การเตรียมและสมบัติทางกายภาพของแก้วสตรอนเชียมแบเรียมฟอสเฟต ที่เจือด้วยเพรซีโอดีเมียม

ณัฐกฤตา จันทิมา[1,2,*], พัฒนวุฒิ นาคศรีโภชน์[1] และ พุธิตา ทำจะดี[1]

[1]สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม นครปฐม 73000
[2]ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม นครปฐม 73000
[*]ผู้รับผิดชอบบทความ: email natthakridta@webmail.npru.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพของแก้วสตรอนเชียมแบเรียมฟอสเฟตที่มีปริมาณความเข้มข้นของเพรซีโอดิเมียมออกไซด์แตกต่างกัน ตัวอย่างแก้วถูกเตรียมด้วยเทคนิคการหลอมและทำตัวให้เย็นลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ตัวอย่างแก้วที่ได้มีลักษณะของเนื้อแก้วใสเป็นเนื้อเดียวกันและโปร่งแสง จากการทดลองหาค่าความหนาแน่นและดรรชนีหักเหแสงของตัวอย่างแก้วพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของเพรซีโอดิเมียมออกไซด์ ในขณะที่ปริมาตรเชิงโมลของตัวอย่างแก้วมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของเพรซีโอดิเมียมออกไซด์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อเจือเพรซีโอดิเมียมออกไซด์ในแก้วพบว่าไม่ส่งผลกับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของแก้วสตรอนเชียมแบเรียมฟอสเฟต

คำสำคัญ: แก้วฟอสเฟต เพรซีโอดิเมียมออกไซด์ ความแข็งแบบวิกเกอร์ ความหนาแน่น

Preparation and physical properties of strontium barium phosphate glasses dope with praseodymium

Natthakridta Chanthima[1,2,*], Phattanawut Naksripoch[1] and Putita Tumjadee[1]

[1]Physics Program, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom 73000, Thailand

[2]Center of Excellence in Glass Technology and Materials Science (CEGM), Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom 73000, Thailand

[*]Corresponding author: email natthakridta@webmail.npru.ac.th

Abstract

In this research, studies the physical properties of the strontium barium phosphate glasses with varied the concentration of Pr_2O_3. Glass samples were prepared by melt – quenching technique at 1200 °C. The results found that all glass samples are clear, homogenous and transparent. The density and refractive index of glass samples were increased with increasing Pr_2O_3 concentration, while the molar volume trend to decreased when the Pr_2O_3 concentration doped in glasses is increased. In addition, when doped the praseodymium oxide in glass will not affect the Vickers hardness of barium phosphate glasses.

Keywords: phosphate glass, praseodymium, Vickers hardness, density

1. บทนำ

แก้วเป็นวัสดุที่มีบทบาทสำคัญทั้งในเชิงวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม เนื่องจากคุณสมบัติต่าง ๆ ของแก้ว เช่น มีความโปร่งแสงสูง สามารถกำหนดขนาดและรูปร่างได้ง่ายและราคาถูกเมื่อเทียบกับคริสตัล (Jayasankar et al., 2013: pp.1557) แก้วออกไซด์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีหลายชนิดโดยแบ่งตามชื่อของสารประกอบทางเคมีเช่น แก้วซิลิเกต (Silicate glass) แก้วบอเรต (Borate glass) แก้วฟอสเฟต (Phosphate glass) และแก้วเจอร์มาเนต (Germanate glass) เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งแก้วฟอสเฟตเป็นแก้วชนิดหนึ่งที่ได้รับความสนใจในการนำมาเป็นแก้วโฮสต์ (Host glass) สำหรับเติมธาตุหายาก เนื่องจากแก้วชนิดนี้มีคุณสมบัติที่ดีคือ โปร่งใสสูง อุณหภูมิการหลอมต่ำ ความต้านทานการขยายตัวทางความร้อนสูงและสามารถเติมธาตุหายากได้มาก (Jayasankar et al., 2013: pp.85), (Jayasankar et al., 2014: pp.233), (Moorthy et al., 2013: pp.82) อย่างไรก็ตามแก้วฟอสเฟตยังมีข้อเสียอยู่คือความทนทานต่อสารเคมีค่อนข้างต่ำและดูดความชื้นสูง ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการใช้งาน จึงได้มีการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบของแก้ว เพื่อให้มีความเสถียรภาพทางเคมีมากยิ่งขึ้น โดยการเติมออกไซด์ อื่น ๆ เข้าไป เช่น สตรอนเชียมออกไซด์ (Strontium oxide: SrO) และแบเรียมออกไซด์ (Barium oxide: BaO) อีกทั้งยังสามารถช่วยลดความหนืดและลดอุณหภูมิในการหลอมแก้วอีกด้วย (C.K. Jayasankar et al., 2012: pp.132)

