

## การศึกษาสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของระบบแก้วแบเรียมบอโรฟอสเฟต Mass Attenuation Coefficient Studies on Barium Borophosphate Glass System

ณัฐกฤตา จันทิมา<sup>1,2</sup>, สุนิสา สาระไชย<sup>1,2</sup> และจักรพงษ์ แก้วขาว<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

<sup>2</sup>ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

natthakridta@webmail.npru.ac.th

### บทคัดย่อ

สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแก้วแบเรียมบอโรฟอสเฟตที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าของแบเรียมออกไซด์ บอเรตออกไซด์ และฟอสเฟตออกไซด์ ที่ปริมาณความเข้มข้น 15.0, 17.5, 20.0, 22.5 และ 25.0 ร้อยละโดยโมล ตามลำดับ ตัวแปรนี้ถูกคำนวณทางทฤษฎีด้วยโปรแกรม WinXCom ในช่วงพลังงาน 1 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ถึง 100 จิกะอิเล็กตรอนโวลต์ ผลการทดลองถูกนำเสนอในรูปแบบของกราฟทั้งแบบอันตรกิริยารวมและอันตรกิริยาลดทอนของโฟตอน พบว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแก้วเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแบเรียมเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรนี้มาจากการกระบวนการเปลี่ยนแปลงของอันตรกิริยาลดทอนในแต่ละช่วงพลังงานที่แตกต่างกัน การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลประกอบด้วย 3 กระบวนการ คือ การดูดกลืนโฟโตอิเล็กทริก การกระเจิงแบบคอมป์ตัน และการผลิตคู่อิเล็กตรอน-โพสิตรอน ที่พลังงานต่ำ กลาง และสูงของโฟตอน ตามลำดับ

**คำสำคัญ:** แก้ว, สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล, อันตรกิริยาของโฟตอน

### Abstract

The mass attenuation coefficients of barium borophosphate glass were studied which varies the concentration of barium oxide borate oxide and phosphate oxide at 15.0, 17.5, 20.0, 22.5 and 25.0 mol% respectively. This parameter has been calculated by theoretical approach using WinXCom program in the energy range of 1 keV to 100 GeV. The results of the present investigation are shown graphically for total and partial photon interactions. It was observed that the mass attenuation coefficients of glass were increased with increasing the concentration of barium. The variation in this parameter is due to the variations in domination of different interaction processes in different energy regions. The variations of mass attenuation coefficient comprise three processes are photoelectric absorption, Compton scattering and pair production at low, medium and high photon energy, respectively.

**Keywords:** glass, mass attenuation coefficient, photon interaction

### 1. บทนำ

การศึกษาอันตรกิริยาของโฟตอนต่อสสารมีประโยชน์ในหลากหลายสาขา เช่น นิวเคลียร์ฟิสิกส์ วิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม เป็นต้น โดยเฉพาะวงการแพทย์ ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของโฟตอนเวลาเกิดอันตรกิริยากับสสาร ได้แก่ การดูดกลืนหรือการกระเจิงชนิดต่าง ๆ ของสสาร (Jackson and Hawkes, 1981: 169) ฯลฯ แต่ในวัสดุที่ประกอบด้วยสสารมากกว่า 1 ชนิด เช่น โลหะผสม ดิน พลาสติก วัสดุทางชีววิทยาและวัสดุป้องกันรังสี เป็นต้น วัสดุเหล่านี้ไม่มีข้อมูลของสัมประสิทธิ์การลดทอน จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการหาค่าตัวแปรสำคัญ เพื่อเป็นฐานข้อมูลต่าง ๆ ในด้านรังสีก่อนทำการทดลอง เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรวม (total attenuation coefficient) ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของการดูดกลืน

แบบโฟโตอิเล็กทริก (photoelectric absorption attenuation coefficient) ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของการกระเจิงคอมป์ตัน (Compton scattering attenuation coefficient) ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของการผลิตคู่ (pair production attenuation coefficient) ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของการกระเจิงโคฮีเรนต์ (coherent scattering attenuation coefficient) เป็นต้น โดยตัวแปรที่กล่าวมา ยังสามารถนำไปคำนวณค่าภาคตัดขวาง (cross sections) ค่าเลขอะตอมยังผล (effective atomic number) และค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผล (effective electron density) ได้อีกด้วย ซึ่งตัวแปรพื้นฐานทางวัสดุของสารผสมที่ได้มาจากการวิจัย ตลอดจนองค์ความรู้และวิธีที่ได้มาซึ่งตัวแปรดังกล่าว หมายถึงการนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมายในหลากหลายวงการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง (Singh et al., 2006: 84, Singh et al., 2005: 305, Singh et al., 2002: 1, Khanna et al., 1996: 217, Singh et al., 2003: 257, Singh et al., 2005: 225, Manohara and Hanagodimath, 2007: 321, Sandhu et al., 2002: 211, Chitrlekha et al., 2005: 1)

โปรแกรม WinXCom มีความเป็นมาดังนี้ ในปี ค.ศ. 1995 Hubbell และ Seltzer (Hubbell and Seltzer, 1995: 5632) ได้ทำการตีพิมพ์ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (attenuation coefficient) ของธาตุและสารประกอบในช่วงพลังงาน 1 keV ถึง 20 keV โดยการคำนวณทางทฤษฎีผ่านทางกฎ Mixture rule ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนนี้ สามารถนำไปคำนวณหาค่าเลขอะตอมยังผลได้ และเพื่อความสะดวกในการทำงาน Berger และคณะ (Berger et al., 1990) ได้พัฒนาโปรแกรม XCOM เพื่อใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนทุกชนิดในรูปแบบ DOS โปรแกรมดังกล่าว ถูกบรรจุอยู่ในฐานข้อมูล National Institute of Standards and Technology (NIST) ประเทศสหรัฐอเมริกา ต่อมาถูกพัฒนาสู่ระบบปฏิบัติการ Window โดย Gerward และคณะ (Gerward et al., 2001: 23, Gerward et al., 2004: 653) โดยใช้ชื่อโปรแกรม WinXCom ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ได้รับการยอมรับและรู้จักกันดีในด้านต่าง ๆ ที่มีความเกี่ยวข้องกันทางด้านรังสี สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนแบบรวม (Total Attenuation Interaction) และสัมประสิทธิ์การลดทอนย่อย (partial attenuation interaction) ได้ตั้งแต่ช่วงพลังงาน 1 keV ถึง 100 GeV ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลทั้งแบบรวมและอันตรกิริยาย่อยของแก้วแบบเบรียมบอโรฟอสเฟตที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าของเบรียมออกไซด์ บอเรตออกไซด์ และฟอสเฟตออกไซด์ ที่ปริมาณความเข้มข้น 15.0, 17.5, 20.0, 22.5 และ 25.0 ร้อยละโดยโมลตามลำดับ และเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในการศึกษาตัวแปรอื่น ๆ ที่มีความเกี่ยวข้องกันทางด้านรังสีต่อไป

## 2. วิธีการคำนวณการวิจัย

แก้วแบบเบรียมบอโรฟอสเฟตที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าของเบรียมออกไซด์ บอเรตออกไซด์ และฟอสเฟตออกไซด์ ถูกแบ่งออกเป็น 3 สูตร คือ  $x\text{BaO} : (30-x)\text{B}_2\text{O}_3 : 70\text{P}_2\text{O}_5$  ตัวย่อที่ใช้คือ BaBP\_1,  $x\text{BaO} : 5\text{B}_2\text{O}_3 : (95-x)\text{P}_2\text{O}_5$  ตัวย่อที่ใช้คือ BaBP\_2 และ  $25\text{BaO} : x\text{B}_2\text{O}_3 : (75-x)\text{P}_2\text{O}_5$  ตัวย่อที่ใช้คือ BaBP\_3 โดยที่  $x$  คือปริมาณความเข้มข้นเท่ากับ 15.0, 17.5, 20.0, 22.5 และ 25.0 mol% ตามลำดับ จากนั้นแก้วในแต่ละเงื่อนไขจะถูกนำไปคำนวณหาค่าสัดส่วนโดยน้ำหนัก (fraction by weight) ของแต่ละธาตุ ซึ่งค่าสัดส่วนโดยน้ำหนักนี้จะถูกนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล สำหรับสารเคมีใด ๆ หรือสารผสมของธาตุ สามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลได้จาก “กฎการผสม (mixture rule)” ดังสมการที่ (1) ตามสูตร (Jackson and Hawkes, 1981: 169)

