

การสังเคราะห์ซีเมนต์สะอาดจากกากวัสดุอุตสาหกรรม  
Synthesizing green cement from industrial waste materials for use as  
cement replacement material in concrete industrial

นายนครินทร์ พึ่งสมบัติ  
นายกัณฑ์เอนก กันอุปัทว์

รหัส 54361305  
รหัส 54364436

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์  
วันที่รับ.....30.11.2558  
เลขทะเบียน.....16910488  
เลขเรียกหนังสือ.....มร.  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ๖๖๓๑


ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
ปีการศึกษา 2557



## ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการงาน	การสังเคราะห์ซีเมนต์สะอาดจากวัสดุกากอุตสาหกรรม		
ผู้ดำเนินโครงการงาน	นายนครินทร์ พึ่งสมบัติ	รหัส	54361305
	นายกันต์เอนก กันอุปัทว์	รหัส	54364436
ที่ปรึกษาโครงการงาน	ดร.พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง		
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา		
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา		
ปีการศึกษา	2557		

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

.....ที่ปรึกษาโครงการงาน  
(ดร.พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง)

.....กรรมการ  
(ผศ.ดร.สสิกรณณ์ เหลืองวิชเจริญ)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การสังเคราะห์ซีเมนต์สะอาดจากวัสดุกากอุตสาหกรรม		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายนครินทร์	พึ่งสมบัติ	รหัส 54361305
	นายกันต์เอนก	กันอุปัทว์	รหัส 54364436
ที่ปรึกษาโครงการ	ดร.พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง		
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา		
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา		
ปีการศึกษา	2557		

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางความเป็นไปได้ในการนำกากอุตสาหกรรมกลับมาใช้ใหม่ โดยเลือกชนิดของวัสดุกากอุตสาหกรรมที่มีคุณสมบัติเหมาะสมมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในผลิตซีเมนต์ โดยในขั้นต้นได้ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงเคมีและฟิสิกส์ของวัสดุกากอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ที่สนใจ จากนั้นจึงทำการเผาวัสดุตั้งกล่าวที่อุณหภูมิระหว่าง 1200 – 1450 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากการศึกษาเลือกชนิดของวัสดุและผสมในสัดส่วนต่างๆ โดยใช้ค่าองค์ประกอบออกไซด์และปฏิกิริยาทางเคมีของวัสดุเป็นเกณฑ์กำหนด การศึกษาวิจัยพบว่า ฝุ่นหินอ่อน ,ดินขาว และฝุ่นศิลาแลง ซึ่งเป็นกากวัสดุอุตสาหกรรมนั้นมียอดค่าประกอบทางเคมีตรงกับองค์ประกอบหลักในปูนซีเมนต์ที่ต้องการ จึงได้ทำวิจัยขึ้นเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อนำไปทดสอบทางคอนกรีตเทคโนโลยีในงานวิศวกรรมต่อไป

**Project title**                      Synthesizing green cement from industrial waste materials for use as cement replacement material in concrete industrial

**Name**                                Mr. Nakarin   Pheongsombut                      ID. 54361305  
     Mr. Kananak   Kanupat                                ID. 54364436

**Project advisor**                    Dr. Phongthorn Julphunthong

**Major**                                 Civil Engineering

**Department**                       Civil Engineering

**Academic year**                    2014

---

### Abstract

This research aims to preliminary study on the synthesizing of a new cement-like materials from several industrial wastes. The study was focused on selection and determination of appropriate proportions of certain types of wastes for the clinkerization processes. In preliminary, the chemical and physical properties of raw wastes were investigated. The selected wastes were burned in an electric furnace by varying the temperatures between 1200 - 1,450 °C for 1 h. Based on the chemical compositions and chemistry of the material, the marble dust, china clay and laterite dust were selected as a raw materials. The study reveals that the chemical composition and the main component in cement to meet demand. We have done extensively research to find the optimal ratio in mixed proportions and calcining condition.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพราะได้รับความอนุเคราะห์จาก ดร.พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ให้ความรู้ คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไข และคำแนะนำในการแก้ไข ปัญหา รวมไปถึงคำชี้แนะในขั้นตอนการทำงานจนโครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบพระคุณ อาจารย์เป็นอย่างสูง



คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นายนครินทร์ พึ่งสมบัติ

นายกัณฑ์เอนก กันอุปัท

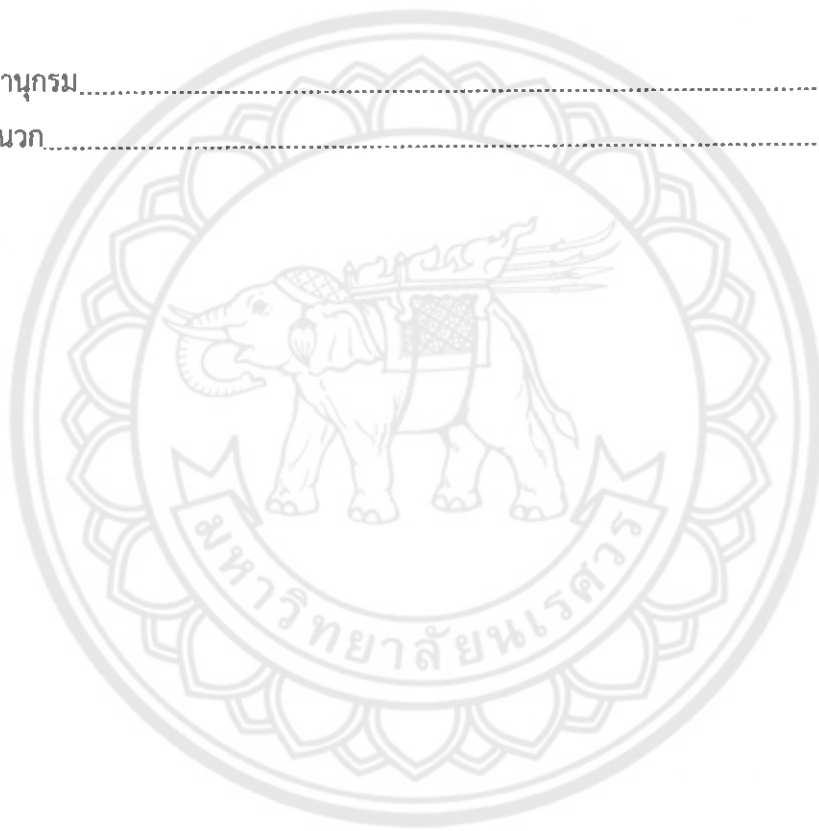
พฤษภาคม 2558

## สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.4 ขอบเขตการทำโครงการ.....	3
1.5 ขั้นตอนในการทำโครงการ.....	3
1.6 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ.....	4
1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ.....	5
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....	6
2.1 ซีเมนต์(Cement).....	6
2.2 ปฏิกริยาเคมีในกระบวนการเผาสังเคราะห์ซีเมนต์.....	9
2.3 คุณสมบัติของสารประกอบ.....	12
2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ.....	14
2.5 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	18
บทที่ 3 วิธีการทดลอง.....	22
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	22
3.3 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	23
3.4 การเตรียมวัสดุ.....	23
3.5 วิธีการทดลอง.....	23

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์.....	25
4.1 การวิเคราะห์ทางเคมีและกายภาพของวัสดุ.....	25
4.2 ปฏิริยาเคมีของวัสดุ.....	26
4.3 การวิเคราะห์สัดส่วนทางเคมีที่ใช้ในการเผา.....	27
4.4 ผลการทดลอง.....	28
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	44
บรรณานุกรม.....	45
ภาคผนวก.....	46



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ.....	4
2.1 ตัวอย่างปริมาณวัสดุตั้งต้น.....	7
2.2 ค่าออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	10
2.3 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	11
2.4 ตัวอย่างการคำนวณหาสารประกอบหลัก.....	12
2.5 สมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PC) และฝุ่นหินอ่อน (MDW).....	19
2.6 อัตราส่วนผสมซีเมนต์-ฝุ่นหินอ่อน-ยิปซัม เพื่อศึกษาคุณสมบัติคอนกรีต.....	20
4.1 ผลองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ.....	25
4.2 จำนวนอัตราส่วนการเผา.....	27
4.3 ผลวิเคราะห์เคมีจากการยิงรังสี XRF.....	29





## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กระบวนการผลิตซีเมนต์.....	8
2.2 ปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการเผาวัตถุดิบเพื่อสังเคราะห์ซีเมนต์.....	9
2.3 รูปร่างลักษณะของ $C_3S$ และ $C_2S$ .....	13
2.4 หลักการทำงานของเครื่อง XRD.....	16
2.5 การกระจายขนาดอนุภาคของฝุ่นหินอ่อน.....	18
2.6 รูปแสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ผสมฝุ่นหินอ่อนในสัดส่วนต่างๆ.....	20
2.7 Compressive strength ของคอนกรีตที่ผสมฝุ่นหินอ่อนที่อัตราส่วนต่างๆ.....	21
4.1 TGA-DTA curves ของฝุ่นหินอ่อน.....	26
4.2 TG-DTA curves ของซีเมนต์ฝุ่นหินอ่อน.....	30
4.3 กราฟรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	31
4.4 กราฟ XRD และวิเคราะห์ธาตุของซีเมนต์ฝุ่นหินอ่อนเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส.....	32
4.5 กราฟ XRD และวิเคราะห์ธาตุของซีเมนต์ฝุ่นหินอ่อนเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส.....	33
4.6 กราฟ XRD และวิเคราะห์ธาตุของซีเมนต์ฝุ่นหินอ่อนเผาที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส.....	34
4.7 กราฟ XRD และวิเคราะห์ธาตุของซีเมนต์ฝุ่นหินอ่อนเผาที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส.....	35
4.8 กราฟ XRD และวิเคราะห์ธาตุของซีเมนต์ฝุ่นหินอ่อนเผาที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส.....	36
4.9 กราฟ XRD และวิเคราะห์ธาตุของซีเมนต์ฝุ่นหินอ่อนเผาที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส.....	37
4.10 รูปพื้นผิวโครงสร้างจุลภาคSEM และกราฟ EDS ของ ซีเมนต์ฝุ่นหินอ่อนเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส.....	38
4.11 รูปพื้นผิวโครงสร้างจุลภาคSEM และกราฟ EDS ของ ซีเมนต์ฝุ่นหินอ่อนเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส.....	39
4.12 รูปพื้นผิวโครงสร้างจุลภาคSEM และกราฟ EDS ของ ซีเมนต์ฝุ่นหินอ่อนเผาที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส.....	40
4.13 รูปพื้นผิวโครงสร้างจุลภาคSEM และกราฟ EDS ของ ซีเมนต์ฝุ่นหินอ่อนเผาที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส.....	41
4.14 รูปพื้นผิวโครงสร้างจุลภาค ของซีเมนต์ฝุ่นหินอ่อนเผาที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส.....	42
4.15 รูปพื้นผิวโครงสร้างจุลภาคSEM และกราฟ EDS ของ ซีเมนต์ฝุ่นหินอ่อนเผาที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส.....	43

## บทที่ 1

### บทนำ

ประเทศไทยในปัจจุบันมีการพัฒนาความเจริญในด้านต่างๆเป็นอย่างยิ่งโดยเฉพาะทางด้านเศรษฐกิจ ซึ่งมีการมุ่งพัฒนาเป็นประเทศอุตสาหกรรมขนาดใหญ่และปัญหาที่คาดว่าจะเกิดตามมาจากการพัฒนาในกระบวนการผลิตในทางอุตสาหกรรมคือ ปัญหาการเพิ่มขึ้นของขยะอุตสาหกรรม และการขาดประสิทธิภาพในการกำจัดของเสีย จากข้อมูลของกรมควบคุมมลพิษพบว่าปริมาณขยะอุตสาหกรรมในประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในทุกๆปีรัฐบาลต้องใช้งบประมาณเป็นจำนวนมากในการกำจัดขยะอุตสาหกรรมให้ถูกวิธีเพื่อป้องกันสารพิษตกค้าง ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อปัญหามลภาวะสิ่งแวดล้อมอีกด้วย วิธีการที่จะแก้ปัญหการเพิ่มขึ้นของขยะอุตสาหกรรมประการหนึ่งก็คือ การลดปริมาณขยะอุตสาหกรรม แต่ในปัจจุบันแนวคิดที่พยายามนำขยะอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์ใหม่เพื่อเป็นวัสดุก่อสร้างกำลังเป็นที่นิยมและได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเช่น การผลิตปูนซีเมนต์จากขยะโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งหลักการดังกล่าวจะนอกจากจะช่วยลดมลภาวะที่จะเกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อมแล้วยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของขยะอุตสาหกรรมอีกด้วย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นในการผลิตสารเชื่อมประสานที่มีลักษณะเทียบเคียงกับปูนซีเมนต์ โดยการนำขยะจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ที่มีศักยภาพเหมาะสมกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นหลักในขั้นตอนของอุตสาหกรรมผลิตซีเมนต์โดยขยะที่ถูกคัดเลือกจะต้องสอดคล้องกับเกณฑ์ จากนั้นทำการทดลองหาปริมาณสัดส่วนของกากวัสดุอุตสาหกรรมโดยใช้องค์ประกอบและปฏิกิริยาทางเคมีของวัสดุเป็นเกณฑ์กำหนด ศึกษาปัจจัยจากอุณหภูมิในการเผาและทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของซีเมนต์สังเคราะห์โดยจะกล่าวในบทต่อไป

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ใช้อย่างแพร่หลายที่สุดในประเทศไทย เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการรับกำลังอัดสูง มีความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อนได้ดี และราคาที่ไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับวัสดุก่อสร้างอื่นๆ อย่างเหล็กหรือไม้ องค์ประกอบหลักของคอนกรีตได้แก่ ซีเมนต์, หิน, ทราย, น้ำ และอาจมีวัสดุเสริมพิเศษอื่นๆเล็กน้อย โดยต้นทุนหลักของคอนกรีตได้แก่ซีเมนต์ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 84 ของต้นทุนวัสดุคอนกรีต [1] นอกจากนี้ซีเมนต์ยังถูกใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานสำหรับวัสดุก่อสร้างอื่นๆอีกมากมาย เช่น คอนกรีตบล็อก, คอนกรีตมวลเบา และอิฐดินประสาน ในแต่ละปี ทั่วโลกมีความต้องการใช้ซีเมนต์มหาศาล เช่น ในปี 2556 ทั่วโลกมีการผลิตซีเมนต์ถึงประมาณ 3,500 เมกะตัน ซึ่งกระบวนการผลิตซีเมนต์มีการใช้เชื้อเพลิงมหาศาลทั้งเพื่อบดวัตถุดิบและบดเม็ดปูน รวมถึงการเผาวัตถุดิบที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,450 องศาเซลเซียส การใช้เชื้อเพลิงมหาศาลเหล่านี้ส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่สิ่งแวดล้อมจำนวนมากมีการประมาณการว่าอุตสาหกรรมซีเมนต์ส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซ CO<sub>2</sub> สู่ชั้นบรรยากาศถึงร้อยละ 6 ของปริมาณก๊าซ CO<sub>2</sub> ทั้งหมดที่ถูกปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศโดยมนุษย์ [2] โดยการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตหมดไปกับการบดวัตถุดิบและเม็ดปูนถึงร้อยละ 55 รองลงมาคือการใช้พลังงานในการเผาวัตถุดิบประมาณร้อยละ 25 [2] ดังนั้น การหากระบวนการในการลดการใช้พลังงานทั้งในส่วนการบดวัตถุดิบ

และเม็ดเงินรวมถึงการลดใช้พลังงานในการในการเผาวัตถุดิบในกระบวนการผลิตซีเมนต์จึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากส่งผลดีทั้งในด้านเศรษฐศาสตร์และด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากกระบวนการผลิตซีเมนต์

อุตสาหกรรมบางประเภท เช่น อุตสาหกรรมการแปรรูปหินอ่อน, อุตสาหกรรมย่อยหินปูนเพื่อการก่อสร้างและอุตสาหกรรมการผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหิน ก่อให้เกิดของเสียจากกระบวนการผลิต เช่น ฝุ่นหินอ่อน, ฝุ่นซิลิกาแลง หรือ ถ่านหิน ซึ่งหากจากอุตสาหกรรมเหล่านี้มักอยู่ในรูปผงละเอียดที่มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของหินปูนที่บดแล้วสำหรับเป็นวัตถุดิบในการผลิตซีเมนต์อยู่แล้วและมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายคลึงกับวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตซีเมนต์ คือ ประกอบด้วย แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) และ ซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ดังนั้นหากอุตสาหกรรมดังกล่าวจึงมีแนวโน้มที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ซีเมนต์ได้เช่นกัน นอกจากนี้ อุตสาหกรรมเหล่านี้มักตั้งอยู่ไม่ไกลจากที่ตั้งของโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ เช่น จังหวัดสระบุรี หรือ จังหวัดลำปาง จึงไม่ส่งผลกระทบในด้านต้นทุนการขนส่งมากนัก อย่างไรก็ตามที่ผ่านมายังไม่มีผู้วิจัยศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กากอุตสาหกรรมดังกล่าวในการเป็นวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับการผลิตซีเมนต์ ดังนั้น การวิจัยเกี่ยวกับการนำกากอุตสาหกรรมดังกล่าวมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการสังเคราะห์ซีเมนต์จึงส่งผลดีทั้งในด้านลดต้นทุนการใช้เชื้อเพลิงในส่วนการบดวัตถุดิบสำหรับกระบวนการผลิตซีเมนต์รวมถึงลดการปล่อยก๊าซ  $\text{CO}_2$  สู่ชั้นบรรยากาศจากกระบวนการผลิตซีเมนต์แล้วยังช่วยลดปัญหาการกำจัดกากอุตสาหกรรมของอุตสาหกรรมการแปรรูปหินอ่อน, อุตสาหกรรมย่อยหินปูนเพื่อการก่อสร้าง, อุตสาหกรรมการผลิตซิลิกาแลง และอุตสาหกรรมการผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหินอีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์และองค์ประกอบทางเคมีที่มีแนวโน้มในการเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตซีเมนต์ของกากอุตสาหกรรมต่างๆโดยวัตถุประสงค์ของการวิจัยประกอบไปด้วย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์และองค์ประกอบทางเคมีของกากอุตสาหกรรมที่มีแนวโน้มเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตซีเมนต์ได้ เช่น ฝุ่นหินอ่อน, ฝุ่นซิลิกาแลง, ดินขาวหรือกากอุตสาหกรรมอื่นๆ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาเงื่อนไขในการสังเคราะห์ซีเมนต์จากวัสดุกากอุตสาหกรรมเช่น ชนิดของวัสดุที่เหมาะสม, ปริมาณสัดส่วนที่เหมาะสม, อุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมในการเผา
- 1.2.3 เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผาต่อสมบัติของซีเมนต์ที่สังเคราะห์ได้

## 1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 เป็นการสร้างแนวทางใหม่ในการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้จากภาคอุตสาหกรรม
- 1.3.2 เป็นการสร้างแนวทางใหม่ในการลดต้นทุนการผลิตและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในกระบวนการผลิตซีเมนต์

### 1.3.3 เป็นการเพิ่มมูลค่าของฝุ่นหินอ่อน ฝุ่นศิลาแลง และดินขาว จากวัสดุกากอุตสาหกรรม

## 1.4 ขอบเขตการทำโครงการ

การวิจัยนี้ใช้ฝุ่นจากการผลิตหินอ่อนที่จังหวัดกำแพงเพชร, ฝุ่นจากกระบวนการผลิตศิลาแลงจากจังหวัดกำแพงเพชรและดินขาวจังหวัดอุดรดิตถ์ มาศึกษาสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ด้วยเทคนิค เช่น X-ray fluorescence (XRF) , X-ray diffraction (XRD), Thermogravimetric analyzer (TGA), Differential thermal analysis (DTA), Scanning electronmicroscope (SEM) เพื่อประเมินความเหมาะสมในการเป็นวัสดุตั้งต้นในการสังเคราะห์ซีเมนต์ ศึกษาเงื่อนไขต่างๆที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีเมนต์จากวัสดุที่เลือกเช่น ปริมาณและชนิดของวัสดุกากอุตสาหกรรม, อุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมในการเผา, ความละเอียดของซีเมนต์ที่ได้จากการเผา และองค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ที่เผาจากวัสดุกากอุตสาหกรรม

## 1.5 ขั้นตอนในการทำโครงการ

- 1.5.1 สํารวจแหล่งวัสดุกากอุตสาหกรรมและศึกษาสมบัติเชิงเคมีและฟิสิกส์ของกากอุตสาหกรรมที่มีแนวโน้มเป็นวัสดุตั้งต้นสำหรับสังเคราะห์ซีเมนต์โดยเฉพาะองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$
- 1.5.2 ศึกษาเงื่อนไขต่างๆที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ซีเมนต์สะอาดจากกากอุตสาหกรรมและศึกษาเงื่อนไขการสังเคราะห์ซีเมนต์สะอาดจากกากอุตสาหกรรม เช่น ชนิดวัสดุและสัดส่วนที่เหมาะสม, อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเผาที่เหมาะสม
- 1.5.3 ทดสอบสมบัติเชิงเคมี-ฟิสิกส์ของซีเมนต์ที่สังเคราะห์ และศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีขณะสังเคราะห์ซีเมนต์ โดยการวิเคราะห์ Thermal analysis, วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF และ XRD และวิเคราะห์สมบัติที่สนใจอื่นๆ เช่น particle size distribution และ surface area
- 1.5.4 สรุปผลการวิจัย



### 1.7 งบประมาณ

1. ค่าวัสดุสำนักงาน	200	บาท
2. ค่าวัสดุคอมพิวเตอร์	300	บาท
3. ค่าวัสดุน้ำมันหรือเชื้อเพลิงและหล่อลื่น	500	บาท
4. ค่าจ้างถ่ายเอกสารหรือจัดทำรูปเล่ม	1,000	บาท
รวมเป็นเงินทั้งสิ้น	2,000	บาท

(สามพันบาทถ้วน)

หมายเหตุ : ขออนุมัติด้วยเฉลี่ยทุกรายการ



## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎี

#### 2.1 ซีเมนต์ (cement)

ซีเมนต์ (cement) เป็นวัสดุเชื่อมประสานสำหรับผลิตคอนกรีตและวัสดุก่อสร้างที่สำคัญต่างๆในงานก่อสร้างเช่น คอนกรีตบล็อก, คอนกรีตมวลเบา, อิฐดินประสาน ปูนฉาบในฐานะวัสดุเชื่อมประสาน ซีเมนต์ที่ผ่านกระบวนการผลิตจากโรงงานประกอบด้วยสารประกอบหลัก 4 ชนิด ได้แก่ tricalcium silicate ( $C_3S$ ), dicalcium silicate ( $C_2S$ ), tricalcium aluminate ( $C_3A$ ) และ tetracalcium aluminoferrite ( $C_4AF$ ) [7] เมื่อสารประกอบเหล่านี้ทำปฏิกิริยากับน้ำ(hydration) จะเกิดสารประกอบ calcium silicate hydrate หรือ CHS ( $C_3S_2H_3$ ) ซึ่งเป็นวัสดุเชื่อมประสาน

##### 2.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์

แบ่งออกเป็น 3 ชนิดใหญ่ๆ ดังนี้

1. วัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของปูนขาว(Lime Component) เป็นวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบทางเคมีเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต(Calcium Carbonate,  $CaCO_3$ ) ซึ่งมีความบริสุทธิ์ประมาณ 85 – 95 % ตัวอย่างวัตถุเหล่านี้ตามธรรมชาติ ได้แก่ หินปูน(Limestone), ชอล์ก(Chalk) และ ดินขาว (Marl)

2. วัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของดินดาน (Clay) เป็นวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบทางเคมีของซิลิกาออกไซด์ ( $SiO_2$ ), อะลูมินาออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) ตัวอย่างวัตถุเหล่านี้ตามธรรมชาติ ได้แก่ ดินเหนียว (Clay) และดินดาน (Shale)

3. วัตถุดิบปรับแต่งคุณสมบัติ (Corrective Materials) เป็นวัตถุดิบที่ใช้สำหรับเพิ่มเติมสารประกอบบางตัวซึ่งมีไม่เพียงพอในดินดำหรือดินดาน วัตถุดิบเหล่านี้ได้แก่ หินทราย (ในกรณีที่ต้องการซิลิกาออกไซด์), แร่เหล็กหรือดินลูกรัง (ในกรณีที่ต้องการเฟอร์ริกออกไซด์) และดินอะลูมินา (ในกรณีที่ต้องการอะลูมินาออกไซด์) เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างปริมาณวัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตซีเมนต์ [7]

	Lime stone	Shale	Sand	Iron oxide	Clinker made from the dry raw material
Dry material used	73	22.5	4.2	0.3	-
SiO <sub>2</sub>	1.4	37.9	95.0	2.7	20.3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5	16.5	1.4	6.6	6.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.2	5.1	1.3	84.0	2.4
CaO	53.7	15.4	1.0	2.7	64.1
CaCO <sub>3</sub>	95.9	27.5	-	-	-
Product of cement clinker					
Tricalcium silicate (C <sub>3</sub> S)					57
Dicalcium silicate (C <sub>2</sub> S)					15
Tricalcium aluminate (C <sub>3</sub> A)					12.4
Tetracalcium aluminoferrite (C <sub>4</sub> AF)					7.3

### 2.1.2 กระบวนการผลิตซีเมนต์

ขั้นตอนที่ 1 นำวัตถุดิบหลักที่ใช้ในกระบวนการผลิตจากแหล่งนั้นคือ หินปูน (Limestone) และ ดินดาน (Shale) ซึ่งได้จากการระเบิดหินจากภูเขาหินปูนมาอยู่ที่ทำการผลิต

ขั้นตอนที่ 2 นำดินทั้งสองชนิดมาลดขนาดลงเพื่อให้เหมาะกับกระบวนการผลิตขั้นต่อไป โดยการนำมาผ่านเครื่องย่อย (Crusher) ซึ่งวัตถุดิบที่ผ่านการย่อยแล้วจะถูกนำมาเก็บไว้ที่กองเก็บวัตถุดิบ (Storage yard) นอกจากนี้วัตถุดิบปรับแต่งคุณสมบัติ (Corrective materials) ซึ่งใช้เฉพาะบางตัว เพื่อให้ได้ส่วนประกอบทางเคมีตามค่ามาตรฐานที่กำหนด วัตถุดิบอื่นเหล่านี้ก็ต้องผ่านเครื่องย่อยเพื่อลดขนาดให้เหมาะสมเช่นกัน

ขั้นตอนที่ 3 ลำเลียงไปยังหม้อบดวัตถุดิบ (Raw mill) ซึ่งในหม้อบดวัตถุดิบนี้จะบดหินปูน, ดินดาน และวัตถุดิบปรับแต่งคุณสมบัติให้เป็นผงละเอียดรวมกันซึ่งเรียกว่า วัตถุดิบสำเร็จ (Raw meal) โดยการควบคุมอัตราส่วนของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่หม้อบดวัตถุดิบมีความสำคัญมาก เนื่องจากอัตราส่วนของวัตถุดิบที่เหมาะสมจะทำให้วัตถุดิบสำเร็จมีคุณสมบัติทางเคมีที่เหมาะสมกับการเผาด้วย

ขั้นตอนที่ 4 หลังจากผ่านกระบวนการบดแล้ววัตถุดิบสำเร็จจะถูกลำเลียงผ่านเครื่องแยกวัตถุดิบผสมแล้ว (Cyclone) ไปยังถังผสมวัตถุดิบสำเร็จ (Raw meal homogenizing silo) เพื่อเก็บและผสมวัตถุดิบสำเร็จให้เป็นเนื้อเดียวกัน

ขั้นตอนที่ 5 จะเป็นกระบวนการเผาโดยวัตถุดิบสำเร็จจะถูกส่งไปเผาในหม้อเผาแบบหมุน (Rotary kiln) โดยกระบวนการเผาช่วงแรกเป็น ชุดเพิ่มความร้อน (Preheater) ซึ่งจะค่อยๆเพิ่มความร้อนให้แก่วัตถุดิบสำเร็จแล้วส่งวัตถุดิบสำเร็จไปเผาในหม้อเผา ซึ่งมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนถึงประมาณ 1,200 - 1,450 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีตามลำดับจนในที่สุดกลายเป็นปูนเม็ด (Clinker)

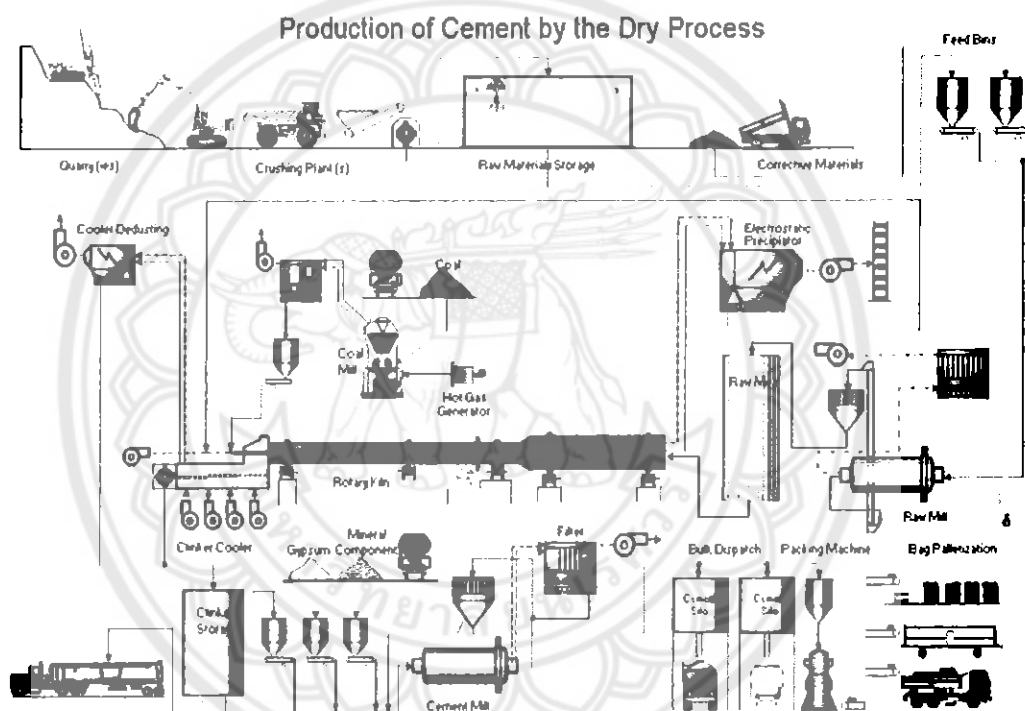


ขั้นตอนที่ 6 เป็นการทำให้ปูนเม็ดเย็นลงโดยการนำปูนเม็ด (Clinker) ไปผ่านหม้อเย็น (Clinker cooler)

ขั้นตอนที่ 7 ลำเลียงปูนเม็ดไปเก็บไว้ที่ยังเก็บเพื่อรอการบดปูนเม็ดต่อไป

ขั้นตอนที่ 8 เป็นขั้นตอนการบดปูนเม็ดให้กลายเป็นปูนซีเมนต์ ทำโดยนำปูนเม็ดมาผสมกับยิปซัม(Gypsum) ที่ถูกย่อยแล้ว จากนั้นก็บดให้ละเอียดเป็นผงในหม้อบดซีเมนต์ (Cement Mill) ความละเอียดในการบดและอัตราส่วนระหว่างปูนเม็ดกับยิปซัมต้องเลือกอย่างเหมาะสม เพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 9 จากนั้นปูนซีเมนต์จะผ่านเครื่องแยกปูนละเอียด แล้วจะถูกลำเลียงไปเก็บไว้ใน Cement silo เพื่อรอการจำหน่ายต่อไป