ในบรรดาธาตุหายาก (Rare earth) เพรซีโอดีเมียมออกไซด์ (Praseodymium oxide: Pr^{3+}) เป็นอีกหนึ่งไอออนที่มีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ในการผลิตตัวกลางเลเซอร์ เนื่องจากเพรซีโอดีเมียมออกไซด์สามารถเปล่งแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็น (Visible light: VIS) ที่มีประสิทธิภาพ โดยแสงที่เปล่งออกมาจะมีความยาวคลื่นและสีที่แตกต่างออกไป ขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้น (Ming, Han, Song, et al., 2013; Mahamuda, Swapna, Srinivasa Rao, et al., 2013; Vijaya Kumar, Rama Gopal, Reddy, et al., 2013; Ramteke, Swart & Gedam, 2016) งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาการเตรียม

แก้วสตรอนเชียมแบเรียมฟอสเฟตที่มีปริมาณความเข้มข้นของเพรซีโอดิเมียมออกไซด์แตกต่างกัน คือ 0.00, 0.05, 0.10, 0.50, 1.00 และ 2.00 mol% และศึกษาสมบัติพื้นฐานคือ สมบัติทางกายภาพและความแข็งแบบวิกเกอร์เพื่อเป็นฐานข้อมูลทางวัสดุที่สำคัญในการประยุกต์ใช้งานระดับสูงต่อไป

2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมแก้ว

แก้วสตรอนเชียมแบเรียมฟอสเฟตได้ถูกเตรียมขึ้นโดยใช้องค์ประกอบทางเคมีจากสูตร 30SrO: 20BaO: (50-x)P_2O_5: xPr_2O_3 เมื่อ x = 0.00, 0.05, 0.10, 0.50, 1.00 และ 2.00 ร้อยละโดยโมล (mol%) สารเคมีที่ใช้ในการวิจัยคือ สตรอนเชียมคาร์บอเนต (strontium carbonate: $SrCO_3$) แบเรียมคาร์บอเนต (Barium carbonate: $BaCO_3$) แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Ammonium dihydrogen orthophosphate: $NH_4H_2PO_4$) และเพรซีโอดิเมียมออกไซด์ (Praseodymium oxide: Pr_2O_3) ผสมสารเคมีทั้งหมดน้ำหนักรวม 20 กรัม ลงในเบ้าพอร์ซเลนนำไปหลอมที่อุณหภูมิ 1200°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ด้วยเทคนิคการหลอมและทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว (Melt quenching technique) จากนั้นสารเคมีที่ถูกหลอมจะถูกนำไปเทลงในแม่พิมพ์แกรไฟต์รูปทรงสี่เหลี่ยมเพื่อขึ้นรูปแก้วเป็นชิ้นงานที่อุณหภูมิห้อง นำตัวอย่างแก้วที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อลดความเครียดที่เกิดขึ้นในแก้ว จากนั้นนำตัวอย่างแก้วไปตัดและขัดให้มีขนาด 1.0 x 1.5 x 0.3 cm^3

2.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพ

การศึกษาสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างแก้วในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความหนาแน่น (Density) ปริมาตรเชิงโมล (Molar volume) ดรรชนีหักเหแสง (Refractive index) ความหนาแน่นของตัวอย่างแก้วศึกษาโดยใช้เครื่องวัดความหนาแน่นรุ่น ANDHR-200 ของบริษัท Dietheim คำนวณตามสมการ (K. Boonin et al., 2011: pp.8)

