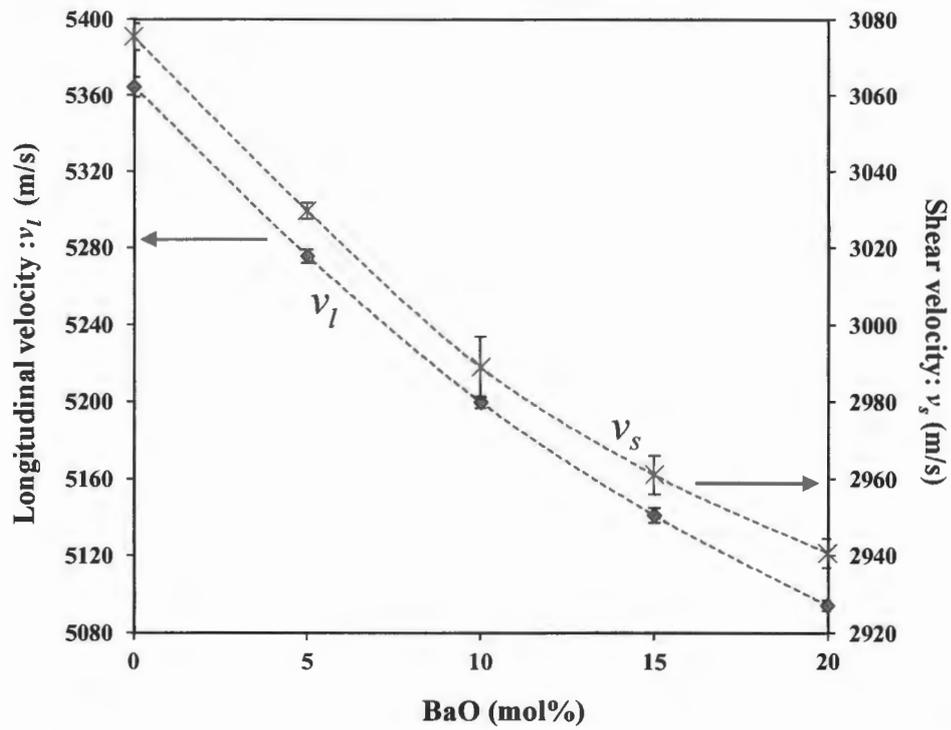
4.3 สมบัติความยืดหยุ่นของตัวอย่างแก้ว

ความเร็วคลื่นเสียงตามยาวและเฉือนของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิคพัลส์เอคโคโดยใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิคถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณหาคุณสมบัติความยืดหยุ่นของตัวอย่างแก้ว ตามสมการที่ (2.4) ถึง (2.9) ได้แก่ โมดูลัสตามยาว (Longitudinal modulus: L) โมดูลัสเฉือน (Shear modulus: G) โมดูลัสเชิงปริมาตร (Bulk modulus: K) และโมดูลัสของยัง (Young's modulus: E) นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณหาค่าอัตราส่วนปัวส์ซอง (Poisson's ratio: σ) และค่าความแข็งระดับไมโคร (Micro-hardness: H) ของแก้วได้ด้วย ซึ่งค่าดังกล่าวแสดงไว้ในตารางที่ 4.3

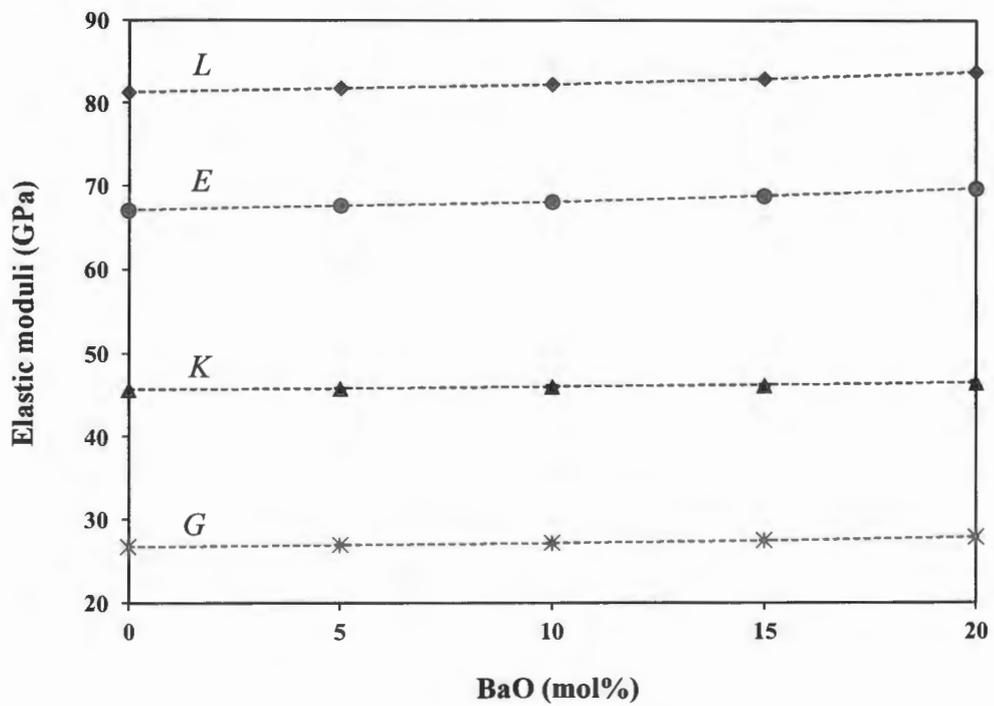
ตารางที่ 4.3 ข้อมูลความเร็วเสียงอัลตราโซนิค (v_l , v_s) โมดูลัสยืดหยุ่น (L , G , K , E) อัตราส่วนปัวซอง (σ) และความแข็งระดับไมโคร (H)

Sample	v_l (m/s) ±5	v_s (m/s) ±8	L (GPa) ±0.1261	G (GPa) ±0.0719	K (GPa) ±0.1557	E (GPa) ±0.1384	σ ±0.0012	H (GPa) ±0.0338
G1	5364	3075	81.2396	26.7006	45.6388	67.0300	0.2552	4.3573
G2	5276	3030	81.7612	26.9605	45.8139	67.6176	0.2540	4.4213
G3	5200	2989	82.2346	27.1681	46.0105	68.1002	0.2533	4.4680
G4	5141	2961	82.8905	27.4971	46.2278	68.8417	0.2518	4.5498
G5	5094	2941	83.7269	27.9022	46.5239	69.7604	0.2501	4.6488

จากตารางที่ 4.3 จะสังเกตเห็นว่าตัวอย่างแก้วระบบนี้มีความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิคตามยาวมากกว่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิคเฉือน เนื่องมาจากคลื่นเสียงอัลตราโซนิคตามยาวเป็นคลื่นเสียงที่มีทิศทางการเคลื่อนที่อยู่ในทิศเดียวกันกับทิศทางการสั่นของตัวกลาง ส่วนคลื่นเสียงอัลตราโซนิคเฉือนเป็นคลื่นเสียงที่มีทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นตั้งฉากกับทิศทางการสั่นของตัวกลาง ส่งผลให้คลื่นเสียงอัลตราโซนิคตามยาวสามารถเคลื่อนที่ไปได้สะดวกและทำให้มีความเร็วมากกว่าคลื่นเสียงอัลตราโซนิคเฉือน [20] เมื่อเพิ่มปริมาณ BaO มากขึ้นในแก้ว ค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิคตามยาวมีค่าลดลงจาก 5364 ถึง 5094 m/s และความเร็วคลื่นเสียงเฉือนมีค่าลดลงจาก 3075 ถึง 2941 m/s ส่วนค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นและความแข็งระดับไมโครมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ BaO และค่าอัตราส่วนปัวส์ซองของตัวอย่างแก้วมีค่าค่อนข้างคงที่อยู่ระหว่าง 0.2501 ถึง 0.2552 ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นแบบ High cross-link density [23, 55] ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิค โมดูลัสยืดหยุ่น และความแข็งระดับไมโครของตัวอย่างแก้วแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 4.3 ถึง 4.5 ตามลำดับ



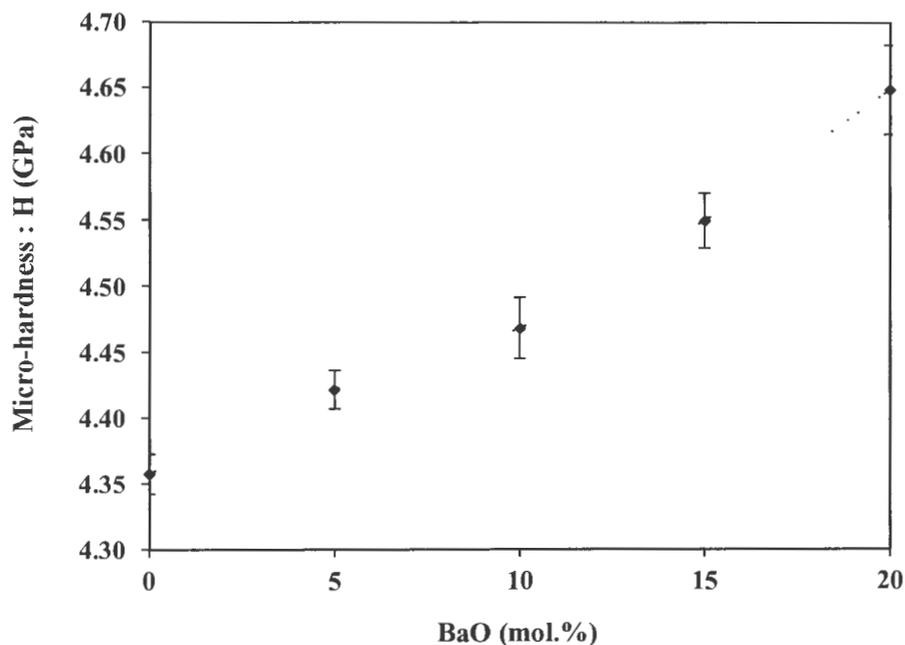
ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิคทั้งตามยาวและเฉือนกับปริมาณแบเรียมออกไซด์ของตัวอย่างแก้ว



ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic moduli) กับปริมาณแบเรียมออกไซด์ของตัวอย่างแก้ว