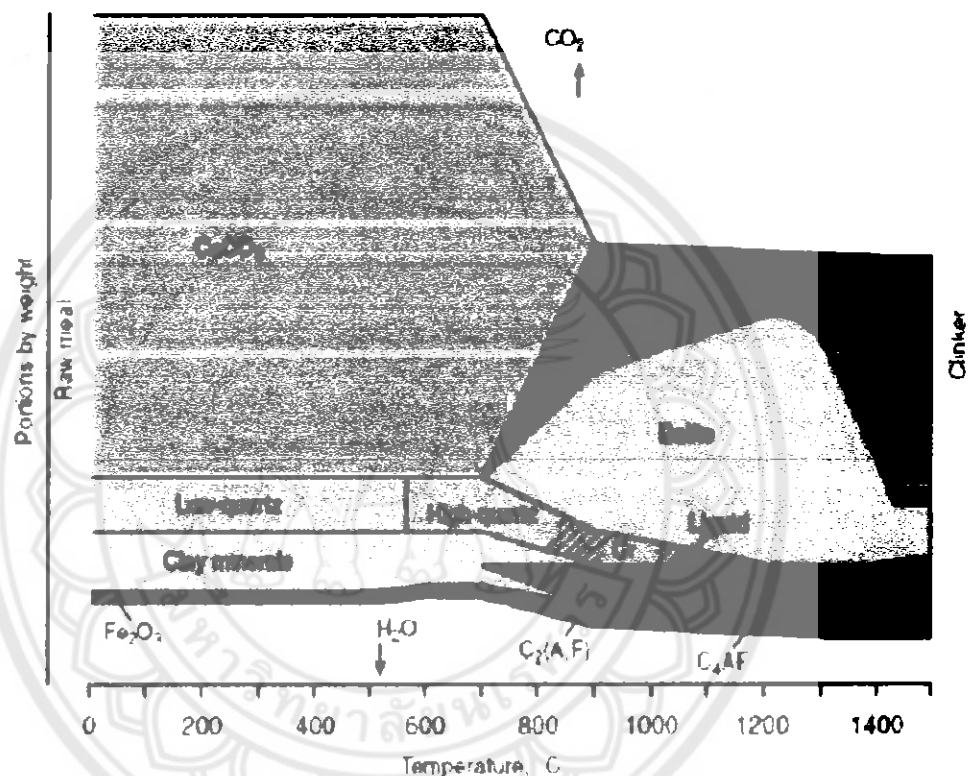


รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตซีเมนต์

ถึงแม้มีความเป็นไปได้ในเบื้องต้นในด้านองค์ประกอบทางเคมีของกากอุตสาหกรรมหลายชนิดมีความเป็นไปได้ในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการสังเคราะห์ซีเมนต์ แต่ยังไม่มีการศึกษาอย่างละเอียดรวมถึงยังมีความเป็นไปได้ของกากอุตสาหกรรมอื่นที่ยังไม่ได้ประเมินความเป็นไปได้เบื้องต้นในการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการสังเคราะห์ซีเมนต์ นอกจากนี้ยังมีความจำเป็นต้องศึกษาเงื่อนไขปริมาณสัดส่วนวัสดุที่เหมาะสม, เงื่อนไขในการเผา เพื่อสังเคราะห์ซีเมนต์ รวมถึงสมบัติทางวิศวกรรมของซีเมนต์ที่สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมดังกล่าว

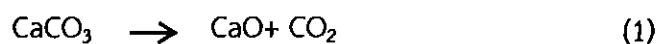
## 2.2 ปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการเผาสร้างเคราะห้ซีเมนต์

การสังเคราะห์ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 สามารถทำได้โดยนำวัตถุดิบตั้งต้นที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ), ซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ), อะลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ในสัดส่วนที่เหมาะสมจากวัสดุต่างๆ (ตารางที่ 2.1) มาผสมกันแล้วทำการเผาที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,450-1,600 องศาเซลเซียสเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีและเกิดวัสดุเชื่อมประสาน 4 ชนิด ได้แก่ tricalcium silicate ( $\text{C}_3\text{S}$ ), dicalcium silicate ( $\text{C}_2\text{S}$ ), tricalcium aluminate ( $\text{C}_3\text{A}$ ) และ tetracalcium aluminoferrite ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) (ตารางที่ 2.1)

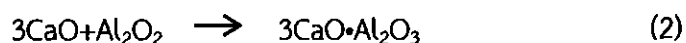


รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการเผาวัตถุดิบเพื่อสังเคราะห์ซีเมนต์ [8]

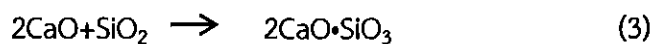
รูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการเกิดวัสดุเชื่อมประสานในขณะเผาวัตถุดิบเพื่อสังเคราะห์ซีเมนต์ กระบวนการการเกิดวัสดุเชื่อมประสานเริ่มตั้งแต่ที่อุณหภูมิประมาณ 700 องศาเซลเซียส แคลเซียมคาร์บอเนตในหินปูนเริ่มสลายตัวเกิดเป็น free lime ( $\text{CaO}$ ) ตามสมการ (1)



ที่อุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส free lime เริ่มทำปฏิกิริยากับ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เกิดเป็น tricalcium aluminate ตามสมการ (2)



อุณหภูมิประมาณ 800 – 1,300 องศาเซลเซียส free lime เริ่มทำปฏิกิริยากับ  $\text{SiO}_2$  เกิดเป็น secondary silicate phase หรือ dicalcium silicate ตามสมการ (3)



เมื่อเพิ่มอุณหภูมิประมาณ 1,300 – 1,500 องศาเซลเซียส dicalcium silicate เกิดปฏิกิริยาเกิดเป็น tricalcium silicate ตามสมการ (4) และ tricalcium aluminate ทำปฏิกิริยากับ free lime และ ferric oxide เกิดเป็น tetracalcium aluminoferrite ดัง แสดงในสมการ (5)



ตารางที่ 2.2 ค่าออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ออกไซด์	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
<b>ออกไซด์หลัก</b>	
CaO	60 – 67
$\text{SiO}_2$	17 – 25
$\text{Al}_2\text{O}_3$	3 – 8
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.5 – 6.0
<b>ออกไซด์รอง</b>	
MgO	0.1 – 5.5
$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	0.5 – 1.3
$\text{TiO}_2$	0.1 – 0.4
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.1 – 0.2
$\text{SO}_3$	1 – 3

ออกไซด์หลัก จะรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (Clinker) เกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	$3\text{CaO} \bullet \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
ไดแคลเซียม ซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	$2\text{CaO} \bullet \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
ไตรแคลเซียม อลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	$3\text{CaO} \bullet \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
เตตราแคลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	$4\text{CaO} \bullet \text{Al}_2\text{O}_3 \bullet \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

เราสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของสารประกอบหลักทั้ง 4 ในปูนซีเมนต์ได้โดยประมาณจากผลการวิเคราะห์ปริมาณออกไซด์ชนิดต่างๆ และอัตราส่วนการรวมตัวทางเคมีของสารประกอบนั้นๆ โดยใช้สูตรคำนวณของ Bogue ดังนี้

$$\text{C}_3\text{S} = 4.07 (\text{CaO}) - 7.60 (\text{SiO}_2) - 6.72 (\text{Al}_2\text{O}_3) - 1.43 (\text{Fe}_2\text{O}_3 - 2.85 (\text{SO}_3))$$

$$\text{C}_2\text{S} = 2.87 (\text{SiO}_2) - 0.754 (\text{C}_3\text{S})$$

$$\text{C}_3\text{A} = 2.65 (\text{Al}_2\text{O}_3) - 1.69 (\text{Fe}_2\text{O}_3)$$

$$\text{C}_4\text{AF} = 3.04 (\text{Fe}_2\text{O}_3)$$

ตัวเลขนอกวงเล็บคือ เปอร์เซ็นต์ของออกไซด์ในเนื้อของซีเมนต์ทั้งหมดและปริมาณ CaO ในสูตรที่ใช้คำนวณหาปริมาณต้องเป็น CaO ที่ทำปฏิกิริยาเท่านั้น ไม่รวม Free Lime ตัวอย่างการคำนวณหาสารประกอบหลักตามสูตรของ Bogue อยู่ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างการคำนวณหาสารประกอบหลัก

ออกไซด์ต่างๆ (%) ใน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์		สารประกอบหลักคำนวณจากสมการ ของ Bogue
CaO	64.73	$C_3S = 4.07 \times (64.73 - 1.60) - 7.60$
SiO <sub>2</sub>	21.20	$\times (21.20) - 6.72 \times (5.22) - 1.43$
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.22	$\times ((3.08) - 2.85 \times (2.01))$
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.08	$= 50.6\%$
MgO	1.04	$C_2S = 2.87 \times (21.20) - 0.754 \times (50.6)$
SO <sub>3</sub>	2.01	$= 22.7\%$
Na <sub>2</sub> O	0.19	$C_3A = 2.65 \times (5.22) - 1.69 \times (3.08)$
K <sub>2</sub> O	0.42	$= 8.6\%$
Loss of Ignition	1.45	$C_4AF = 3.04 \times (3.08)$
Insoluble Residue	0.66	$= 9.4\%$
Free Lime	1.60	

## 2.3 คุณสมบัติของสารประกอบ

### 2.3.1 คุณสมบัติของสารประกอบหลัก

#### - ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C<sub>3</sub>S)

C<sub>3</sub>S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยมมีสีเทาเข้ม คุณสมบัติ C<sub>3</sub>S เหมือนกับคุณสมบัติของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมงและจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรกการเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C<sub>3</sub>S ถูกกระทบโดยปริมาณยิปซัมปริมาณ C<sub>3</sub>S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณ 35-55 %

#### - ไตแคลเซียมซิลิเกต ( $C_2S$ )

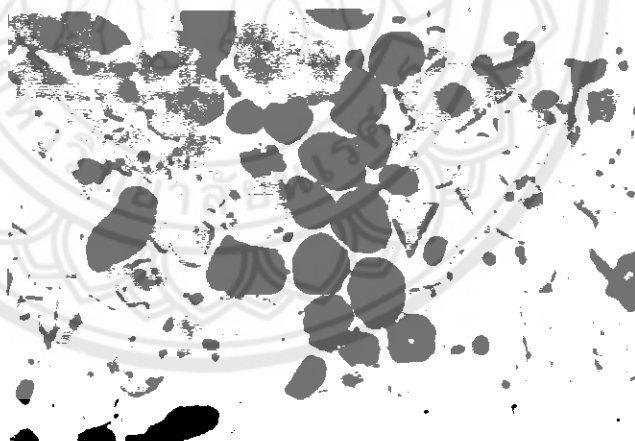
$C_2S$  เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม โดย  $C_2S$  มีอยู่หลายรูปแบบ มีคุณสมบัติยึดเกาะเมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยปล่อยความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวจะพัฒนากำล้างอัดอย่างช้าๆ แต่ในระยะยาวจะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ  $C_3S$  ปริมาณ  $C_2S$  ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณ 15-35 %

#### - ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ )

$C_3A$  เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน  $C_3A$  จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันที ก่อให้เกิด Flash Set และเกิดความร้อนจำนวนมาก ประมาณ 850 จูลต่อกรัม การป้องกัน Flash Set ทำได้โดยการเติมยิปซัมลงระหว่างการบดซีเมนต์กำลังอัดของ  $C_3A$  จะพัฒนาขึ้นภายใน 1-2 วัน แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี  $C_3A$  อยู่ในปริมาณ 7-15 %

#### - เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ ( $C_4AF$ )

$C_4AF$  ทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมาก และก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดประมาณ 420 จูลต่อกรัมกำลังอัดของ  $C_4AF$  ค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี  $C_4AF$  อยู่ในปริมาณ 5-10 %



รูปที่ 2.3 รูปร่างลักษณะของ  $C_3S$  ซึ่งเป็นผลึกรูป 6 เหลี่ยม และ  $C_2S$  เป็นเม็ดกลมดำ

### 2.3.2 สารประกอบรอง

#### ยิปซัม ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ )

ยิปซัมถูกใส่เข้าไปในระหว่างการบดเม็ดปูน เพื่อทำหน้าที่ควบคุมเวลาการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ปริมาณยิปซัมที่ใส่ต้องเหมาะสมเพื่อให้ซีเมนต์เกิดกำลังอัดสูงที่สุดและเกิดการหดตัวน้อยที่สุด ปริมาณยิปซัมที่ใส่ขึ้นอยู่กับ

- อัลคาไลน์ออกไซด์ ได้แก่  $\text{Na}_2\text{O}$  และ  $\text{K}_2\text{O}$
- ปริมาณ  $\text{C}_3\text{A}$
- ความละเอียดของปูนซีเมนต์

#### Free Lime (CaO)

Free Lime เกิดขึ้นได้สองกรณี คือ

- เมื่อวัตถุดิบมี Lime มากเกินไปจะทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยา  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ได้หมด
- ปริมาณ Lime มีไม่มาก แต่ทำปฏิกิริยากับ Oxide ต่างๆ ไม่สมบูรณ์

#### แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ )

วัตถุดิบในการผลิตซีเมนต์ส่วนใหญ่ จะมี  $\text{MgCO}_3$  ซึ่งเมื่อเผาแล้วจะเกิดการแยกตัวให้  $\text{MgO}$  และ  $\text{CO}_2$  แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะหลอมละลายเป็นเม็ดปูนที่เหลือจะอยู่ในรูปของ  $\text{MgO}$  และเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเหมือนกับ  $\text{CaO}$  คือปริมาณจะเพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดการไม่ยุบตัว

#### อัลคาไลน์ออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O}$ )

อัลคาไลน์ออกไซด์ ที่อยู่ในปูนซีเมนต์จะส่งผลเสียในกรณีที่ใช้มวลรวมบางประเภทที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลน์มาผสมเป็นคอนกรีต ผลจากปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดการขยายตัวตันให้คอนกรีตแตกร้าวได้ยากต่อการแก้ไขในกรณีที่ต้องใช้มวลรวมที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลน์ ควรเลือกใช้ปูนซีเมนต์ที่อัลคาไลน์ต่ำๆ

## 2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

### 2.4.1 X-ray Fluorescence (XRF)

XRF เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุที่อยู่ในตัวอย่างทดสอบ โดยสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ โดยสามารถใช้ได้กับงานวิจัยในหลายๆด้าน เช่น วัสดุศาสตร์, ธรณีวิทยา, สิ่งแวดล้อม, การแพทย์ รวมถึงตัวอย่างจากอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เป็นต้น การวิเคราะห์ของเครื่อง XRF จะอาศัยหลักการเรืองรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง โดยจะยิงรังสีเอกซ์เข้าไปในตัวอย่างธาตุต่างๆที่อยู่ในตัวอย่างจะดูดกลืนรังสีเอกซ์แล้วคายพลังงานออกมา โดยพลังงานที่คายหรือ Fluorescence ออกมานั้น จะมีค่าพลังงานขึ้นกับชนิดของธาตุที่อยู่ในตัวอย่งนั้นๆ ทำให้เราสามารถแยกได้ว่าในตัวอย่างที่ทดสอบนั้นมีธาตุอะไรอยู่บ้าง โดยใช้ Detector วัดค่าพลังงานที่ออกมาจากตัวอย่าง

เมื่อรังสีเอ็กซ์ปฐมภูมิ (Primary X-ray Photon) จากหลอดรังสีเอ็กซ์พุ่งเข้าชนสารตัวอย่างจะเป็นผลให้อิเล็กตรอนวงในสุด (K-shell) ของอะตอมภายในสารตัวอย่างหลุดออกจากอะตอมในรูปของโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในวงอิเล็กตรอนนั้น ซึ่งที่สภาวะนี้ อะตอมจะไม่เสถียร อะตอมจะกลับสู่สภาวะที่เสถียรขึ้นโดยการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกเข้ามาแทนที่ช่องว่างดังกล่าว ซึ่งในการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจะมีการปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “ฟลูออเรสเซนซ์” พลังงานของรังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิที่ปลดปล่อยออกมาจะมีค่ารังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ที่เกิดขึ้นจะถูกส่งผ่าน collimator ในรูปลำ รังสีขนานไปยัง Diffracting Crystal ซึ่งมีค่าระยะห่างระหว่างระนาบผลึกที่แน่นอนเช่น ควอตซ์ , ลิเทียม-ฟลูออไรด์ , ไมกา ฯลฯ โดย Diffracting Crystal จะทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเลี้ยวเบนเข้าสู่เครื่องตรวจจับรังสีเอ็กซ์ (X-ray Detector) โดยปกติ Diffracting Crystal จะทำมุม Theta กับระนาบรังสีขนานจาก Collimator และทำมุม 2Theta กับเครื่องตรวจจับ

#### 2.4.2 Brunauer Paul Hugh Emmett and Edward Teller( BET)

บรูเนอร์, เอ็มเมทท์และเทลเลอร์ (Brunauer, Paul Hugh Emmett and Edward Teller) ได้ศึกษาการดูดซับก๊าซไนโตรเจนทั้งบนผิวหน้าและภายในรูพรุนของวัสดุ พบว่าก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับนั้นจะมีส่วนหนึ่งที่เคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียวจนเต็มพื้นที่ผิวก่อน จากนั้นก๊าซไนโตรเจนที่เหลือแพร่กระจายไปเคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุลหลายชั้น ซึ่งจากผลการศึกษาสามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของก๊าซที่ถูกดูดซับกับความดันสัมพัทธ์ของวัสดุที่เพิ่มขึ้น