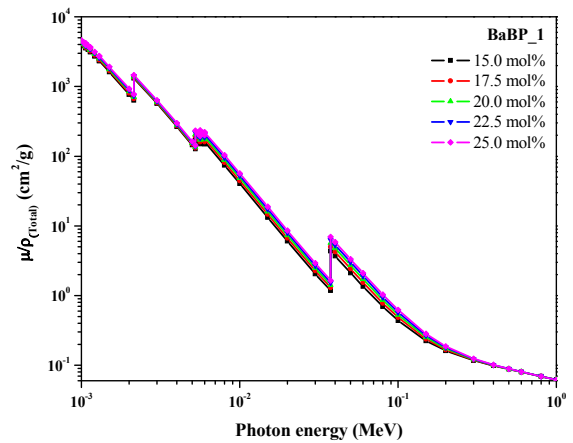
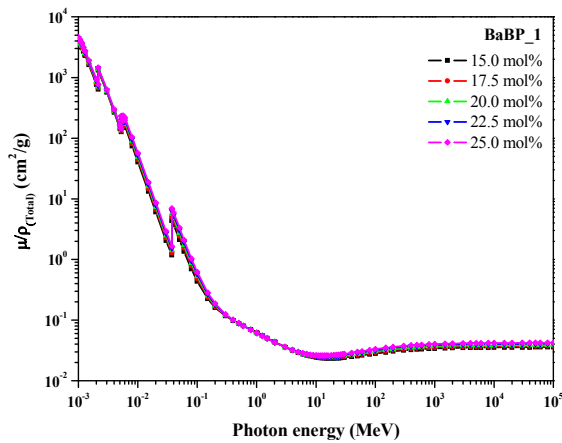
$$\mu/\rho = \sum w_i(\mu/\rho)_i \quad (1)$$

เมื่อ  $w_i$  คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของแต่ละธาตุ

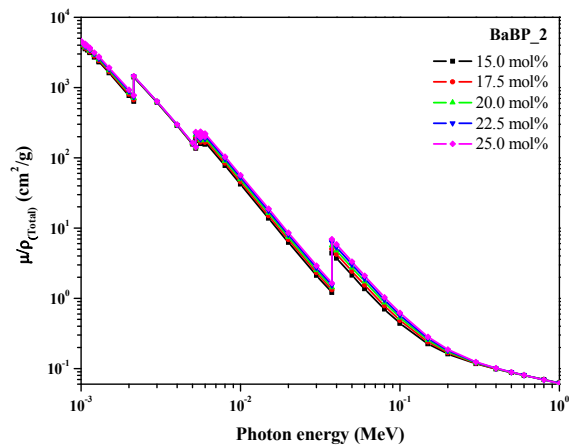
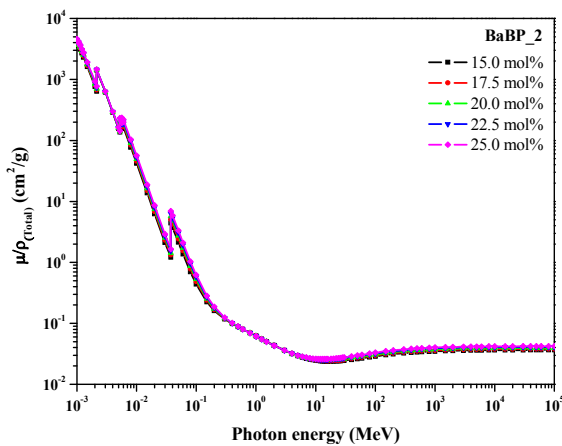
$(\mu/\rho)_i$  คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแต่ละธาตุ

สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลทั้งแบบอันตรกิริยารวมและอันตรกิริยาย่อยของแต่ละธาตุที่นำมาใช้ในการคำนวณได้รับมาจากโปรแกรม WinXCom

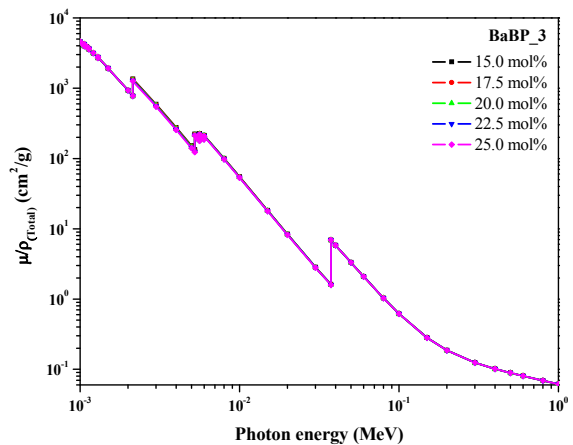
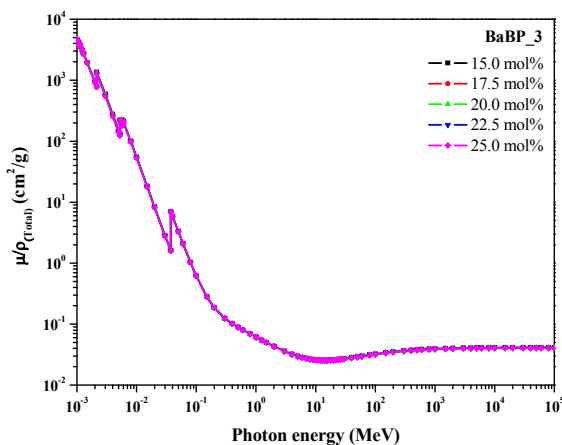
### 3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล



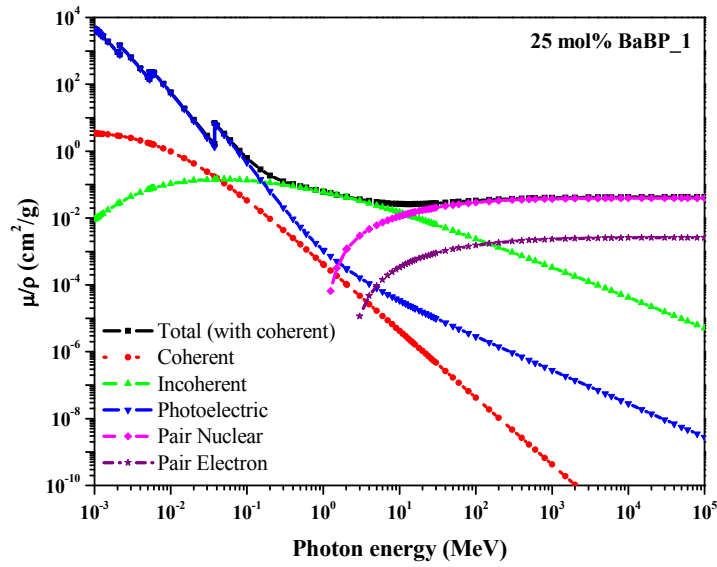
รูปภาพที่ 1 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลสำหรับอันตรกิริยารวมของแก้ว BaBP\_1 ในช่วงพลังงาน 1 keV ถึง 100 GeV (ซ้าย) และช่วงพลังงาน 1 keV ถึง 1 MeV (ขวา)