ในภาพที่ 4.3 พบว่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิคทั้งตามยาวและเฉือนมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณ BaO ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อเพิ่มปริมาณ BaO มากขึ้น อะตอมของ Ba จะเข้าไปแทรกอยู่ในโครงสร้างหลักของแก้วมีผลทำให้พันธะโครงข่ายหลักของแก้วที่จับกับออกซิเจนขาดหายไปเพิ่มมากขึ้นดังที่เคยได้กล่าวมาแล้ว ด้วยเหตุนี้ทำให้อะตอมของ Ba เข้ามาขัดขวางทางเดินของคลื่นเสียงทำให้คลื่นเสียงอัลตราโซนิคเคลื่อนที่ไปได้ลำบากมากขึ้นและส่งผลให้ความเร็วคลื่นเสียงมีค่าลดลง ซึ่งเราจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การขวางกั้นทางเดินคลื่นเสียง (Hindrance effect) ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ความเร็วคลื่นเสียงตามยาวและเฉือนของตัวอย่างแก้วในระบบนี้มีค่าลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ C. Bootjomchai, J. Laopaiboon และ R. Laopaiboon [56]

ความยืดหยุ่นเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานต่อแรงที่มากกระทำกับวัสดุในรูปแบบต่างๆ เช่น โมดูลัสตามยาว เป็นความสามารถในการต้านทานต่อแรงกดในทิศตามยาวของวัสดุ โมดูลัสเฉือน บ่งบอกความสามารถในการต้านทานต่อแรงกดในทิศแนวขวางหรือพันธะตามขวางในวัสดุ โมดูลัสเชิงปริมาตร เป็นความสามารถในการต้านทานต่อแรงที่มากกระทำในทุกทิศทางหรือทนต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตร ส่วนค่าโมดูลัสของยัง เป็นค่าที่บ่งบอกความแข็งแรงหรือเป็นค่าที่แสดงถึงความต้านทานต่อความเครียดจากแรงที่กระทำ จากภาพที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณ BaO เพิ่มขึ้น โมดูลัสยืดหยุ่นจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อ BaO เข้าไปแทรกในโครงสร้างหลักของแก้วแล้วทำให้พันธะของโครงสร้างหลักของแก้วยืดออกหรือทำให้พันธะสลายไป พลังงานยืดหยุ่นของโครงสร้างของแก้วจึงลดลงเป็นผลให้ความแข็งแรงของโครงสร้างของแก้วลดลงค่าความยืดหยุ่นจึงเพิ่มขึ้น [35] นั้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ BaO มากขึ้น ตัวอย่างแก้วในระบบนี้จะมีความสามารถในการต้านทานต่อแรงที่มากกระทำในรูปแบบต่างๆ ได้มากขึ้นนั่นเอง

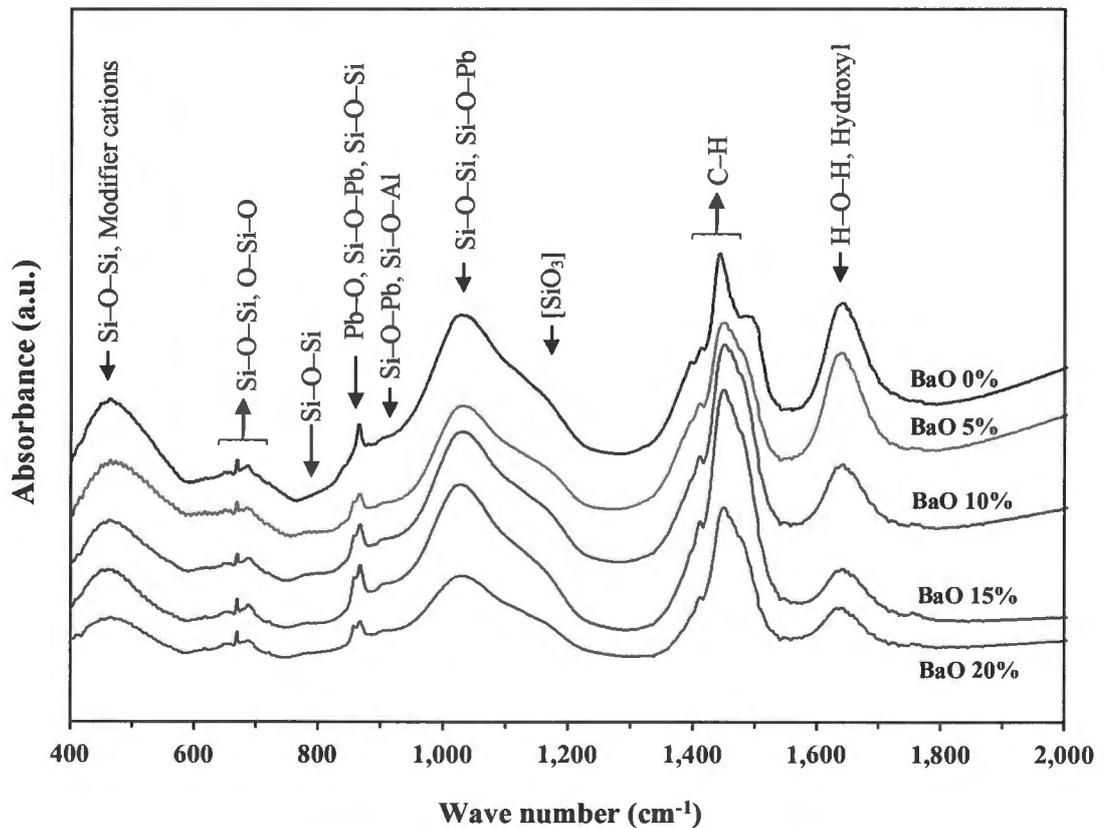


ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งระดับไมโคร (Micro-hardness) กับปริมาณแบเรียมออกไซด์ของตัวอย่างแก้ว

พิจารณาภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งระดับไมโครกับปริมาณ BaO ที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวอย่างแก้วในระบบ (70-x)CRT-30K₂O-xBaO พบว่าค่าความแข็งระดับไมโครของตัวอย่างแก้วอยู่ในช่วง 4.3573 ถึง 4.6488 GPa เมื่อเพิ่มปริมาณ BaO จาก 0 ถึง 20 mol% ค่าความแข็งระดับไมโครมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความแข็งระดับไมโครเป็นสมบัติที่บ่งบอกถึงความต้านทานของวัสดุต่อการแปรรูปอย่างถาวรในบริเวณเฉพาะที่ เช่น การเกิดรอยบวมหรือรอยขีดข่วน ทั้งนี้ผลจากการเพิ่มปริมาณ BaO มากขึ้นในสัดส่วนองค์ประกอบแก้วจะส่งผลให้เกิดการขาดของพันธะโครงข่ายหลักที่จับกับออกซิเจน เนื่องจาก BaO ทำหน้าที่เป็นตัวปรับปรุงโครงสร้างแก้ว โดยการขาดของพันธะในโครงข่ายหลักจะทำให้อะตอมของ Ba เข้าไปสร้างพันธะกับออกซิเจนในตำแหน่งที่เคยสร้างพันธะร่วมกับโครงข่ายหลักเกิดเป็นพันธะไอออนิกที่แข็งแรงมากขึ้นในโครงสร้างแก้ว [57] ดังนั้นจึงส่งผลให้ความแข็งระดับไมโครของตัวอย่างแก้วในระบบนี้มีค่าเพิ่มมากขึ้น

4.4 สมบัติโครงสร้างของตัวอย่างแก้ว

สมบัติโครงสร้างของแก้ว CRT-K₂O-BaO ถูกวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง FTIR Spectroscopy ซึ่งทำการวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวอย่างแก้วในระบบนี้ที่ช่วงเลขคลื่นตั้งแต่ 400 ถึง 2,000 cm⁻¹ ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืน (Absorbance) รังสีอินฟราเรดกับเลขคลื่น (Wave number) ของตัวอย่างแก้ว

ภาพที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวอย่างแก้วที่เลขคลื่นตั้งแต่ 400 ถึง 2,000 cm^{-1} พบว่าที่เลขคลื่นในช่วง 400 ถึง 1,200 cm^{-1} เป็นช่วงตำแหน่งการสั่นของพันธะในกลุ่ม Silicate networks (SiO_3 , SiO_4) และกลุ่ม Lead networks (PbO_3 , PbO_4) [58-61] เลขคลื่นในช่วง 440 ถึง 520 เป็นแถบการสั่นของพันธะ Si–O–Si แบบ bending [47, 58-60, 62-67] และพันธะ Pb–O [59-61] นอกจากนี้ยังเป็นตำแหน่งการสั่นของพันธะในกลุ่มของแคทไอออน (Modifier cations) [58, 60, 67-68] ที่เลขคลื่น 620 ถึง 690 cm^{-1} เป็นตำแหน่งการสั่นของพันธะ Si–O–Si และ O–Si–O แบบ bending [62, 66-67, 69] ที่เลขคลื่นประมาณ 760 ถึง 780 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นของพันธะ Si–O–Pb และ Si–O–Si แบบ Symmetric stretching [59, 64, 66-67, 64] ที่เลขคลื่นประมาณ 860 ถึง 880 cm^{-1} เป็นตำแหน่งการสั่นของพันธะ Pb–O ในกลุ่ม PbO_4 และ PbO_3 [58-60, 64] ซึ่งพบว่าที่ตำแหน่งนี้ตัวอย่างแก้วที่มีปริมาณ BaO 0% มีพีคที่เด่นชัดมากกว่าตัวอย่างแก้วอื่น ๆ ที่เลขคลื่นประมาณ 915 ถึง 930 cm^{-1} เป็นตำแหน่งการสั่นของพันธะในกลุ่ม Si–O–Al และ Si–O–Pb [65, 69-71] ที่เลขคลื่นในช่วง 980 ถึง 1,080 cm^{-1} เป็นตำแหน่งการสั่นของพันธะ Si–O–Si แบบ Asymmetric stretching และพันธะ Si–O–Pb [58-59, 62, 64, 69-71] ที่ตำแหน่ง 1160 cm^{-1} เกี่ยวข้องกับพันธะ SiO_3 [64, 67, 69] เป็นบริเวณที่เกิด NBOs ที่ตำแหน่ง เลขคลื่น 1,425 cm^{-1} เป็นสเปกตรัมการสั่นของพันธะในกลุ่มของคาร์บอนेट หรือ C–H [58, 65, 67] ที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 1,620 ถึง 1,660 cm^{-1} เป็นตำแหน่งการสั่นของพันธะในกลุ่มของ hydroxyl หรือ H–O–H [47, 58, 61-62, 65-67, 69] และสำหรับพันธะที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงต่อสมบัติโครงสร้างของแก้วในระบบนี้คือพันธะในกลุ่มโครงข่ายซิลิเกต (Silicate networks) และกลุ่มของแคทไอออน (Modifier cations) แสดงดังตารางที่ 4.4