เป็นเครื่องที่ออกแบบมาเพื่องานวัดพื้นที่ผิวโดยเฉพาะเครื่องนี้เป็นเครื่องที่ทำการวัดโดยอัตโนมัติ การไล่ก๊าซออกจากพื้นผิวตัวอย่างกระทำโดยการให้ความร้อนและ“ทำสุญญากาศ” ตัวเครื่องเองมีระบบตรวจสอบว่าการไล่ก๊าซออกจากพื้นผิวเสร็จสมบูรณ์หรือยังด้วยการ “วัดความดัน” ซึ่งถ้าหากพื้นผิวยังมีก๊าซใดๆดูดซับเอาไว้อยู่ ก๊าซที่คายออกมาจะทำให้ความดันของระบบสูงกว่าสุญญากาศถ้าหากยังทำสุญญากาศไม่ได้ระดับที่เหมาะสม เครื่องก็จะยังไม่เริ่มการวิเคราะห์จะเริ่มวิเคราะห์ก็ต่อเมื่อทำสุญญากาศได้ระดับแล้วเท่านั้น ส่วนต้องใช้เวลาทำสุญญากาศนั้นนานเท่าใดก็ขึ้นอยู่กับตัวอย่าง ตัวอย่างที่มีพื้นที่ผิวสูงอาจต้องใช้เวลาทำสุญญากาศอย่างน้อย 8-12 ชั่วโมง ในขณะที่ตัวอย่างที่มีพื้นที่ผิวต่ำอาจใช้เวลาทำสุญญากาศเพียงแค่ 2 ชั่วโมง

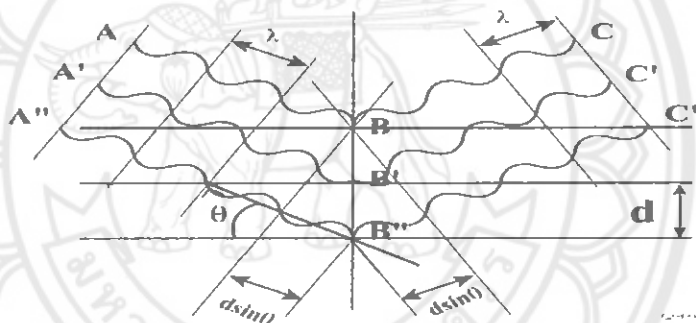
เมื่อทำสุญญากาศได้ที่แล้วก็จะเปลี่ยนจากการให้ความร้อนมาเป็นการหล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลว (ตรงนี้ต้องทำการเปลี่ยนอุปกรณ์กันเองจากอุณหภูมิให้ความร้อนมาเป็นถึงไนโตรเจนเหลว) เครื่องก็จะเริ่มฉีดก๊าซไนโตรเจนไปยังตัวอย่างตามปริมาตรที่กำหนดไว้ ซึ่งจะพบว่าตัวอย่างจะดูดซับก๊าซไนโตรเจนเอาไว้และจะบันทึกปริมาณก๊าซตัวอย่างดูดซับเอาไว้ พอดูดซับเอาไว้จนอิ่มตัวก็จะทำการไล่ก๊าซออก ดังนั้นในการวิเคราะห์จะมีข้อมูลในระหว่างการดูดซับ (adsorption) และการคายซับ (desorption) ปริมาตรก๊าซที่ถูกดูดซับหรือคายซับสามารถนำมาใช้คำนวณพื้นที่ผิว และพฤติกรรม การดูดซับและการคายซับที่ความดันต่าง ๆ กันจะถูกใช้คำนวณขนาดรูพรุน ข้อมูลที่เครื่องวัดได้นั้นจะนำไปคำนวณพื้นที่ผิว



### 2.3.3 X-ray Diffractometer (XRD)

XRD เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้ Pattern ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับ Pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่าในตัวอย่างนั้นๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง

เครื่อง XRD เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของ Bragg's law หรือ  $2d \sin \theta = n\lambda$  ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ยังผ่านชั้นผลึกที่อยู่ในตัวอย่าง โดยจะใช้ Detector รับความเข้มของรังสีเอกซ์ ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ของการทดสอบโดยเครื่อง XRD เป็นเครื่องที่ติดตั้ง Detector ที่สามารถทำการทดสอบตัวอย่างได้รวดเร็วและให้ความแม่นยำในการวิเคราะห์ที่สูง



รูปที่ 2.4 หลักการทำงานของเครื่อง XRD

ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ก็คือ ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อหาปริมาณหรือหาค่าประกอบตัวอย่างที่เป็น Amorphous ได้ เนื่องจากตัวอย่างกลุ่มนี้จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แต่เราสามารถให้ XRD คำนวณหาปริมาณของส่วนที่เป็น Amorphous ในตัวอย่างว่ามีสัดส่วนกี่ % ได้ โดยใช้การเปรียบเทียบกับปริมาณของสารมาตรฐานที่ทราบค่าแน่นอน

### 2.3.4 Thermogravimetric Analysis(TGA)

TGA เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุโดยเฉพาะพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อนโดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับก๊าซหรือระเหยของน้ำ การตกผลึก (Crystallization) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟส การแตกตัวของวัสดุ

(Decomposition) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันหรือปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometry)

ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็กซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายในอาจจะเป็นก๊าซเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน หรือก๊าซที่มีความว่องไว เช่น อากาศ หรือ ออกซิเจน โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหย, การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ

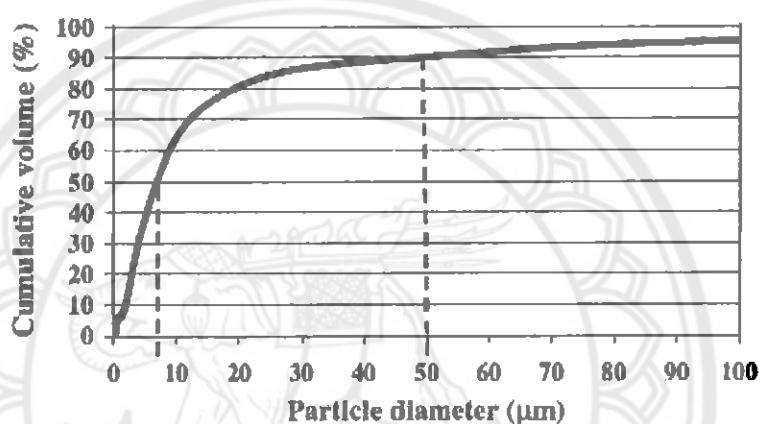
### 2.3.5 Differential Thermal Analysis(DTA)

DTA เป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนของวัสดุตัวอย่างเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่มีการเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับความร้อน โดยวิธีนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนระหว่างการเกิดปฏิกิริยาซึ่งสามารถแบ่งปฏิกิริยาได้เป็น 2 ประเภท คือ ปฏิกิริยาคายพลังงานความร้อนออกสู่ภายนอก (Exothermic reaction) และ ปฏิกิริยาดูดพลังงานความร้อนจากภายนอก (Endothermic reaction)

การทำงานของเครื่องมือนี้ คือ เครื่องวัดความแตกต่างของอุณหภูมิของสารตัวอย่างและสารเปรียบเทียบ โดยจะได้รับความร้อนเท่าๆกัน ถ้าอุณหภูมิของสารตัวอย่างเริ่มต่างไปจากอุณหภูมิของสารเปรียบเทียบ เครื่องก็จะจับการเปลี่ยนแปลงนี้ได้และสามารถเพิ่ม หรือ ลดปริมาณความร้อนที่ป้อนให้กับสารเปรียบเทียบ เพื่อควบคุมสารตัวอย่างและสารเปรียบเทียบให้มีความแตกต่างของอุณหภูมิเป็นศูนย์ (Null balance) ค่าปริมาณพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยเวลาที่เครื่องต้องจ่ายไฟฟ้าไปให้กับ Heating Element เพื่อรักษาสภาพให้ความแตกต่างของอุณหภูมิเป็นศูนย์นั้นเป็นส่วนโดยตรงกับปริมาณความร้อนที่ตัวอย่างปล่อยออกต่อหน่วยเวลา ถ้าเครื่องต้องจ่ายไฟฟ้าให้กับสารตัวอย่างเป็นปฏิกิริยาดูดพลังงานความร้อนจากภายนอก ส่วนถ้าเครื่องต้องจ่ายไฟฟ้าให้กับสารเปรียบเทียบนั้นเป็นปฏิกิริยาคายพลังงานความร้อนออกสู่ภายนอก

## 2.5 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

V. Corinaldesi *et al.* [9]. ศึกษาคุณสมบัติของฝุ่นหินอ่อนเพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุผสมเสริมในคอนกรีตรูปที่ 3 แสดงการกระจายขนาดอนุภาค (Particle size distribution) ของฝุ่นจากอุตสาหกรรมหินอ่อน สังเกตได้ว่าฝุ่นหินอ่อนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 7 ไมโครเมตร ( $d_{50} = 7 \mu\text{m}$ ) และร้อยละ 90 ของฝุ่นหินอ่อนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 50 ไมโครเมตร ( $d_{90} = 50 \mu\text{m}$ ) ตารางที่ 2.5 แสดงสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของซีเมนต์ (PC) และฝุ่นหินอ่อน (MDW) เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีพบว่าฝุ่นหินอ่อนประกอบด้วย CaO เป็นองค์ประกอบหลัก และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) ใกล้เคียงกับซีเมนต์



รูปที่ 2.5 การกระจายขนาดอนุภาคของฝุ่นหินอ่อนมีวิเคราะห์ด้วยวิธี Laser diffraction [9]

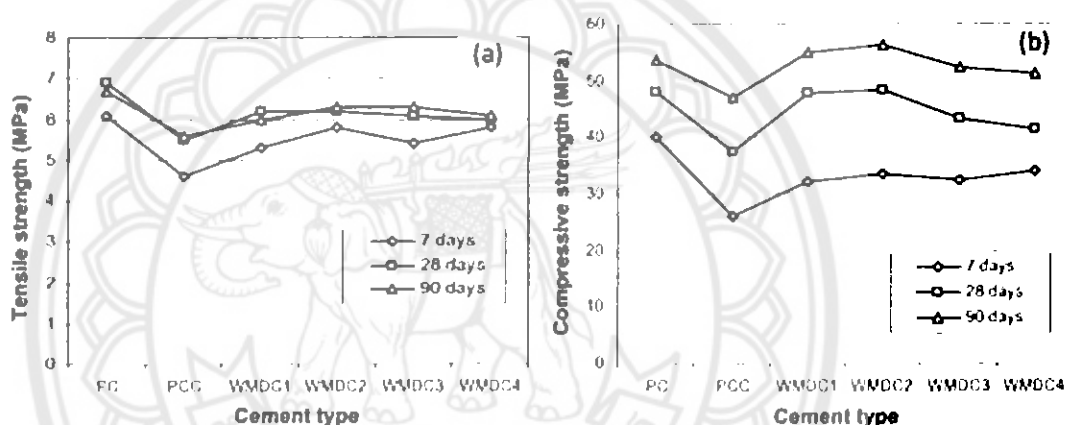
ตารางที่ 2.5 สมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PC) และฝุ่นหินอ่อน (MDW) [9]

Oxide (%)	PC	WMD
CaO	61.39	54.43
SiO <sub>2</sub>	19.55	0.67
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.82	0.12
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.52	0.08
MgO	1.83	0.59
SO <sub>3</sub>	2.76	-
K <sub>2</sub> O	0.74	-
Na <sub>2</sub> O	0.14	0.14
Loss on ignition	2.18	43.4
Insoluble residue	0.38	-
Physical and mechanical properties		
Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	3.1	2.6
Specific surface (Blaine) (cm <sup>2</sup> /g)	3,238	3,097
Initial setting time (min.)	140	-
Final setting time (min.)	240	-
Soundness (mm.)	2	-
Compressive strength (MPa)		
days	41.1	-
28 days	48.8	-

เมื่อนำฝุ่นหินอ่อนมาผสมกับซีเมนต์ในอัตราส่วนต่างๆของมอร์ตาร์ (ตารางที่ 2.6) พบว่า tensile strength ของตัวอย่างที่มีการผสมฝุ่นหินอ่อนและทำการบ่มที่ระยะเวลา 7 วันมีค่าต่ำกว่า tensile strength ของตัวอย่างที่ใช้ PC เป็นวัสดุเชื่อมประสาน (รูปที่ 2.6 (a)) โดย tensile strength ของ WMDC1, WMDC2, WMDC3 และ WMDC4 มีค่าต่ำกว่าตัวอย่าง PC 13%, 5%, 11% and 5% ตามลำดับ เมื่อพิจารณา compressive strength (รูปที่ 2.6 (b)) พบว่าตัวอย่างที่มีการผสมฝุ่นหินอ่อนและทำการบ่มที่ระยะเวลา 7 วันมีค่าต่ำกว่า compressive strength ของตัวอย่างที่ใช้ PC เช่นกัน อย่างไรก็ตามเมื่อระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างเพิ่มขึ้นเป็น 90 วัน พบว่า compressive strength ของตัวอย่าง WMDC1 and WMDC2 สูงกว่าตัวอย่าง PC 2% และ 5% ตามลำดับ ในขณะที่ compressive strength ของตัวอย่าง WMDC3 and WMDC4 มีค่าต่ำกว่าตัวอย่าง PC 3% และ 4%

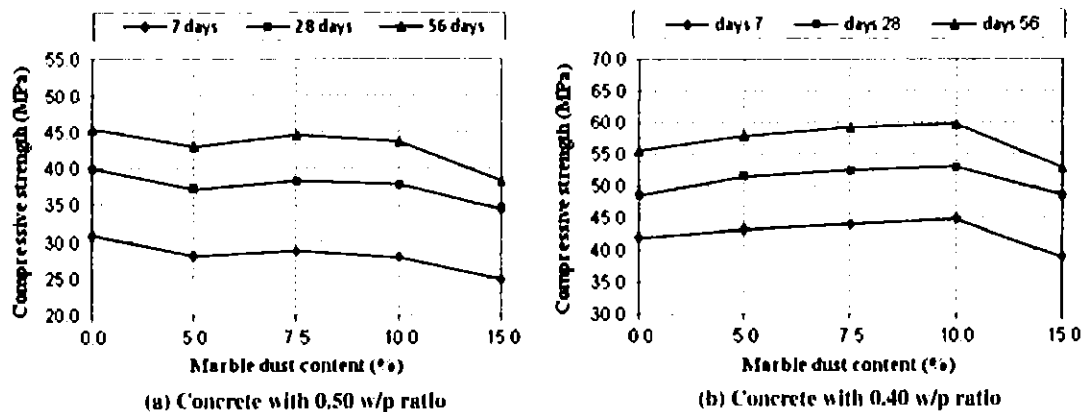
Cement type	PC clinker (%)	WMD (%)	Gypsum (%)	Total (%)
WMDC1	92.5	2.5	5	100
WMDC2	90.0	5.0	5	100
WMDC3	87.5	7.5	5	100
WMDC4	85.0	10	5	100
PC	EN 197-1 CEM I			

ตารางที่ 2.6 อัตราส่วนผสมซีเมนต์-ฝุ่นหินอ่อน-ยิปซัม เพื่อศึกษาคุณสมบัติคอนกรีต [9]



รูปที่ 2.6 รูปแสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงของตัวอย่างmortar ที่ผสมฝุ่นหินอ่อนในสัดส่วนต่างๆ (a) tensile strength และ (b) compressive strength [9]

รูปที่ 2.7 แสดงผลการทดสอบ compressive strength ของคอนกรีตที่ผสมฝุ่นหินอ่อน แทนที่ซีเมนต์ที่อัตราส่วน 0%, 5.0%, 7.5%, 10.0% และ 15.0% โดยใช้  $w/p = 0.5$  พบว่าการใช้ฝุ่นหินอ่อนแทนที่ซีเมนต์ส่งผลให้ compressive strength ของคอนกรีตลดลงเล็กน้อย โดย compressive strength ที่บ่มที่ระยะเวลา 28 วัน ลดลง 7%, 4%, 5% และ 14% สำหรับตัวอย่างที่ใช้ฝุ่นหินอ่อนแทนที่ซีเมนต์ 5.0%, 7.5%, 10.0% และ 15.0% ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อปรับอัตราส่วน  $w/p$  เป็น  $w/p = 0.4$  พบว่า compressive strength ของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และสูงที่สุดเมื่อมีการใช้ฝุ่นหินอ่อนแทนที่ซีเมนต์ 10% โดยพบว่า compressive strength ที่ 287 วันของตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ฝุ่นหินอ่อน 10% สูงกว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ล้วนถึง 9% และเมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินอ่อนมากกว่า 10% จะส่งผลให้ compressive strength ของคอนกรีตลดลง



