



รายงานผลการวิจัย

เรื่อง

การสังเคราะห์และการตรวจลักษณะเฉพาะของวอลลาสโทไนต์ที่เตรียมจาก
เพอร์ไลต์และเปลือกไข่เหลือทิ้งด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

Synthesis and characterization of wollastonite prepared from perlite
and waste eggshell by solid state reaction

โดย

นภัสภ์ จันทรมี และรัชดาภรณ์ ปันทะรส

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

2557



รายงานผลการวิจัย

เรื่อง การสังเคราะห์และการตรวจลักษณะเฉพาะของวอลลาสทอนที่เตรียมจาก
เพอร์ไลต์และเปลือกไข่เหลือทิ้งด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง
Synthesis and characterization of wollastonite prepared from perlite
and waste eggshell by solid state reaction

ได้รับการจัดสรรงบประมาณวิจัย ประจำปี 2556
จำนวน 300,000 บาท

หัวหน้าโครงการ

นางสาวนภัสต์ จันทรมี

ผู้ร่วมโครงการ

นางสาวรัชดาภรณ์ ปันทะรส

งานวิจัยเสร็จสิ้นสมบูรณ์

25/ก.ย./2557

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย เรื่อง การสังเคราะห์และการตรวจลักษณะเฉพาะของวอลลาสทโทไนต์ที่เตรียมจากเพอร์ไลต์และเปลือกไข่เหลือทิ้งด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง(Synthesis and characterization of wollastonite prepared from perlite and waste eggshell by solid state reaction) ได้สำเร็จลุล่วง โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก สำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปีงบประมาณ 2556 ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่อนุเคราะห์เรื่องสถานที่และอุปกรณ์บางอย่างที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยให้เสร็จสมบูรณ์

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณกมล โยริยะ ที่ให้ความอนุเคราะห์เปลือกไข่จำนวนมาก ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในงานวิจัย ขอขอบคุณ ดร.กฤษณะ ถาน้ำเที่ยง สาขาวิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้คำแนะนำการแปรผลทางสถิติในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณบริษัท SIBELCO minerals (Thailand) Co.,Ltd ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างวอลลาสทโทไนต์ทางการค้า

ผู้วิจัย

สารบัญ

หน้า

สารบัญตาราง	๗
สารบัญภาพ	๓
บทคัดย่อ	1
Abstract	2
คำนำ	3
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	6
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการ	17
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย	20
สรุปผลการวิจัย	37
เอกสารอ้างอิง	38
ภาคผนวก	40

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 1	สมบัติทางกายภาพของวอลลาสโทไนต์	7
ตารางที่ 2	ปริมาณสารที่พบในเปลือกไข่ไก่ ไข่เป็ด และไข่นกกระทา	8
ตารางที่ 3	สมบัติทางกายภาพของหินเพอร์ไลต์	11
ตารางที่ 4	องค์ประกอบทางเคมีของเพอร์ไลต์ขยายตัว	22
ตารางที่ 5	ระยการไหลของเคลือบหินปูน-สังกะสีที่เตรียมจาก วอลลาสโทไนต์สังเคราะห์ เคลือบที่เตรียมจากหินปูน และเคลือบที่เตรียมจากวอลลาสโทไนต์ทางการค้า	33
ตารางที่ 6	สรุปค่าทางสถิติในการคำนวณความแปรปรวนแบบ One-way ANOVA	34

สารบัญภาพ

ภาพ		หน้า
ภาพที่ 1	แผนภาพสมดุลภาคระหว่าง $\text{CaO} - \text{SiO}_2$ แสดงการเกิดวอลลาสโทไนต์ที่อัตราส่วนผสม 48 : 52 โดยน้ำหนัก หรือ 1 : 1 โดยโมล	6
ภาพที่ 2	ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของเปลือกไข่ด้วยเทคนิค DTA/TG	9
ภาพที่ 3	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเปลือกไข่เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส	10
ภาพที่ 4	ลำดับกระบวนการเผาหินเพอร์ไลต์	12
ภาพที่ 5	ลักษณะพื้นฐานของวัตถุดิบตั้งต้น	20
ภาพที่ 6	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเปลือกไข่เผา ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส	21
ภาพที่ 7	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเพอร์ไลต์ขยายตัว	21
ภาพที่ 8	การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของของผสมระหว่างเปลือกไข่เผาและเพอร์ไลต์ขยายตัว	22
ภาพที่ 9	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของของผสมระหว่างเปลือกไข่เผาและเพอร์ไลต์ขยายตัว ที่มีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาเป็น 1 : 1 เผาที่อุณหภูมิ 400 – 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	24
ภาพที่ 10	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของของผสมระหว่างเปลือกไข่เผาและเพอร์ไลต์ขยายตัวที่มีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาเป็น 1 : 0.8 1 : 1 1 : 1.2 และ 1 : 1.4 เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	25
ภาพที่ 11	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของของผสมระหว่างเปลือกไข่เผาและเพอร์ไลต์ขยายตัวที่มีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาเป็น 1 : 1.2 และ 1 : 1.4 เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง	26

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
ภาพที่ 12	รูปแบบการเลี้ยงเบนรังสีเอ็กซ์ของของผสมระหว่างเปลือกไข่เผาและเพอร์ไลต์ขยายตัวที่มีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาเป็น 1 : 1.4 เเผที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 และ 5 ชั่วโมง	27
ภาพที่ 13	ลักษณะพื้นฐานของผงสังเคราะห์เตรียมจากการใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาเป็น (ก) 1 : 0.8 (ข) 1 : 1 (ค) 1 : 1.2 (ง) 1 : 1.4 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (จ) 1 : 1.2 เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (ฉ) 1 : 1.4 เป็นเวลา 5 ชั่วโมง	28
ภาพที่ 14	เคลือบหลังเผา 1100 องศาเซลเซียส	30
ภาพที่ 15	เคลือบหลังเผา 1150 องศาเซลเซียส	31
ภาพที่ 16	เคลือบหลังเผา 1200 องศาเซลเซียส	32
ภาพที่ 17	การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบสูตรที่ 4 ทั้ง 3 ระบบ	35
ภาพที่ 18	การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบสูตรที่ 9 ทั้ง 3 ระบบ	36

การสังเคราะห์และการตรวจลักษณะเฉพาะของวอลลาสโทไทน์ที่เตรียมจากเพอร์ไลต์และเปลือกไข่เหลือทิ้งด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

Synthesis and characterization of wollastonite prepared from perlite and waste eggshell by solid state reaction

นภัสต์ จันทรามี¹ และ รัชดาภรณ์ ปันทะรส²

Napat Chantaramee and Ratchadaporn Puntharod

¹ สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่ 5 0290

² สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่ 50290

บทคัดย่อ

การศึกษานี้สังเคราะห์วอลลาสโทไทน์ (CaSiO_3) โดยใช้แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เหลือทิ้งร่วมกับซิลิกาจากเพอร์ไลต์ขยายตัวด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง เมื่อใช้อัตราส่วนผสมระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาเป็น 1 : 1 โดยโมล และเผาซินเทอร์ พบว่า วอลลาสโทไทน์เกิดปะปนกับแคลไซต์ (CaCO_3) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ขณะที่ช่วงอุณหภูมิ 1000 – 1100 องศาเซลเซียส พบวอลลาสโทไทน์และเจลาไนต์ ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) และจากการปรับอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาบ่งชี้ว่า ความเป็นผลึกของวอลลาสโทไทน์ชัดเจนขึ้นเมื่ออัตราส่วนผสมระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาเป็น 1 : 1.4 เเผาที่ 1100 องศาเซลเซียส แห่อุณหภูมิ 5 ชั่วโมง วอลลาสโทไทน์สังเคราะห์สามารถใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับเคลือบระบบหินปูน-สังกะสี ซึ่งทำให้เคลือบเริ่มหลอมที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียสและหลอมตัวดีที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส เคลือบมีความหนืดต่ำและมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนค่อนข้างต่ำกว่าเมื่อเทียบกับเคลือบระบบหินปูน-สังกะสีที่ใช้อ้างอิง

คำสำคัญ : เปลือกไข่ เพอร์ไลต์ วอลลาสโทไทน์

Abstract

In this study, wollastonite (CaSiO_3) was synthesized using calcium oxide from the waste eggshell and silica from the expanded perlite by solid-state reaction method. The mixture of $\text{CaO} : \text{SiO}_2$ was prepared to a molar ratio of 1 : 1, then sintered. It was observed that wollastonite arises with calcite (CaCO_3) at 800°C . While sintering at the temperature of 1000 and 1100°C , wollastonite has developed with gehlignite ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$). Moreover, the mixtures with different molar ratio of $\text{CaO} : \text{SiO}_2$ were also examined. A mixture with $\text{CaO} : \text{SiO}_2$ molar ratio of 1 : 1.4, which sintered at 1100°C for 5 h provided a noticeable crystalline wollastonite phase. The synthetic wollastonite was used as the starting material for the lime-zinc glaze. The synthetic wollastonite based lime-zinc glaze began to melt at 1100°C and completely melt at 1150°C . It showed a relatively low viscosity and slightly low values of linear thermal expansion coefficient compare with the reference lime-zinc glaze.

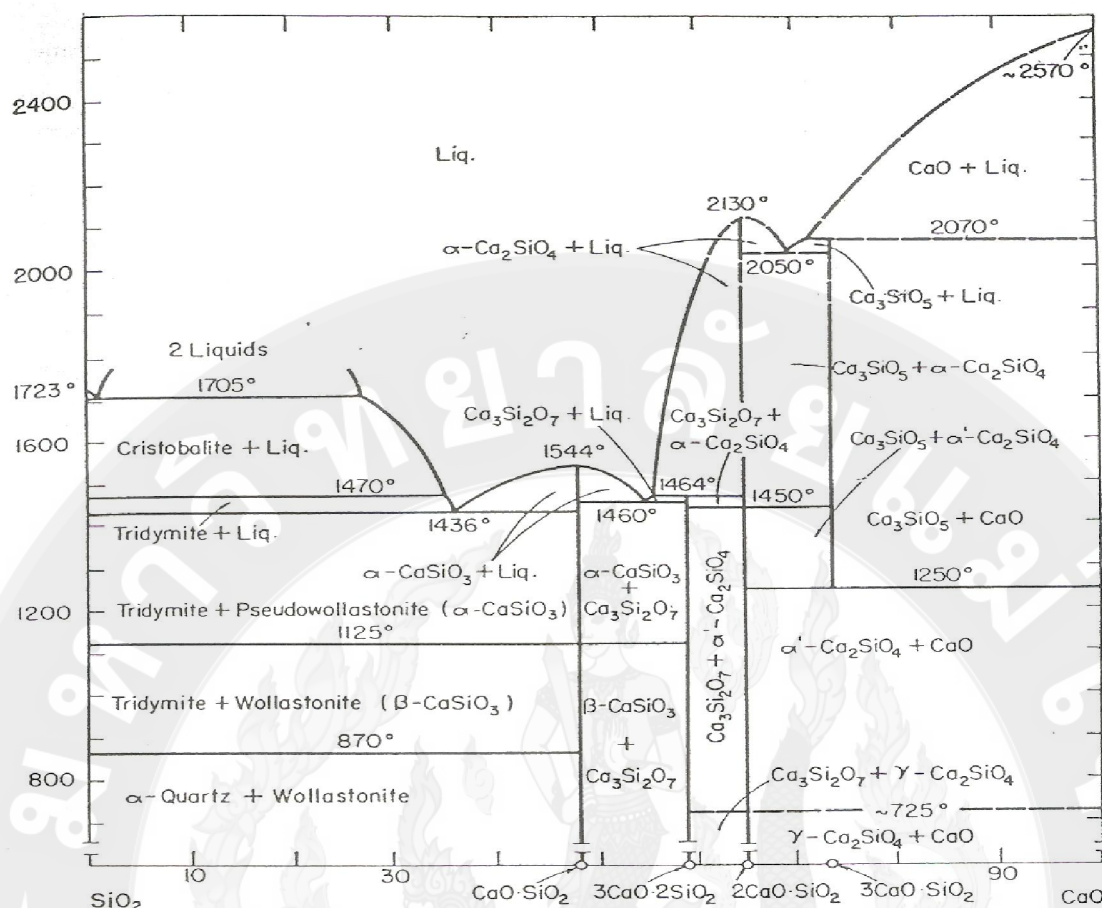
Key words : Eggshell, Perlite, Wollastonite

คำนำ

วอลลาสโทไนต์ (Wollastonite) เป็นแร่อุตสาหกรรม ซึ่งประกอบด้วยแคลเซียมซิลิเกต สูตรโมเลกุลคือ CaSiO_3 หรือ $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ โดยมีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 48 ซิลิกา (SiO_2) ร้อยละ 51 และมลทินปะปนต่างๆ ซึ่งมีปริมาณรวมไม่เกินร้อยละ 1.5 อนุภาคของวอลลาสโทไนต์เป็นแท่งเข็มและมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง ดังนั้นเมื่อนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในอุตสาหกรรมพลาสติก จะเพิ่มความสามารถในการทนทานต่อความร้อน และให้ความเป็นฉนวนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีการนำวอลลาสโทไนต์ไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ อีกมาก เช่น อุตสาหกรรมเซรามิก อุตสาหกรรมแก้ว อุตสาหกรรมซีเมนต์ อุตสาหกรรมสี และ อุตสาหกรรมกระดาษ สำหรับโรงงานเซรามิกประเทศไทยยังไม่นิยมใช้งานวอลลาสโทไนต์อย่างแพร่หลาย ซึ่งในความเป็นจริงวอลลาสโทไนต์สามารถใช้ทั้งในเนื้อดินและในเคลือบ โดยเป็นส่วนช่วยลดการหดตัวของเนื้อดินและชิ้นงาน สำหรับในอุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้างสามารถใช้วอลลาสโทไนต์ทดแทนแมกนีเซียมซิลิเกตหรือแร่ใยหินที่เชื่อกันว่าเป็นสารก่อมะเร็งได้อีกด้วย ในประเทศไทย พบแร่วอลลาสโทไนต์ในท้องที่จังหวัด ลพบุรี สระบุรี และในบางท้องที่ภาคตะวันตกของนครราชสีมา แต่ยังไม่มีการสำรวจทางธรณีวิทยาแหล่งแร่อย่างจริงจังเพื่อพัฒนานำขึ้นมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันมีการศึกษาการสังเคราะห์วอลลาสโทไนต์จากวัตถุดิบตั้งต้นที่มีราคาถูก หาได้ทั่วไปเพื่อลดต้นทุนในกระบวนการผลิต และตอบสนองความต้องการของโรงงานอุตสาหกรรม วอลลาสโทไนต์สังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่เป็นแหล่งของแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งได้แก่ หินปูน เปลือกไข่ แคลเซียมไนเตรด ซอล์ค และเปลือกหอย เป็นต้น และวัตถุดิบที่เป็นแหล่งของซิลิกาเช่น ควอตซ์ ซิลิกาเจล ซิลิกาฟุ้ง แกลบข้าว และไดอะทอมไมต์ เป็นต้น

การสังเคราะห์วอลลาสโทไนต์ใช้หลักการของการเข้าทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมออกไซด์ และซิลิกา ที่อัตราส่วน 1 : 1 โดยโมล หรือ ที่อัตราส่วนผสม 48 : 52 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในแผนภาพสมดุลภาค (Phase diagram) ตามรูปที่ 1



ภาพที่ 1 แผนภาพสมดุลภาคระหว่าง CaO - SiO₂ แสดงการเกิดวอลลาสไทต์

ที่อัตราส่วนผสม 48 : 52 โดยน้ำหนัก หรือ 1 : 1 โดยโมล

จากแผนภาพสมดุลภาคตามภาพที่ 1 นั้น การทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาสามารถเกิดสารประกอบได้ 4 ชนิด ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและสัดส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกา สารประกอบดังกล่าวได้แก่