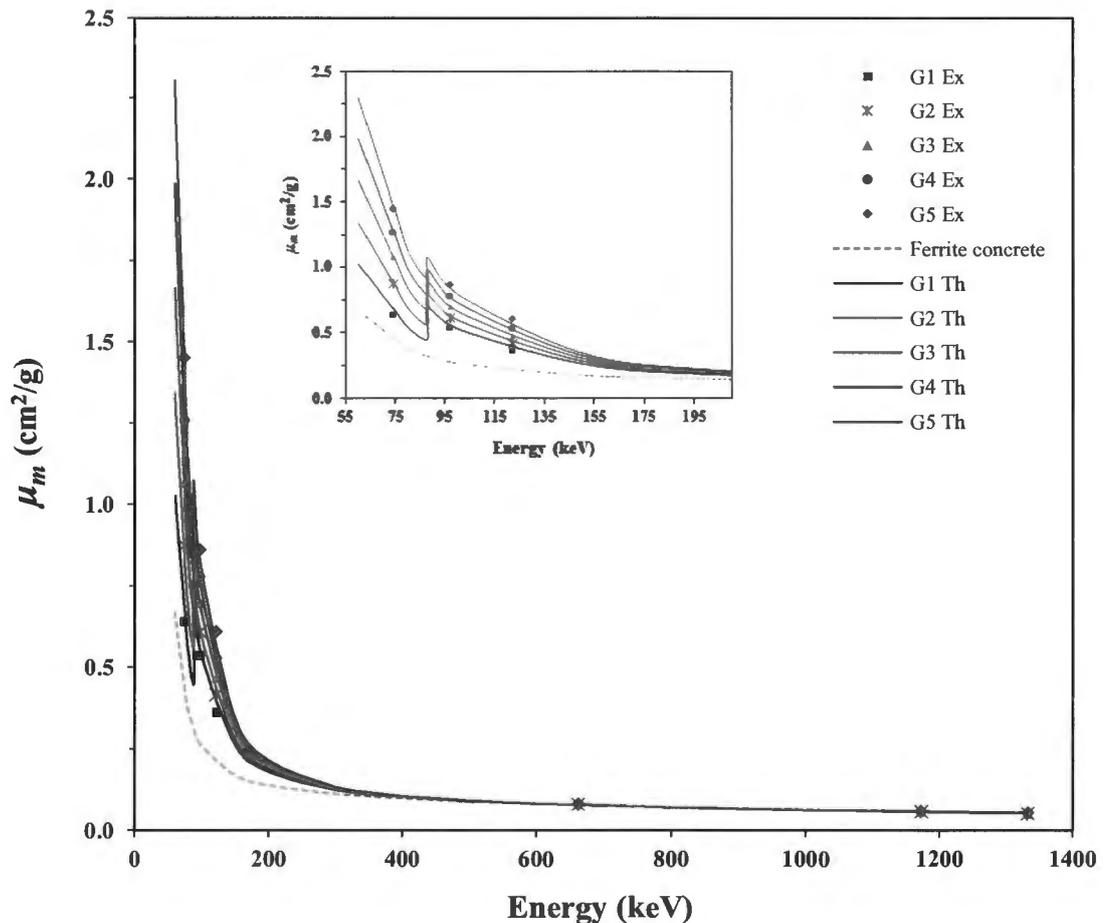
ตารางที่ 4.4 ข้อมูลพันธะโครงข่ายที่พบในตัวอย่างแก้วระบบ CRT– K_2O –BaO

Wave number (cm^{-1})	Assignment
Silicate network	
440–520	Si–O–Si bending vibrations [47,58-60,62-67]
620–690	Si–O–Si and O–Si–O bending modes [62,66-67,69]
760–850	Si–O–Si symmetrical Stretching [59,64,66-67,64]
980–1080	Si–O–Si asymmetric Stretching [58-59,62,64,69-71]
1160	Si–O stretching vibration of trigonal [SiO_3] [64,67,69]
Modifier cations	
400–500	Covalents of Pb–O, Ca–O, Al–O, Mg–O [58,60,67-68]
460–475	Pb–O bonds in [PbO_4] structural units [58-61]
860–880	Pb–O bonds in [PbO_4] structural units [58-60,64]
915–930, 1030	Pb–O bonds in [PbO_3] structural units [65,58-59,64,69-71] Al–O bonds in [AlO_3] structural units

โครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวอย่างแก้วเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ CRT และ BaO พบว่ามีความสอดคล้องกับผลของความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ซึ่งความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ทั้งตามยาวและเฉือนของตัวอย่างแก้วมีแนวโน้มลดลง จากการศึกษาศสมบัติโครงสร้างของแก้วระบบนี้ ด้วยการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดพบว่าเกิดแถบการสั่นของพันธะ Si-O-Si Si-O-Pb และ Pb-O ขึ้นที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 860 ถึง 880 cm^{-1} ซึ่งพบว่าในตัวอย่างแก้วพื้นฐานที่ยังไม่มีการเพิ่มปริมาณ BaO (BaO 0%) ลงไปแสดงให้เห็นสัญญาณเป็นพีคที่เด่นชัด และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณ BaO มากขึ้นจะทำให้สัญญาณที่บริเวณนี้มีความเด่นชัดน้อยลงและสัญญาณที่ได้เกิดการเลื่อน (Shift) หรือแยกเฟสไปเล็กน้อย ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการเกิด NBOs ขึ้นในพันธะที่ตำแหน่งนี้ ดังนั้น การเพิ่มปริมาณ BaO มากขึ้นในสัดส่วนแก้วจะทำให้จำนวนพันธะของโครงข่ายหลักหรือโครงข่ายในกลุ่มของ Silicate น้อยลง และส่งผลให้ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของตัวอย่างแก้ว มีค่าน้อยลงตามไปด้วยนั่นเอง เช่นเดียวกันกับแถบการดูดกลืนรังสีของพันธะ Si-O-Pb และ Si-O-Si แบบยึดที่ไม่สมมาตร ในตำแหน่งแถบการสั่นที่เลขคลื่นประมาณ 980 ถึง 1,080 cm^{-1} โดยที่ตำแหน่งนี้เป็นแถบที่ค่อนข้างกว้าง ซึ่งแถบความกว้างของสัญญาณการเกิดพันธะสามารถบ่งบอกถึงจำนวนพันธะที่เกิดขึ้นว่าเกิดได้มากหรือน้อย กล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ ถ้าแถบความกว้างมีขนาดกว้างมากแสดงว่ามีการสร้างพันธะมากขึ้นหรือมีการลดลงของ NBOs แต่ถ้าแถบความกว้างมีขนาดกว้างน้อยลงแสดงว่าเกิดการสร้างพันธะได้น้อยลงหรือมีการเพิ่มขึ้นของ NBOs จากสังเกตแถบการสั่นในบริเวณนี้พบว่าตัวอย่างแก้วพื้นฐานที่ยังไม่มีการเพิ่มปริมาณ BaO (BaO 0%) มีระยะแถบที่กว้างและเด่นชัดมากกว่าตัวอย่างแก้วอื่น ๆ โดยเมื่อเพิ่มปริมาณ BaO มากขึ้นอาจจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวพันธะหรือมุมพันธะเนื่องจากเกิด NBOs และเป็นผลให้ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกทั้งตามยาวและเฉือนของตัวอย่างแก้วมีค่าลดลง จากข้อมูลความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก พบว่ามีความสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวอย่างแก้ว แสดงว่าการศึกษาโครงสร้างของตัวอย่างแก้วโดยใช้เทคนิค FTIR สนับสนุนผลความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของตัวอย่างแก้ว

4.5 สมบัติการกำบังรังสีของตัวอย่างแก้ว

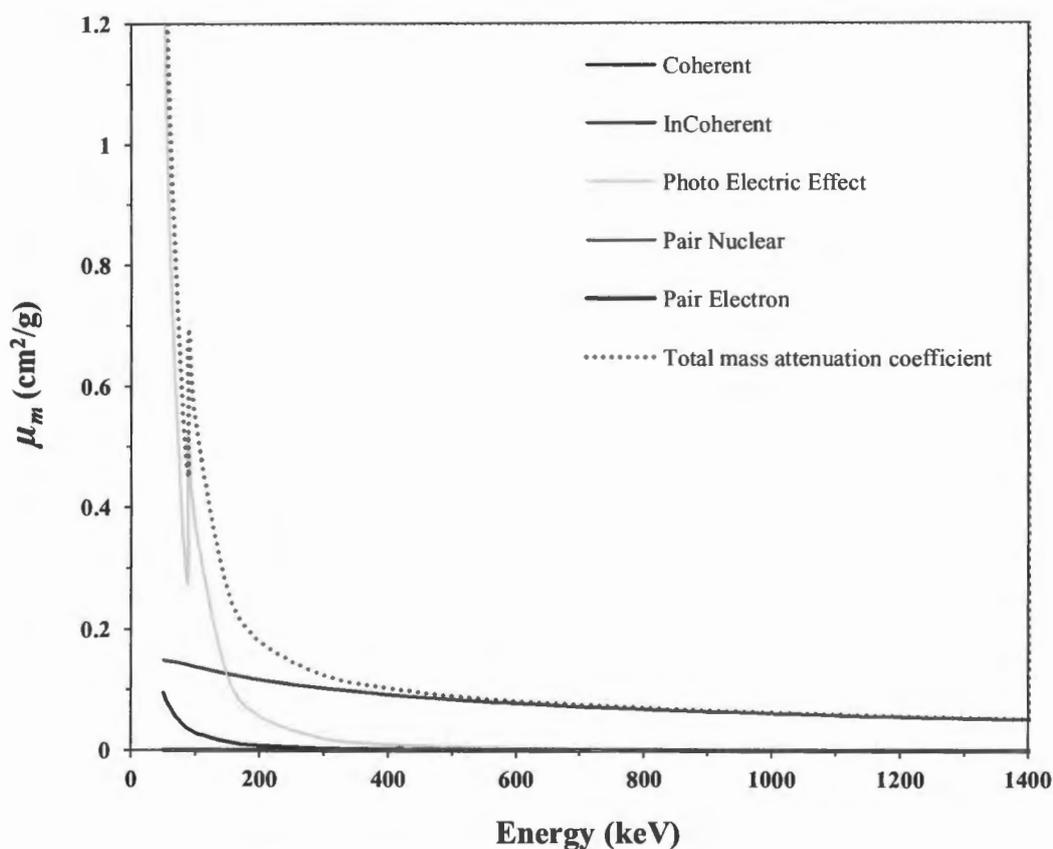
สำหรับคุณสมบัติการกำบังรังสีของระบบแก้ว (70-x)CRT-30K₂O-xBaO จะศึกษาในเทอมของสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (μ_m) และความหนาวัสดุที่ทำให้รังสีลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง (HVL) โดยจะทำการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลองกับค่าทางทฤษฎีที่คำนวณโดยใช้โปรแกรม WinXCom นอกจากนี้แล้วยังมีการเปรียบเทียบกับเฟอร์ไรต์คอนกรีต (Ferrite concrete) เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำแก้วรีไซเคิล CRT ที่มีส่วนผสมของ BaO และ K₂O ไปใช้เพื่อกำบังรังสี โดยจะทำการทดสอบที่พลังงาน 74.228 97.143 122 662 1173 และ 1332 keV ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นดังภาพที่ 4.7 และ 4.8