รูปที่ 2.7 Compressive strength ของคอนกรีตที่ผสมฝุ่นหินอ่อนที่อัตราส่วนต่างๆ [9]



## บทที่ 3

### วิธีการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง, วัสดุที่ใช้ในการทดลอง, ขั้นตอนการเตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดลอง, วิธีการและขั้นตอนการทดลองซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่สุดในโครงงานวิจัยนี้ โดยก่อนที่จะทำการทดลองจะต้องมีการเตรียมการเกี่ยวกับวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง เพื่อความรวดเร็วและยังช่วยให้การดำเนินงานในการทำโครงงานวิจัยเป็นไปตามแผนที่วางไว้ อีกทั้งการเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่ดีและการทำการทดลองที่เป็นขั้นตอนย่อมจะทำให้ผลการทดลองที่ได้มีประสิทธิภาพตามจุดประสงค์ที่วางไว้

#### 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 เครื่องชั่งตวงวัด 4 ตำแหน่ง
- 3.1.2 ถาดอะลูมิเนียม
- 3.1.3 ตู้อบ
- 3.1.4 เตาเผาอุณหภูมิสูง
- 3.1.5 ตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 40
- 3.1.6 ตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 200
- 3.1.7 บีกเกอร์ ขนาด 100 และ 500 ml
- 3.1.8 ซ้อนคนสารเคมี
- 3.1.8 กระป๋อง Ball ขนาด 500 ml
- 3.1.9 Hot Plate
- 3.2.10 อะลูมิเนียมฟอยด์
- 3.1.11 อุปกรณ์ นำตัวอย่างออกจากเตาเผา
- 3.1.12 ชุดกันความร้อน
- 3.1.13 พัดลม

3.1.14 crucible

3.1.15 อิฐทนไฟ

3.1.16 เครื่อง Ball milling

### 3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ฝุ่นหินอ่อน

3.2.2 ฝุ่นศิลาแลง

3.2.3 ดินขาว

3.2.4 Ethanal 99%

3.2.5 น้ำกลั่น

### 3.3 การเตรียมวัสดุ

3.3.1 นำวัตถุดิบที่จะมาสังเคราะห์เช่น ฝุ่นหินอ่อน, ฝุ่นศิลาแลง และดินขาว มาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 เพื่อขจัดเศษสิ่งเจือปนขนาดใหญ่(เศษไม้ หิน ตะกอน)

3.3.2 นำวัตถุดิบที่ร่อนผ่านตะแกรงเสร็จแล้วนำไปอบเพื่อไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบ

3.3.3 หลังจากที่อบไล่ความชื้นออกเสร็จแล้วนำไปบดให้เป็นผงละเอียด จากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200

3.3.4 นำไปอบเพื่อไล่ความชื้นอีกครั้งใช้อะลูมิเนียมฟรอยด์ ปิดปากภาชนะป้องกันสิ่งสกปรกตกใส่ เจาะรูเพื่อให้ความชื้นระบายออก

3.3.5 หลังจากอบไล่ความชื้นเสร็จจะต้องนำมาชั่งทันที เพื่อป้องกันสารโดนความชื้นการชั่งไม่ควรเกิน 5 นาทีหลังจากการอบ เพื่อป้องกันน้ำหนักที่คลาดเคลื่อน

### 3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 ชั่งวัตถุดิบที่เตรียมไว้ตามอัตราส่วนที่เหมาะสม

3.4.2 นำวัตถุดิบทั้ง 3 ที่ชั่งแล้วมาผสมให้เข้ากันโดยวิธี Ball Milling ผสมสาร 100 กรัม กับ Ethanal 99% และเม็ด Alumina



- 3.4.3 ใส่วัตถุดิบทั้ง 3 ใส่ ครอบงบอล ใส่เม็ด Alumina 3/4 ของครอบงบอล และเติม Ethanal 99% ให้ถึง 3/4 ของครอบงบอลเช่นกันหลังจากใส่เม็ด Alumina แล้ว (ถ่วงเม็ดAlumina)
- 3.4.4 นำครอบงบอล ที่ทำการผสมแล้ว ใส่เครื่องBall milling โดยให้เครื่องทำงาน 4 ชั่วโมง พัก 1 ชั่วโมง รวมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 3.4.5 เดินเครื่องครบ 24 ชั่วโมงแล้วให้นำสารตัวอย่าง(RAW)ที่ผสมเข้ากันแล้วเทใส่บีกเกอร์ ขนาด 500 ml โดยใช้ตะแกรงกรองเม็ดAlumina ไว้
- 3.4.6 ทำให้แห้ง(Dried)โดยการใช้ Hot Plate ทำให้แห้ง อุณหภูมิประมาณ 150-200 °C ระวังอย่าให้ร้อนเกินไปบีกเกอร์จะแตก ให้คนสารไปเรื่อยๆจนEthanal ระเหยเกือบหมด ให้แห้งพอสมควรแล้วทิ้งไว้ให้เย็น
- 3.4.7 หลังจากเย็นแล้วนำมาปั่นเม็ด เป็นก้อนกลมขนาดศูนย์กลางประมาณ 0.5-1 cm หากปั่นไม่ได้ให้เติมน้ำกลั่นลงไปพอให้ปั่นเม็ดได้
- 3.4.8 หลังจากปั่นเม็ดใส่ถาดแล้วทิ้งไว้ให้แห้ง 1 วันในเตาอบอุณหภูมิ 110 °C โดยใช้ อะลูมิเนียมฟรอยด์เจาะรูเล็กๆ ระบายความชื้นปิดปากภาชนะไว้
- 3.4.9 นำเม็ดตัวอย่าง(RAW)ไปเผาที่อุณหภูมิ 1200 , 1250 , 1300 , 1350 , 1400 และ 1450°C ตามลำดับ โดยเผาแต่ละครั้งทิ้งไว้เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง ใช้ (Rate 10 °C/min)
- 3.4.10 หลังจากเผาทิ้งไว้เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมงแล้วให้นำตัวอย่างออกที่อุณหภูมิ 1300 °C หากอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 1300 °C ให้เอาออกทันที
- 3.4.11 ทำให้เย็นอย่างรวดเร็ว โดยการใช้พัดลมเป่า

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์

#### 4.1 การวิเคราะห์ทางเคมีและกายภาพของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุซึ่งประกอบด้วยฝุ่นหินอ่อน (MD) ,ภาคดินขาว(Kao) และ ฝุ่นศิลาแลง(LS) จากตารางที่ 4.1 การทดสอบยิงรังสี XRF พบว่า ฝุ่นหินอ่อน มีปริมาณ CaO บริสุทธิ์มากถึง 98% จึงใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนปูนขาว(Lime component) ส่วนของหินดินดาน ซึ่งต้องการ  $\text{SiO}_2$  ก็จะได้จาก ดินขาว มี 72% และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ได้จาก ฝุ่นศิลาแลงมี 43% ส่วน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ทั้งดินขาวและ ฝุ่นศิลาแลงมีมากเพียงพอแล้ว จึงนำวัสดุทั้ง 3 ดังกล่าวมาเป็นวัสดุตั้งต้นในการสังเคราะห์ซีเมนต์

ตารางที่ 4.1 ผลองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

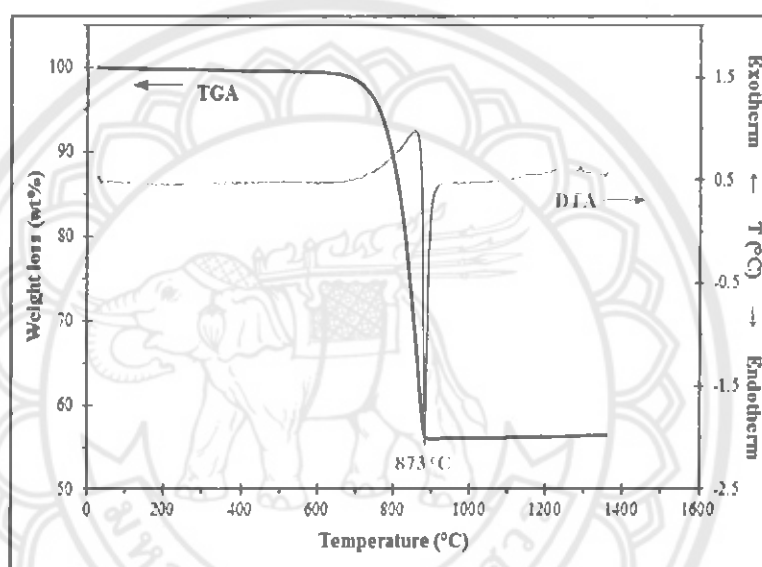
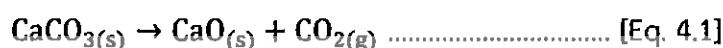
องค์ประกอบทางเคมี(%)	ฝุ่นหินอ่อน	ดินขาว	ฝุ่นศิลาแลง
CaO	98.57	-	0.08
$\text{SiO}_2$	0.87	72	33.77
$\text{Al}_2\text{O}_3$	-	18.4	20.83
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	-	2.7	43.2
$\text{CaCO}_3$	-	-	-
MnO	-	0.05	-
$\text{TiO}_2$	-	0.26	1
$\text{K}_2\text{O}$	0.31	5.35	0.38
$\text{SO}_3$	0.25	0.33	0.19
MgO	-	0.95	-

\*ทดสอบโดยวิธี XRF

## 4.2 ปฏิริยาเคมีของวัสดุ

### 4.2.1 ฝุ่นหินอ่อน

เส้นโค้ง TGA-DTA ในการตรวจสอบปฏิริยาทางเคมีของผงหินอ่อนที่แสดงในรูปที่ 4.5 การสูญเสียน้ำหนักที่เกิดขึ้นจากประมาณ 600 °C - 900 °C ซึ่งสอดคล้องกับจุดดูดความร้อนสูงสุดที่ 873 °C ในโค้ง DTA และ TGA มีค่าลดลงถึง 43.1% และหลังจากนั้นน้ำหนักเริ่มเปลี่ยนแปลงไม่มากนักไม่เปลี่ยนแปลง ข้อมูลเหล่านี้เกี่ยวข้องกับการสังเกตปฏิริยาเมื่อแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) สลายตัวเกิดเป็นlime ( $\text{CaO}$ ) และคาร์บอนไดออกไซด์ตามที่แสดงใน Eq. 4.1



รูปที่ 4.1 TGA-DTA curves ของฝุ่นหินอ่อน

จากปฏิริยาดังกล่าว จึงได้ค่า น้ำหนักที่สูญเสียจากการเผา ( Loss on Ignition:LOI) ของ ฝุ่นหินอ่อน 43.1%

### 4.2.2 ดินขาว

ทำการทดสอบหาค่า LOI โดยวิธีการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศา เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลที่ได้

น้ำหนักก่อนเผา 1.0018 กรัม

น้ำหนักหลังเผา 0.9696 กรัม

$$\text{LOI} = \frac{1.0018 - 0.9696}{1.0018} \times 100$$

$$= 3.214 \%$$

ดังนั้น ดินขาว( $\text{KaO}$ ) มีค่า LOI = 3.21%

### 4.3 การวิเคราะห์สัดส่วนทางเคมีที่ใช้ในการเผา

จากผลทดสอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้นและปฏิกิริยาทางเคมี หาค่าเปอร์เซ็นต์ของออกไซด์หลักและออกไซด์รอง เพื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป

ตารางที่ 4.2 คำนวนอัตราส่วนการเผา

ออกไซด์	ฝุ่นหินอ่อน	ดินขาว	ฝุ่นศิลาแลง	น้ำหนักหลังเผา(STOCK)	*STOCK (%)	ออกไซด์ที่ควรมี
LOI(%)	43.1	3.21	0			
CaO	98.57	-	0.08	41.51	61.53	60-68
SiO <sub>2</sub>	0.87	72	33.77	15.97	23.67	1-26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	18.4	20.83	4.84	7.18	3-9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	2.7	43.2	3.52	5.22	0.6-7
CaCO <sub>3</sub>	-	-	-	0.00	0.00	
MnO	-	0.05	-	0.01	0.01	
TiO <sub>2</sub>	-	0.26	1	0.12	0.17	0.1-0.5
K <sub>2</sub> O	0.31	5.35	0.38	1.14	1.69	
SO <sub>3</sub>	0.25	0.33	0.19	0.12	0.27	1-4
MgO	-	0.95	-	0.17	0.26	
				67.46	100.00	
**Trail (%)	74	19	7			

\*STORK = อัตราส่วนร้อยละน้ำหนักที่เหลือหลังจากการเผา

\*\* Trail = ค่าสัดส่วนที่ใช้ชั่งก่อนเผา

#### 4.3.1 วิธีคิดอัตราส่วน

สมมติอัตราส่วน(Trail) ที่ใช้ในการเผาเป็น 100 กรัม โดยแบ่งให้อัตราส่วนของวัสดุตั้งต้นทั้ง 3 คือน้ำหนักของออกไซด์ที่มีในวัสดุ และคิดหักค่าสูญเสียน้ำหนักหลังจากการเผาจะได้น้ำหนักหลังจากการเผาของออกไซด์แต่ละตัว

$$\text{น้ำหนักหลังจากการเผา(STOCK)} = \sum \left( g \times \frac{\% \text{ผลรวมของสารที่มี}}{100} \times \frac{100 - \text{LOI}}{100} \right)$$

$$\text{STOCK}(\%) = \frac{\text{น้ำหนักหลังจากการเผาของออกไซด์แต่ละตัว}}{\text{ผลรวมน้ำหนักหลังจากออกไซด์ทั้งหมด}} \times 100$$

### ตัวอย่างการคำนวณ

STORK(%) ของ CaO จากตาราง 4.3

น้ำหนักหลังจากการเผา CaO

สมมติให้

วัสดุ	ฝุ่นหินอ่อน(MD)	ดินขาว(KaO)	ฝุ่นซิลิกาแลง(LS)
น้ำหนัก(g)	74	19	7

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักหลังจากการเผา} &= \left( 74 \times \frac{98.57}{100} \times \frac{100-43.1}{100} \right) + \left( 19 \times \frac{0}{100} \times \frac{100-3.21}{100} \right) + \\ &\quad \left( 7 \times \frac{0.08}{100} \times \frac{100-0}{100} \right) \\ &= 41.51 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{STOCK(\%)} &= \frac{41.51}{67.46} \times 100 \\ &= 61.53 \% \end{aligned}$$