1. Ca₃SiO₅ หรือ 3CaO.SiO₂ มีชื่อทางแร่เรียกว่า แฮทรูไรต์ (Hatrurite) ฟอรัมตัวเมื่ออัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเป็น 3 : 1 สารประกอบนี้เสถียรระหว่างอุณหภูมิ 1250 – 2070 องศาเซลเซียส หากอุณหภูมิสูงกว่า 2070 องศาเซลเซียส จะเริ่มหลอมอย่างต่อเนื่องไม่สมบูรณ์ (Incongruently melting) เป็นเฟสของเหลวร่วมกับแคลเซียมออกไซด์

2. Ca_2SiO_4 หรือ $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ มีชื่อทางแร่เรียกว่า ลาไนต์ (Larnite) ฟอรัมตัวเมื่ออัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเป็น 2 : 1 และหลอมอย่างต่อเนื่องสมบูรณ์ (Congruently melting) เป็นของเหลวที่อุณหภูมิสูงถึง 2130 องศาเซลเซียส

3. $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$ หรือ $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2$ มีชื่อทางแร่เรียกว่า แร่งไคไนต์ (Rankinite) ฟอรัมตัวเมื่ออัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเป็น 3 : 2

4. CaSiO_3 หรือ $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ มีชื่อทางแร่เรียกว่า วอลลาสโทไทน์ มีการฟอรัมตัวเมื่ออัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเป็น 1 : 1 และมีการเปลี่ยนเฟสจาก $\beta\text{-CaSiO}_3$ เป็น $\alpha\text{-CaSiO}_3$ ที่อุณหภูมิ 1125 องศาเซลเซียส และหลอมอย่างต่อเนื่องสมบูรณ์เป็นเฟสของเหลวที่อุณหภูมิ 1544 องศาเซลเซียส

การเตรียมวอลลาสโทไทน์สามารถเตรียมได้จากวัตถุดิบที่เป็นแหล่งของแคลเซียมออกไซด์ และวัตถุดิบที่ให้ซิลิกาซึ่งสามารถหาได้จากวัตถุดิบเหลือใช้และแร่ธรรมชาติโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีราคาแพง การศึกษาครั้งนี้จึงสนใจที่จะศึกษาการเตรียมวอลลาสโทไทน์จากเปลือกไข่ซึ่งเป็นแหล่งของแคลเซียมคาร์บอเนตหรือแคลไซด์ เมื่อผ่านการแยกเชื้อโปรตีนและเผาที่อุณหภูมิ 800 - 1000 องศาเซลเซียส จะมีการสลายตัวดังนี้



โดยใช้ร่วมกับเพอร์ไลต์ (Perlite) ซึ่งเป็นหินแก้วภูเขาไฟชนิดหนึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีหลักเป็นซิลิกาในปริมาณร้อยละ 74.11 – 89.91 (ดรุณี, 2549) โดยแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เผาเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิกาจากเพอร์ไลต์ได้เป็นวอลลาสโทไทน์ อย่างไรก็ตามเพอร์ไลต์มีสารประกอบออกไซด์อื่นปะปน จึงจำเป็นต้องคำนวณปริมาณการใช้เปลือกไข่เผาหรือแคลเซียมออกไซด์ และเพอร์ไลต์ ตลอดจนอุณหภูมิเผาและระยะเวลาเผาให้เหมาะสม ซึ่งเบื้องต้นยึดหลักสัดส่วนผสมระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกา ตลอดจนอุณหภูมิเผา ตามที่แสดงในแผนภาพสมดุลภาคที่ได้กล่าวมาแล้ว การศึกษาในครั้งนี้จึงมุ่งศึกษาการเตรียมวอลลาสโทไทน์จากเปลือกไข่เหลือทิ้งซึ่งเป็นแหล่งของแคลเซียมออกไซด์ร่วมกับเพอร์ไลต์ซึ่งเป็นหินแก้วภูเขาไฟชนิดหนึ่งที่องค์ประกอบทางเคมีหลักเป็นซิลิกา โดยเป็นการสนับสนุนการเพิ่มมูลค่าของทรัพยากรแร่และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาเพื่อเพิ่มมูลค่าของทรัพยากรแร่เพอร์ไลต์ และเปลือกไข่ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับการเตรียมวอลลาสโทไนต์ และมีประเด็นการศึกษา ดังต่อไปนี้

1. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมวอลลาสโทไนต์
2. เพื่อตรวจลักษณะเฉพาะของวอลลาสโทไนต์ที่เตรียมได้สำหรับเป็นปัจจัยบ่งชี้สำหรับการนำวอลลาสโทไนต์ไปประยุกต์ใช้งาน
3. ทดลองใช้วอลลาสโทไนต์ที่เตรียมได้สำหรับการทำเคลือบเซรามิก และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพเบื้องต้นของเคลือบ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบผลทางด้านกายภาพของเคลือบที่ใช้วอลลาสโทไนต์สังเคราะห์เป็นวัตถุดิบตั้งต้น
2. ทราบลำดับขั้นตอนสำหรับการสังเคราะห์วอลลาสโทไนต์จากเปลือกไข่เผาและเพอร์ไลต์
3. เพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและทรัพยากรแร่ ตลอดจนเป็นการเสนอแนวทางการใช้ประโยชน์จากการใช้วอลลาสโทไนต์สังเคราะห์เพื่อการทำเคลือบเซรามิก

การตรวจเอกสาร

วอลลาสโทไนต์

วอลลาสโทไนต์ หรือแคลเซียมซิลิเกต (CaSiO_3) ใช้เป็นวัตถุดิบสำคัญในอุตสาหกรรมเซรามิก โดยสามารถใช้ได้ทั้งในเนื้อดินและในเคลือบ ช่วยปรับปรุงค่าความแข็งของเนื้อดินทั้งก่อนและหลังเผา ทั้งยังช่วยปรับปรุงความแข็งของเคลือบ ในอุตสาหกรรมก่อสร้างสามารถนำมาใช้แทนแร่ใยหินหรือแมกนีเซียมซิลิเกตได้อีกด้วย

วอลลาสโทไนต์ในธรรมชาติจะเกิดขึ้นสองชนิดคือ พาราวอลลาสโทไนต์ (Parawollastonite) โครงสร้างผลึกแบบ โมโนคลินิก (Monoclinic) และ ชูโดวอลลาสโทไนต์ (Pseudowollastonite) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบไตรคลินิก (Triclinic) โดยมีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 48 ซิลิกา ร้อยละ 51 และมลทินต่างๆ ปะปน รูปร่างอนุภาคของวอลลาสโทไนต์ในธรรมชาติเป็นแบบแท่งเข็ม โดย

กระบวนการเกิดแบบ Thermal metamorphosis ของหินประเภทซิลิเซียสคาร์บอเนต (Siliceous carbonate) คุณสมบัติโดยทั่วไปของวอลลาสไทต์แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของวอลลาสไทต์

คุณสมบัติ	ลักษณะ / ค่าที่ได้
สี (Color)	ขาว
ความสว่าง (Brightness)	ร้อยละ 85 – 93
ดัชนีหักเหแสง (Refractive index)	1.63
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	2.8 - 2.9
ความหนาแน่น (Apparent density)	2264 กก. / ลบ.ม.
ค่าความเป็นกรดด่าง (pH)	9 – 10
การดูดซับน้ำมัน (Oil adsorption)	22 – 45 กรัมไขมัน/กรัมของวอลลาสไทต์
จุดหลอมเหลว (Softening point)	1540 องศาเซลเซียส
น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight)	116 กรัม / โมล
ผลึก (Crystal)	แท่งเข็ม
ค่าความแข็งตามมาตรฐานของโมห์ (Mohs scale)	4.5 – 5.0

ตามทฤษฎี วอลลาสไทต์เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาที่อัตราส่วน 1 : 1 โดยโมล หรือที่อัตราส่วนผสมระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเป็น 48 : 52 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในแผนภาพสมดุลภาค ตามภาพที่ 1 ทั้งนี้กระบวนการเกิดวอลลาสไทต์สามารถอธิบายในรูปของสมการเคมี ได้ดังนี้



ความแตกต่างระหว่างวอลลาสไทต์ที่พบในธรรมชาติและวอลลาสไทต์สังเคราะห์ คือรูปแบบโครงสร้างผลึก ส่วนตัวแปรได้แก่ อุณหภูมิและความดันที่มีส่วนในกระบวนการเกิดของวอลลาสไทต์ในธรรมชาติ ซึ่งรวมไปถึงการใช้ระยะเวลาการเกิดที่ยาวนานอีกด้วย

ปัจจุบันมีการศึกษาการสังเคราะห์วอลลาสไทต์ด้วยวัตถุดิบตั้งต้นที่มีราคาถูก หาได้ทั่วไปเพื่อลดต้นทุนในกระบวนการผลิต และตอบสนองความต้องการของโรงงานอุตสาหกรรม วอลลาสไทต์สามารถเตรียมได้จากวัตถุดิบซึ่งเป็นแหล่งของแคลเซียมออกไซด์ ได้แก่ หินปูน เปลือกไข่ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซอล์ก

เปลือกหอย และวัตถุดิบซึ่งเป็นแหล่งที่ให้ซิลิกา ได้แก่ ควอตซ์ ซิลิกาเจล ซิลิกาฟูม แกลบข้าว โดยจะต้องมีการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ แล้วคำนวณอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์วัสดุลาโตนี

เปลือกไข่

เปลือกไข่จากภาคครัวเรือนและจากภาคอุตสาหกรรมอาหาร จะถูกกำจัดโดยทิ้งให้เป็นภาระของเทศบาลร่วมกับขยะชนิดอื่นๆ โดยการฝังกลบซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่าย บริเวณที่ฝังกลบเปลือกไข่ยังนำมาซึ่งปัญหาทางสิ่งแวดล้อมมากมาย เช่น เป็นแหล่งเพาะพันธุ์ของแมลงวันและเป็นที่อยู่อาศัยของหนู ส่งกลิ่นเหม็นเนื่องจากเกิดแก๊สแอมโมเนีย (NH_3) และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ที่ผลิตขึ้นจากการหมักกรดอะมิโนที่ได้จากการย่อยสลายส่วนที่เป็นโปรตีนในเปลือกไข่โดยจุลินทรีย์

เปลือกไข่ของสัตว์ปีกโดยทั่วไปประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนที่เป็นเปลือกไข่และเยื่อหุ้มภายในโครงสร้าง ส่วนใหญ่เปลือกไข่ของสัตว์ปีกเป็นผลึกแคลเซียมคาร์บอเนต ร้อยละ 98.2 ของน้ำหนักเปลือกไข่ แมกนีเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 0.9 แคลเซียมฟอสเฟต ร้อยละ 0.9 ตัวอย่างสารและปริมาณสารที่พบในเปลือกไข่แต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 2

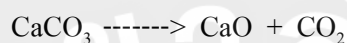
ตารางที่ 2 ปริมาณสารที่พบในเปลือกไข่ไก่ ไข่เป็ด และไข่นกกระทา (วิชัย, 2555)

สาร	ร้อยละ (โดยน้ำหนัก)		
	เปลือกไข่ไก่	เปลือกไข่เป็ด	เปลือกไข่นกกระทา
หินปูน	99.0	96.50	97.30
กำมะถัน	0.10	1.20	0.40
แมกนีเซียม	0.50	0.10	1.00
ฟอสฟอรัส	0.20	0.50	1.10
แคลเซียม	-	0.08	-

ไข่ 1 ฟองมีน้ำหนัก 50 – 60 กรัม ส่วนของเปลือกจะมีน้ำหนักประมาณ 6 กรัม ส่วนประกอบของเปลือกไข่เกือบทั้งหมดเป็น แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ประกอบกับสารอินทรีย์ โดยจะมีช่องว่างหรือรูพรุน (Pores) เกิดขึ้นจำนวนมากบนเปลือกไข่ เปลือกไข่ด้านในจะติดสนิทอยู่กับเยื่อเปลือกไข่ เปลือกไข่ชั้นนอกสุดจะมีสารอินทรีย์ (Organic material) ซึ่งเป็นเยื่อหุ้มชั้นนอก (Shell) เคลือบที่ผิวด้านนอกทั้งหมด

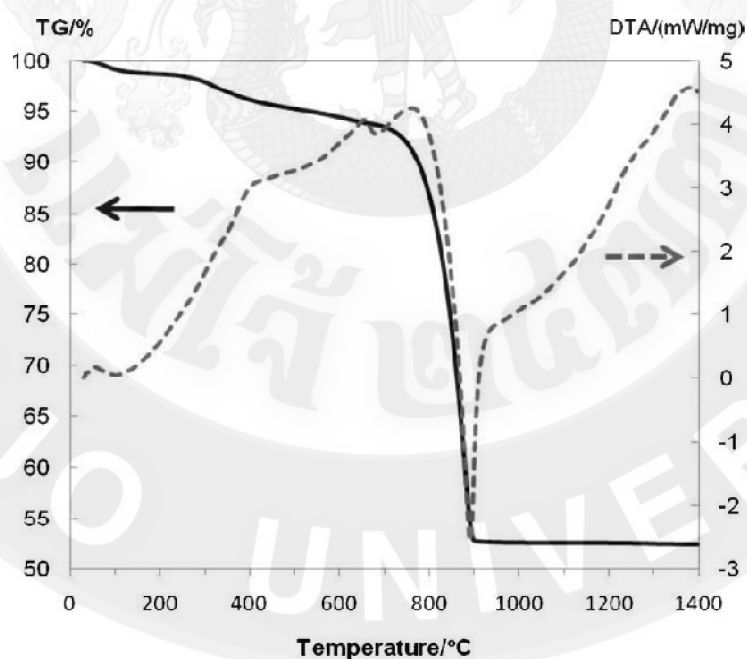
ใน ความแตกต่างของสีเปลือกไข่ เกิดจากพันธุ์ของสัตว์ สารอาหารที่สัตว์ได้รับ และสิ่งแวดล้อมที่สัตว์อาศัยอยู่

การเผาเปลือกไข่ที่อุณหภูมิสูงในสถานะที่ไม่มีออกซิเจนที่เรียกว่าระบบไพโรไลซิส (Pyrolysis) ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่เรียกว่ากระบวนการแคลไซน์ชัน (Calcination) ดังสมการ



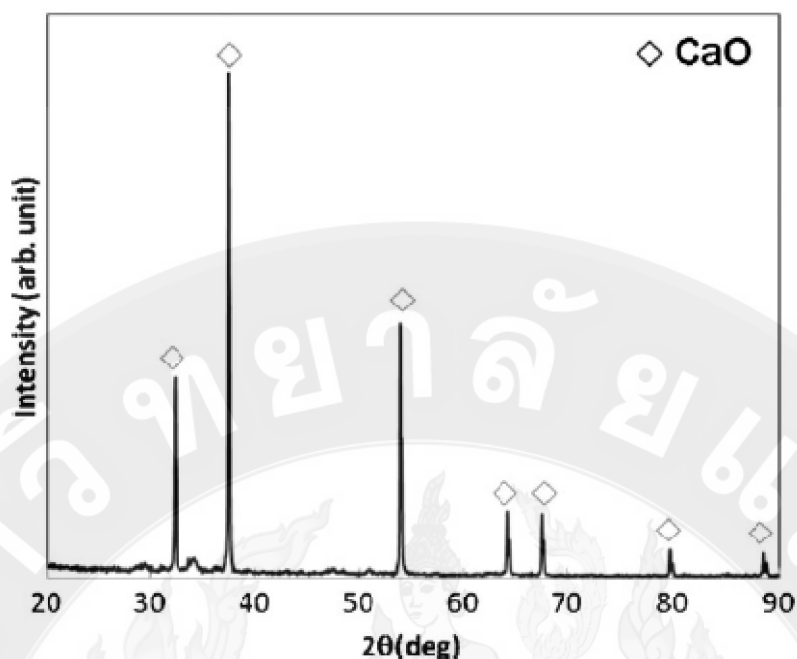
และแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผาเปลือกไข่มีคุณสมบัติเหมือนกับแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผาหินปูนทั่วไป

ในการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาเมื่อเผาเปลือกไข่ (Vichaphund S. *et al.* (2011)) เปลือกไข่เกิดปฏิกิริยาดูดความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส เนื่องจากการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต นอกจากนี้มีการสูญเสียน้ำหนักรวมทั้งสิ้นร้อยละ 44 ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 2 และจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน พบว่าเปลือกไข่สลายตัวให้แคลเซียมออกไซด์ที่ 900 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของเปลือกไข่ด้วยเทคนิค DTA/TG

(Vichaphund S. *et al.* (2011))



ภาพที่ 3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเปลือกไข่เผือกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

(Vichaphund S. *et al.* (2011))

เพอร์ไลต์

เพอร์ไลต์เป็นหินแก้วภูเขาไฟชนิดหนึ่งเกิดจากการที่น้ำเข้าไปทำปฏิกิริยากับหินออบซิเดียน (Obsidian) มักจะพบตามธรรมชาติ เมื่อเผาจะเกิดการขยายตัว มีส่วนประกอบเป็นซิลิกาค่อนข้างสูง ประมาณร้อยละ 70 หรือมากกว่า มีน้ำเป็นส่วนประกอบประมาณ ร้อยละ 2 - 5 ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารเคมีอื่นๆ ใฝ่ขานัก จัดอยู่ในจำพวกสารเฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมี

เพอร์ไลต์จากแหล่งต่างๆ มีความหนาแน่นแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับขนาดและความสามารถในการขยายตัวของอนุภาคหินเพอร์ไลต์เริ่มต้นก่อนการเผา จากการศึกษาแหล่งหินเพอร์ไลต์ในประเทศไทย โดย นิคม จิงอยู่สุข และปัญญา สุริยะฉาย (2530) สรุปว่า หินเพอร์ไลต์ในประเทศไทยพบในบริเวณหน่วยหินภูเขาดีนารายณ์ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 1200 ตารางกิโลเมตร ในเขตจังหวัดลพบุรี และ เพชรบูรณ์ สมบัติทางกายภาพโดยทั่วไปของหินเพอร์ไลต์ สรุปในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพของหินเพอร์ไลต์ (ครุณี, 2549)

คุณสมบัติ	ลักษณะ / ค่าที่ได้
สี (Color)	ขาว
ความสว่าง (Brightness)	ร้อยละ 70-80
ดัชนีการหักเหแสง (Refractive index)	1.47
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	2.2 -2.4
ความหนาแน่น (Apparent density)	40 – 170 กก. /ลบ.ม.
ความหนาแน่นขณะเปียก (Wet density)	80 – 320 กก. /ลบ.ม.
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	กลาง
การซึมซับน้ำ (Water adsorption)	ร้อยละ 200 – 600 โดยน้ำหนัก
การซึมซับน้ำมัน (Oil adsorption)	50 – 100 กรัมไขมัน/กรัมของเพอร์ไลต์
จุดหลอมเหลว (Softening point)	980 องศาเซลเซียส
ความชื้น (Moisture)	น้อยกว่าร้อยละ 1.0
น้ำหนักที่สูญเสียจากการเผา (Ignition loss) (3 ชั่วโมง 927 องศาเซลเซียส)	สูงสุดร้อยละ 1.5
ขนาดของอนุภาค (Particle size)	20 – 200 เมช

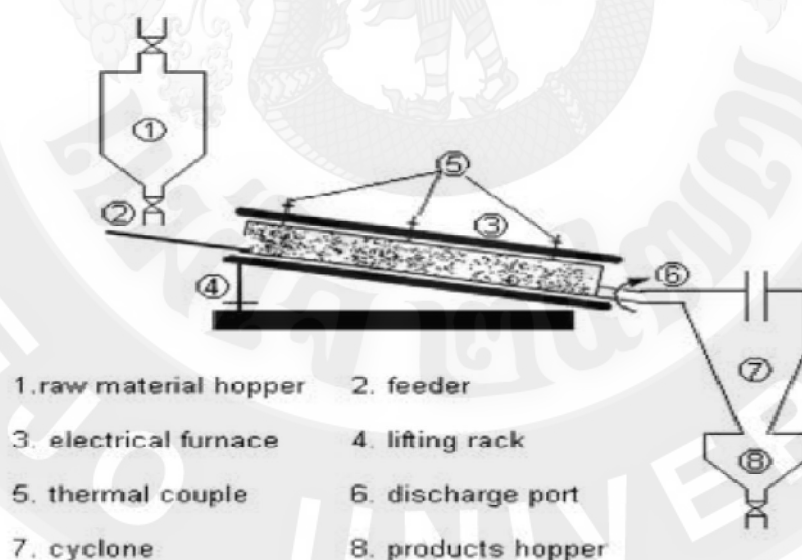
เนื่องจากสมบัติทางกายภาพที่หลากหลายของหินเพอร์ไลต์ จึงมีการนำไปพัฒนาใช้ในอุตสาหกรรม การก่อสร้าง เนื่องจากเป็นมีสภาพเบาและมีความแข็งแรงสูง จึงมีการนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนวัสดุก่อสร้าง เพื่อลดน้ำหนักและเพิ่มความแข็งแรง เช่น อิฐก่อสร้าง ฝ้าเพดาน อีกทั้งยังช่วยให้ปูนแห้งเร็ว มีความยืดหยุ่น ลดการเกิดรอยร้าว และยังทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันความร้อน

นอกจากนี้มีการนำเพอร์ไลต์มาใช้ในลักษณะตัวกรอง เนื่องจากเพอร์ไลต์มีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซับ ที่ดี และเมื่อต่อปฏิกิริยาทางเคมีในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เช่น เป็นตัวกรองน้ำผลไม้ในโรงงานผลิตน้ำผลไม้ เป็นตัวกรองน้ำสำหรับการกรองน้ำในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ สำหรับทางด้านการเกษตร มีการนำเพอร์ไลต์มาใช้ดูดซับน้ำเสีย บำบัดน้ำเสีย และมีการนำไปใช้ปรับปรุงบริเวณที่สภาพดินเสื่อม มีการผสมเพอร์ไลต์ลงไปในดินเพื่อช่วยให้ดินร่วน รักษาสมดุลระหว่างปริมาณของน้ำและอากาศที่มีในดินได้ สามารถเพิ่มความพรุนให้ดินเหนียวทำให้ปริมาณออกซิเจนในดินเหนียวเพียงพอต่อความต้องการของพืช และสามารถ

กักเก็บความชื้นได้ดีกว่าทราย 4 เท่า ซึ่งช่วยไม่ให้ดินแห้งจนเกินไป รักษาอุณหภูมิของดินไม่ให้เปลี่ยนแปลงมาก รวมไปถึงการปรับสภาพความเป็นกรดด่างในน้ำได้อีกด้วย นอกจากนี้เพอร์ไลต์ช่วยดูดซับยาฆ่าแมลง ปุ๋ยเคมีต่าง ๆ ที่เกษตรกรเติมลงไปดิน ไม่ให้ซึมหายออกจากดินเร็วเกินไป สำหรับในด้านอื่น ๆ นอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้ว ยังสามารถนำเพอร์ไลต์ผสมกับสีทาบ้านทั้งภายนอกและภายในอาคาร เพื่อให้สีติดทนนานและกันความร้อน การนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี ใช้เป็นผงขัด และผสมซีเมนต์ใช้ในการฉาบผนังปูนน้ำมัน เป็นต้น

การใช้ประโยชน์จากหินเพอร์ไลต์มักนำไปเผาให้ขยายตัวและใช้เป็นวัตถุดิบโดยตรง มีการนำไปใช้ในวัสดุก่อสร้าง นำไปหลอมเปลี่ยนสภาพเป็นใยหิน เป็นฉนวนป้องกันความร้อนแทนแร่ใยหิน รวมทั้งใช้เป็นสารตั้งต้นที่ให้ซิลิกาในการสังเคราะห์ได้เช่นกัน

การเผาหินเพอร์ไลต์ให้เป็นเพอร์ไลต์ขยายตัว (Expanded perlite) มีลำดับขั้นตอนแสดงดังภาพที่ 4 โดยหินเพอร์ไลต์ที่ผ่านการบดย่อยจะถูกบรรจุในถังวัตถุดิบ (Raw materials hopper) ผ่านกรวย (Feeder) ก่อนถูกป้อนเข้าสู่เตาหลอมซึ่งมีความยาวประมาณ 3 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 30 เซนติเมตร เอียงประมาณ 22 – 35 องศา สามารถพลิกหมุนได้ และมีเทอร์โมคัปเปิลติดตั้งสามตำแหน่งเพื่อวัดอุณหภูมิที่



ภาพที่ 4 ลำดับกระบวนการเผาหินเพอร์ไลต์

(Jing Q. *et al.* (2011))

ตำแหน่งต่าง ๆ ของเตา ทั้งกรวยและเตาเผาแบบหลอดจะมีการสันตลอดเวลา เพื่อไม่ให้หินเพอร์ไลต์ติดกับหลอดเผาด้านใน เมื่อหินเพอร์ไลต์จะผ่านเข้าไปในเตาเผาหลอดได้รับความร้อนอย่างกะทันหัน เกิดการหลอมและอ่อนตัวลง น้ำที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในโครงสร้างจะระเหยกลายเป็นไอน้ำอย่างรวดเร็ว จึงทำให้เกิดการขยายตัวและมีรูพรุน ได้เพอร์ไลต์ขยายตัว ที่มีมวลเบา โดยหลังจากที่ผ่านการเผาในเตาแล้ว เตาจะพลิกเพื่อลำเลียงเพอร์ไลต์ขยายตัวต่อไปยังถังไซโคลน (Cyclone) ที่มีอากาศไหลวน ซึ่งจะทำให้อนุภาคถูกเหวี่ยงไปยังผนังถังไซโคลนและตกลงสู่กรวยด้านล่าง ซึ่งในโรงงานอุตสาหกรรมจะใช้อุณหภูมิความร้อนเผาหินเพอร์ไลต์ในช่วงอุณหภูมิ 800 – 1200 องศาเซลเซียส ด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติ

การสังเคราะห์วอล์ลาสโทไนต์และบทบาทของวอล์ลาสโทไนต์สำหรับงานด้านเซรามิก

การสังเคราะห์วอล์ลาสโทไนต์จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกา สามารถเตรียมได้หลายวิธี ได้แก่

1. วิธีซอล-เจล (Sol-gel method)

ในการเตรียมด้วยวิธีนี้ สารตั้งต้นอยู่ในสภาพของสารละลายซึ่งผสมเข้ากันได้เป็นอย่างดี และสามารถทำปฏิกิริยากันในระดับโมเลกุล ทำให้เกิดเป็น โมเลกุลที่เป็นสายโซ่ยาว หรือเกิดเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กกระจายอยู่ในของเหลวที่เรียกว่า ซอล (Sol) เมื่อความเข้มข้นของสารละลายมากขึ้นทำให้ความหนืดสูงขึ้นจนกระทั่งกลายเป็นสารกึ่งแข็งกึ่งเหลวที่เรียกว่า เจล (Gel) เมื่อเจลแห้งสนิท บดให้เป็นผงละเอียดก่อนที่จะนำไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อไป การเตรียมด้วยวิธีนี้จะได้ผงที่มีขนาดเล็กในช่วงประมาณ 20 – 50 นาโนเมตร ผงมีความบริสุทธิ์สูง แต่สารตั้งต้นส่วนใหญ่จะมีราคาแพง

2. วิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal)

วิธีไฮโดรเทอร์มอลเป็นวิธีการที่ให้ความร้อนแก่ตัวทำปฏิกิริยาในภาชนะความดันสูง (Autoclave) โดยมีน้ำเป็นตัวทำละลาย ความดันภายในภาชนะปิดเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำที่อยู่เหนือของเหลวนั้นเดือดที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส ที่สภาวะนี้ อุณหภูมิจะสูงขึ้นเหนือจุดเดือดของน้ำและจุดเดือดจะสูงเหนือความดันบรรยากาศ ผงที่เตรียมได้มีความสม่ำเสมอทั้งองค์ประกอบทางเคมีและขนาดอนุภาค สามารถเตรียมได้ในขั้นตอนการเตรียมเพียงขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิและความดันสูงถึงปานกลาง โดยที่สารบางชนิดไม่ต้องผ่านขั้นตอนการเผาแคลไซน์ และมีอุณหภูมิการเผาผนึกที่ต่ำกว่า

เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการสังเคราะห์ทางเคมีอื่นๆ เนื่องจากมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า ข้อเสียของวิธีไฮโดรเทอร์มอลคือ ต้องควบคุมอุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา และค่าพีเอช

3. วิธีไมโครเวฟ (Microwave)

วิธีไมโครเวฟเป็นวิธีการที่อาศัยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟในการให้ความร้อนโดยมีเพียงตัวทำละลายและตัวถูกละลายเท่านั้นที่ถูกกระตุ้นซึ่งทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 10 – 1000 เท่า มีพื้นฐานมาจากหลักการที่ว่า สารต่างชนิดกันจะมีการตอบสนองต่อไมโครเวฟที่ต่างกัน สารบางชนิดยินยอมให้ไมโครเวฟทะลุผ่านในขณะที่บางประเภทจะถูกดูดกลืน ดังนั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถทำซ้ำใหม่ได้มากกว่าวิธีการให้ความร้อนแบบอื่นๆ สารประกอบที่สังเคราะห์ได้มีความบริสุทธิ์สูง

4. วิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction)

วิธีนี้สามารถเตรียมโดยการนำสารตั้งต้นที่เป็นของแข็ง ซึ่งตามสัดส่วนที่ต้องการแล้วนำมาบดและผสมเข้าด้วยกัน แล้วจึงทำการเผาที่อุณหภูมิที่ต้องการ เป็นวิธีการเตรียมที่ง่าย ค่าใช้จ่ายน้อย วิธีการนี้ถึงแม้ว่าจะมีข้อเสียหลายประการ เช่น ขนาดของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคกว้าง สารตั้งต้นอาจทำปฏิกิริยาได้ไม่สมบูรณ์ อาศัยการเผาที่อุณหภูมิสูงและใช้เวลานานซึ่งเป็นการเปลืองพลังงาน แต่เป็นวิธีการที่มีโอกาสในการขยายผลเชิงอุตสาหกรรมได้

การสังเคราะห์ออลลาสโทไนต์สามารถเลือกใช้วัตถุดิบซึ่งเป็นแหล่งที่มาของแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาที่หลากหลาย ดังรายงานการวิจัยต่อไปนี้

Nour W.M.N. *et al.* (2008) สังเคราะห์ออลลาสโทไนต์จากแคลเซียมคาร์บอเนต เศษผงหินอ่อน ซิลิกาเจล ควอร์ตซ์ และซิลิกาฟูม โดยนำส่วนผสมจากวัตถุดิบดังกล่าวในอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเป็น 1 : 1 บดเปียกด้วยบอลลมิลล์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทำให้แห้ง จากนั้นอัดส่วนผสมเป็นชิ้นงานที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร หนา 2 เซนติเมตร โดยใช้แรงอัด 20 เมกกะปาสกาล และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1000 – 1400 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมงก่อนจะนำมาตรวจสอบด้วยเทคนิคเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชัน ซึ่งพบว่า กรณีที่ 1 ตัวอย่างที่เตรียมจากส่วนผสมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกาเจล พบการฟอร์มตัวของลาไนต์ (Larnite, Ca_2SiO_4) แทนที่จะเกิดเป็นออลลาสโทไนต์ (CaSiO_3) ทั้งยังเกิด คริสโตบาไลต์ (SiO_2) จากการตกผลึกของซิลิกาเจล (SiO_2) และมีไลม์ (CaO) หลงเหลืออยู่ด้วย กรณีที่ 2 ตัวอย่างที่เตรียมจากส่วนผสมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและควอร์ตซ์นั้น จะพบออลลาสโทไนต์