$$\rho = \frac{w_a}{w_a - w_b} \times \rho_w \qquad (g/cm^3) \tag{1}$$

เมื่อ ρ หมายถึง ความหนาแน่นของตัวอย่างแก้ว w_a หมายถึง น้ำหนักของตัวอย่างแก้วในอากาศ w_b หมายถึง น้ำหนักของตัวอย่างแก้วในน้ำ และ ρ_w หมายถึง ความหนาแน่นของน้ำ (ρ_w = 1.0000 g/cm^3) จากค่าความหนาแน่นของตัวอย่างแก้วสามารถนำมาคำนวณหาค่าปริมาตรเชิงโมลได้ ตามสมการ (K. Boonin et al., 2011: pp.8)

$$V_m = \frac{M_T}{\rho} \qquad (cm^3/mol) \tag{2}$$

เมื่อ M_T หมายถึงผลรวมทั้งหมดของน้ำหนักโมเลกุลโดยหาได้จาก

$$M_T = x_{SrO}Z_{SrO} + x_{BaO}Z_{BaO} + x_{P_2O_5}Z_{P_2O_5} + x_{Pr_2O_3}Z_{Pr_2O_3} \tag{3}$$

เมื่อ $x_{S_rO}, x_{BaO}, x_{P_2O_5}$ และ $x_{Pr_2O_3}$ หมายถึงสัดส่วนโมเลกุลขององค์ประกอบออกไซด์ $Z_{S_rO}, Z_{BaO}, Z_{P_2O_5}$ และ $Z_{Pr_2O_3}$ หมายถึง มวลโมเลกุลขององค์ประกอบออกไซด์ ค่าดรรชนีหักเหของตัวอย่างแก้วศึกษาโดยใช้เครื่อง Abbe refractometer รุ่น 3T ของบริษัท ATAGO

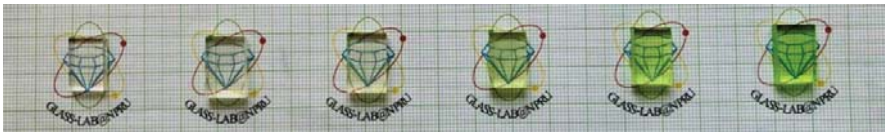
2.3 การวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ (Micro-Vickers hardness test)

วัดความแข็งแบบวิกเกอร์ด้วยเครื่อง Micro Vickers Hardness Tester รุ่น HVS-1000 ของบริษัท Sino Age Development Technology ให้แรงกดขนาด 0.05 กิโลกรัมแรง (kgf) (0.49 นิวตัน (N)) กดแช่เป็นเวลา 10-15 วินาที ตัวอย่างละ 4 จุด คำนวณตามสมการ (Trevor Sidaway, et al., 1994: pp.583)

$$H_v = 1.854\frac{P}{d^2} \quad \text{(HV)} \qquad (4)$$

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

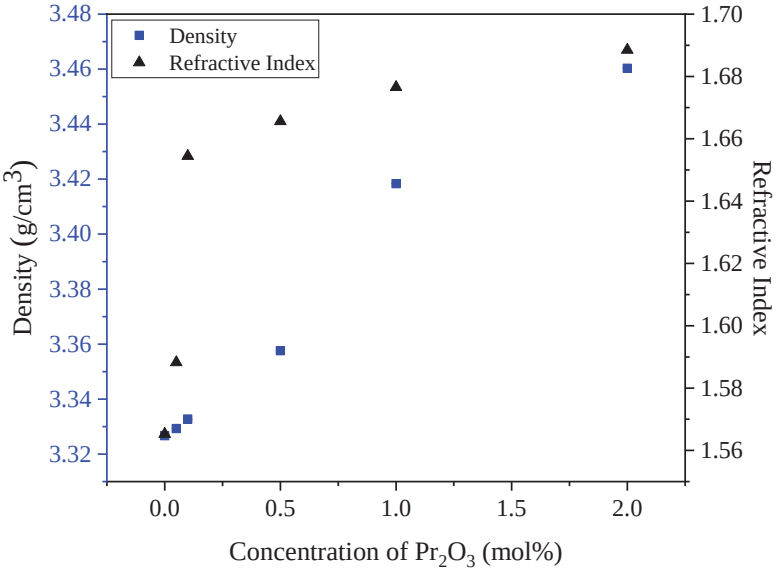
จากการทดลองการหลอมแก้วสตรอนเชียมแบเรียมฟอสเฟตที่มีความเข้มข้นของ Pr_2O_3 ในปริมาณ 0.00, 0.05, 0.10, 0.50, 1.00 และ 2.00 mol% ตามลำดับ พบว่าลักษณะของตัวอย่างแก้วที่ได้มีลักษณะโปร่งแสงและเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของแก้วฟอสเฟต โดยพบว่าตัวอย่างแก้วมีสีเขียวและสีเขียวที่เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ Pr_2O_3 เนื่องจากเพรซีโอดีเมียมเป็นสารเคมีที่มีสีเขียว แสดงดังภาพ ที่ 1