อัตราส่วนดังกล่าวจะได้ CaO = 61.53%

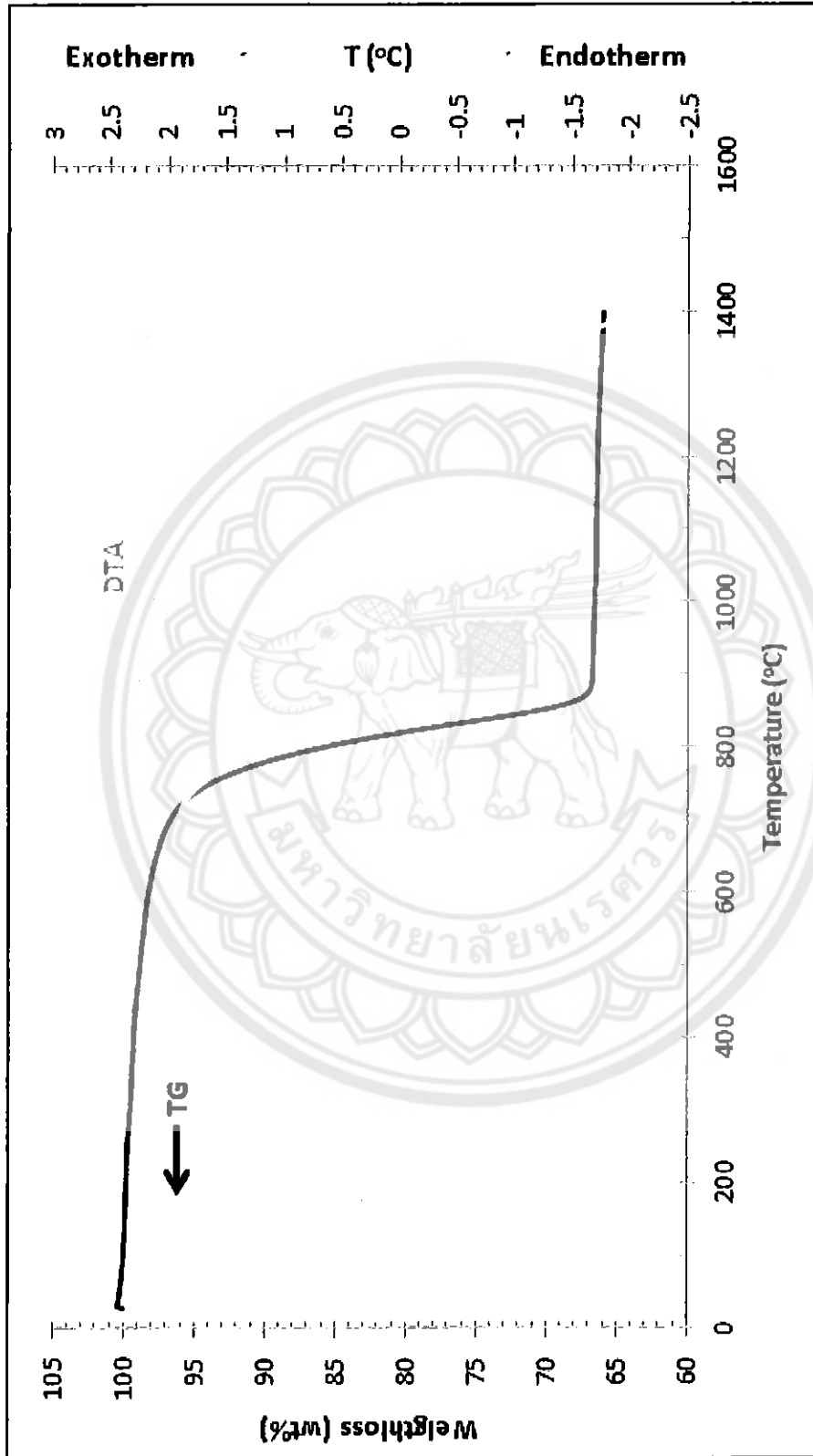
### 4.4 ผลการทดลอง

จากการเผาด้วยสัดส่วน MD:KaO:LS = 74:19:7 ที่อุณหภูมิ 1200 ,1250 ,1300 ,1350 ,1400 และ1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงได้ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี และวิเคราะห์ได้ว่า จากผลXRF ตารางที่ 4.3 พบว่าออกไซด์ที่ได้หลังจากการเผา ยังมีค่าไม่ใกล้เคียงกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป และจากการเปรียบเทียบการอิงรังสีเอกซ์ XRD ดังรูปที่ 4.3 พบว่า มีการเกิดปฏิกิริยาทำให้ เพิ่มขึ้นของ calcium silicate hydrate แต่ไม่สามารถจำแนกชนิดได้

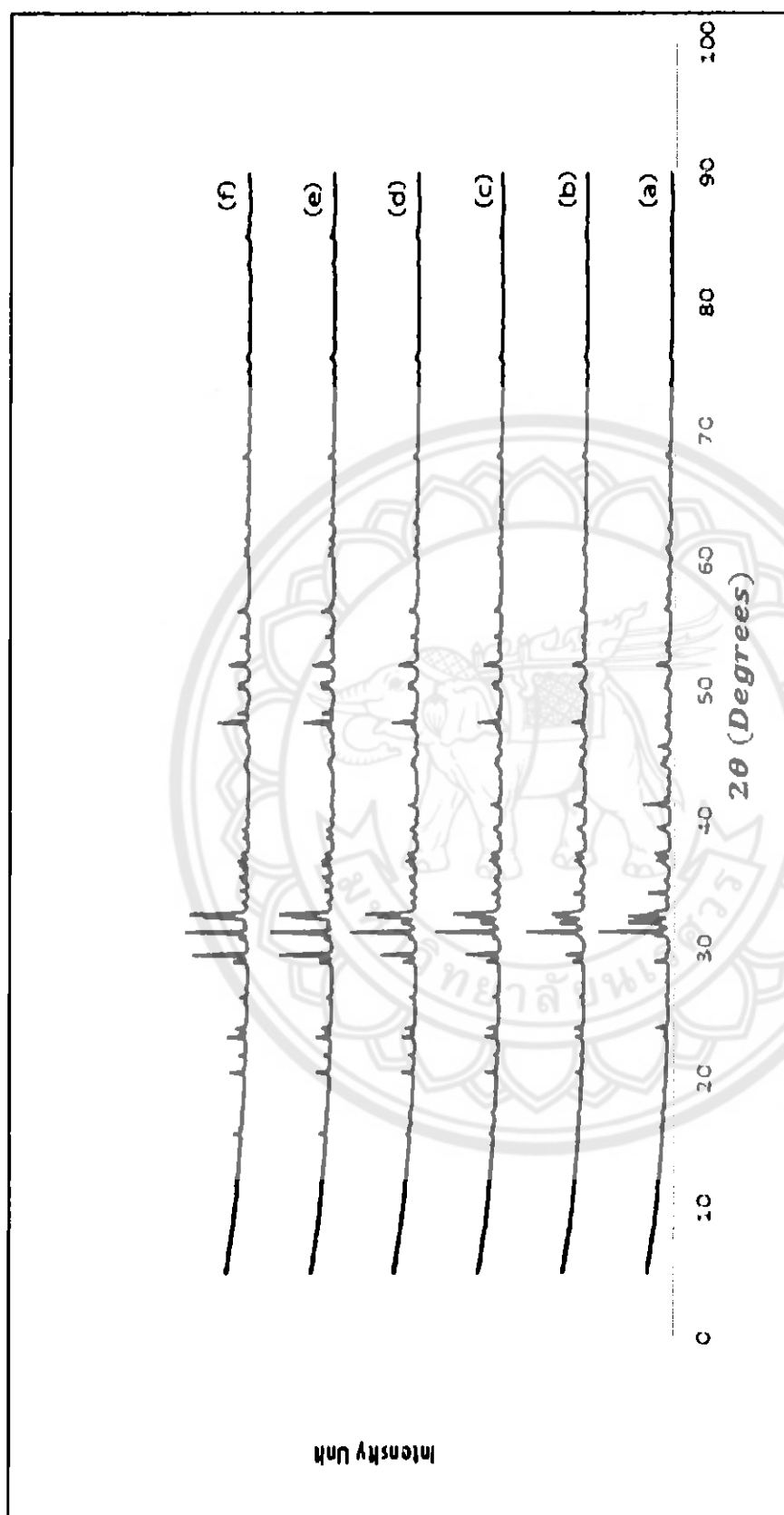
ตารางที่ 4.3 ผลวิเคราะห์เคมีจากการยิงรังสี XRF

Oxide (%)	Portland cement	CMD 1200	CMD 1250	CMD 1300	CMD 1350	CMD 1400	CMD 1450	ออกไซด์ที่กำหนด
CaO	61.39	57.43	56.55	57.14	58.00	57.16	57.55	60-67
SiO <sub>2</sub>	19.55	25.12	26.62	26.26	25.74	26.17	25.73	1-25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.82	11.36	11.02	10.84	10.60	11.12	10.98	3-8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.52	4.88	4.63	4.71	4.82	4.75	4.96	0.5-6
MgO	1.83	-	-	-	-	-	-	0.1-5.5
SO <sub>3</sub>	2.76	-	-	-	-	-	-	1-3
K <sub>2</sub> O	0.74	0.10	0.98	0.87	0.66	0.61	0.54	-
Na <sub>2</sub> O	0.14	-	-	-	-	-	-	-

\*“ - ” หมายถึง ไม่มีหรือมีน้อยมากจนวัดค่าไม่ได้

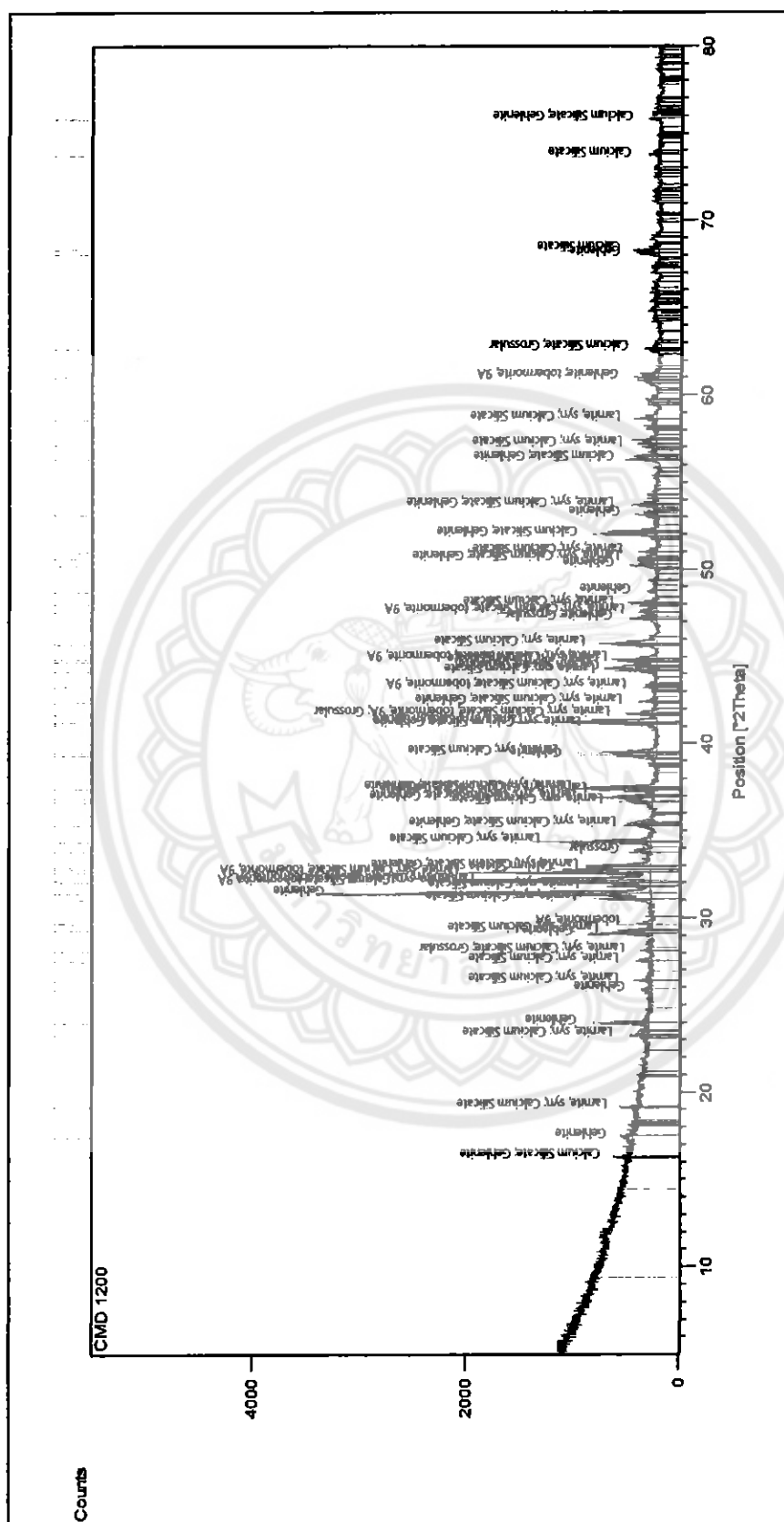


รูปที่ 4.2 กราฟ TG-DTA ของซีเมนต์ฝุ่นหินอ่อน

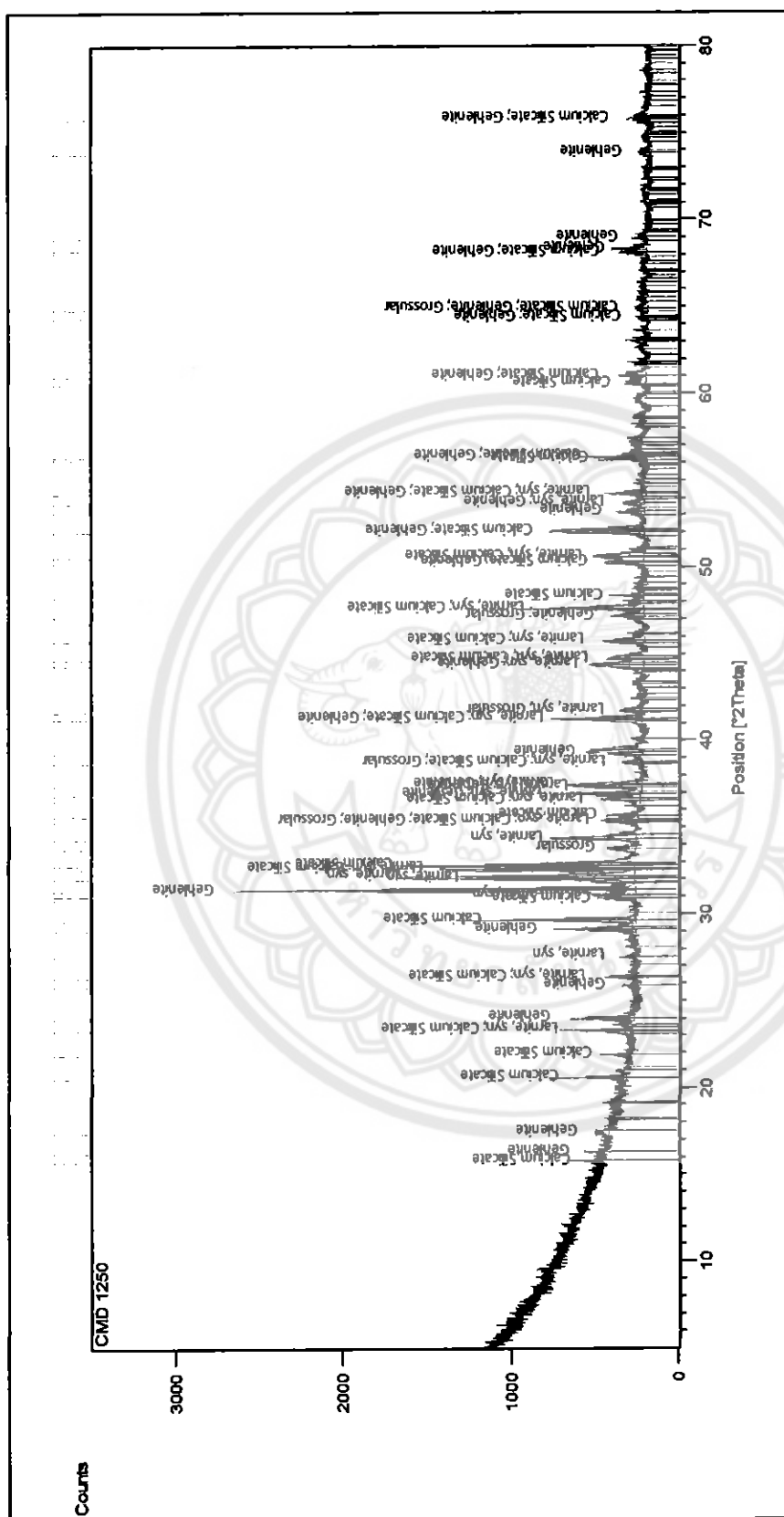


รูปที่ 4.3 กราฟรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ (a) ซิเมนต์ฝุ่นหินอ่อนเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (b) ซิเมนต์ฝุ่นหินอ่อนเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (c) ซิเมนต์ฝุ่นหินอ่อนเผาที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (d) ซิเมนต์ฝุ่นหินอ่อนเผาที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (e) ซิเมนต์ฝุ่นหินอ่อนเผาที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ (f) ซิเมนต์ฝุ่นหินอ่อนเผาที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส



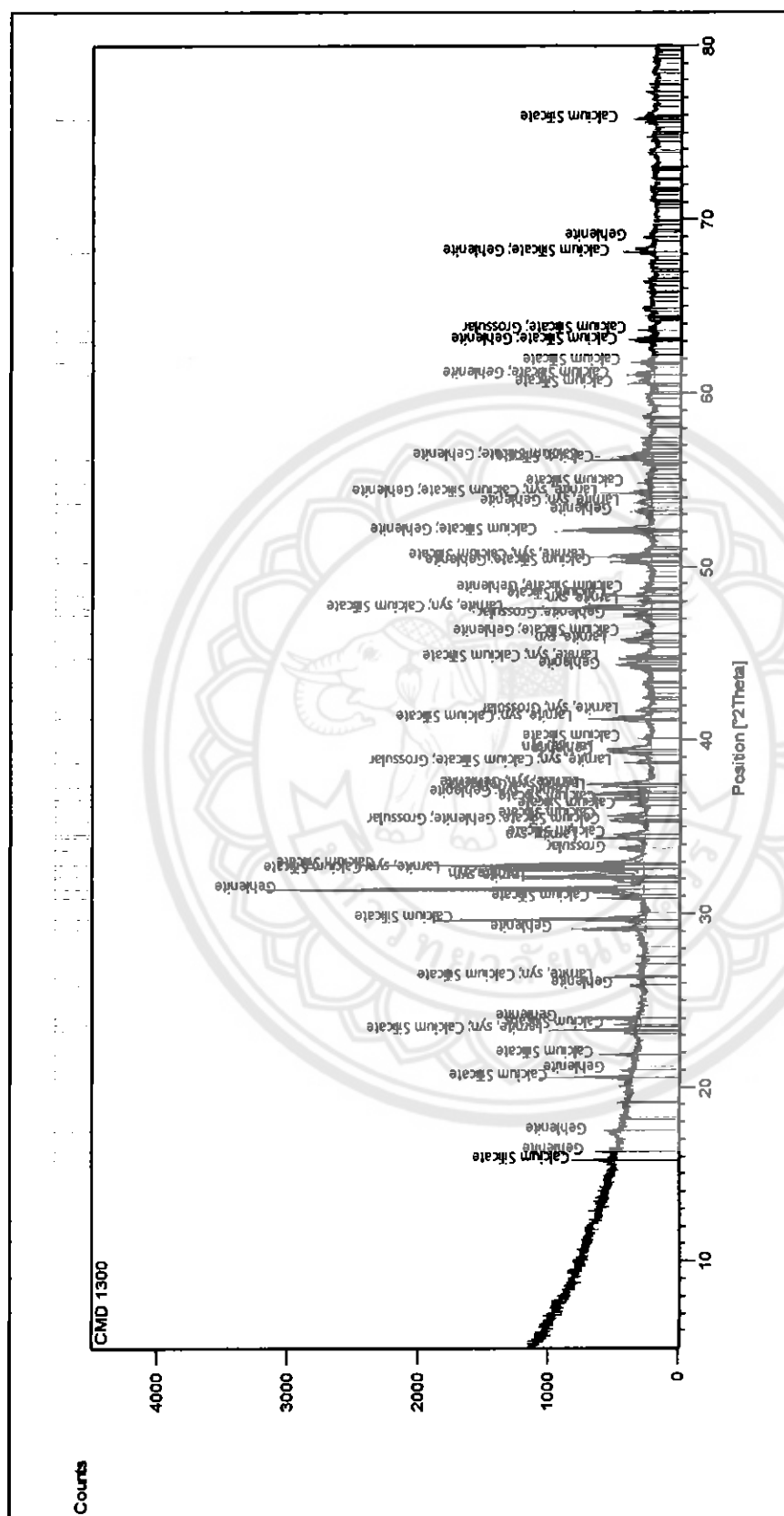


รูปที่ 4.4 กราฟ XRD และวิเคราะห์ธาตุของ ซิเมนต์ปูนหินอ่อนเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส



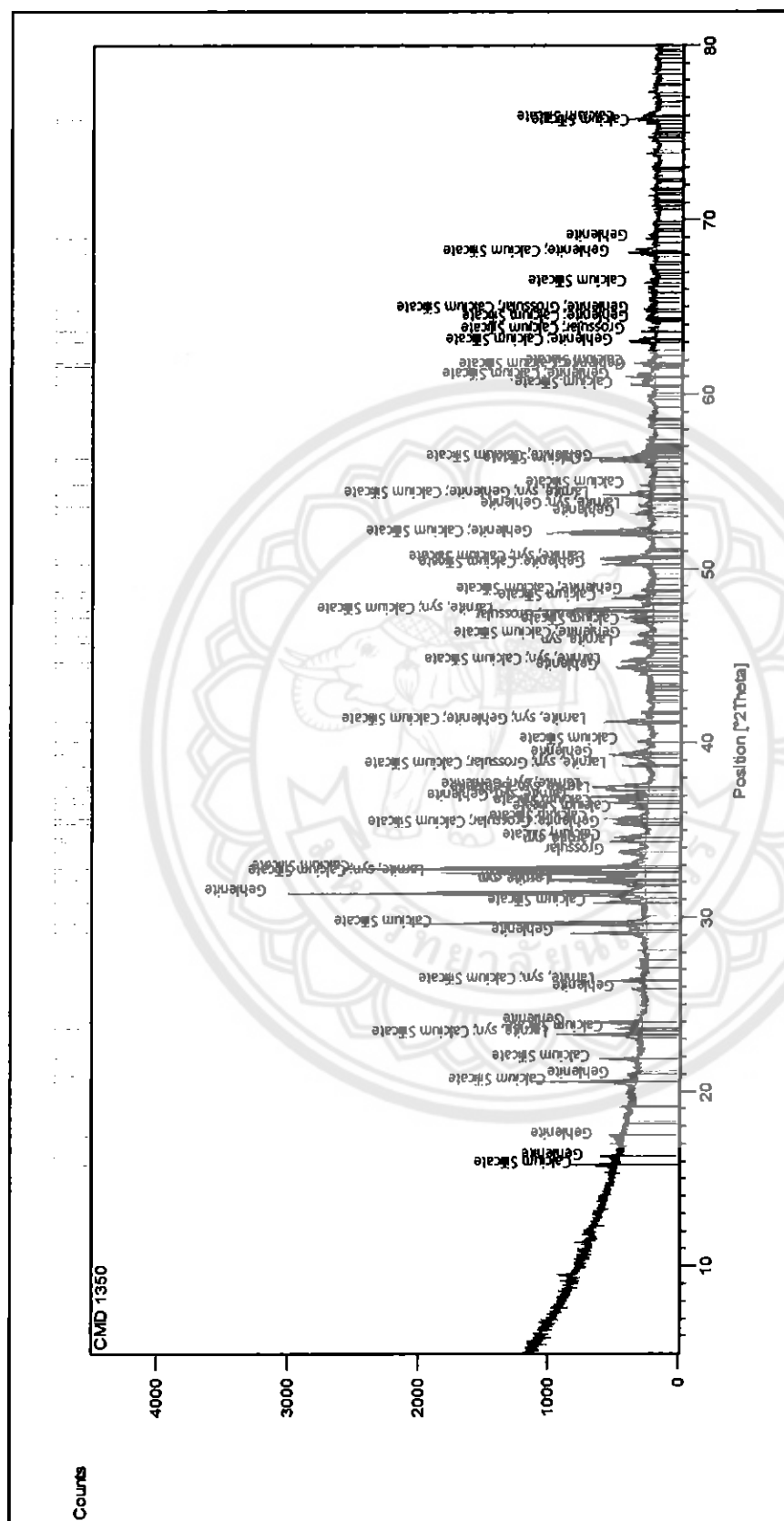
รูปที่ 4.5 กราฟ XRD และวิเคราะห์ธาตุของ ซีเมนต์ฟุ้งหินอ่อนเผือกอุณหภูมิ

1250 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.6 กราฟ XRD และวิเคราะห์ธาตุของ ซีเมนต์ฝุ่นหินอ่อนเผาที่อุณหภูมิต่ำ

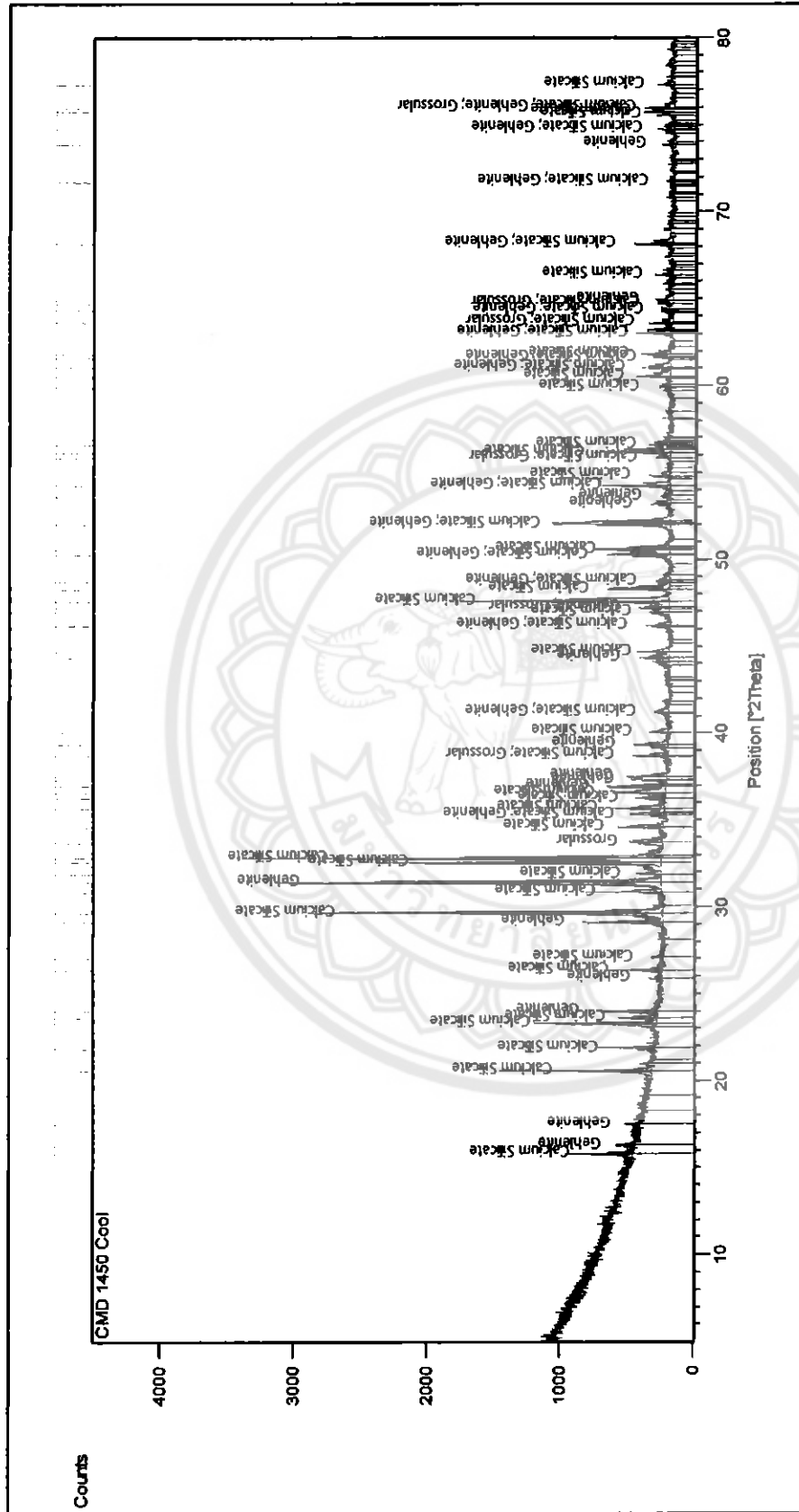
1300 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.7 กราฟ XRD และวิเคราะห์ธาตุของ ซีเมนต์ฝุ่นหินอ่อนเผาที่อุณหภูมิ

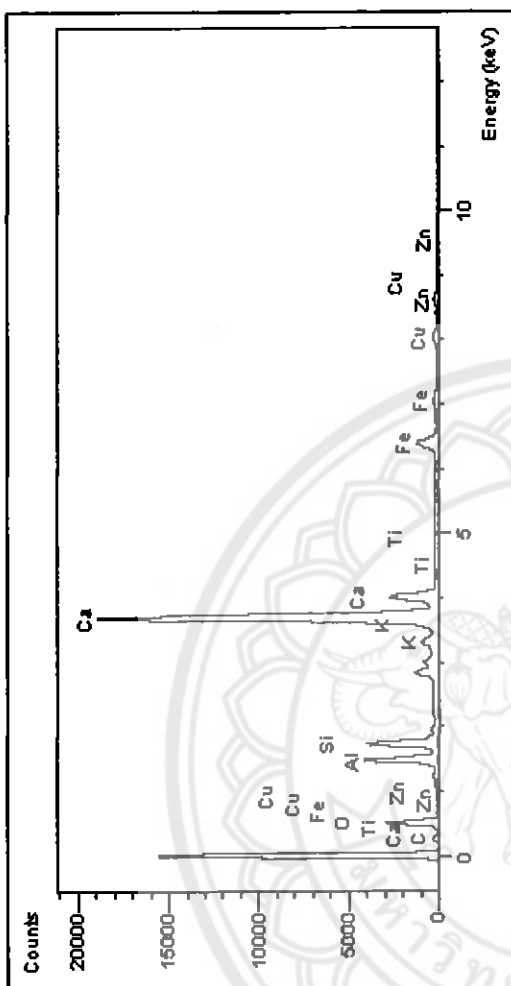
1350 องค์าเซลเซียส





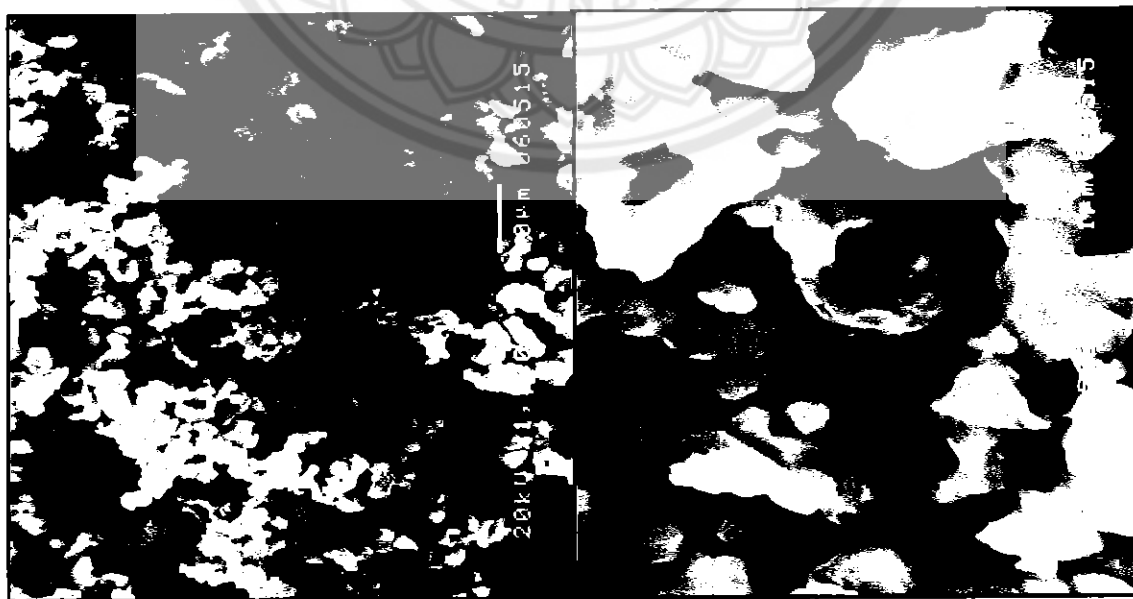
รูปที่ 4.9 กราฟ XRD และวิเคราะห์ธาตุของ ซิเมนต์ฝุ่นหินอ่อนเผาที่อุณหภูมิ