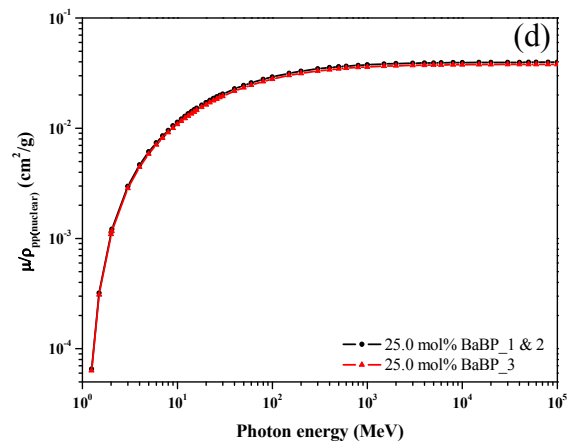
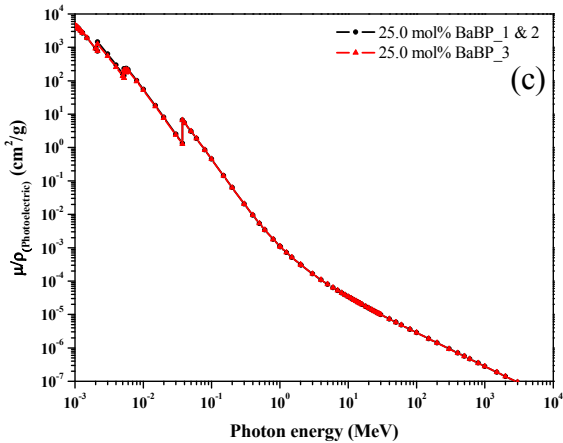
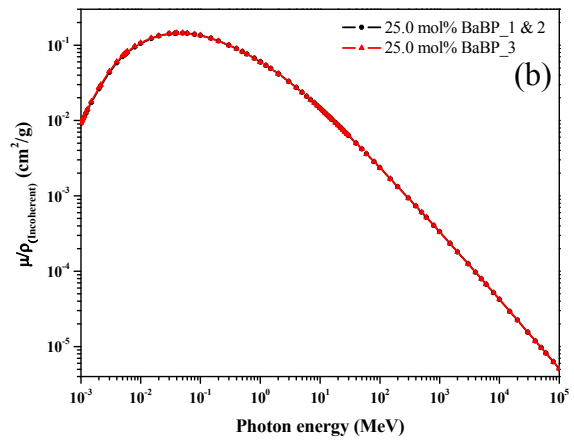
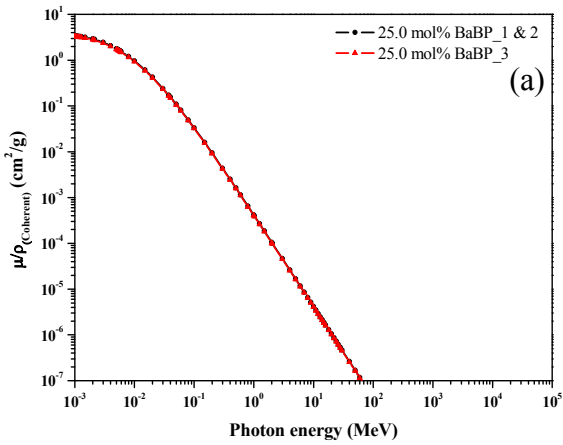
รูปภาพที่ 2 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลสำหรับอันตรกิริยารวมของแก้ว BaBP\_2 ในช่วงพลังงาน 1 keV ถึง 100 GeV (ซ้าย) และช่วงพลังงาน 1 keV ถึง 1 MeV (ขวา)

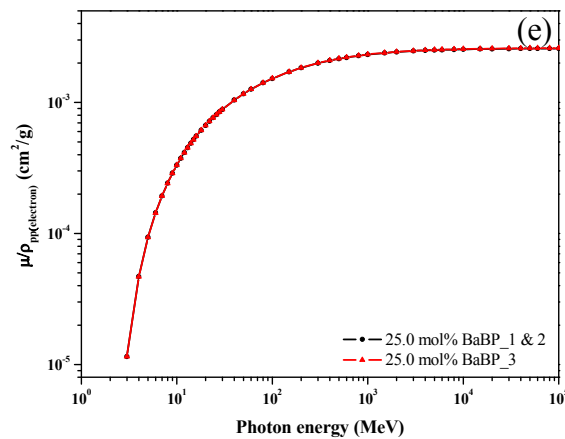


รูปภาพที่ 3 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลสำหรับอันตรกิริยารวมของแก้ว BaBP\_3 ในช่วงพลังงาน 1 keV ถึง 100 GeV (ซ้าย) และช่วงพลังงาน 1 keV ถึง 1 MeV (ขวา)