เพียงเล็กน้อยในตัวอย่างที่เผา 1100 องศาเซลเซียส โดยเมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณวอลลาสโทไทน์จะลดลง แต่จะเกิดเป็นลาไนต์ ไลม์ และคริสโตบาไลต์ สำหรับกรณีที่ 3 ตัวอย่างจากส่วนผสมระหว่างเศษผงหินอ่อนและ ซิลิกาฟุ้ง จะพบวอลลาสโทไทน์ และลาไนต์ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1000 – 1100 องศาเซลเซียส เท่านั้น โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 1150 – 1200 องศาเซลเซียสจะพบซูดวอลลาสโทไทน์ (Pseudo wollastonite, α -CaSiO₃) และแรนไคไนต์ (Rankinite, Ca₃Si₂O₇) แทน แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเป็น 1 : 1.125 1 : 1.166 1 : 1.250 ตามลำดับ สรุปได้ว่าเกิดวอลลาสโทไทน์ได้ดีที่สุดที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเป็น 1 : 1.125 ที่อุณหภูมิเผา 1150 องศาเซลเซียส

Javed S. H. *et. al.* (2009) ศึกษาการเตรียมวอลลาสโทไทน์ จากแคลเซียมออกไซด์ร่วมกับซิลิกาออสฐานที่สกัดมาจากแคลบข้าว โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกา 1 : 1 ทำให้อยู่ในรูปแคลเซียมไฮดรอกไซด์เจด โดยใช้อุณหภูมิ 50 60 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปอบแห้งที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปเผาที่ 800 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ผงที่เตรียมได้จะนำมาบดและร่อนผ่านตะแกรง 100 เมช ก่อนนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน ซึ่งพบว่า แคลเซียมไฮดรอกไซด์เจดที่เตรียมโดยใช้อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เกิดเป็นวอลลาสโทไทน์ได้ทั้งหมด ขณะที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์เจดที่เตรียมโดยใช้อุณหภูมิ 50 60 70 80 องศาเซลเซียส จะเกิดวอลลาสโทไทน์ร่วมกับแคลไซต์

Radev L. *et. al.* (2009) ได้ทำการเตรียมวอลลาสโทไทน์ด้วยวิธีโซลเจล โดยใช้ซิลิกาซอลจาก TEOS (Tetraethoxysiloxane) ในตัวทำละลายผสมของเอทานอลและน้ำ โดยมีกรดไฮโดรคลอริกเป็นคะตะลิส จากนั้นนำมาทำปฏิกิริยากับแคลเซียมฟอสเฟตที่ได้จากการผสมระหว่าง Ca(OH)₂ และ H₃PO₄ ที่ pH 10 – 11 คนเป็นเวลา 20 ชั่วโมง แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1100 และ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า อัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมฟอสเฟตและซิลิกาเท่ากับ 1.89 ที่อุณหภูมิ 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันแสดงผลึกของ α -CaSiO₃ และ Ca₁₅(PO₄)₂(SiO₄)₆ แต่ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส พบผลึก β -CaSiO₃ เพิ่มขึ้น

Felipé-Sesé M. *et. al.* (2011) สังเคราะห์แคลเซียมซิลิเกตหรือวอลลาสโทไทน์ จากแคลเซียมออกไซด์ซึ่งได้มาจากหินอ่อน เปลือกหอยแมลงภู่และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ร่วมกับซิลิกาที่ได้จากเถ้าชีวมวลและเศษผงเซรามิก โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง และควบคุมอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียม

ออกไซด์ต่อซิลิกา 1 : 1 เฟอร์ไรต์อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากการตรวจสอบด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันระบุเฟสที่พบคือ วอลลาสโทไนต์ เกล็นต์และลาร์ไนต์

Vichaphund S. *et. al.* (2011) กล่าวถึงการสังเคราะห์วอลลาสโทไนต์จากการผสมเปลือกไข่และซิลิกาโดยอาศัยคลื่นไมโครเวฟด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) เปลือกไข่ผ่านกระบวนการเตรียมให้มีขนาดไม่เกิน 150 ไมครอน นำมาทดสอบโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน (TG/DTA) พบว่าเปลือกไข่เกิดการดูดความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียสโดยมีการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต และมีการสูญเสียน้ำหนักรวมทั้งสิ้นร้อยละ 44 ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันยืนยันได้ว่าเปลือกไข่เปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ที่ 900 องศาเซลเซียส เปลือกไข่ถูกนำมาผสมกับซิลิกาโดยมีการควบคุมอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเป็น 1 : 1 1 : 0.9 และ 1 : 0.8 และนำเข้าเตาไมโครเวฟให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 700 – 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากการทดลองพบว่า ในช่วงอุณหภูมิ 800 - 1100 องศาเซลเซียส จะเกิดซิววอลลาสโทไนต์ ทั้งนี้ในการใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกา 1 : 0.8 จะพบลาไนต์และคริสโตบาไลต์เกิดขึ้นน้อยกว่าที่พบเมื่อใช้อัตราส่วน 1 : 1 และ 1 : 0.9 กล่าวคือ ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกา 1 : 1 จะมีคริสโตบาไลต์ปะปนอยู่ด้วย และที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกา 1 : 0.9 จะมีทั้งคริสโตบาไลต์ ลาไนต์ และซิววอลลาสโทไนต์ปะปน

สำหรับบทบาทของวอลลาสโทไนต์ในงานด้านเซรามิก จากการตรวจเอกสารย้อนหลังมีตัวอย่างดังต่อไปนี้

Sathiyakumar M. *et. al.* (2003) ศึกษาบทบาทของสารเติมแต่งวอลลาสโทไนต์ที่มีต่อโครงสร้างจุลภาค ความหนาแน่น และสมบัติเชิงกลของอลูมินาเซรามิก โดยใช้วอลลาสโทไนต์เป็นตัวช่วยหลอมและเร่งกระบวนการเกิดเฟสของเหลวเพื่อลดอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ ผลการศึกษาพบว่า เมื่อใช้วอลลาสโทไนต์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ทำให้อนุภาคของอลูมินาเซรามิก ซึ่งเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส มีความสม่ำเสมอของขนาดเกรนและความหนาแน่นของอลูมินาเซรามิกสูงถึงร้อยละ 98 ของความหนาแน่นทางทฤษฎีและวอลลาสโทไนต์ที่ถูกเติมลงในอลูมินาเซรามิก ร้อยละ 0 - 1.0 โดยน้ำหนัก ให้ความแข็งแรงวิกเกอร์ส เพิ่มขึ้นจาก 8.5 ± 0.2 เป็น 11.3 ± 0.3 จิกะปาสคาล และความทนแรงดัด เพิ่มขึ้นจาก 119 ± 26 เป็น 231 ± 17 เมกะปาสคาล

Meechoowas E. *et. al.* (2012) ศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพการหลอมวัตถุดิบสำหรับแก้วชนิดโซดาไลม์โดยใช้วอล์ลาสโทไนต์เป็นวัตถุดิบตั้งต้นแทนที่การใช้หินปูน จากการคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์และการทดสอบเปรียบเทียบความสามารถของการหลอมวัตถุดิบพบว่า แก้วชนิดโซดาไลม์ที่มีองค์ประกอบของวอล์ลาสโทไนต์สามารถหลอมโดยใช้เวลาสำหรับการหลอมสั้นกว่า ซึ่งทำให้ใช้พลังงานในการหลอมต่ำกว่าเดิมถึงร้อยละ 10 และเมื่อทำการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติทางกายภาพพบว่า แก้วชนิดโซดาไลม์ที่ใช้วอล์ลาสโทไนต์แทนที่การใช้หินปูนนั้น ให้ค่าการส่องผ่านของแสง ความหนืด ความแข็งแรงวิกเกอร์ส สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน และ ค่าอุณหภูมิต่างๆ ในกระบวนการหลอมแก้วไม่ต่างจากแก้วชนิดโซดาไลม์ที่ใช้หินปูนเป็นวัตถุดิบ

Zhang W. Y. *et. al.* (2013) เตรียมวอล์ลาสโทไนต์กลาสเซรามิกโดยใช้เจเลไนต์ ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) ร่วมกับเศษแก้วชนิดโซดาไลม์และเกาหลิน ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) ผลการศึกษาพบว่า วอล์ลาสโทไนต์กลาสเซรามิกที่เตรียมจากเจเลไนต์ร้อยละ 15 เผาด้วยเตาเผาที่ 850 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ให้ผลทางด้านสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดโดยมีการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.27 ความแข็งแรงอัด 247 ± 21 เมกะปาสกาล ความทนแรงดัด 119 ± 14 เมกะปาสกาล และมีความแข็งแบบวิกเกอร์ส 5.32 ± 0.1 เมกะปาสกาล

อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

อุปกรณ์และเครื่องมือ	บริษัทผู้ผลิต	ประเทศ
ครกบดสาร		
เครื่องบดบอลมิลล์		
เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง	ADAM PGW2502E	USA
เวอร์เนีย	MITUTOYO	JAPAN
ตะแกรงร่อน 100 เมช	COMPOUND CLAY CO., LTD	THAILAND
เตาไฟฟ้าอุณหภูมิ 1300 °C	PARAGON TnF-66-3	USA
เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน	PHILIPS X'Pert	NETHERLANDS
เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์	PHILIPS MagiX Pro	NETHERLANDS
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	JEOL JSM-5410 LV	USA
เครื่องวัดการขยายตัวเชิงความร้อน	NETZSCH DIL 402 PC	GERMANY

วิธีการวิจัย

ตอนที่ 1 การเตรียมและวิเคราะห์วัตถุดิบตั้งต้น

1.1 เปลือกไข่

ล้างและลอกเยื่อออกจากเปลือกไข่ไก่จนสะอาด ตากแดดให้แห้งและบดแห้งด้วยครกบดสาร กระทั่งมีขนาดประมาณ 0.15 มิลลิเมตร นำไปเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นสุมผงหลังเผาเพื่อนำไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชัน

1.2 เพอร์ไลต์ขยายตัว

นำเพอร์ไลต์ขยายตัวซึ่งเป็นแหล่งซิลิกาออสฐาน กัดขนาดผ่านตะแกรงร่อน 100 เมช (150 μm) และสุมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตรวจสอบเฟส ด้วยเทคนิคเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชัน และตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคเอ็กซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

ตอนที่ 2 การเตรียมและ การสังเคราะห์วอล์ลาสโทไนต์

2.1 การเตรียมสารและการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน

ใช้ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีคำนวณน้ำหนักเปลือกไข่เผาและเพอร์ไลต์ขยายตัวสำหรับกรณี อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเป็น 1 : 1 กวนผสมในน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำมาบดให้อยู่ในรูปของผง จากนั้นนำผงที่ได้ไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (DTA/TG) ในสภาวะช่วงอุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึง 1,230 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

2.2 การตรวจสอบผลของอุณหภูมิต่อการเกิดเฟสวอล์ลาสโทไนต์

เตรียมของผสมระหว่างเปลือกไข่เผาและเพอร์ไลต์ขยายตัว ที่มีอัตราส่วนโดยโมล ระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาเป็น 1 : 1 พิจารณาเลือกอุณหภูมิเผาของผสมจากผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน เเผาโดยใช้เตาไฟฟ้า อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา

2 ชั่วโมง จากนั้นบดและลดขนาดสารหลังเผาโดยการคัดขนาดผ่านตะแกรง 200 เมช ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน

2.3 การตรวจสอบผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกา และการเพิ่มอุณหภูมิต่อการเกิดเฟสออสต์ราสโทไนต์

เตรียมของผสมระหว่างเปลือกไข่เผาและเพอร์ไลต์ขยายตัว ที่มีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาเป็น 1 : 0.8 1 : 1 1 : 1.2 และ 1 : 1.4 เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 2 และ 5 ชั่วโมง ตรวจสอบลักษณะพื้นฐานของผงที่สังเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และวิเคราะห์สารหลังเผาด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน

ตอนที่ 3 การใช้วัสดุอสต์ราสโทไนต์สังเคราะห์เป็นวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับเคลือบระบบหินปูน – สังกะสี

3.1 เตรียมเคลือบระบบหินปูน – สังกะสี ซึ่งมีสูตรเชิงเคมีเป็นดังต่อไปนี้

0.3 KNaO

0.4 CaO

0.3 ZnO

x Al₂O₃

y SiO₂

เมื่อ x : 0.35 – 0.45 y : 2.50 – 4.00

โดยการใช้วัตถุดิบสำหรับการคำนวณส่วนผสมเคลือบ เป็น ดินขาวลำปาง หินฟืนม้า ซิลิกา และ ซิงค์ออกไซด์ ผลวิเคราะห์ห่อหุ้มประกอบทางเคมีของวัตถุดิบดังกล่าวแสดงในภาคผนวก ก สำหรับการเตรียมเคลือบระบบหินปูน – สังกะสี ดังกล่าวแบ่งเป็น 3 ระบบคือ

ระบบ L : ระบบเปรียบเทียบที่ใช้หินปูน

ระบบ WS : ระบบเปรียบเทียบที่ใช้วัสดุอสต์ราสโทไนต์การค้า

ระบบ A : ระบบที่ใช้วัสดุอสต์ราสโทไนต์สังเคราะห์

3.2 ทดลองหุบเคลือบบนชิ้นทดสอบ เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1100 – 1200 องศาเซลเซียส ใช้อัตราเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที และ ตรวจสอบลักษณะปรากฏหลังการเผา

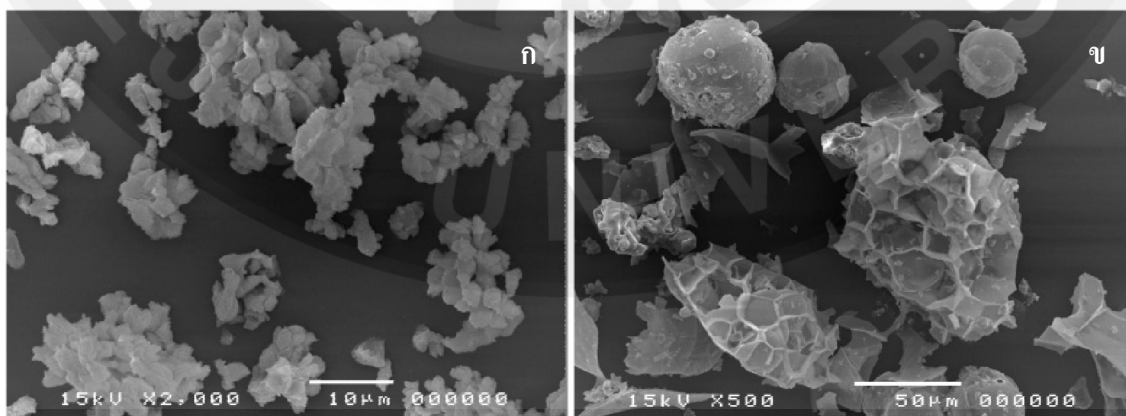
3.3 ทดสอบการไหลของเคลือบ โดยเตรียมผงวัตถุดิบเคลือบสูตรต่างๆ ใช้สูตรละ 5 กรัม เติมน้ำพอบั่นได้ให้เป็นทรงกลม เมื่อแห้งนำเคลือบที่ปั่นวางในบ้ำของอุปกรณ์ทดสอบการไหล ซึ่งวางบนพื้นเยี่ยงอิฐทนไฟ ทำมุม 60 องศา เฝานในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อ นาที เป็นเวลา 30 นาที วัดระยะการไหลของเคลือบหลังเผาและใช้สถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ One-way ANOVA