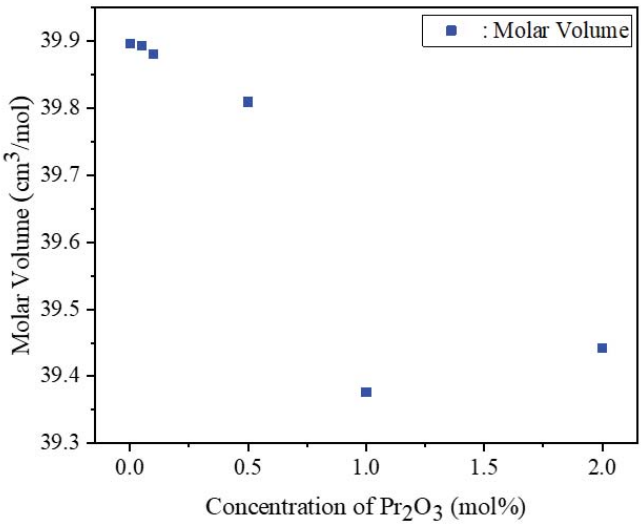
0.00 mol% 0.05 mol% 0.10 mol% 0.50 mol% 1.00 mol% 2.00 mol%

ภาพที่ 1 ลักษณะของตัวอย่างของแก้วสตรอนเชียมแบเรียมฟอสเฟตที่เจือด้วย Pr_2O_3

ภาพที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและดรรชนีหักเหแสงของแก้วสตรอนเชียมแบเรียมฟอสเฟตกับความเข้มข้นของ Pr_2O_3 ผลการศึกษาความหนาแน่นของตัวอย่างแก้วพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ Pr_2O_3 โดยมีค่าอยู่ในช่วง 3.3267 ถึง 3.4603 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นแสดงให้เห็นถึงการแทนที่ของ P_2O_5 โดย Pr_2O_3 เนื่องจากมวลโมเลกุลของ P_2O_5 (141.9445 กรัม/โมล (g/mol)) มีค่าน้อยกว่ามวลโมเลกุลของ Pr_2O_3 (329.814 กรัม/โมล (g/mol)) ดังนั้นเมื่อเพิ่มเพรซีโอดีเมียมออกไซด์เข้าไปแทนที่ P_2O_5 ในโครงสร้างแก้วจึงส่งผลให้ความหนาแน่นของตัวอย่างแก้วมีค่าเพิ่มขึ้น จากผลการศึกษาดรรชนีหักหเหแสงของตัวอย่างแก้ว พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของ Pr_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า Pr_2O_3 เข้าไปแทนที่ P_2O_5 ในโครงสร้างแก้ว ทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและส่งผลให้ดรรชนีหักเหแสงของตัวอย่างแก้วเพิ่มขึ้น โดยเป็นไปตามหลักทฤษฎีไดอิเล็กตริกแบบดั้งเดิม ซึ่งค่าดรรชนีหักเหแสงจะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่น และสภาพการเกิดขั้วได้ของอะตอมในวัสดุ (Kaewkao, J., 2011: pp.8) แสดงดังภาพที่ 2