รูปภาพที่ 4 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลสำหรับอันตรกิริยารวมและอันตรกิริยาลย่อยของแก้ว BaBP\_1 ในช่วงพลังงาน 1 keV ถึง 100 GeV





**รูปภาพที่ 5** สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลสำหรับอันตรกิริยาย่อยของแก้ว BaBP\_1, BaBP\_2 และ BaBP\_3 (a) การกระเจิงแบบโคฮีเรนต์ (b) การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (c) การดูดกลืนโฟโตอิเล็กทริก (d) การผลิตคู่แบบนิวเคลียร์ และ (e) การผลิตคู่แบบอิเล็กตรอน

สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลทั้งแบบอันตรกิริยารวมและอันตรกิริยาย่อยของแก้วแบเรียมบอโรฟอสเฟต BaBP\_1, BaBP\_2 และ BaBP\_3 ในลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอนและค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลแสดงได้ดังรูปภาพที่ 1 – 5 เมื่อ  $\mu/\rho$  คือสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลในฟังก์ชันของการกระเจิงของพลังงานโฟตอน รูปภาพที่ 1 – 3 (ซ้าย) แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอนและค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลสำหรับอันตรกิริยารวมในช่วงพลังงาน 1 keV ถึง 100 GeV ของแก้ว BaBP\_1, BaBP\_2 และ BaBP\_3 ตามลำดับ พบว่าลักษณะของกราฟมีความคล้ายคลึงกัน เนื่องจากแก้วทั้งสามสูตรมีธาตุที่เหมือนกันคือ แบเรียม บอโร และฟอสเฟต ส่วนรูปภาพที่ 1 – 3 (ขวา) เป็นกราฟการเปลี่ยนแปลงในช่วงพลังงาน 1 keV ถึง 1 MeV พบว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแก้ว BaBP\_1 และ BaBP\_2 มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของแบเรียมออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่แก้ว BaBP\_3 มีค่าเท่ากันทุกความเข้มข้น เนื่องจากแก้วสูตรนี้ความเข้มข้นของแบเรียมออกไซด์มีค่าคงที่ จากรูปภาพที่ 1 – 3 นี้สังเกตพบว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลจะมีค่ามากและลดลงอย่างรวดเร็ว (1 – 100 keV) ต่อมาสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลจะมีการค่าลดลงในอัตราที่น้อย (100 keV – 4 MeV) และหลังจากพลังงานโฟตอนประมาณ 4 MeV เป็นต้นไป ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานของโฟตอนเพิ่มขึ้น (4 MeV – 100 GeV) ในช่วงพลังงานต่ำลักษณะของกราฟจะมีความไม่ต่อเนื่องกันเกิดขึ้น เนื่องจากแบเรียมเป็นธาตุที่มีขอบการดูดกลืน (absorption edge) ของพลังงานที่ชั้น M ( $M_3: 1.062 \times 10^{-3}$  MeV,  $M_2: 1.137 \times 10^{-3}$  MeV,  $M_1: 1.293 \times 10^{-3}$  MeV), L ( $L_3: 5.247 \times 10^{-3}$  MeV,  $L_2: 5.624 \times 10^{-3}$  MeV,  $L_1: 5.989 \times 10^{-3}$  MeV) และ K ( $3.744 \times 10^{-3}$  MeV) และธาตุฟอสเฟตที่ชั้น K ( $2.145 \times 10^{-3}$  MeV)