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วและเฟอร์ไรต์คอนกรีต (Ferrite concrete) ที่พลังงานต่าง ๆ

พิจารณาภาพที่ 4.7 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วจากการทดลอง (Ex) ทฤษฎี (Th) และ Ferrite concrete ที่พลังงานต่าง ๆ พบว่าที่พลังงานต่ำ ๆ ตั้งแต่ 74.228 ถึง 122 keV ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วจะมีค่าค่อนข้างมาก ที่พลังงานสูงมากขึ้น ตั้งแต่ 662 ถึง 1332 keV ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลจะมีค่าลดลงและเริ่มคงที่ ลักษณะการเกิดเช่นนี้เป็นเหตุผลเนื่องมาจากอันตรกิริยาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างรังสีกับแก้วในระบบนี้ ซึ่งพบว่าอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริกเกิดได้มากที่พลังงานต่ำ ๆ และเกิดได้น้อยที่พลังงานสูงขึ้นไป จึงมีผลทำให้สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วในระบบนี้มีค่ามากที่พลังงานต่ำ และมีค่าลดลงจนเริ่มคงที่เมื่อพลังงานสูงมากขึ้น ซึ่งอันตรกิริยาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างรังสีกับแก้วในระบบนี้แสดงให้เห็นดังภาพที่ 4.8 และพบว่าที่พลังงานประมาณ 88 keV ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากรังสีทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากอะตอม และรังสีหรือโฟตอนจะต้องมีพลังงานสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน เรียกบริเวณที่เกิดขึ้นนี้ว่า “Absorption edge” โดยจะมีสัมประสิทธิ์ในการเกิดอันตรกิริยาสูงสุดเมื่อมีพลังงานใกล้เคียงกับ absorption edge และจะมีค่าลดลงเมื่อรังสีที่เข้าทำอันตรกิริยามีพลังงานสูงขึ้น โดยมีค่าแตกต่างกันสำหรับอิเล็กตรอนแต่ละชั้นและแตกต่างกันในแต่ละธาตุ นอกจากนี้ยังพบว่าสัมประสิทธิ์การลดทอน

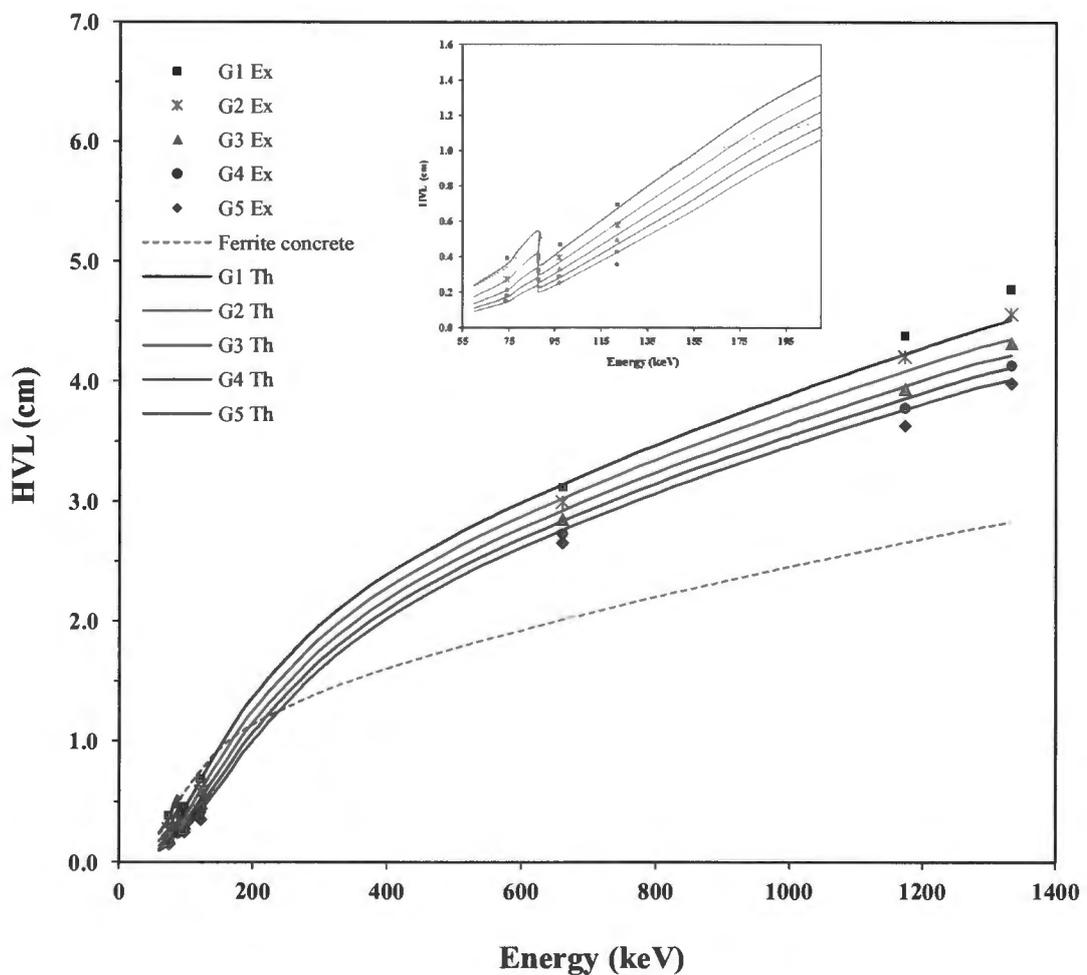
เชิงมวลของตัวอย่างแก้วมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ BaO ($G5 > G4 > G3 > G2 > G1$) นั้นแสดงว่าคุณสมบัติการกำบังรังสีในเทอมของสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลขึ้นอยู่กับพลังงานและปริมาณ BaO ที่เพิ่มขึ้นในตัวอย่างแก้วระบบนี้ เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลองกับค่าทางทฤษฎี พบว่า ค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎีมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อทำการเปรียบเทียบตัวอย่างแก้วกับ Ferrite concrete พบว่าที่พลังงานต่ำ ๆ ในช่วงพลังงานตั้งแต่ 74.228 ถึง 122 keV สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วมีค่ามากกว่า Ferrite concrete ที่พลังงานสูงขึ้น ในช่วงพลังงาน 662 ถึง 1332 keV พบว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วมีค่าใกล้เคียงกับ Ferrite concrete ดังนั้นคุณสมบัติทางด้านรังสีในเทอมของสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลนี้ ตัวอย่างแก้วมีคุณสมบัติการกำบังรังสีที่ดีกว่า Ferrite concrete ในช่วงพลังงาน 74.228 ถึง 122 keV แต่ในช่วงพลังงาน 662 ถึง 1332 keV พบว่าตัวอย่างแก้วกับ Ferrite concrete มีคุณสมบัติการกำบังรังสีที่ใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 4.8 การจำลองอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างรังสีกับตัวอย่างแก้วด้วยโปรแกรม WinXCom

ภาพที่ 4.8 แสดงให้เห็นถึงอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างรังสีกับตัวอย่างแก้ว โดยพบว่าอันตรกิริยาแบบการผลิตอนุภาคคู่ (Pair nuclear และ Pair electron) เกิดขึ้นได้น้อยมาก ๆ และมีค่าไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อพลังงานเปลี่ยนไป ส่วนอันตรกิริยาแบบการกระเจิงคอมป์ตัน (Coherent

และ InCoherent) เกิดได้มากที่พลังงานสูง ๆ อันตรกิริยาที่เปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดคือปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก โดยจะมีค่ามากที่พลังงานต่ำ ๆ และมีค่าน้อยลงที่พลังงานสูงขึ้น และเริ่มคงที่ที่พลังงานสูงขึ้นมา ๆ นั้นเป็นเพราะว่าที่พลังงานตั้งแต่ 1.20 MeV เลขอะตอมของแต่ละธาตุจะไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลทำให้มีค่าเท่ากันหมด อันตรกิริยารวมที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้ว ดังนั้นเหตุผลที่ทำให้สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างแก้วมีค่ามากที่พลังงานต่ำ ๆ และมีค่าน้อยลงที่พลังงานสูงขึ้น เป็นผลมาจากอันตรกิริยาทั้งหมดที่เกิดขึ้นระหว่างรังสีกับแก้วระบบนั่นเอง



ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาที่ทำให้รังสีลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง (HVL) ของตัวอย่างแก้วและเฟอร์ไรต์คอนกรีต (Ferrite concrete) ที่พลังงานต่าง ๆ

ความหนาวัสดุที่ทำให้รังสีลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง (HVL) หมายถึง ค่าที่บ่งบอกขนาดความหนาของวัสดุเมื่อนำไปใช้กำบังรังสีแล้วทำให้รังสีลดลงเหลือเพียงครึ่งเดียว ซึ่งค่านี้มีความสำคัญอย่างมากต่อการผลิตวัสดุเมื่อมีการนำวัสดุนั้นไปใช้เป็นวัสดุในการกำบังรังสี สำหรับค่า HVL ของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลองและคำนวณได้จากโปรแกรม WinXCom รวมทั้งค่า HVL ของ Ferrite concrete ที่พลังงานต่าง ๆ แสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าที่พลังงานต่ำ ๆ ค่า HVL ของตัวอย่างแก้วจะมี