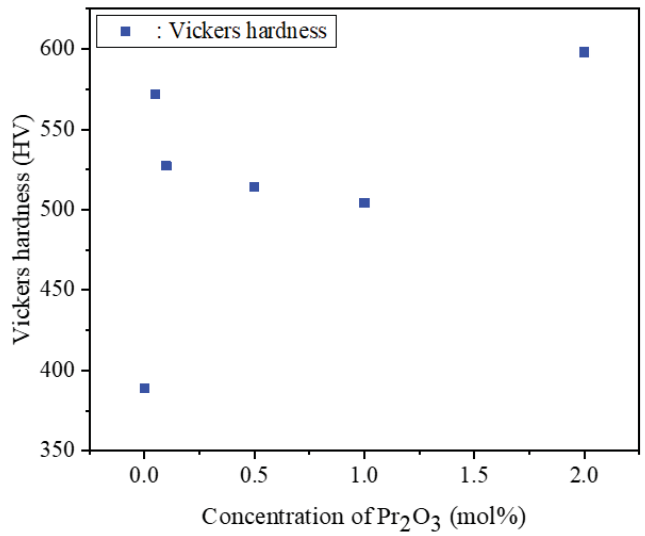


ภาพที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและดรรชนีหักเหแสงของแก้วสตรอนเชียมแบเรียมฟอสเฟตกับความเข้มข้นของ Pr_2O_3



ภาพที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรเชิงโมลของแก้วสตรอนเชียมแบเรียมฟอสเฟตกับความเข้มข้นของ Pr_2O_3

ภาพที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรเชิงโมลของแก้วสตรอนเชียมแบเรียมฟอสเฟตกับความเข้มข้นของ Pr_2O_3 ผลการศึกษาปริมาตรเชิงโมลของตัวอย่างแก้ว พบว่าปริมาตรเชิงโมลมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของ Pr_2O_3 เพิ่มขึ้นจนถึง 1.00 mol% จากนั้นปริมาตรเชิงโมลจะมีค่าเพิ่มขึ้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเติม Pr_2O_3 ที่ความเข้มข้น 0.05-1.00 mol% เพรซีโอดีเมียมได้ประพฤติตัวเป็นโครงสร้างหลักของแก้ว (Intermediate former) เข้าไปเชื่อมต่อกับออกซิเจนที่สะพานเชื่อมต่อประจุในโครงสร้างแก้ว ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกับออกซิเจน (Bridging Oxygen: BO) เป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ช่องว่างในโครงสร้างแก้วลดลงและทำให้ปริมาตรเชิงโมลของตัวอย่างแก้วลดลง และเมื่อเจือความเข้มข้นของ Pr_2O_3 ที่ 2.00 mol% สามารถอธิบายได้ว่า Pr_2O_3 ได้ประพฤติตัวเป็นตัวปรับปรุงโครงสร้างแก้ว (Network modifier) เข้าไปทำลายออกซิเจนที่สะพานเชื่อมต่อประจุทำให้เกิดออกซิเจนไม่จับพันธะ (Non-bridging oxygen: NBO) เพิ่มขึ้นในโครงสร้างแก้ว ส่งผลให้โครงสร้างแก้วเกิดช่องว่างมากขึ้นและเกิดการขยายตัวของปริมาตรเชิงโมลเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของแก้วสตรอนเชียมแบเรียมฟอสเฟต กับความเข้มข้นของ Pr_2O_3

ภาพที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของแก้วสตรอนเชียมแบเรียมฟอสเฟตกับความเข้มข้นของ Pr_2O_3 ผลการทดลองพบว่าค่าความแข็งของแก้วสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง โดยช่วงแรกค่าความแข็งแบบวิกเกอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความเข้มข้นของเพรซีโอดิเมียมออกไซด์มีค่าเท่ากับ 0.05 mol% ช่วงที่สองค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของแก้วมีค่าลดลงเมื่อปริมาณความเข้มข้นของเพรซีโอดิเมียมออกไซด์มีค่าเท่ากับ 0.10-1.00 mol% และช่วงที่สามค่าความแข็งแบบวิกเกอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความเข้มข้นของเพรซีโอดิเมียมออกไซด์มีค่าเท่ากับ 2.00 mol% ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนกับปริมาณความเข้มข้นของเพรซีโอดิเมียมออกไซด์ที่เจือลงไปในแก้ว เนื่องจากแก้วเป็นวัสดุอสัณฐาน มีโครงสร้างที่ไม่แน่นอน ดังนั้นการเจือเพรซีโอดิเมียมออกไซด์จึงไม่ส่งผลกับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของแก้วสตรอนเชียมแบเรียมฟอสเฟต