3.4 ทดสอบการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของเคลือบ ซึ่งทำโดยเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1100, 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส ใช้อัตราเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อ นาที เป็นเวลา 30 นาที และนำเคลือบหลังเผามาตัดและขัดให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 6 – 12 มิลลิเมตร ความยาวไม่เกิน 50 มิลลิเมตร ทดสอบการขยายตัวเนื่องจากความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 30 – 600 องศาเซลเซียส และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

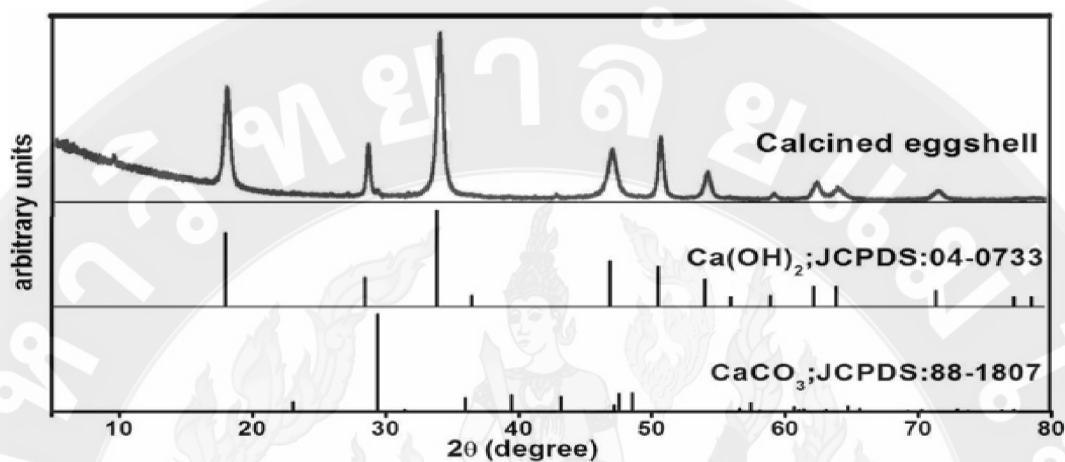
ตอนที่ 1 ผลการวิเคราะห์วัตถุดิบตั้งต้น

ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของวัตถุดิบตั้งต้นด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงในภาพที่ 5 เปลือกไข่เผามีลักษณะเป็นผง เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน รูปร่างไม่แน่นอน (Irregular shape) ขนาดประมาณ 2 - 5 ไมครอน ขณะที่เพอร์ไลต์ขยายตัวมีทั้งอนุภาคทรงกลมซึ่งภายในมีความพรุนตัวสูงและบางส่วนเป็นเศษผนังแตกปะปนอยู่ซึ่งเกิดจากน้ำในหินเพอร์ไลต์ซึ่งเมื่อได้รับความร้อนจากการเผาจะเกิดการขยายตัวดันผนังอนุภาคให้แตก ทั้งนี้อัตราการปลดปล่อยน้ำจากโครงสร้างหินเพอร์ไลต์ส่งผลต่อความพรุนของเพอร์ไลต์ขยายตัว (Roulia *et al.* (2006))



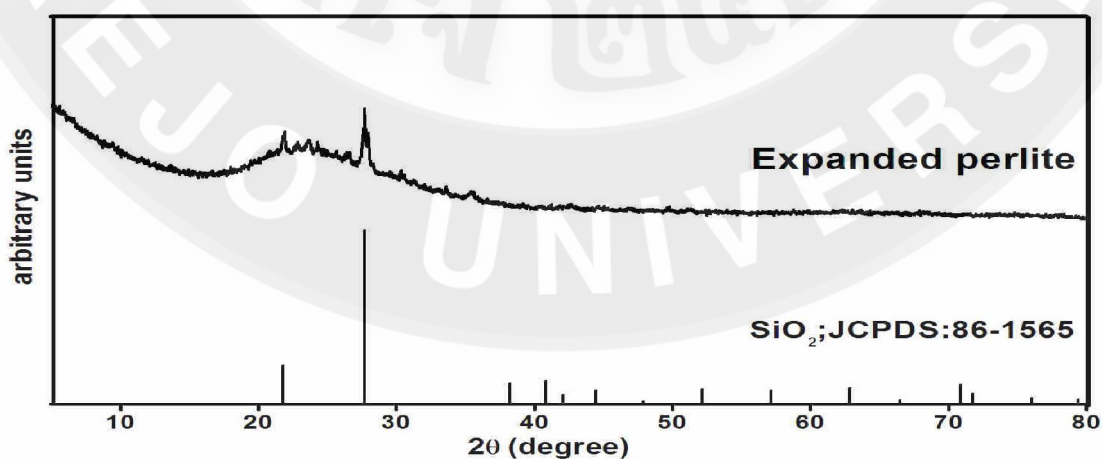
ภาพที่ 5 ลักษณะพื้นฐานของวัตถุดิบตั้งต้น (ก) เปลือกไข่เผา และ (ข) เพอร์ไลต์ขยายตัว

จากการวิเคราะห์เปลือกไข่เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ด้วยเทคนิคเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชัน แสดงผลการวิเคราะห์ในภาพที่ 6 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเปลือกไข่เผา สอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ตามฐานข้อมูล JCPDS หมายเลข 04-0733 เนื่องมาจากการที่แคลเซียมออกไซด์ที่ได้ไม่เสถียร



ภาพที่ 6 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเปลือกไข่เผา ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

จากการวิเคราะห์เพอร์ไลต์ขยายตัว ด้วยเทคนิคเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชัน แสดงผลการวิเคราะห์ในภาพที่ 7 จากภาพ ปรากฏพีกความเข้มต่ำ ที่ตำแหน่งมุม $2\theta = 27.689$ องศา และ 21.808 องศา โดยพีกดังกล่าว ตรงกับพีกหลักของซิลิกาตามฐานข้อมูล JCPDS หมายเลข 86-1565 และเนื่องจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของเพอร์ไลต์ขยายตัวมีสัญญาณพีกที่กว้างเป็นเนินขึ้นมาเล็กน้อย จึงยืนยันได้ว่าเพอร์ไลต์ขยายตัวเป็นซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous silica)



ภาพที่ 7 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเพอร์ไลต์ขยายตัว

จากการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของเพอร์ไลต์ขยายตัวด้วยเทคนิคเอ็กซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ พบว่ามีปริมาณซิลิการ้อยละ 72.59 รองลงมาคืออลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 14.09 และองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ แสดงตามตารางที่ 4

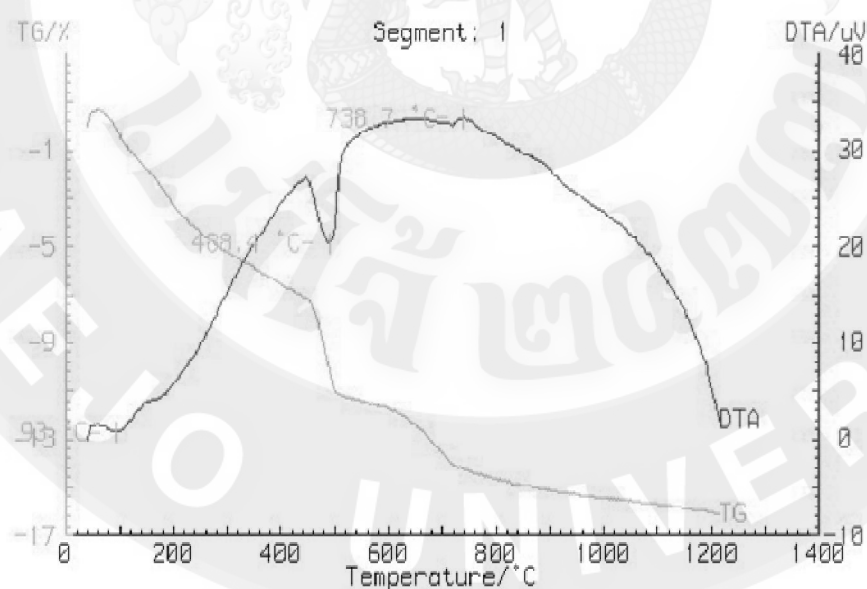
ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของเพอร์ไลต์ขยายตัว (wt%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
Expanded perlite	72.59	14.09	1.59	0.31	0.05	1.08	0.41	3.30	5.37	1.21

ตอนที่ 2 ผลการสังเคราะห์วิเคราะห์วัสดุโพลิเมอร์

2.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของของผสมระหว่างเปลือกไข่เผาและเพอร์ไลต์ขยายตัว ในกรณีที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเป็น 1 : 1 และใช้อลูมินาเป็นสารอ้างอิงมาตรฐาน แสดงในภาพที่ 8



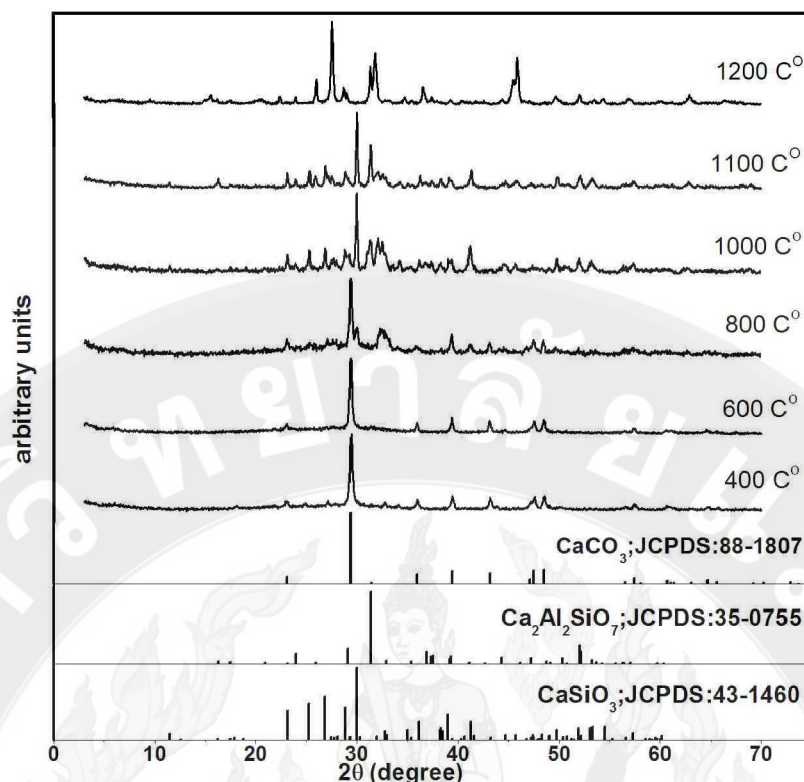
ภาพที่ 8 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของของผสมระหว่างเปลือกไข่เผาและเพอร์ไลต์ขยายตัว

ผลการทดสอบแสดงอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาคายความร้อน 2 ตำแหน่ง คือที่ อุณหภูมิ 93.0 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 488.4 องศาเซลเซียส นอกจากนี้เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 738.7 องศาเซลเซียส การสูญเสียน้ำหนักของของผสมเมื่อได้รับความร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 60.6 – 455.1 องศาเซลเซียส ร้อยละ 8.0 ที่อุณหภูมิ 455.1 – 502.8 องศาเซลเซียส ร้อยละ 3.8 ที่อุณหภูมิ 502.8 – 628.2 องศาเซลเซียส ร้อยละ 0.9 ที่อุณหภูมิ 628.2 – 736.6 องศาเซลเซียส ร้อยละ 2.2 และที่อุณหภูมิ 736.6 – 1214.3 องศาเซลเซียส ร้อยละ 1.9 ทั้งนี้ น้ำหนักสูญหายทั้งหมดตลอดการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงประมาณ 1200 องศาเซลเซียสคิดเป็นร้อยละ 16.8

2.2 ผลการตรวจสอบผลของอุณหภูมิต่อการเกิดเฟสวอล์ลาสโทไนต์

จากข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของของผสมที่แสดงปฏิกิริยาคายความร้อนที่อุณหภูมิ 488.4 องศาเซลเซียส และปฏิกิริยาคายความร้อนที่ 738.7 องศาเซลเซียส จึงเลือกพิจารณาอุณหภูมิเผาก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวในการเผาเพื่อสังเคราะห์วอล์ลาสโทไนต์ โดยอุณหภูมิเผาที่เลือกศึกษา คือ 400 600 800 1000 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส

ผลการตรวจสอบเฟสหรือองค์ประกอบทางแร่ที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ด้วยเทคนิคเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชัน แสดงในภาพที่ 9 พบว่า ที่อุณหภูมิ 400 และ 600 องศาเซลเซียส ปรากฏเฟสแคลไซต์หรือแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) โดยยังไม่เกิดปฏิกิริยากับซิลิกาออสันฐาน ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พบเฟสวอล์ลาสโทไนต์เกิดร่วมกับแคลไซต์ และที่อุณหภูมิ 1000 – 1100 องศาเซลเซียส พิกหลักแสดงเฟสวอล์ลาสโทไนต์ที่ตำแหน่งมุม $2\theta = 29.982, 26.840, 25.289, 28.861$ และ 23.144 องศา ตามฐานข้อมูล JCPDS หมายเลข 43-1460 ชัดเจนยิ่งขึ้น แต่มีเฟสเจไดไนต์ ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) ตามฐานข้อมูล JCPDS หมายเลข 35-0755 เกิดขึ้นร่วมด้วย สำหรับที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซเรย์ยืนยันว่าไม่ใช่เฟสเดียวกันกับที่พบเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1000 – 1100 องศาเซลเซียส



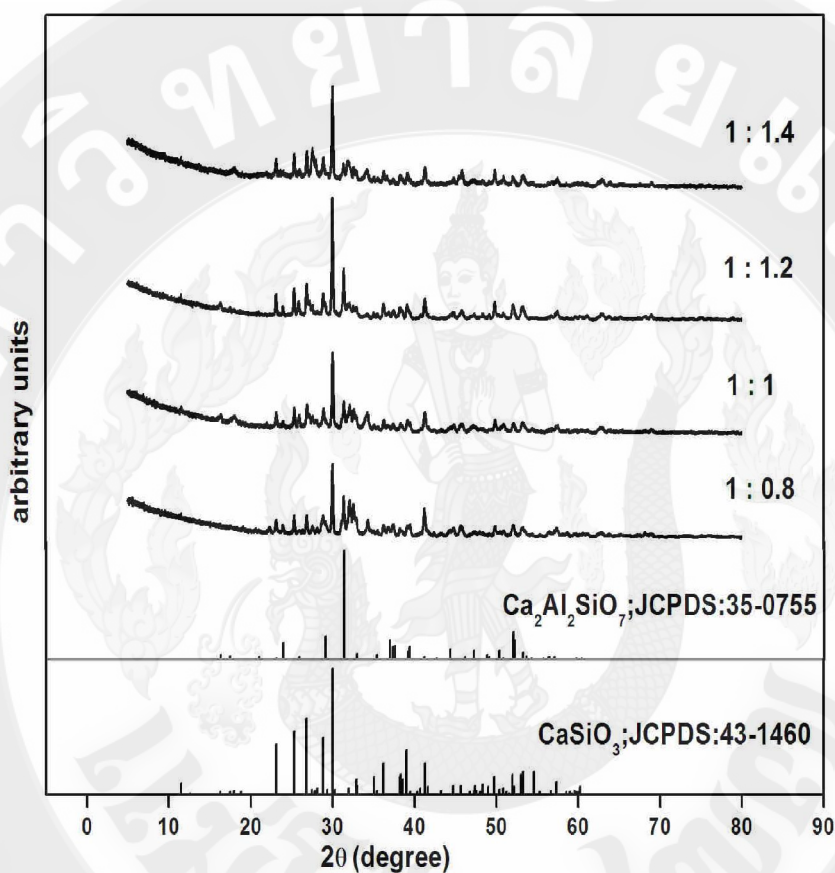
ภาพที่ 9 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของของผสมระหว่างเปลือกไข่เผาและเพอร์ไลต์ขยายตัว ที่มีอัตราส่วนโดยโมล ระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาเป็น 1 : 1 เผาที่อุณหภูมิ 400 – 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2.3 ผลการตรวจสอบผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกา และการแช่อบอุณหภูมิต่อการเกิดเฟสออสต์ราสโทไนต์