ค่าน้อย ที่พลังงานสูงมากขึ้น HVL จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยทั่วไปแล้วค่า HVL ยิ่งมีค่าน้อย ๆ จะมีศักยภาพในการกำบังรังสีที่ดีกว่าค่า HVL มากๆ เพราะ ค่า HVL น้อย ๆ จะหมายความหนาของวัสดุ น้อยๆ ก็สามารถใช้กันหรือกำบังรังสีให้ลดลงเหลือครึ่งหนึ่งได้ ส่วนค่า HVL มาก ๆ ก็หมายถึงจะต้อง ใช้ความหนาวัสดุมาก ๆ ถึงจะสามารถใช้ในการกำบังรังสีและทำให้มีรังสีลดลงเหลือครึ่งหนึ่งได้นั่นเอง นอกจากนี้แล้วยังพบว่า ค่า HVL จะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณ BaO นั้นแสดงว่า คุณสมบัติการ กำบังรังสีในเทอมของ HVL ขึ้นอยู่กับพลังงานและปริมาณ BaO ในตัวอย่างแก้วระบบนี้ และเมื่อทำ การเปรียบเทียบค่า HVL ของตัวอย่างแก้วที่ได้จากการทดลองกับค่าทางทฤษฎี พบว่า ค่าที่ได้จากการ ทดลองกับค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎีมีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามค่าที่วัดได้จากการทดลองมีค่า มากกว่าค่าที่คำนวณด้วยโปรแกรม WinXCom เล็กน้อย ซึ่งจะสังเกตได้อย่างชัดเจนที่พลังงานสูงๆ นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบตัวอย่างแก้วกับ Ferrite concrete พบว่าที่พลังงานต่ำ ๆ ในช่วง พลังงาน 74.228 ถึง 122 keV ตัวอย่างแก้วมีค่า HVL น้อยกว่า Ferrite concrete แต่จะสังเกตเห็น ว่าตัวอย่างแก้วที่ G1 มีค่า HVL ใกล้เคียงกันกับ Ferrite concrete นั้นอาจจะเป็นเพราะว่าตัวอย่าง แก้ว G1 ไม่มีการเติมของ BaO (BaO 0%) ทำให้มีศักยภาพในการกำบังรังสีน้อยกว่าตัวอย่างแก้วอื่น ๆ ที่มีปริมาณ BaO เพิ่มมากขึ้นนั่นเอง และที่พลังงานสูงขึ้นไปในช่วงพลังงาน 662 ถึง 1332 keV พบว่า ตัวอย่างแก้วมีค่า HVL มากกว่า Ferrite concrete ดังนั้นคุณสมบัติทางด้านรังสีในเทอมของ HVL ตัวอย่างแก้วมีคุณสมบัติการกำบังรังสีที่ดีกว่า Ferrite concrete ในช่วงพลังงาน 74.228 ถึง 122 keV แต่ในช่วงพลังงาน 662 ถึง 1332 keV พบว่า Ferrite concrete มีคุณสมบัติการกำบังรังสีที่ดีกว่า ตัวอย่างแก้วในระบบนี้ที่ระดับความหนาเดียวกัน ถ้าต้องการให้แก้วมีคุณสมบัติที่เท่าเทียมกันต้องเพิ่ม ความหนาของตัวอย่างแก้วให้มากกว่า Ferrite concrete หรืออาจจะปรับปรุงคุณสมบัติแก้วโดยการ เปลี่ยนแปลงองค์ประกอบ เพื่อนำวัสดุแก้ว CRT ไปใช้เป็นวัสดุกำบังรังสีที่มีคุณสมบัติดีขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

ตัวอย่างแก้วในระบบ $(70-x)\text{CRT}-30\text{K}_2\text{O}-x\text{BaO}$ ที่เตรียมขึ้นมีลักษณะโปร่งแสง เป็นเนื้อเดียวกัน และไม่มีรูพรุนหรือฟองอากาศเกิดขึ้นในเนื้อแก้ว ยกเว้นในตัวอย่างที่มีปริมาณ BaO 0 mol% พบว่ามีฟองอากาศเกิดขึ้นในเนื้อแก้วเล็กน้อย เมื่อมีการเพิ่มปริมาณ BaO มากขึ้นจะมีผลให้ตัวอย่างแก้วหลอมเหลวได้ง่ายขึ้น และ BaO จะมีผลให้แก้วในระบบนี้เปลี่ยนจากสีฟ้าเป็นสีเหลืองมากขึ้น โดยอัตราส่วนของ BaO มากที่สุดและอัตราส่วนของ CRT น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดเป็นเนื้อแก้วได้คือ 20 และ 50 mol% ตามลำดับ สำหรับความหนาแน่นของตัวอย่างแก้วในระบบนี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ BaO ส่วนปริมาตรโดยโมลกลับมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณ BaO

ค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิคทั้งตามยาวและเฉือนของแก้วในระบบนี้มีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจาก BaO มีผลทำให้พันธะโครงข่ายหลักของแก้วที่จับกับออกซิเจนขาดหายไป โดยอะตอมของ Ba เข้ามาขัดขวางทางเดินคลื่นเสียงทำให้คลื่นเสียงอัลตราโซนิคเคลื่อนที่ไปได้ลำบากมากขึ้นและส่งผลให้ความเร็วคลื่นเสียงมีค่าลดลงนั่นเอง อย่างไรก็ตามค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่าความแข็งระดับไมโครของตัวอย่างแก้วมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากอะตอมของ Ba เข้าไปสร้างพันธะกับอะตอมของออกซิเจนเกิดเป็นพันธะไอออนิกที่แข็งแรงมากขึ้น ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ค่าความยืดหยุ่นและความแข็งระดับไมโครของตัวอย่างแก้วมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้แล้วเราพบว่าอัตราส่วนปริมาตรของของตัวอย่างแก้วมีค่าค่อนข้างคงที่อยู่ระหว่าง 0.2501 ถึง 0.2552 ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นแบบ High cross-link density

การศึกษาสมบัติโครงสร้างของแก้ว CRT-K₂O-BaO ด้วยสเปกโตรสโกปีชนิด FTIR พบว่า เกิดการสั่นของพันธะขึ้นที่เลขคลื่นในตำแหน่งต่าง ๆ พันธะที่เกิดขึ้น คือ Si-O-Si, O-Si-O, Si-O-Al, Si-O-Pb, Pb-O, Ca-O, Al-O, Mg-O และ H-O-H โดยพบว่าโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวอย่างแก้วเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ CRT และ BaO มีความสอดคล้องกับผลของความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิค ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากความเข้มของพีคหรือแถบความกว้างของพันธะการสั่น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการสร้างหรือการทำลายพันธะในโครงสร้างแก้ว โดยการสร้างหรือทำลายพันธะในโครงสร้างแก้วนี้จะมีผลทำให้ความยาวพันธะหรือมุมพันธะเปลี่ยนแปลงไป แล้วทำให้เกิดเห็นการเลื่อนของสัญญาณ และความเข้มของพีคหรือความกว้างของแถบการสั่นจะแตกต่างกัน ด้วย จากการสังเกตเราพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ BaO มากขึ้น ความเข้มพีคหรือความกว้างแถบการสั่นของพันธะ Si-O-Si Si-O-Pb และ Pb-O ในตำแหน่งเลขคลื่นที่ประมาณ 860 ถึง 880 cm⁻¹ และที่ประมาณ 980 ถึง 1,200 cm⁻¹ มีค่าลดลงและเกิดการเลื่อนของสัญญาณ ดังนั้นจึงมีผลให้ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิคในแก้วมีค่าลดลงด้วย

การทดสอบคุณสมบัติทางรังสีที่ระดับพลังงานของโฟตอน 74.228, 97.143, 122, 662, 1173 และ 1332 keV พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนค่า HVL มีค่าลดลงตามปริมาณ BaO และยังพบอีกว่าสมบัติทางรังสีทั้งสองเทอมมีค่าใกล้เคียงกับผลที่คำนวณได้จาก

ทฤษฎี นอกจากนี้แล้วเมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางรังสีของตัวอย่างแก้วกับคอนกรีตมาตรฐาน พบว่าตัวอย่างแก้วมีสมบัติการก่้างรังสีที่ดีกว่าคอนกรีตมาตรฐานในช่วงพลังงาน 74.228 ถึง 122 keV และในช่วงพลังงาน 662 ถึง 1332 keV พบว่ามีคุณสมบัติการก่้างรังสีที่ใกล้เคียงกันกับคอนกรีตมาตรฐาน เมื่อเปรียบเทียบค่า HVL ของตัวอย่างแก้วกับคอนกรีตมาตรฐาน พบว่าในช่วงพลังงาน 74.228 ถึง 122 keV แก้วที่ได้จากการวิจัยมีค่า HVL น้อยกว่าประมาณ 2 เท่า และที่พลังงานในช่วง 662 ถึง 1332 keV แก้วที่ได้จากการวิจัยมีค่า HVL มากกว่าประมาณ 1.5 เท่า ซึ่งแก้วที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้พัฒนาต่อเป็นกระจกก่้างรังสีเอ็กซ์สำหรับเครื่องเอ็กซ์เรย์วินิจฉัยโรค แต่ถ้าหากต้องการนำแก้วระบบนี้ไปใช้ก่้างรังสีหรือผนึกกากัมมันตรังสีที่มีพลังงานสูงมากขึ้นให้มีประสิทธิภาพเทียบเท่าคอนกรีตมาตรฐานจำเป็นต้องเพิ่มความหนาของตัวอย่างแก้วในระบบนี้ให้หนามากขึ้นประมาณ 1.5 เท่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทำวิจัยในครั้งนี้ปัญหาที่พบคือการเตรียมสูตรแก้วเพื่อให้ได้แก้วที่มีความโปร่งใส และไม่มีฟองอากาศเกิดขึ้นในเนื้อแก้ว แนวทางการแก้ไขคือปรับสูตรแก้วโดยการเติมสารไล่ฟองลงไปเพื่อให้ได้เนื้อแก้วที่มีลักษณะไม่มีฟองและมีความโปร่งใสมากขึ้น จากการทดลองเนื้อแก้วที่มีปริมาณของแบเรียมออกไซด์มากขึ้นจะให้สีเหลืองมากขึ้นซึ่งถ้ามีสีมากเกินไปอาจจะไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นกระจกก่้างรังสี แนวทางการแก้ไขคืออาจจะต้องเติมสารฟอกสีให้มากขึ้นเพื่อให้ได้เนื้อแก้วที่มีความโปร่งใสเหมาะแก่การนำไปทำเป็นกระจกก่้างรังสี

จากการทดสอบทางด้านรังสีพบว่าตัวอย่างแก้ว CRT ที่มีส่วนผสมของ BaO จะก่้างรังสีได้ดีกว่าคอนกรีตมาตรฐานที่ระดับพลังงานในช่วง 74.228 ถึง 122 keV แต่จะด้อยกว่าเมื่อเทียบในช่วงพลังงาน 662 ถึง 1332 keV หากต้องการให้มีสมบัติการก่้างรังสีเทียบเท่ากับคอนกรีตมาตรฐานจะต้องมีความหนาที่มากกว่าซึ่งอาจจะทำให้สิ้นเปลืองต้นทุนมากขึ้น แนวทางการแก้ไขคืออาจจะต้องปรับสูตรแก้วโดยการเติมธาตุหนักชนิดอื่นเพิ่มเข้าไปเพื่อให้แก้วตัวอย่างมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นเพื่อให้มีคุณสมบัติในการก่้างรังสีได้ดีขึ้น