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการหลอมแก้วสตรอนเชียมแบเรียมฟอสเฟตที่มีปริมาณความเข้มข้นของเพรซีโอดิเมียมออกไซด์แตกต่างกัน คือ 0.00, 0.05, 0.10, 0.50, 1.00 และ 2.00 mol% โดยทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพและความแข็งของตัวอย่างแก้ว ผลการหลอมตัวอย่างแก้วพบว่าตัวอย่างแก้วมีความใสสม่ำเสมอและมีสีเขียวเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของเพรซีโอดิเมียมออกไซด์ ผลการศึกษาความหนาแน่นและดรรชนีหักเหแสงของตัวอย่างแก้วพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ Pr_2O_3 ในขณะที่ปริมาตรเชิงโมลแสดงให้เห็นว่า Pr_2O_3 ประพฤติตัวเป็นโครงสร้างหลักของแก้วที่ความเข้มข้น 0.05-1.00 mol% จากนั้นประพฤติตัวเป็นตัวปรับปรุงโครงสร้างแก้วที่ความเข้มข้น 2.00 mol% ผลการศึกษาค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของตัวอย่างแก้วพบว่าเมื่อเจือ Pr_2O_3 ลงไปในแก้ว ไม่ส่งผลกับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของแก้วสตรอนเชียมแบเรียมฟอสเฟต

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ(วช.) สำหรับความร่วมมือและการสนับสนุนงานวิจัยนี้เป็นอย่างดี

6. เอกสารอ้างอิง

Jayasankar, C.K. Lim, K.S. Vijaya, N. & Kesavulu, C.R. (2013). Structural and luminescence properties of Sm^{3+}ions in zinc fluorophosphate glasses. **Optical materials**, (35), 1557-1563.

Jayasankar, C.K. Vijaya, R. Venkatrumu, V. Babu, P. Rodriguez-Mendoza, U.R. & Lavin, V. (2013). Spectroscopic properties of Sm^{3+} ions in phosphate and fluorophosphates glasses. **Journal of Non-Crystalline Solids**, (365), 85-92.

Jayasankar, C.K. & Basavapoornima, Ch. (2014). Spectroscopic and photoluminescence properties of Sm^{3+}ions in Pb-K-Al-Na phosphate glasses for efficient visible lasers. **Journal of Luminescence**, (153), 233-241.

Moorthy, L.R. Rasool, Sk.N. & Jayasankar, C.K. (2013). Optical and luminescence properties of Dy^{3+} ions in phosphate-based glasses. **Solid State Sciences**, (22). 82-90.

C.K. Jayasankar and C.R. Kesavulu. (2012). Spectroscopic properties of Sm^{3+} ions in lead fluorophosphate glasses. **Journal of Luminescence**, (132), 2802–2809.

Ming, Ch., Han, Y., Song, F., Ren, X., An, L. (2013). **Strong white light in P_2O_5–Li_2O–Yb_2O_3–Sb_2O_3 glass doped with Pr^{3+} ion**. Optics Communications, 311, 245–247.

Mahamuda, Sk., Swapna, K., Srinivasa Rao, A., Sasikala, T., Rama Moorthy, L. (2013). **Reddish-orange emission from Pr^{3+} doped zinc alumino bismuth borate glasses**. Physica B, 428, 36–42.

Vijaya Kumar, M.V., Rama Gopal, K., Reddy, R.R., Lokeswara Reddy, G.V., Sooraj Hussain, N., Jamalaiah B.C. (2013). **Application of modified Judd–Ofelt theory and the evaluation of radiative properties of Pr^{3+}doped lead telluroborate glasses for laser applications**. Journal of Non-Crystalline Solids, 364, 20–27.

Ramteke, D.D., Swart, H.C., Gedam, R.S. (2016). **Spectroscopic properties of Pr^{3+} ions embedded in lithium borate glasses.** Physica B: Condensed Matter, 480, 111-115.

K. Boonin, J. Kaewkhao, T. Ratana and P. Limsuwan. (2011). **Preparation and properties of Bi_2O_3-B_2O_3-Nd_2O_3 glass system**. Physics Procedia, (8), 207-211.

Trevor Sidaway, **Hardness Testing - An Integral Part of Quality Control**, Materials World, Vol. 12 no. 11 pp. 583-84. November 1994.

Kaewkhao, J., Srisittipokakun, N., Kirdsiri, K, Kedkaew, C. and Limsuwan, P., (2012). Optical and Physical Investigation of Fe2O3 Doped in Soda-Lime Silicate Glass at Different Melting Temperature. **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 103, pp. 97-101.

.