จากผลการทดลองหัวข้อ 2.2 อุณหภูมิเผาที่เหมาะสมคือ 1100 องศาเซลเซียส จึงทำการตรวจสอบผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาต่อการเกิดเฟสออสต์ราสโทไนต์ โดยแปรอัตราส่วนโดยโมล ระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาเป็น 1 : 0.8 1 : 1.2 และ 1 : 1.4 เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ผลจากการตรวจสอบผงสังเคราะห์หลังเผาด้วยเทคนิคเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชัน แสดงเปรียบเทียบในภาพที่ 10 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์สอดคล้องกับฐานข้อมูล JCPDS หมายเลข 43-146 ซึ่งระบุว่าออสต์ราสโทไนต์ที่สังเคราะห์ได้มีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก ตำแหน่งของพีคหลัก $2\theta = 29.982, 26.840, 25.289, 28.861$ และ 23.144 องศา ตามลำดับ และยังสอดคล้องกับฐานข้อมูล JCPDS หมายเลข 35-7055 ซึ่งระบุว่าเป็นเจไลไนต์ โดยสังเกตได้อย่างชัดเจนที่ตำแหน่งพีคหลัก $2\theta = 31.423$ องศา

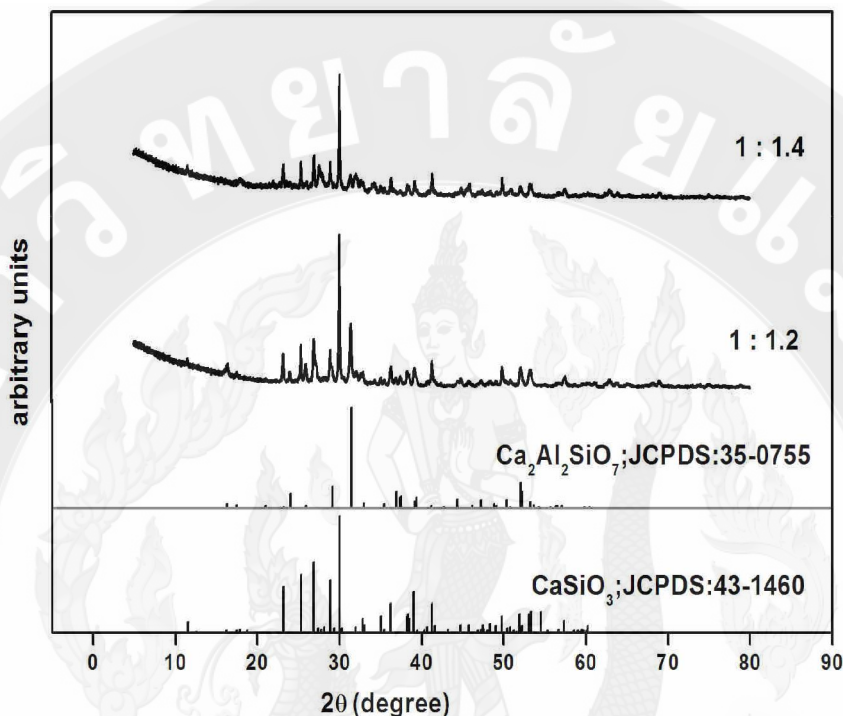
รูปแบบการเลี้ยวเบนชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาเป็น 1 : 1.2 และ 1 : 1.4 โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ตำแหน่งพิกหลัก $2\theta = 29.982$ องศา ซึ่งตรงกับระนาบ (320) ซึ่งบ่งชี้ว่าเมื่อสังเคราะห์วอล์ลาสโทไนต์โดยใช้วัตถุดิบตั้งต้นเป็นเปลือกไข่เผาและเพอร์ไลต์ขยายตัวนั้น การใช้ปริมาณซิลิกาเกินพอหรือมากกว่าอัตราส่วนทางทฤษฎีทำให้วอล์ลาสโทไนต์มีความเป็นผลึกมากขึ้น



ภาพที่ 10 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของของผสมระหว่างเปลือกไข่เผาและเพอร์ไลต์ขยายตัว ที่มีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาเป็น 1 : 0.8 1 : 1 1 : 1.2 และ 1 : 1.4 เเผที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

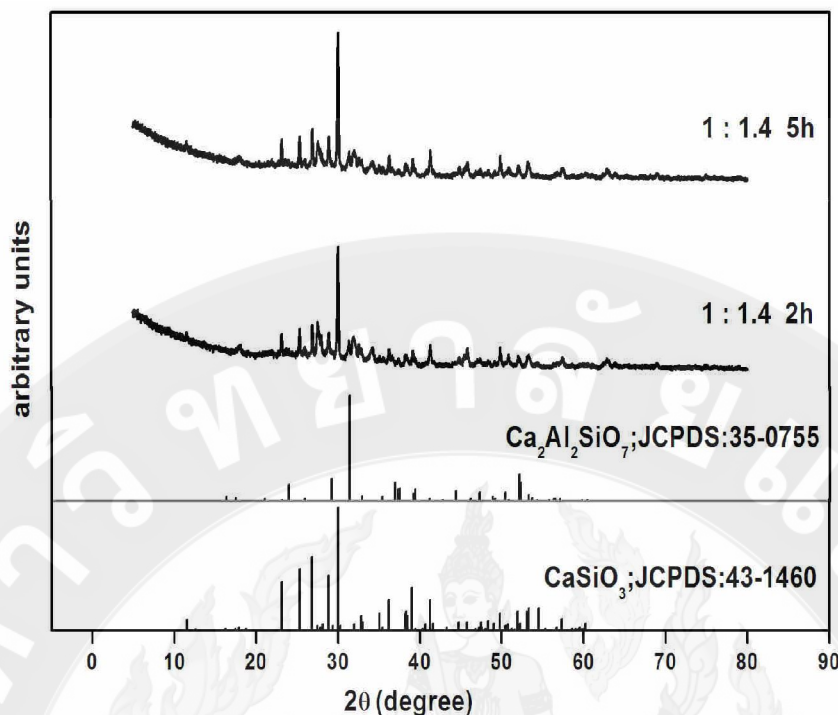
เมื่อเพิ่มเวลาการแช่อุณหภูมิจาก 2 ชั่วโมง เป็น 5 ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์ผงสังเคราะห์ด้วยเทคนิคเอ็กซเรย์ดิฟแฟรคชัน แสดงในภาพที่ 11 – 12

จากภาพที่ 11 กรณีสัดส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาเป็น 1 : 1.2 นั้น การแช่ อุณหภูมิขึ้นเป็น 5 ชั่วโมง ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสเจลในดี ขณะเดียวกันการแช่อุณหภูมิยังไม่ ส่งผลให้เกิดเฟสเจลในดีเมื่อใช้สัดส่วนเป็น 1 : 1.4



ภาพที่ 11 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของของผสมระหว่างเปลือกไข่เผาและเพอร์ไลต์ขยายตัว ที่มี สัดส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาเป็น 1 : 1.2 และ 1 : 1.4 เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

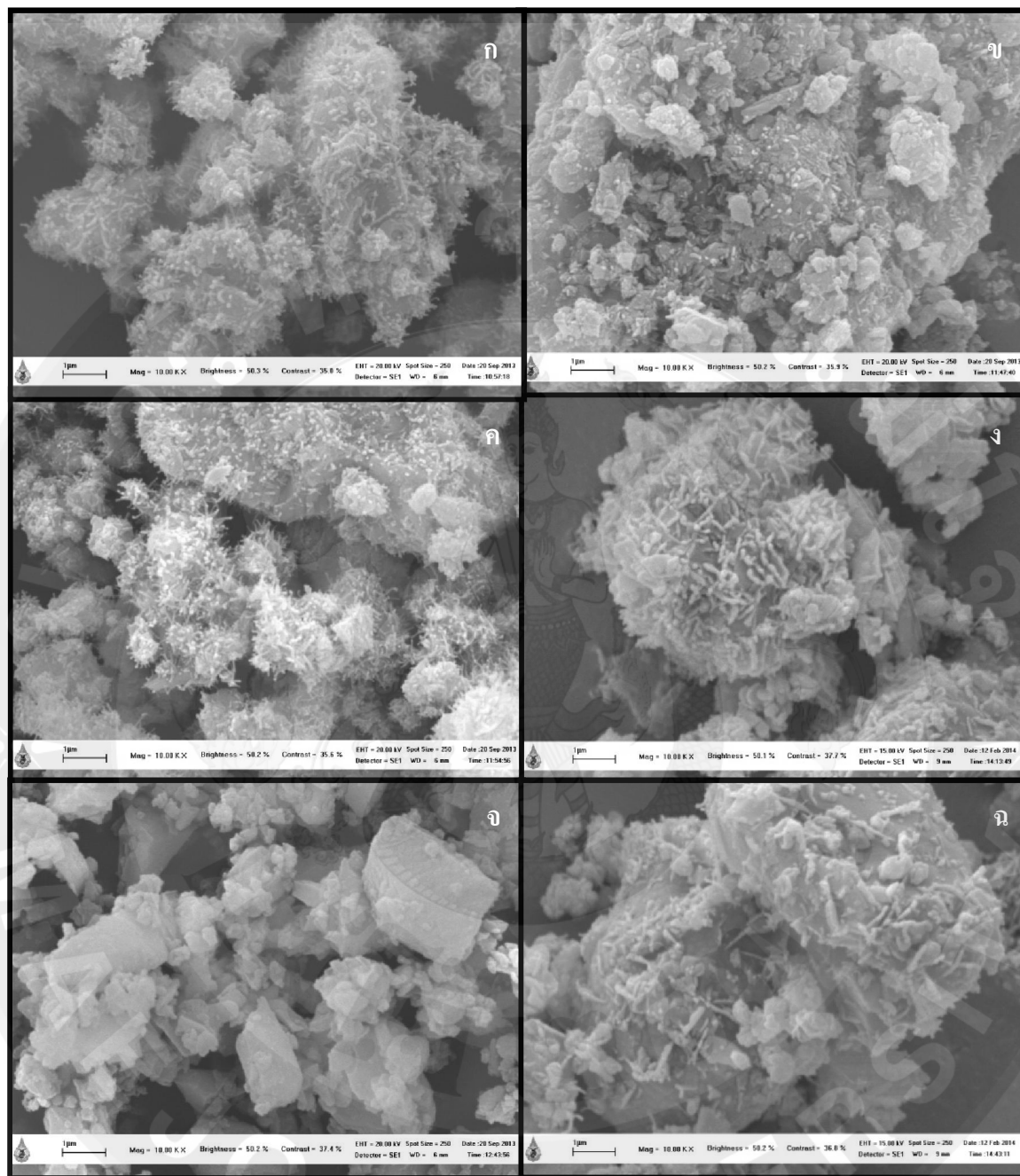
นอกจากนี้จากภาพที่ 12 กรณีสัดส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาเป็น 1 : 1.4 แช่อุณหภูมิ 5 ชั่วโมง ทำให้ผงสังเคราะห์ที่เตรียมแสดงความเข้มการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิสิกหลักจาก เฟสวอลลาสโทไนต์ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยเฉพาะที่ตำแหน่ง $2\theta = 29.982$ องศา



ภาพที่ 12 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของของผสมระหว่างเปลือกไข่เผาและเพอร์ไลต์ขยายตัว ที่มีอัตราส่วนโดยโมล ระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาเป็น 1 : 1.4 เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 และ 5 ชั่วโมง

ผลการตรวจสอบลักษณะพื้นฐานของผงสังเคราะห์ เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงในภาพที่ 13(ก) - 13(ง) ซึ่งปรากฏเฟสปฐภูมิของวอลลาสโทไนต์บริเวณผิวของอนุภาค มีลักษณะคล้ายแท่งเข็มขนาดเล็ก ลักษณะเดียวกับที่พบในรายงานการศึกษาของ Vakalova *et al.* (2010) ซึ่งระบุถึงการเกิดเฟสปฐภูมิของวอลลาสโทไนต์ขนาด 1-3 ไมครอน เมื่อใช้หินชอล์ก และผงฝุ่นซิลิกาออสฐาน (Amorphous micro silica) เป็นวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์และควบคุมอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาเป็น 1 : 1 เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

ลักษณะพื้นฐานของผงสังเคราะห์ที่เตรียมจากอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาเป็น 1 : 1.2 เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แสดงในภาพที่ 13(จ) ซึ่งไม่ปรากฏเฟสปฐภูมิของวอลลาสโทไนต์ แต่กรณีที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาเป็น 1 : 1.4 เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ยังคงพบเฟสปฐภูมิของวอลลาสโทไนต์ปะปนอยู่บริเวณผิวอนุภาค ภาพที่ 13(ฉ)



ภาพที่ 13 ลักษณะพื้นฐานของผงสังเคราะห์เตรียมจากการใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาเป็น (ก) 1 : 0.8 (ข) 1 : 1 (ค) 1 : 1.2 (ง) 1 : 1.4 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (จ) 1 : 1.2 เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (ฉ) 1 : 1.4 เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