อย่างไรก็ตามตัวอย่างแก้วที่เตรียมได้นี้ควรมีการศึกษาคุณสมบัติเพิ่มเติม เช่น ศึกษาผลของรังสีต่อสมบัติต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างแก้วหลังการฉายรังสี และศึกษาคุณสมบัติทางแสงด้วยเทคนิค UV-visible เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- [1] ณิชชา บุรณสิงห์. **ขยะอิเล็กทรอนิกส์**. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานเลขาธิการสภาผู้แทนราษฎร, 2559.
- [2] C.S. Poon. "Management of CRT glass from discarded computer monitors and TV sets", **Waste Manage.** 28(9): 1499; June, 2008.
- [3] F. Andreola and et al. "CRT glass state of the art A case study: recycling in ceramic glazes", **Journal of the European Ceramic Society.** 27(2-3): 1623-1629; June, 2007.
- [4] I.C. Nnorom and et al. "Global disposal strategies for waste cathode ray tubes. Resources", **Resources: Conservation and Recycling.** 55(3): 275-290; June, 2011.
- [5] Q. Xu and et al. "Cathode ray tube (CRT) recycling: Current capabilities in China and research progress", **Waste Management.** 32(8): 1566-74; August, 2012.
- [6] นรัญญา บางอ้อ และวาวไพลิน ซ่อวิเชียร. (2555) "ประโยชน์มหาศาลจากพลังงานนิวเคลียร์", **ที่ไม่ใช่แค่การผลิตกระแสไฟฟ้า**. <http://www.vowpailin.com/2012/09/nuclear-energy/>. พฤศจิกายน, 2559.
- [7] B. Caddy. **Forensic Examination of Glass and Paint: Analysis and Interpretation**. London: CRC Press, 2001.
- [8] สุรศักดิ์ โกสิยพันธ์. "วัสดุศาสตร์", กรุงเทพฯ: เอกสารประกอบการศึกษาวิชาชั้น 461 ภาควิชาช่างปั้นดินเผา คณะวิชาอุตสาหกรรมศิลป์ วิทยาลัยครูพระนคร, 2534.
- [9] บริการข้อมูลวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแก้ว. "แก้ว", **ข้อมูลแก้ว**. <http://www2.mtec.or.th/research/GSAT/Glassweb/property.html>. สิงหาคม, 2559.
- [10] ยุทธชัย ใจเฉื่อย. **การศึกษาเลขอะตอมยังผลของเครื่องวัดปริมาณรังสีแบบเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ชนิด 90RWG-10Na₂O-0.01Cu₂O**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2558.
- [11] W.C. Taylor and S. Toth. "The constituents of marine sponges .8. minor diterpenoid metabolites of aplysilla-rosea and A. VAR. sulfurea", **Australian Journal of Chemistry.** 50(9): 895-902; May, 1997.
- [12] ศิริรัตน์ ใจดี. **ความเข้มข้นของนีโอติเนียมออกไซด์ที่มีผลต่อสีของแก้วที่เตรียมจากทรายมูล**. โครงการพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2547.
- [13] สุภาสินี ลิ้มปานภาพ. "องค์ประกอบของแก้ว", **สมบัติทั่วไปของเซรามิกส์**. <http://www.physics.kku.ac.th/315205/sites/default/files/chapter08.pdf>. สิงหาคม, 2559.
- [14] เพลินใจ ฝ่ายสงฆ์. **ผลของนีโอติเนียมออกไซด์ต่อสีของแก้ว**. โครงการพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2547.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [15] จรรยา โคตรหา. ผลของยูเรเนียมต่อสมบัติทางโครงสร้างและทางแสงของแก้วตะกั่วโบโรซิลิเกต. โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2555
- [16] ประสิทธิ์ ปุระชาติ. “สมบัติและชนิดของแก้ว”, การเป่าแก้วเบื้องต้น. มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี, 2549.
- [17] เทพีวรรณ จิตรวัชรโกมล. (2556) “แก้วตะกั่วกับพลอย”, กรมวิทยาศาสตร์บริการ. <http://glass.dss.go.th/publication/country/ArtC-7.pdf>. มกราคม, 25560.
- [18] Wendy Gabriel. (2557). “The Necessity in Choosing a Responsible CRT Glass”, **recyclenation**. <http://recyclenation.com/2014/02/necessity-choosing-right-recycler-crt-glass>. December, 2015.
- [19] M.S. Gaafar and S.Y. Marzonk. “Mechanical and structural studies on sodium borosilicate glasses doped with Er_2O_3 using ultrasonic velocity and FTIR spectroscopy”, **Physica B: Condensed Matter**. 388(1–2): 294–302; September, 2007.
- [20] K.J. Singh and et al. “Gamma-ray shielding and structural properties of $PbO-SiO_2$ glasses”, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**. 266(6): 944–948; February, 2008.
- [21] เรวัตน์ เหล่าไพบูลย์. “หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับคลื่นเสียง”, ใน **Selected Topic in Materials Science**. คณะวิทยาศาสตร์: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2556.
- [22] อำนวย งามเกตุสุข. “ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด”, เอกสารทางวิชาการ วิชาความแข็งแรงของวัสดุ. http://www.stc.ac.th/stc/index.php?option=com_content&view=article&id=123:-2104-2114-&catid=44:2009-07-02-10-24&Itemid=48. 25 มีนาคม, 2560.
- [23] V. Rajendran and et al. “Characterisation of semiconducting $V_2O_5-Bi_2O_3-TeO_2$ glasses through ultrasonic measurements”, **Journal of Non-Crystalline Solids**. 320(1–3): 195–209; February, 2003.
- [24] ชัยขารี สีเทา. สมบัติความยืดหยุ่นและโครงสร้างของแก้วกระจกหน้าต่างที่ถูกรังสีเคลดด้วยการเติม ไอรอนออกไซด์ วาเนเดียมออกไซด์ โทเทเนียมออกไซด์ และโคบอลต์ออกไซด์ ภายใต้อิทธิพลของการฉายรังสีแกมมา. โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2556.
- [25] สำนักงานเลขานุการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. “เครื่อง FTIR”, **Sec Magazine**. www.sec.psu.ac.th/home/ebook/sec-magazine.ftir/secmagazine-2557-04-ftir.pdf. 7 มกราคม, 2560.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [26] ชีรยุทธ วิไลวัลย์ และ วรวรรณ พันธุนาวิน. “อินฟราเรด สเปกโตรสโคป”, ใน การตรวจสอบโครงสร้างสารด้วย FTIR. คณะวิทยาศาสตร์: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [27] พงศกร สุวรรณเดชา. **ฟิลิกส์นิวเคลียร์**. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2540.
- [28] สมพร จงคำ. **พลังงานนิวเคลียร์กับการพัฒนาประเทศ**. กรุงเทพฯ: สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2542.
- [29] ธนาภรณ์ ทำสะอาด. **การพัฒนาหัววัดรังสีแบบเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์จากกระจกหน้าต่างที่ถูกรังสีเคลือบโดยการเจือด้วยคอปเปอร์ออกไซด์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2558.
- [30] Nuclear e-cology. “ปลอดรังสีเอ็กซ์”, **การทำให้เกิดรังสีเอ็กซ์**. <https://sites.google.com/site/nuclearremotelaboratoryth/kar-khn-phb-rangsi-xeks/kar-thahi-keid-rangsi-xeks>. กุมภาพันธ์, 2560.
- [31] วิฑิต เกษคุปต์. “รังสีจากการสลายของไอโซโทปกัมมันตรังสี”, **รังสี**. kanchanapisek.or.th/kp6/Ebook/BOOK38/pdf/book38_7.pdf. มีนาคม, 2560.
- [32] H. Johnson and M. Tutiah. **Radiation is Part of your Life**. Canada: Atomic Energy of Canada, 1981.
- [33] ขวลิต วงษ์เอก. **Interaction of radiation with matter**. นครปฐม: มหาวิทยาลัยมหิดล, 2557.
- [34] W.E. Burcham. **Nuclear Physics: An Introduction**. London: Longman, 1973.
- [35] เชิดศักดิ์ บุตรจอมชัย. **การผลิตกระจกกำบังรังสีเอ็กซ์โดยการรีไซเคิลแก้วโบโรซิลิเกต**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2551.
- [36] L. Gerward and et al. “x-ray absorption in matter reengineering XCOM”, **Radiation physics and chemistry**. 60(1–2): 23–24; January, 2001.
- [37] P. Walczak and et al. “Mechanical properties of concrete mortar based on mixture of CRT glass cullet and fluidized fly ash”, **Procedia Engineering**. 108: 453–458; December, 2015.
- [38] H. Zhao, C.S. Poon and T.C. Ling. “Utilizing recycled cathode ray tube funnel glass sand as river sand replacement in the high-density concrete”, **Journal of Cleaner Production**. 51: 184–190; July, 2013.
- [39] C.S. Poon and T.C. Ling. “Use of recycled CRT funnel glass as fine aggregate in dry-mixed concrete paving blocks”, **Journal of Cleaner Production**. 68: 209–215; April, 2014.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [40] K.J. Singh and et al. "Gamma-ray shielding and structural properties of PbO–SiO₂ glasses", **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**. 266(6): 944–948; March, 2008.
- [41] M.H. Kharita and et al. "Shielding properties of lead and barium phosphate glasses", **Radiation Physics and Chemistry**. 81(10): 1568–1571; October, 2012.
- [42] R. Laopaiboon and et al. "Elastic properties investigation of gamma-radiated barium lead borosilicate glasses using ultrasonic technique", **Annals of Nuclear Energy**. 38(11): 2333–2337; November, 2011.
- [43] A.B. Edathazhe and H.D. Shashikala. "Effect of BaO addition on the structural and mechanical properties of soda lime phosphate glasses", **Materials Chemistry and Physics**. 184: 146-154; December, 2016.
- [44] S.Y. Marzouk. "The acoustic properties of borosilicate glass affected by oxide of rare earth gadolinium", **Physica B: Condensed Matter**. 405(16): 3395–3400; August, 2010.
- [45] M.S. Gaafa and S.Y. Marzouk. "Mechanical and structural studies on sodium borosilicate glasses doped with Er₂O₃ using ultrasonic velocity and FTIR spectroscopy", **Physica B: Condensed Matter**. 388(1–2): 294–302; January 2007.
- [46] C. Bootjomchai and et al. "Gamma-ray shielding and structural properties of barium–bismuth–borosilicate glasses", **Radiation Physics and Chemistry**. 81(7): 785–790; July, 2012.
- [47] M.A. Marzouk, Y.M. Hamdy and H.A. ElBatal. "Optical and structural properties of WO₃-doped silicophosphate glasses for gamma-ray applications", **Journal of Molecular Structure**. 1056–1057: 227–232; January, 2014.
- [48] Chemical Portal. "Molecular Weight of BaO", **Molecular Weight and Elemental Composition Calculator**. <http://www.webqc.org/molecular-weight-of-BaO.html>. March, 2017.
- [49] Chemical Portal. "Molecular Weight of SiO₂", **Molecular Weight and Elemental Composition Calculator**. <http://www.webqc.org/molecular-weight-of-SiO2.html>. March, 2017.
- [50] N. Singh and et al. "Gamma-ray attenuation studies of PbO–BaO–B₂O₃ glass system", **Radiation Measurements**. 41(1): 84–88; January, 2006.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [51] H. Doweidar, G. El-Damrawi and E.F. El-Agammy. "Structural correlations in BaO–PbO–B₂O₃ glasses as inferred from FTIR spectra". **Vibrational Spectroscopy**. 73: 90-96; July, 2014.
- [52] M. Hafid. "Structure of (45–x)Na₂O–xBaO–5ZnO–50P₂O₅ glasses studied by DSC and infrared spectroscopy", **Materials Letters**. 56(4): 486–490; October, 2002.
- [53] J.E. Shelby. **Introduction to Glass Science and Technology**. London: Royal Society of Chemistry, 2005.
- [54] H.A.A. Sidek and et al. "Effect of AlF₃ on the density and elastic properties of zinc tellurite glass systems", **Materials**. 5(8): 1361–1372; August, 2012.
- [55] K.A. Matori and et al. "Studying the Effect of ZnO on Physical and Elastic Properties of (ZnO)_x(P₂O₅)_{1-x} Glasses Using Nondestructive Ultrasonic Method", **Advances in Materials Science and Engineering**. 2015: 1–6; January 2015.
- [56] C. Bootjomcha, J. Laopaiboon and R. Laopaiboon. "The effect of amount of BaO on the elastic properties of glasses prepared from recycle borosilicate glass", In **the 12th National Graduate Research Conference**. p.24–27. Khon Kaen: Khon Kaen University, 2009.
- [57] R.D. Shannon. "Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides", **Acta Crystallographica Section A**. 32: 751–767; September, 1976.
- [58] E.M.A. Khalil and et al. "Infrared absorption spectra of transition metals-doped soda lime silica glasses", **Physica B: Condensed Matter**. 405(5): 1294–1300; March, 2010.
- [59] R. Kaur, S. Singh and O.P. Pandey. "Structural variation in gamma ray irradiated PbO–Na₂O–B₂O₃–SiO₂ glasses", **Solid State Communications**. 188: 40–44; June, 2014.
- [60] C. Erdogan, M. Bengisu and S.A. Erenturk. "Chemical durability and structural analysis of PbO–B₂O₃ glasses and testing for simulated radioactive wastes", **Journal of Nuclear Materials**. 445(1-3): 154–164; February, 2014.
- [61] H.A. ElBatal and et al. "Gamma rays interactions with WO₃-doped lead borate glasses", **Materials Chemistry and Physics**. 134(1): 542–548; May, 2012.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [62] M. Wang and et al. "Structure and viscosity of soda lime silicate glasses with varying Gd_2O_3 content", **Journal of Molecular Structure**. 1063(24): 139–144; April, 2014.
- [63] 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; June, 2014.
- [64] A.M. Efimov. "Quantitative IR spectroscopy: Applications to studying glass structure and properties", **Journal of Non-Crystalline Solids**. 203: 1; August, 1996.
- [65] D. Eniu and et al. "FTIR and EPR spectroscopic investigation of calcium-silicate glasses with iron and dysprosium", **Journal of Molecular Structure**. 1084: 23–27; March, 2015.
- [66] Y.M. Hamdy, M.A. Marzouk and H.A. ElBatal. "Spectral properties and shielding behavior of gamma irradiated MoO_3 -doped silicophosphate glasses", **Physica B: Condensed Matter**. 429: 57–62; November, 2013.
- [67] F.H. ElBatal, A.M. Abdelghany and H.A. ElBatal. "Characterization by combined optical and FT infrared spectra of 3d-transition metal ions doped-bismuth silicate glasses and effects of gamma irradiation", **Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc**. 122: 461-468; March, 2014.
- [68] A.M. Abdelghany. "Role of SrO on the bioactivity behavior of some ternary borate glasses and their glass ceramic derivatives", **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**. 152: 126–133; January, 2016.
- [69] M. Arora and et al. "Radiation effects on $PbO-Al_2O_3-B_2O_3-SiO_2$ glasses by FTIR spectroscopy". **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**. 267(5): 817-820; March, 2009.
- [70] L. Stoch and M. Sroda. "Infrared spectroscopy in the investigation of oxide glasses structure", **Journal of Molecular Structure**. 511–512: 77–84; November, 1999.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [71] S. Baccaro and et al. "Analysis of structural modifications in gamma-irradiated PbO-B₂O₃-SiO₂ glasses by FTIR spectroscopy", **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**. 260(2): 613-618; July, 2007.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ ก.1 เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ ยี่ห้อ Denver Instrument ความละเอียด 0.0001 กรัม