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลที่เกิดขึ้นสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลรวมมาจากกระบวนการเกิดอันตรกิริยาที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงพลังงาน 3 ปรากฏการณ์คือปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ที่พลังงานโฟตอนต่ำกว่า 100 keV การกระเจิงแบบคอมป์ตัน จากพลังงานโฟตอน 100 keV ถึง 4 MeV และการผลิตคู่ พลังงานโฟตอนตั้งแต่ 4 MeV เป็นต้นไป แสดงได้ดังรูปภาพที่ 4 ซึ่งแสดงลักษณะของกราฟเพียงสูตรและเงื่อนไขเดียวคือ  $25\text{BaO} : 5\text{B}_2\text{O}_3 : 70\text{P}_2\text{O}_5$  (25 mol% BaBP\_1) เงื่อนไขนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลมากที่สุด จากรูปภาพที่ 4 สามารถสร้างกราฟในแต่ละอันตรกิริยาย่อยได้ ดังแสดงในรูปภาพที่ 5 (a) – (e)

จากรูปภาพที่ 5 (a) – (b) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลสำหรับการกระเจิงแบบโคฮีเรนต์  $\mu/\rho_{\text{(Coherent)}}$  หลังจากพลังงานโฟตอนที่ 10 keV จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อพลังงานโฟตอนเพิ่มขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลสำหรับการกระเจิงแบบคอมป์ตัน  $\mu/\rho_{\text{(Incoherent)}}$  มีอัตราการลดลงเช่นเดียวกัน การลดลงของค่านี้อาจเนื่องมาจาก  $\mu/\rho_{\text{(Coherent)}}$  และ  $\mu/\rho_{\text{(Incoherent)}}$  มีสัดส่วนผกผันกันต่อพลังงานโฟตอน การเปลี่ยนแปลงค่าของ  $\mu/\rho_{\text{(Incoherent)}}$  เนื่องมาจากมีส่วนประกอบทางเคมีน้อยแต่ก็มีความคล้ายกันกับกรณีของการกระเจิงแบบโคฮีเรนต์

จากรูปภาพที่ 5 (c) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลสำหรับการการดูดกลืนโฟโตอิเล็กทริก  $\mu / \rho_{(Photoelectric)}$  ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อพลังงานโฟตอนเพิ่มขึ้น อาจเกิดจากภาคตัดขวางโฟโตอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงตามการผกผันของพลังงานโฟตอน  $E^{7/2}$  ส่วนประกอบทางเคมีของแก้วออกไซด์มีความสำคัญมากเนื่องจาก  $\mu / \rho_{(Photoelectric)}$  จะขึ้นกับเลขอะตอมในวัสดุโดยมีอันตรกิริยาเป็นแบบ  $Z^{4-5}$  (Gupta and Sidhu, 2013: 3830)

รูปภาพที่ 5 (d) - (e) แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลสำหรับการผลิตคู่นิวเคลียร์  $\mu / \rho_{pp(nuclear)}$  และแบบอิเล็กตรอน  $\mu / \rho_{pp(electron)}$  ตามลำดับ พบว่าทั้งสองแบบจะมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลเพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานโฟตอนเพิ่มขึ้นถึง 400 MeV หลังจากพลังงานนี้สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลมีค่าเกือบจะคงที่ อาจเป็นเพราะสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลสำหรับการผลิตคู่นิวเคลียร์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ  $\log E$  การผลิตคู่นิวเคลียร์จะขึ้นกับค่า  $Z^2$  ในขณะที่การผลิตคู่นิวเคลียร์อิเล็กตรอนเกือบจะเป็นแบบเชิงเส้น ดังนั้นในช่วงพลังงานสูงลักษณะของค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลรวมในรูปภาพที่ 1 - 3 (ซ้าย) จะมาจาก  $\mu / \rho_{pp(nuclear)}$  ที่ขึ้นกับค่า  $Z^2$  (Gupta and Sidhu, 2013: 3830)

#### 4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของระบบแก้วแบบเรียบบอโรฟอสเฟตทั้งสามสูตรมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอันตรกิริยารวมและอันตรกิริยาย่อยคล้ายคลึงกัน ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของแบบเรียบออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลมีลักษณะแตกต่างกัน 3 ช่วงซึ่งขึ้นกับพลังงานโฟตอนในแต่ละช่วงที่แตกต่างกันคือ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก การกระเจิงแบบคอมป์ตัน และการผลิตคู่นิวเคลียร์ ซึ่งเป็นอันตรกิริยาหลักที่จะเกิดในช่วงพลังงานโฟตอนต่ำ ช่วงกลางของพลังงาน และช่วงพลังงานสูง ตามลำดับ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลนี้เป็นตัวแปรพื้นฐานและมีความสำคัญกับตัวแปรอื่น ๆ ทางด้านรังสีด้วย เช่น เลขอะตอมยังผลความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และ buildup factor เป็นต้น