ตอนที่ 3 ผลการใช้อัลตราโซนิกสักระยะในการทำเคลือบระบบหินปูน – สังกะสี

3.1 ลักษณะเคลือบหลังเผา

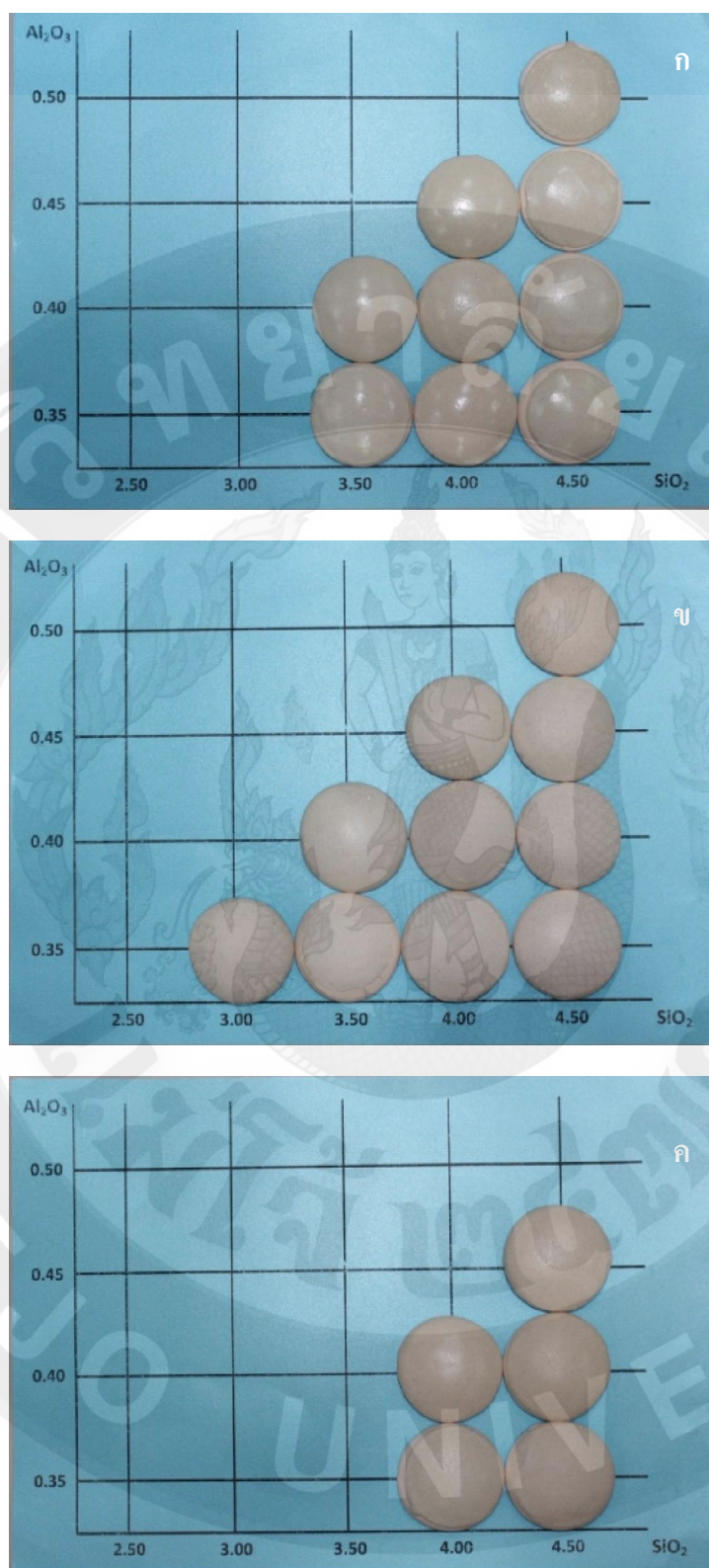
จากข้อมูลตอนที่ 2 เลือกใช้อัลตราโซนิกสักระยะที่เตรียมจากการใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาเป็น 1 : 1.4 เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เป็นวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมเคลือบหินปูน-สังกะสี (ระบบ A) โดยมีระบบเปรียบเทียบเตรียมจากหินปูน (ระบบ L) และเตรียมจากอัลตราโซนิกการค้ำ (ระบบ WS)

ลักษณะปรากฏของเคลือบหลังเผา ที่อุณหภูมิ 1100, 1500 และ 1200 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 14 – 16

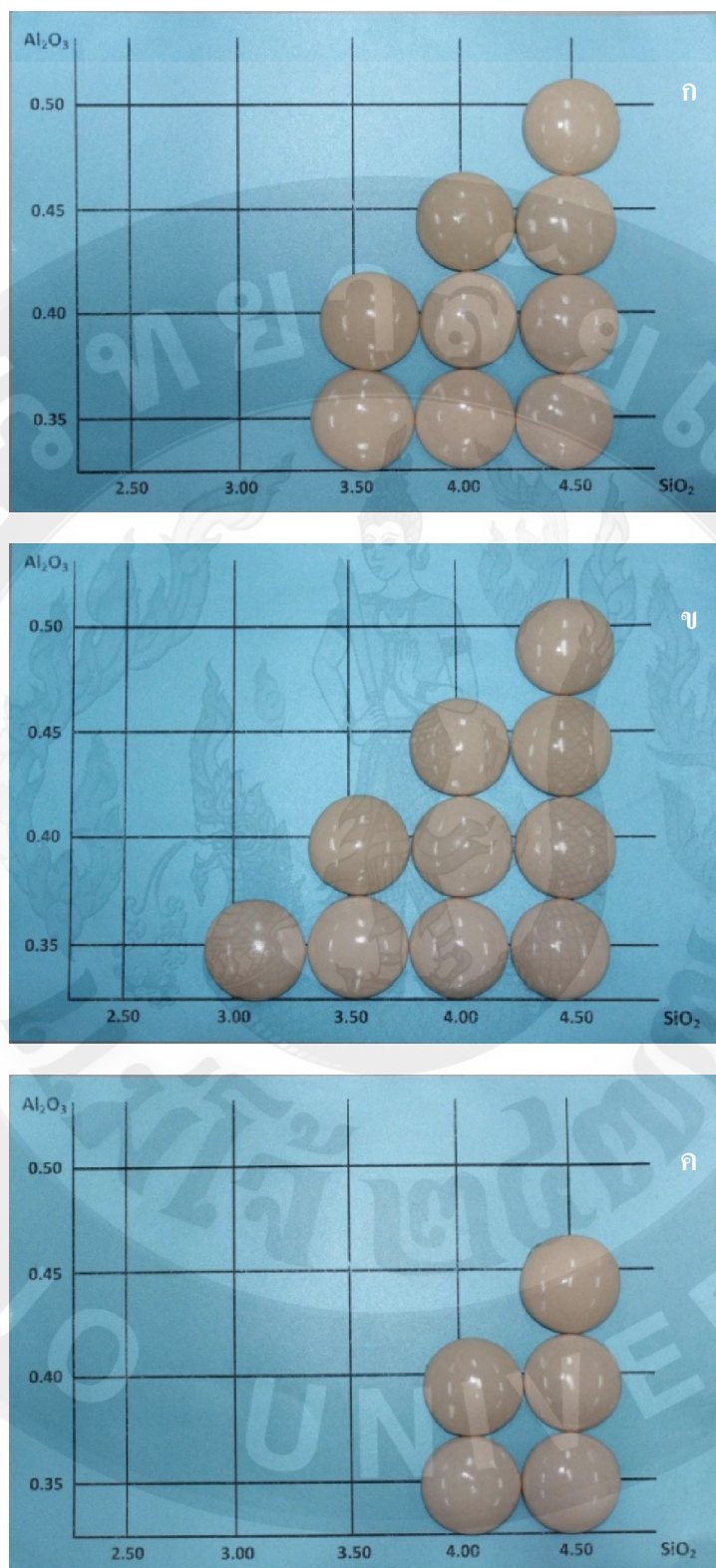
เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เคลือบที่เตรียมจากอัลตราโซนิกสักระยะ มีความมันวาวมากกว่า ส่วนเคลือบที่เตรียมจากหินปูน และเคลือบที่เตรียมจากอัลตราโซนิกสักระยะการค้ำยังไม่หลอม

เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส เคลือบที่เตรียมจากอัลตราโซนิกสักระยะ มีความใสและมันวาว เคลือบที่เตรียมจากหินปูนมีความขาวใสและมันวาว ส่วนเคลือบที่เตรียมจากอัลตราโซนิกสักระยะการค้ำ มีลักษณะใส ขาวขุ่น มีความมันวาว แต่ยังคงปรากฏส่วนที่ไม่หลอมเป็นเนื้อแก้วบางส่วน

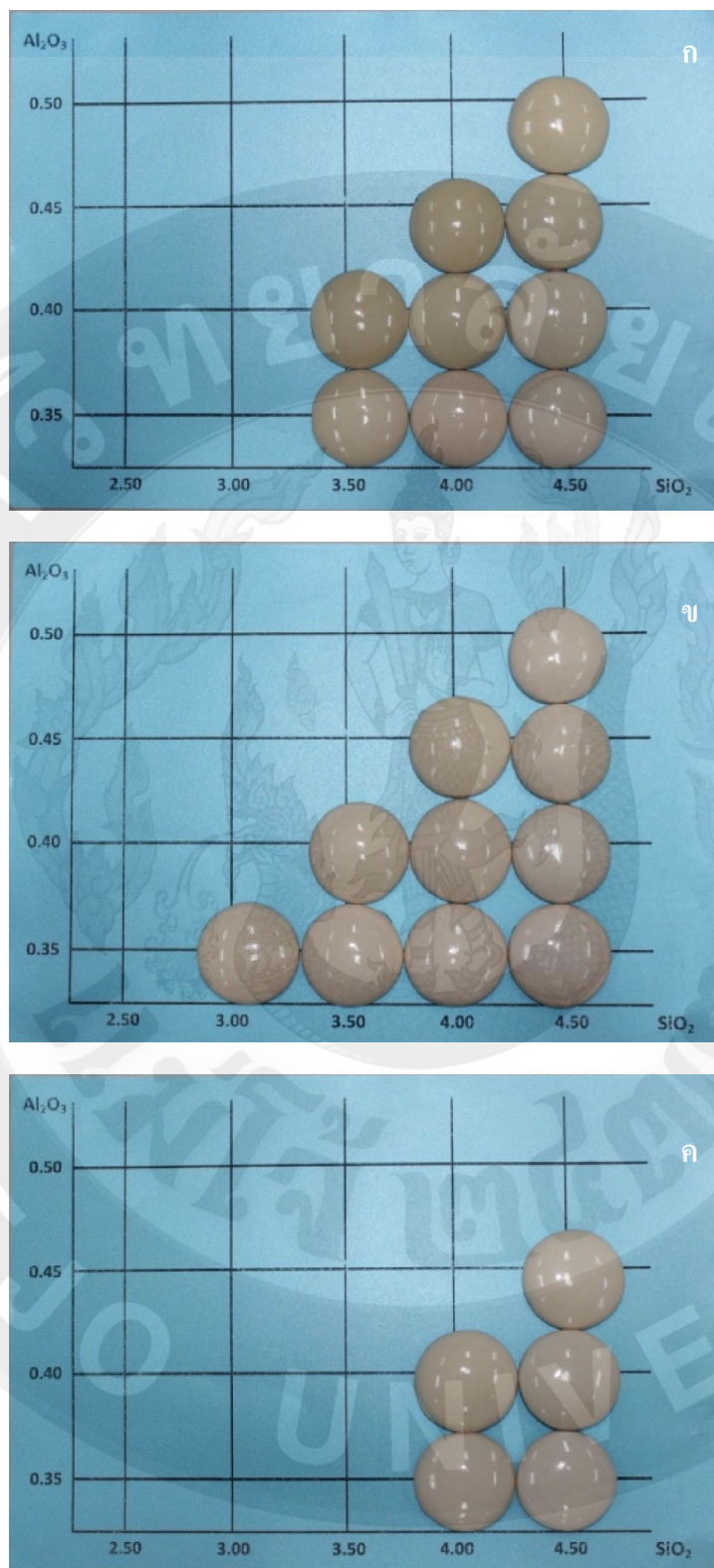
เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เคลือบที่เตรียมจากอัลตราโซนิกสักระยะมีสีน้ำตาลเข้มขึ้น มีความมันวาว เริ่มสังเกตเห็นบริเวณที่มีเคลือบแตกและการร่อนของเคลือบเล็กน้อย เคลือบที่เตรียมจากหินปูนยังคงมีความขาวใส มันวาวและร่อนตัวเล็กน้อย ส่วนเคลือบที่เตรียมจากอัลตราโซนิกสักระยะการค้ำ มีลักษณะยังคงมีความขาวใส ไม่เกิดการร่อนตัวหรือแตก



ภาพที่ 14 เคลือบหลังเผา 1100 องศาเซลเซียส (ก) ระบบ A (ข) ระบบ L และ (ค) ระบบ WS



ภาพที่ 15 เคลือบหลังเผา 1150 องศาเซลเซียส (ก) ระบบ A (ข) ระบบ L และ (ค) ระบบ WS



ภาพที่ 16 เคลือบหลังเผา 1200 องศาเซลเซียส (ก) ระบบ A (ข) ระบบ L และ (ค) ระบบ WS

3.2 การไหลของเคลือบบนระนาบเอียง

จากการทดสอบการไหลของเคลือบบนระนาบเอียง 60° โดยใช้สูตรที่ 4 ซึ่งมีสูตรเชเกอร์เป็น

0.3 KNaO

0.4 CaO

0.35 Al_2O_3

4.0 SiO_2

0.3 ZnO

และ สูตรที่ 9 ซึ่งมีสูตรเชเกอร์เป็น

0.3 KNaO

0.4 CaO

0.40 Al_2O_3

4.0 SiO_2

0.3 ZnO

เผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส ใช้อัตราเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เผาแช่ 30 นาที ระยะเวลาไหลของเคลือบทำซ้ำ 5 ครั้ง แสดงสรุปค่าในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ระยะเวลาไหลของเคลือบหินปูน-สังกะสี ที่เตรียมจากวอลลาสโทไนต์สังเคราะห์ เคลือบที่เตรียมจากหินปูน และเคลือบที่เตรียมจากวอลลาสโทไนต์ทางการค้า

สูตร	ค่าสังเกต (มิลลิเมตร)					รวม	เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
4A	25.02	23.36	27.41	25.39	26.49	127.67	25.53
9A	25.67	25.53	27.83	25.79	24.98	129.8	25.96
4L	24.96	23.70	24.79	25.30	24.98	123.73	24.75
9L	22.12	21.56	22.91	24.98	21.41	112.98	22.60
4WS	13.31	12.74	15.18	15.80	14.12	71.15	14.23
9WS	16.50	15.24	14.62	14.15	13.16	73.67	14.73
					รวม	639	21.30

และจากการประเมินผลการทดลองในตารางที่ 5 โดยใช้สถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ One-way ANOVA ผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 6 ซึ่งเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการไหลของเคลือบทั้ง 6 สูตร พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($F_{(5, 24)} = 95.295$; $p\text{-value} < 0.01$) และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบหลายคู่ด้วย LSD (Fisher's Least Significant Difference) สามารถจัดกลุ่มของสูตร

ทั้ง 6 สูตร เป็น 3 กลุ่ม โดยกลุ่มที่มีระยะการไหลสูงสุด ได้แก่ 9A, 4A และ 4L ซึ่งมีค่าประมาณ 25.96 ± 1.09 , 25.53 ± 1.54 และ 24.75 ± 0.61 มิลลิเมตร ตามลำดับ กลุ่มที่มีระยะการไหลรองลงมา ได้แก่ 4L และ 9L ซึ่งมีค่าประมาณ 24.75 ± 0.61 และ 22.60 ± 1.46 มิลลิเมตร ตามลำดับ (4L สามารถจัดกลุ่มอยู่ได้ ทั้งสองกลุ่ม ซึ่ง $4L = 4A$, $9A$ และ $9L$ แต่ $9L \neq 4A$ และ $9A$) และกลุ่มที่มีระยะการไหลต่ำสุด ได้แก่ 9WS และ 4WS ซึ่งมีค่าประมาณ 14.73 ± 1.25 และ 14.23 ± 1.27 มิลลิเมตร ตามลำดับ

เนื่องจากอัตราการไหลของของเหลวบนระนาบเอียงซึ่งทำมุม θ แปรผกผันกับค่าความหนืดของของเหลว นั้น ดังนั้นค่าระยะการไหลเฉลี่ยของเคลือบจึงใช้เพื่อเปรียบเทียบความหนืดของเคลือบที่ศึกษาในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 6 สรุปค่าทางสถิติในการคำนวณความแปรปรวนแบบ One-way ANOVA

สูตร	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ช่วงความเชื่อมั่น (ร้อยละ 99)	
			ขอบล่าง	ขอบบน
4A	25.53 ^A	1.53660	23.6261	27.4419
9A	25.96 ^A	1.09032	24.6062	27.3138
4L	24.75 ^{A,B}	0.61309	23.9847	25.5073
9L	22.60 ^B	1.45675	20.7872	24.4048
4WS	14.23 ^C	1.26945	12.6538	15.8062
9WS	14.73 ^C	1.24562	13.1874	16.2806
รวม	21.30	5.14719	19.3780	23.2220
F = 95.295, df 1= 5, df2 = 24, p-value < 0.01, Sig. = 0.00				