ภาพที่ ก.2 ครกบดสาร Agate



ภาพที่ ก.3 เบ้าหลอมเซรามิกส์ที่ทำจาก Compound Clay



ภาพที่ ก.4 เตาหลอมสารอุณหภูมิ 1,800 องศาเซลเซียส ที่ใช้ในการหลอมแก้ว สร้างโดยกลุ่มวิจัยแก้ว ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



ภาพที่ ก.5 เตาอบไฟฟ้าสำหรับอบตัวอย่างแก้วอุณหภูมิสูงสุด 1,000 องศาเซลเซียส สร้างโดยกลุ่มวิจัยแก้ว ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



ภาพที่ ก.6 แม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับการขึ้นรูปแก้ว



ภาพที่ ก.7 เครื่องตัดชิ้นงาน ยี่ห้อ Benetec limited รุ่น labcut 1010



ภาพที่ ก.8 เครื่องขัดแก้ว สร้างโดยกลุ่มวิจัยแก้ว ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



ภาพที่ ก.9 เครื่อง EDS ยี่ห้อ Hitachi รุ่น S-3400N



ภาพที่ ก.10 เครื่องอัลตราโซนิก SONATEST รุ่น Sitascan 230



ภาพที่ ก.11 เครื่อง FTIR Spectrometer ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Nicolet 6700



ภาพที่ ก.12 เครื่องอัดไฮดรอลิก ยี่ห้อ Specac



ภาพที่ ก.13 ชุดอุปกรณ์สำหรับเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ FTIR



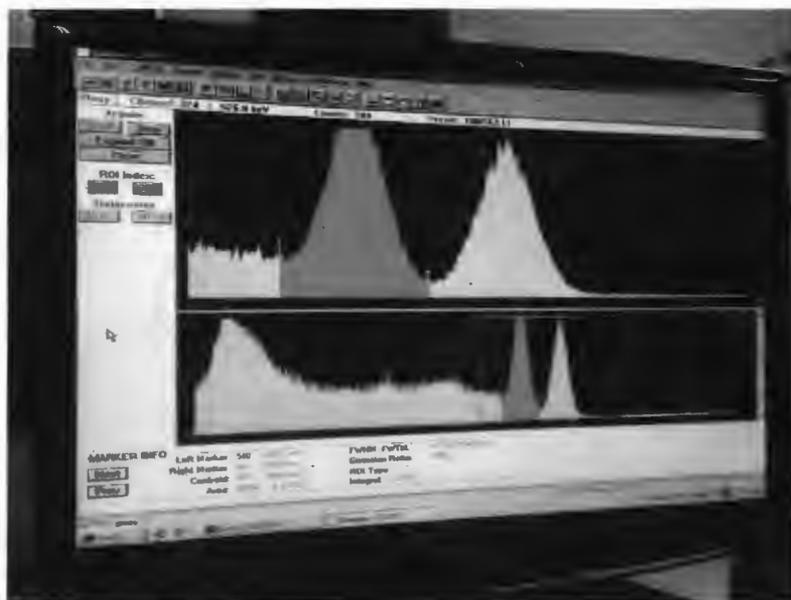
ภาพที่ ก.14 หัววัดรังสีชนิด NaI(Tl) ยี่ห้อ Canberra Model 802 พื้นที่หน้าตัด 2 x 2 นิ้ว



ภาพที่ ก.15 หัววัดรังสีชนิด CdTe Model XR-100T พื้นที่หน้าตัด 3 x 3 mm



(a)



(b)

ภาพที่ ก.16 เครื่อง MCA และหน้าจอแสดงผลของเครื่อง MCA



ภาพที่ ก.17 การจัดอุปกรณ์สำหรับการวัดสมบัติทางรังสีด้วยวิธี Narrow beam transmission