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สำหรับความร่วมมือและการสนับสนุนงานวิจัยนี้เป็นอย่างดี และ Professor L. Gerward สำหรับโปรแกรม WinXCom

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- Berger, M.J., Hubbell, J.H., Saltzer, S.M., Chang, J., Coursey, J.S., Sukumar, R. & Zucker, D.S. (1990). **XCOM: Photon Cross Sections Database**. on 9 December 2015 from <http://www.nist.gov/pml/data/xcom/>.
- Chitralakha, Kerur B.R., Lagare M.T., Nathuram R. & Sharma D.N. (2005) Mass Attenuation Coefficients of Saccharides for Low-Energy X-Rays. **Radiation Physics and Chemistry**, 72, 1-5.
- Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K.B. & Levring, H. (2001). X-Ray Absorption in Matter. Reengineering XCOM. **Radiation Physics and Chemistry**, 60, 23-24.
- Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K.B. & Levring, H. (2004). WinXCom-a Program for Calculating X-Ray Attenuation Coefficients. **Radiation Physics and Chemistry**, 71, 653-654.
- Gupta, S. & Sidhu, G.S. (2013). Measurement of Total and Partial Mass Attenuation Coefficients of Oxide Glasses: A Radiation field. **International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)**. 3, 3830-3835.

- Hubbell, J.H. & Seltzer, S.M. (1995). Tables of X-ray mass attenuation coefficients from 1 keV to 20 MeV for elements Z=1 to Z=92. **Nation Institute of Standards and Technological (IR) Report**, No. 5632.
- Jackson, D.F. & Hawkes, D.J. (1981). X-ray Attenuation Coefficients of Elements and Mixtures”, **Physics Reports**. 70, 169-233.
- Khanna, A., Bhatti, S.S., Singh, K.J. & Thind, K.S. (1996). Gamma-Ray Attenuation Coefficients in Some Heavy Metal Oxide Borate Glasses at 662 keV. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**. 114, 217-220.
- Manohara, S.R. & Hanagodimath, S.M. (2007). Studies on Effective Atomic Numbers and Electron Densities of Essential Amino Acids in the Energy Range 1 keV-100 GeV. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**, 258, 321-328.
- Sandhu, G.K., Singh, K., Lark, B.S. & Gerward, L. (2002). Molar Extinction Coefficients of Some Fatty Acid. **Radiation Physics and Chemistry**, 65, 211-215.
- Singh, N., Singh, K.J., Singh, K. & Singh, H. (2006). Gamma-ray attenuation Studies of PbO-BaO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Glass System, **Radiation Measurement**, 41, 84-88.
- Singh, N., Singh, K.J., Singh, K. & Singh, H. (2005). Comparative Study of Lead Borate and Bismuth Lead Borate Glass system as Gamma-Radiation Shielding Materials. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**, 225, 305-309.
- Singh, K., Singh, H., Sharma, V., Nathuram, R., Khanna, A., Kumar, R., Bhatti, S.S. & Sahota, H.S. (2002). Gamma-Ray Attenuation Coefficient in Bismuth Borate Glass. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**, 194, 1-6.
- Singh, H., Singh, K., Gerward, L., Singh, K., Sahota, H.S. & Nathuram, R. (2003). ZnO-PbO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Glasses as Gamma-Ray Shielding Materials. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**, 207, 257-262.
- Singh, K., Singh, H., Sharma, G., Gerward, L., Khanna, A., Kumar, R., Nathuram, R. and Sahota, H.S. (2005). Gamma-Ray Shielding Properties of CaO-SrO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Glasses. **Radiation Physics and Chemistry**, 72, 225-228.