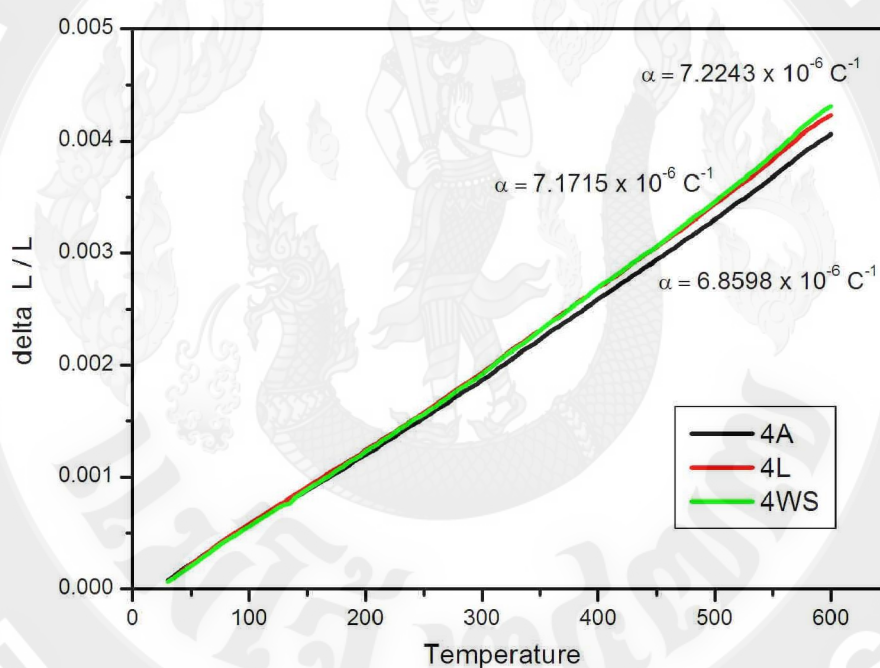
หมายเหตุ : ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงว่ามีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.01$)

ทั้งนี้พบว่าค่าเฉลี่ยระยะการไหลของสูตรที่ 4 และสูตรที่ 9 ของระบบเดียวกันไม่แตกต่างกัน แต่ค่าเฉลี่ยระยะการไหลของเคลือบที่เตรียมจากวอลลาสโทไนต์ที่สังเคราะห์ เคลือบที่เตรียมจากหินปูน และเคลือบที่เตรียมจากวอลลาสโทไนต์ทางการค้า แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ยกเว้น 4L) ดังนั้น เคลือบระบบวอลลาสโทไนต์ทางการค้ามีความหนืดสูงสุด เคลือบที่มีความหนืดรองลงมาคือเคลือบระบบหินปูน และเคลือบที่มีความหนืดต่ำสุดคือ เคลือบวอลลาสโทไนต์สังเคราะห์

3.3 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

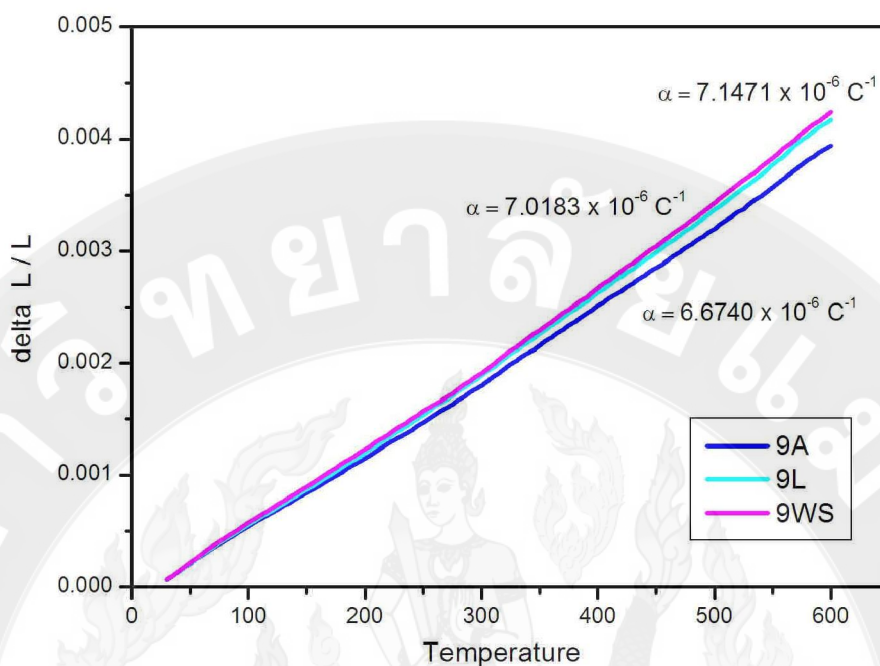
จากการทดสอบการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของเคลือบของสูตรที่ 4 และ สูตรที่ 9 ทุกระบบ ที่ช่วงอุณหภูมิ 30 – 600 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 17 – 18

กรณีเคลือบสูตรที่ 4 ของทุกระบบ พบว่าเคลือบที่เตรียมจากวอลลาสโทไนต์สังเคราะห์มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำสุดเท่ากับ 6.8598×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส เคลือบที่เตรียมจากหินปูนมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเท่ากับ 7.1715×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส และเคลือบที่เตรียมจากวอลลาสโทไนต์ทางการค้าแสดงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเท่ากับ 7.2243×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส



ภาพที่ 17 การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบสูตรที่ 4 ทั้ง 3 ระบบ

กรณีเคลือบสูตรที่ 9 ของทุกระบบ พบว่าเคลือบที่เตรียมจากวอลลาสโทไนต์สังเคราะห์มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำสุดเท่ากับ 6.6740×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส เคลือบที่เตรียมจากหินปูนมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน 7.0183×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส และเคลือบที่เตรียมจากวอลลาสโทไนต์ทางการค้าแสดงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเท่ากับ 7.1471×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส



ภาพที่ 18 การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบสูตรที่ 9 ทั้ง 3 ระบบ

จากผลการทดลองเคลือบหลังเผาและการไหลของเคลือบบนระนาบเอียง บ่งชี้ว่า วอลลาสไทต์สังเคราะห์มีส่วนช่วยให้เคลือบหลอมที่อุณหภูมิต่ำลง และช่วยลดความหนืดของเคลือบได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเคลือบที่มีการใช้หินปูนเป็นวัตถุดิบซึ่งเนื่องมาจากองค์ประกอบทางเคมีของวอลลาสไทต์สังเคราะห์มีปริมาณรวมของแอลคาไลออกไซด์ที่มากกว่า (ภาคผนวก) ทั้งยังลดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเคลือบได้ ขณะที่เคลือบที่มีการใช้หินปูนและเคลือบที่ใช้วอลลาสไทต์ทางการค้าแสดงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนในระดับใกล้เคียงกัน

สรุปผลการวิจัย

เมื่อเผาของผสมระหว่างเปลือกไข่เผาและเพอร์ไลต์ขยายตัว โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเป็น 1 : 1 พบว่า ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 400 – 600 องศาเซลเซียส ปรากฏเฟสแคลไซต์หรือสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต โดยยังไม่ทำปฏิกิริยากับซิลิกาอสัณฐาน ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พบเฟสวอลลาสโทไนต์และแคลไซต์ และที่อุณหภูมิ 1000 – 1100 องศาเซลเซียส พบเฟสวอลลาสโทไนต์และเจไลน์ต์ สำหรับที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส รูปแบบการเรียงเบนริงส์เอ็กซ์ยืนยันว่าไม่ใช่เฟสเดียวกันกับที่พบเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1000 – 1100 องศาเซลเซียส ในทางทฤษฎี อัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์วอลลาสโทไนต์ คือ 1 : 1 โดยโมล แต่ผลจากการแปรอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาเป็น 1 : 0.8 1 : 1 1 : 1.2 และ 1 : 1.4 เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ใช้อัตราเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที แห่อุณหภูมิ 2 – 5 ชั่วโมง พบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสังเคราะห์วอลลาสโทไนต์ คือ การใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาเป็น 1 : 1.4 เป็นเวลา 2 หรือ 5 ชั่วโมง เนื่องจากพบเฉพาะเฟสของวอลลาสโทไนต์ ในขณะที่การสังเคราะห์โดยใช้เงื่อนไขอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาเป็น 1 : 0.8 1 : 1 1 : 1.2 เผาที่อุณหภูมิต่ำเดียวกัน จะปรากฏเฟสเจไลน์ต์เกิดร่วมกับวอลลาสโทไนต์

จากการทดลองนำวอลลาสโทไนต์สังเคราะห์เป็นวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับเคลือบหินปูน-สังกะสี โดยมีเคลือบหินปูน-สังกะสีที่ใช้หินปูน และวอลลาสโทไนต์ทางการค้าเป็นระบบเปรียบเทียบ ผลปรากฏว่าเคลือบที่เตรียมจากวอลลาสโทไนต์สังเคราะห์เริ่มหลอมที่อุณหภูมิต่ำกว่า คือที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เนื่องมาจากวอลลาสโทไนต์สังเคราะห์มีองค์ประกอบทางเคมีของแอลคาไลออกไซด์ในปริมาณที่มากกว่า และจากการทดสอบการไหลของเคลือบสูตรที่ 4 และสูตรที่ 9 บนระนาบเอียงที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส ผลเชิงสถิติยืนยันได้ว่า ค่าเฉลี่ยระยะการไหลของสูตรที่ 4 และสูตรที่ 9 ของระบบเดียวกันไม่แตกต่างกัน แต่ค่าเฉลี่ยระยะการไหลของเคลือบที่เตรียมจากวอลลาสโทไนต์สังเคราะห์ เคลือบที่เตรียมจากหินปูน และเคลือบที่เตรียมจากวอลลาสโทไนต์ทางการค้า แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยเคลือบที่มีระยะการไหลเฉลี่ยสูงสุด หรือมีความหนืดต่ำคือเคลือบที่เตรียมจากวอลลาสโทไนต์สังเคราะห์ เคลือบที่มีระยะการไหลเฉลี่ยรองลงมาก็คือเคลือบที่เตรียมจากระบบหินปูน โดยเคลือบที่เตรียมจากวอลลาสโทไนต์ทางการค้ามีระยะการไหลเฉลี่ยต่ำสุดหรือมีความหนืดสูงสุด นอกจากนี้ยังพบว่าเคลือบที่เตรียมจากวอลลาสโทไนต์สังเคราะห์แสดงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- คชินท์ สายอินทวงศ์. **Wollastonite**. จาก http://www.thaiceramicsociety.com/rm_paint_wollastonite.php [2 สิงหาคม 2556]
- ครุณี สายสุทธิชัย. 2549. สมบัติของหินเพอร์ไลต์และการใช้ประโยชน์. รายงานวิชาการ. สำนักทรัพยากรแร่ กรมทรัพยากรธรณี: กรุงเทพฯ.
- ลดา พันธุ์สุขุมธนา วรรณาด.แสงจันทร์ และสายจิต ดาวสุโข. 2553. การวิเคราะห์เชิงสถิติ ผลการทดสอบ การไหลของเคลือบเซรามิกหกลอมโดยการวัดระยะไหลบนระนาบเอียง. **วารสารกรมวิทยาศาสตร์ บริการ**. 58(183): 36 – 42.
- อลงกต ช้างเผือก. 2541. การผลิตแคลเซียมคลอไรด์จากเปลือกไข่ไก่. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมี. คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เสาวนีย์ เสียมไหม. 2551. การศึกษาสมบัติหินเพอร์ไลต์ด้วยเครื่องมือระดับสูง. รายงานวิชาการ. กองวิเคราะห์และตรวจสอบทรัพยากรธรณี. กรมทรัพยากรธรณี: กรุงเทพฯ.
- Bergeron, C. G. and S. H. Risbud. 1984. **Introduction to phase equilibria in ceramics**. The American Ceramics Society. 149 p.
- Cherdsak, U., Pornsawat, W., Ludda, M. and S. Pramuanpong. 1989. Industrial potential of wollastonite from Lopburi, Central Thailand. **Proceeding of 9th regional congress on geology, mineral and energy resource of southeast (GEOSEA'98)**. Kuala Lumpur, Malaysia, August 17-19, 1998: 209 - 210.
- Felipé-Sesé, M., Eliche-Quesada, D. and F. A. Corpas-Iglesias. 2011. The use of solid residues derived from different industrial activities to obtain calcium silicates for use as insulating construction materials. **Ceram. Int.** 37(8): 3019-3028.
- Javed, S. H., Naveed, S., Tajwar, S., Shafaq, M., Mohsin, K. and F. Nadeem. 2009. Synthesis of wollastonite from agro-waste. **J. Agric. Res.** 47(3): 319-327.
- Jing, Q., Fang, L., Liu, H. and P. Liu. 2011. Preparation of surface-vitrified micron sphere using perlite from Xinyang China. **Appl. Clay. Sci.** 53(4): 745-748.
- Meechoowas, E., Ketboonruang, P., Tapasa, K. and T. Jitwatcharakomol. 2012. Improve melting glass efficiency by batch to melt conversion. **Procedia Engineering**. 32: 956-961.

- Nour, W. M. N., Mostafa, A. A. and D. M. Ibrahim. 2008. Recycled wastes as precursor for synthesizing wollastonite. **Ceram. Int.** 34(1): 101-105.
- Radev, L., Hristov, V., Michailova, I. and B. Samuneva. 2009. Sol-gel bioactive glass-ceramics Part I: calcium phosphate silicate/wollastonite glass-ceramics. **Cent. Eur. J. Chem.** 7(3): 317-321.
- Roulia, M., Chassapis, K., Kapoutsis, J. A., Kamitsos, E. I. and T. Savvidis. 2006. Influence of thermal treatment on water release and glassy structure of perlite. **J. Mater. Sci.** 41: 5870-5881.
- Sathiyakumar, M. and F. D. Gnanam. 2003. Role of wollastonite additive on density, microstructure and mechanical properties of alumina. **Ceram. Int.** 29(8): 869-873.
- Vakalova, T. V., Karionova, N. P., Pogrebenkov, V. M., Vereshchagin, V. I. and V. V. Gorbatenko. 2010. Features of solid phase synthesis of wollastonite from natural and technogenic raw material. **Refract. Ind. Ceram.** 51(4): 295-301.
- Vichaphund, S., Kittiwat, M., Atong, D. and P. Thavornniti. 2011. Microwave synthesis of wollastonite powder from eggshell. **J. Eur. Ceram. Soc.** 31(14): 2435-2440.
- Wollastonite. ESMA - The European Specialty Minerals. Available from: www.ima-eu.org [2012 September 2]
- Wollastonite. Powder (Calcium Metasilicate) from READE. Available from: <http://www.reade.com/products/135-silicate-compounds-powder/821> [2014 August 2]
- Zhang, W. Y. and H. Liua. 2013. A low cost route for fabrication of wollastonite glass-ceramics directly using soda-lime waste glass by reactive crystallization-sintering. **Ceram. Int.** 39(2): 1943-1949.

ภาคผนวก

องค์ประกอบทางเคมี (XRF)

Raw materials	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
Expanded perlite	72.59	14.09	1.59	0.31	0.05	1.08	0.41	3.30	5.37	1.21
Lampang clay	75.29	15.92	1.14	0.28	0.07	0.20	0.25	1.77	0.47	4.60
Feldspar	73.61	14.77	0.35	-	0.03	0.36	0.04	8.13	2.19	0.52
Silica	98.30	0.71	0.08	0.01	-	0.06	0.02	0.21	0.04	0.13
Limestone	0.08	0.07	0.06	-	-	55.57	0.32	-	-	43.9
Wollastonite (Commercial)	56.52	0.24	0.21	2.00	0.01	40.58	0.96	0.10	0.09	1.28
Wollastonite (Synthesis)	53.30	10.08	1.20	0.16	0.04	27.94	0.51	4.02	1.43	0.58