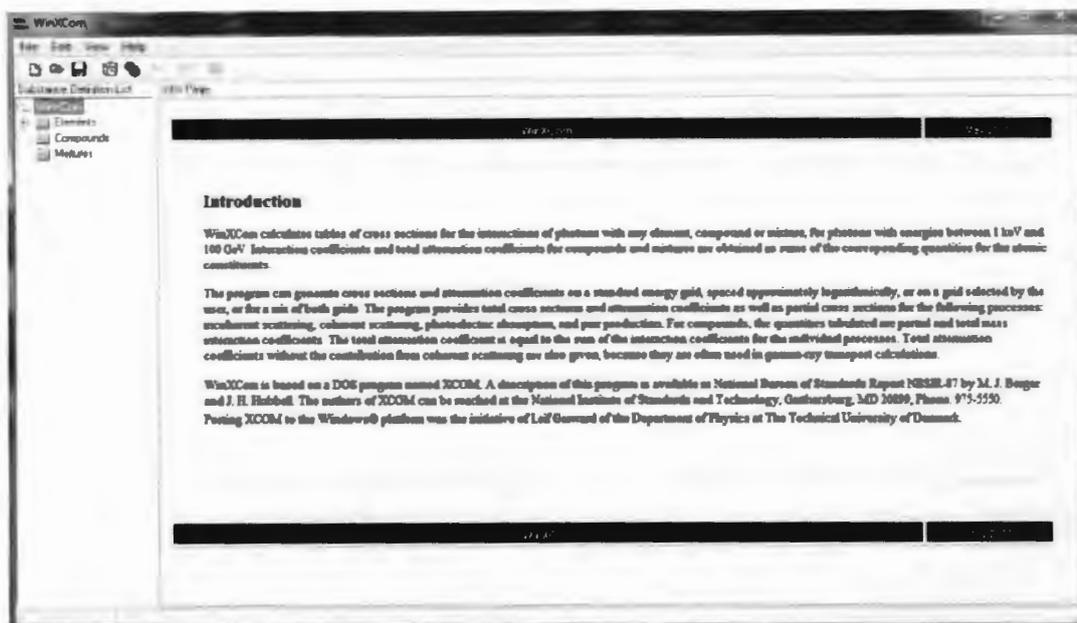


ภาพที่ ก.18 กล่องสำหรับวางแผ่น Target

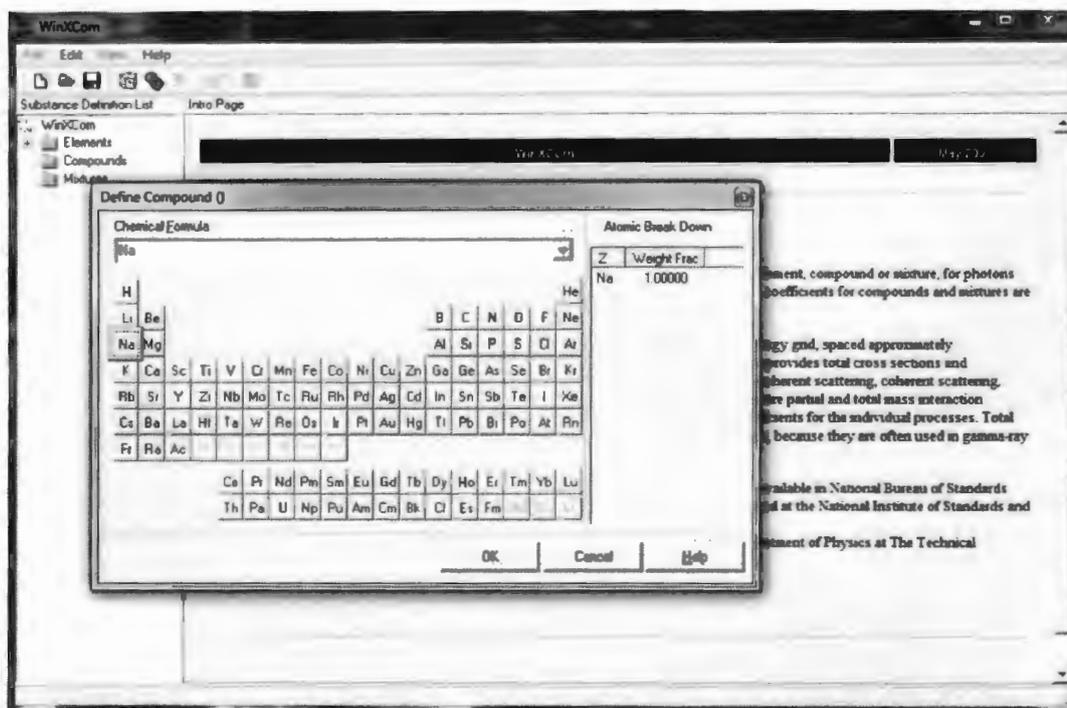


ภาพที่ ก.19 การจัดอุปกรณ์สำหรับการวัดสมบัติทางรังสีด้วยวิธี Narrow beam transmission method แบบ secondary target

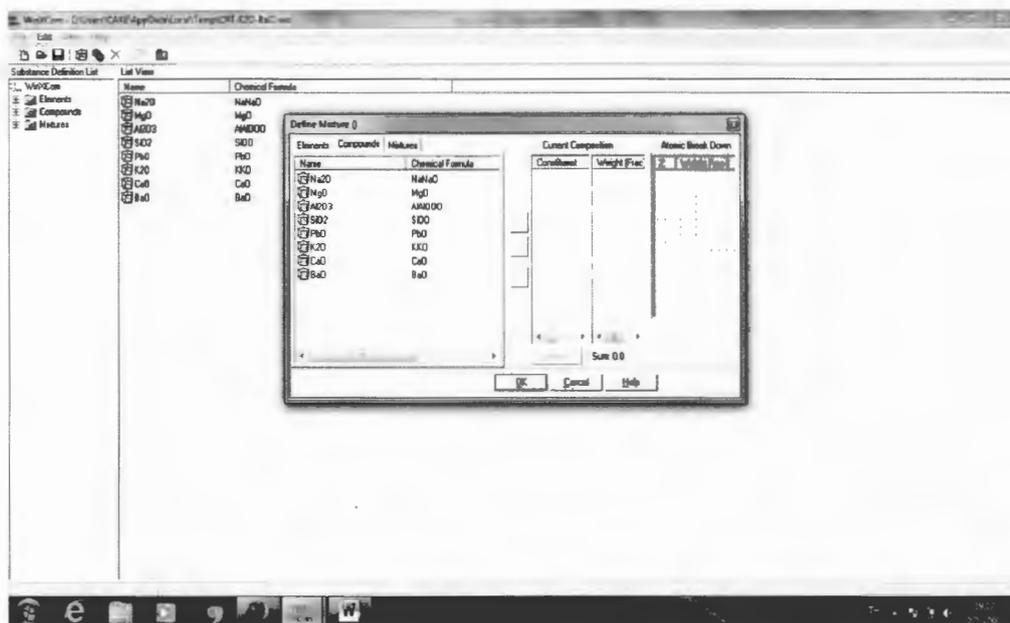
ภาคผนวก ข
โปรแกรม WinXCom



ภาพที่ ข.1 หน้าหลักของโปรแกรม WinXCom



ภาพที่ ข.2 การเลือกธาตุที่ต้องการศึกษา



ภาพที่ ข.3 การจำลองสารประกอบในโปรแกรม WinXCom

The screenshot shows the WinXCom interface with the 'Partial Interaction Coefficients and Total Attenuation Coefficients' table. The table has the following columns: Energy (MeV), Coherent (cm²/g), Incoherent (cm²/g), Photo Electric (cm²/g), PAIR Matter (cm²/g), PAIR Electron (cm²/g), Sum (cm²/g), and Sum Incoherent (cm²/g). The table lists various elements and their coefficients for different energy levels.

Energy (MeV)	Coherent (cm ² /g)	Incoherent (cm ² /g)	Photo Electric (cm ² /g)	PAIR Matter (cm ² /g)	PAIR Electron (cm ² /g)	Sum (cm ² /g)	Sum Incoherent (cm ² /g)
1.000E-003	3.27E+000	1.04E-002	3.58E+003	0	0	3.59E+003	3.58E+003
1.031E-003	3.26E+000	1.09E-002	3.32E+003	0	0	3.33E+003	3.32E+003
1.062E-003	3.24E+000	1.14E-002	3.08E+003	0	0	3.08E+003	3.08E+003
1.092E-003	3.24E+000	1.14E-002	3.17E+003	0	0	3.17E+003	3.17E+003
1.097E-003	3.24E+000	1.15E-002	3.13E+003	0	0	3.14E+003	3.13E+003
1.072E-003	3.24E+000	1.15E-002	3.10E+003	0	0	3.10E+003	3.10E+003
1.072E-003	3.24E+000	1.15E-002	3.54E+003	0	0	3.55E+003	3.54E+003
1.104E-003	3.22E+000	1.21E-002	3.31E+003	0	0	3.31E+003	3.31E+003
1.137E-003	3.21E+000	1.26E-002	3.08E+003	0	0	3.08E+003	3.08E+003
1.137E-003	3.21E+000	1.26E-002	3.12E+003	0	0	3.12E+003	3.12E+003
1.212E-003	3.17E+000	1.39E-002	2.67E+003	0	0	2.68E+003	2.67E+003
1.293E-003	3.14E+000	1.53E-002	2.29E+003	0	0	2.30E+003	2.29E+003
1.293E-003	3.14E+000	1.53E-002	2.31E+003	0	0	2.32E+003	2.31E+003
1.299E-003	3.14E+000	1.54E-002	2.29E+003	0	0	2.29E+003	2.29E+003
1.305E-003	3.13E+000	1.55E-002	2.26E+003	0	0	2.27E+003	2.26E+003
1.305E-003	3.13E+000	1.55E-002	2.30E+003	0	0	2.30E+003	2.30E+003
1.500E-003	3.04E+000	1.90E-002	1.63E+003	0	0	1.64E+003	1.63E+003
1.560E-003	3.02E+000	2.01E-002	1.48E+003	0	0	1.48E+003	1.48E+003
1.560E-003	3.02E+000	2.01E-002	1.54E+003	0	0	1.55E+003	1.54E+003
1.694E-003	2.95E+000	2.74E-002	1.25E+003	0	0	1.26E+003	1.25E+003
1.809E-003	2.88E+000	2.50E-002	1.01E+003	0	0	1.02E+003	1.01E+003
1.809E-003	2.88E+000	2.50E-002	1.93E+003	0	0	1.93E+003	1.93E+003
2.000E-003	2.81E+000	2.78E-002	1.62E+003	0	0	1.62E+003	1.62E+003
2.484E-003	2.60E+000	3.61E-002	9.46E+002	0	0	9.50E+002	9.48E+002
2.484E-003	2.60E+000	3.61E-002	9.83E+002	0	0	9.86E+002	9.83E+002
2.534E-003	2.57E+000	3.69E-002	9.51E+002	0	0	9.53E+002	9.51E+002
2.586E-003	2.55E+000	3.78E-002	9.23E+002	0	0	9.28E+002	9.23E+002
2.586E-003	2.55E+000	3.78E-002	9.53E+002	0	0	9.56E+002	9.53E+002

ภาพที่ ข.4 ผลการคำนวณของสารประกอบที่ต้องการศึกษา

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นายปุดณภพ โสภำพันธ์
ที่อยู่	เลขที่ 30 หมู่ 15 ตำบลหัวนา อำเภอเขมรราชู จังหวัดอุบลราชธานี 34170
E-mail	s.sopapan_pao@hotmail.com
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2551 – 2553 มัธยมศึกษำตอนปลาย โรงเรียนพังเคนพิทยา ตำบลพังเคน อำเภอนาตาล จังหวัดอุบลราชธานี 34170 พ.ศ. 2554 – 2557 ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ประวัติการได้รับทุน	พ.ศ. 2554 ได้รับทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย (Science Achievement Scholarship of Thailand)
ประวัติการวิจัย	Elastic properties investigation of alkaline borosilicate glasses with Nd ₂ O ₃ content by ultrasonic technique. ในงานประชุมวิชาการ Siam Physics Congress 2014 ณ จ.เชียงใหม่ ประเทศไทย Oral presentation; Investigation of structural and elastic properties of calcium–lead–silicate glass systems for gamma-ray shielding application. ในงานประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (North Eastern Science and Technology Conference 2015) ณ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี Gamma-ray shielding and elastic properties of recycled silica gel glasses. ในงานประชุมวิชาการ Siam Physics Congress 2016 ณ จ.อุบลราชธานี ประเทศไทย Investigation of the elastic properties of CRT–K ₂ O–BaO glass for gamma-ray shielding application. ในงานประชุมวิชาการ ISCEAS 2016 (The 4 th International Scientific Conference on Engineering and Applied Sciences) ณ ปักกิ่ง สาธารณรัฐประชาชนจีน A study of the effect of lead oxide on structural and elastic properties of recycled silica gel glass by ultrasonic technique and FTIR. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ฉบับที่ 19 เล่มที่ 3 ปี 2560