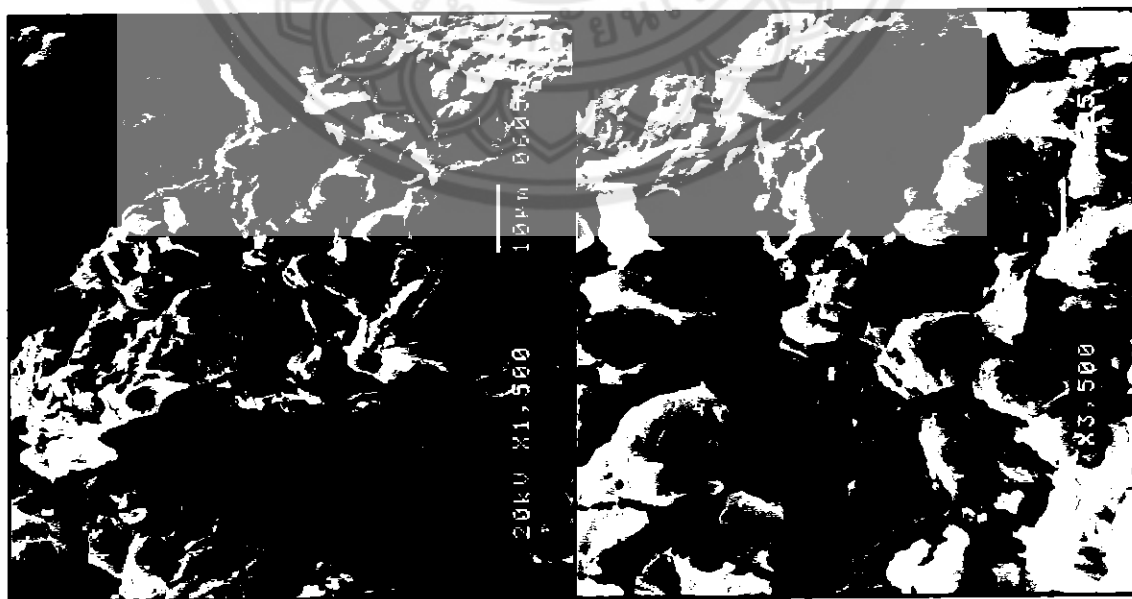
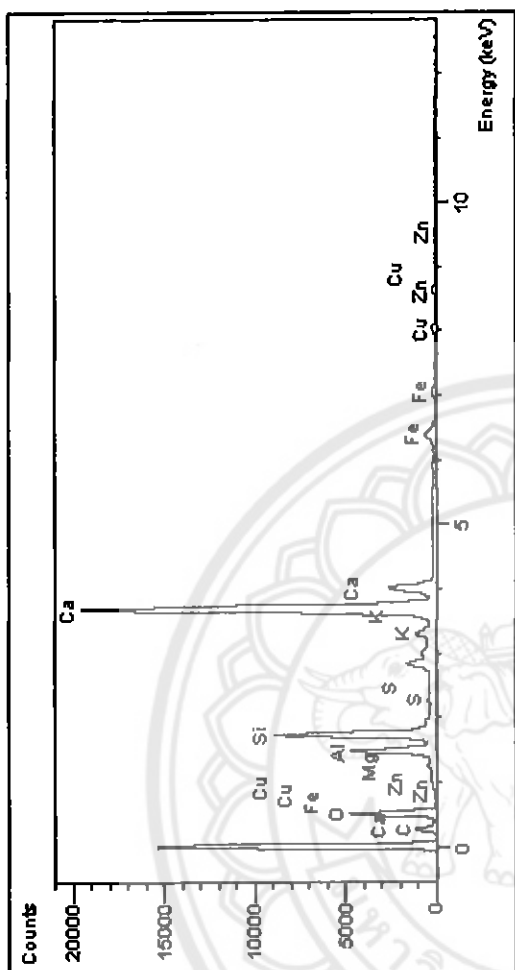
1450 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.10 รูปพื้นผิวโครงสร้างจุลภาคSEM และกราฟ EDS ของ ซีเมนต์ฝุ่นหินอ่อน

แผ่นที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

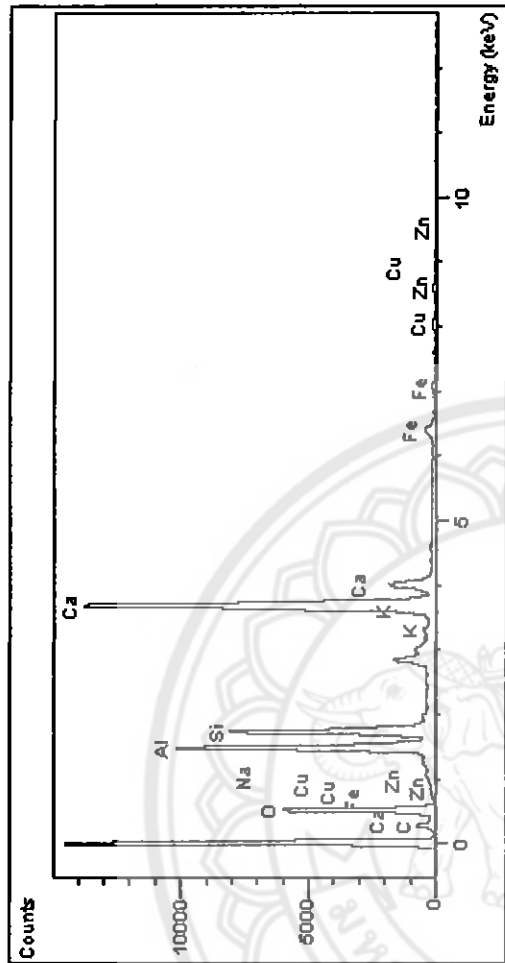
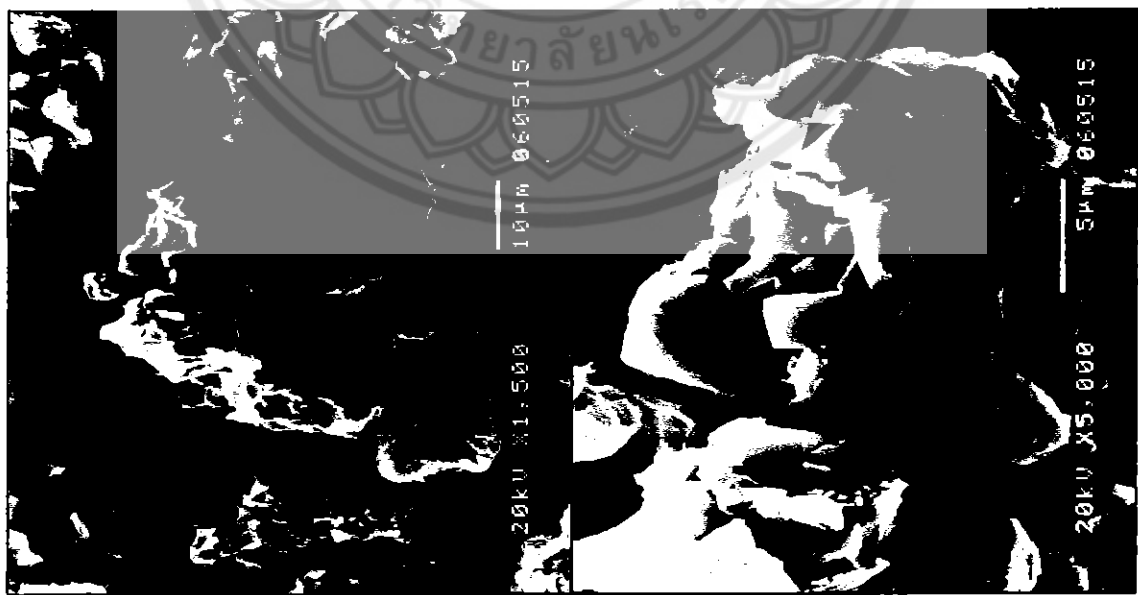




รูปที่ 4.11 รูปพื้นผิวโครงสร้างจุลภาคSEM และกราฟ EDS ของ ซีเมนต์ฝุ่นหินอ่อน

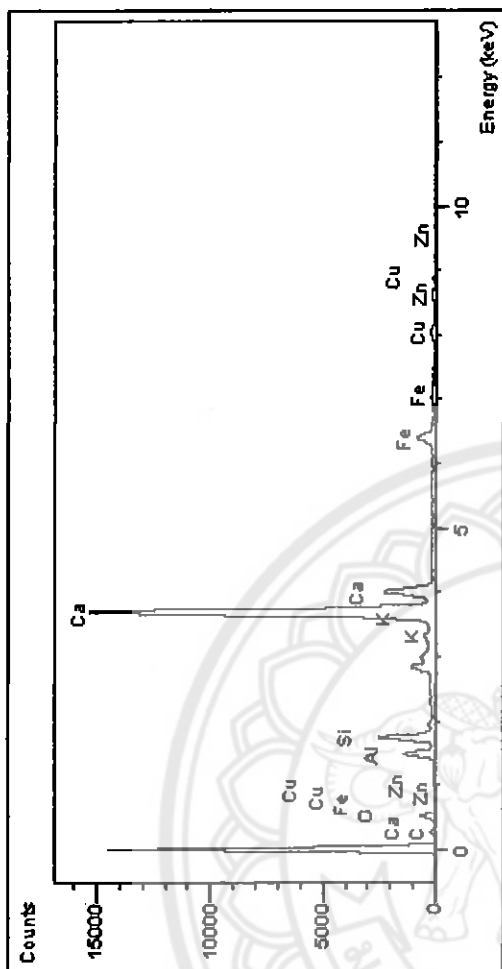
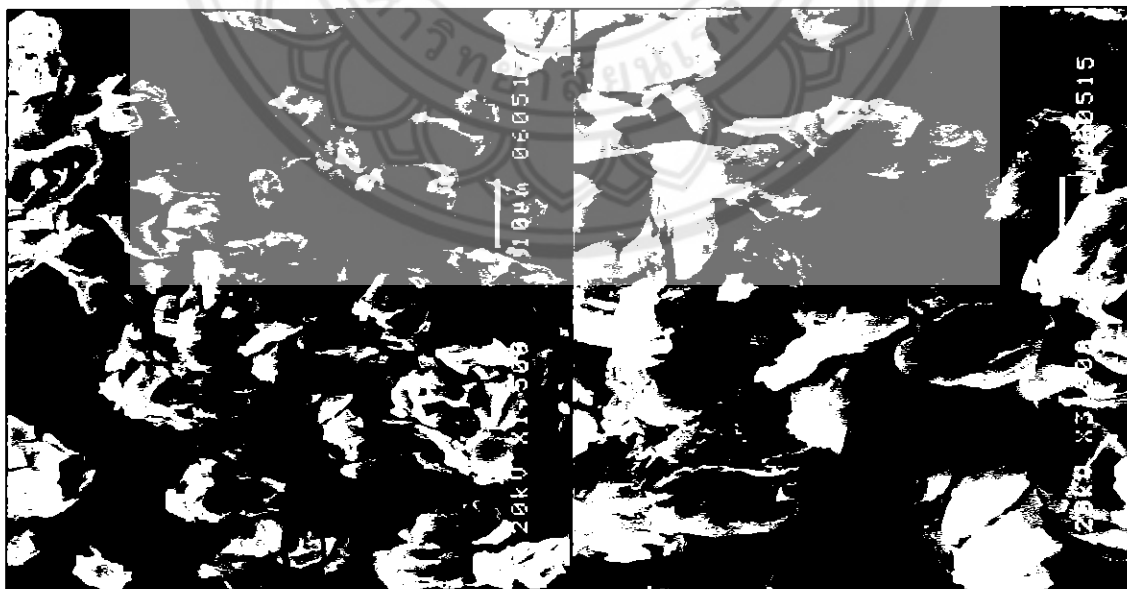
แผนที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส





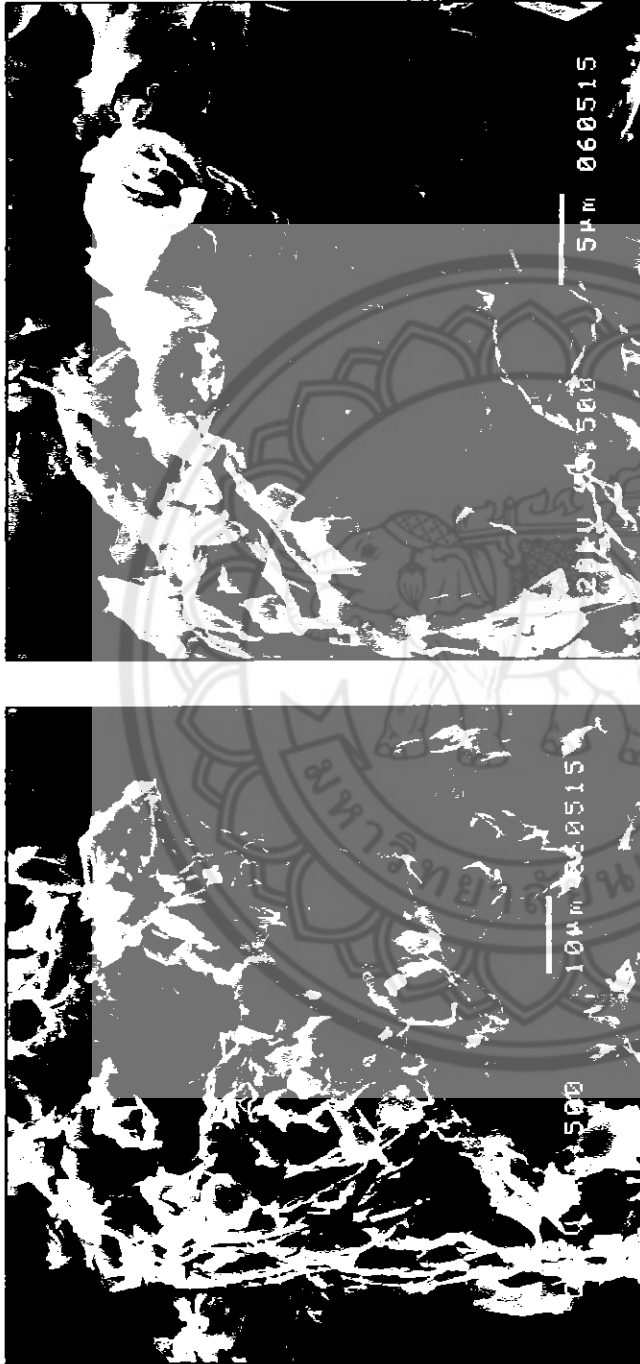
รูปที่ 4.12 รูปพื้นผิวโครงสร้างจุลภาคSEM และกราฟ EDS ของ ซีเมนต์ฝุ่นหินอ่อน

แผ่นที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส

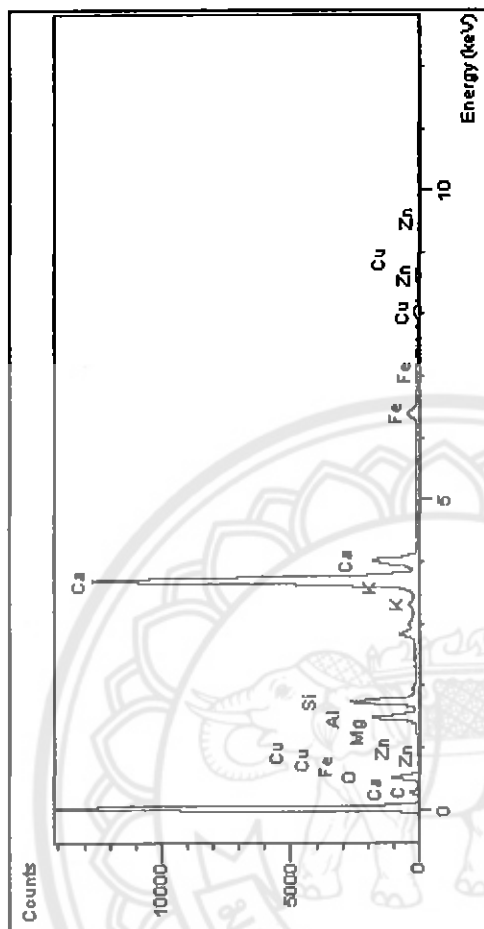
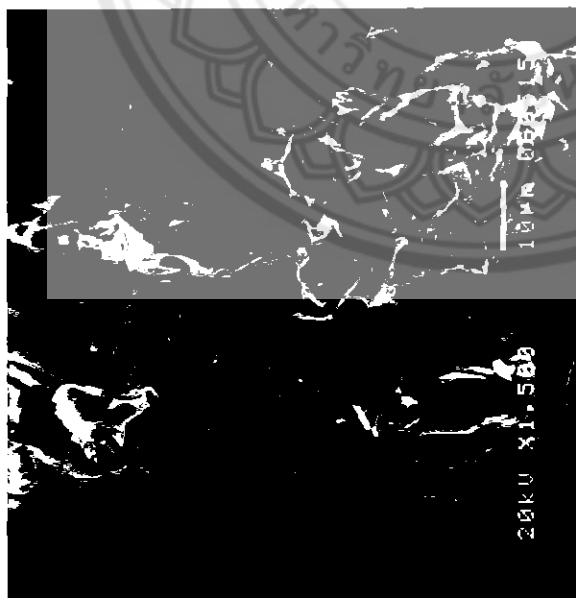


รูปที่ 4.13 รูปพื้นผิวโครงสร้างจุลภาคSEM และกราฟ EDS ของ ซีเมนต์ฝุ่นหินอ่อน

เผาท่อนหุ้ม 1350 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.14 รูปพื้นผิวโครงสร้างจุลภาคSEM เมาที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.15 รูปพื้นผิวโครสสักร่างจุลภาคSEM และกราฟ EDS ของ ซีเมนต์ฝุ่นหินอ่อน

แผนที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดสอบทางเคมี พบว่า วัสดุตั้งต้นที่เลือกใช้ คือ ฝุ่นหินอ่อน ,ดินขาว และฝุ่นซิลิกา แล่ง ที่ถูกเผาในอัตราส่วน 74% 19% และ 7% ตามลำดับ หลังจากการเผาและได้ทดสอบคุณสมบัติทางเคมี สรุปได้ว่า วัสดุที่ 3 มีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่ยังพบปัญหาเกี่ยวกับปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น จึงส่งผลให้อัตราส่วนที่เหมาะสมไม่ได้



### บรรณานุกรม

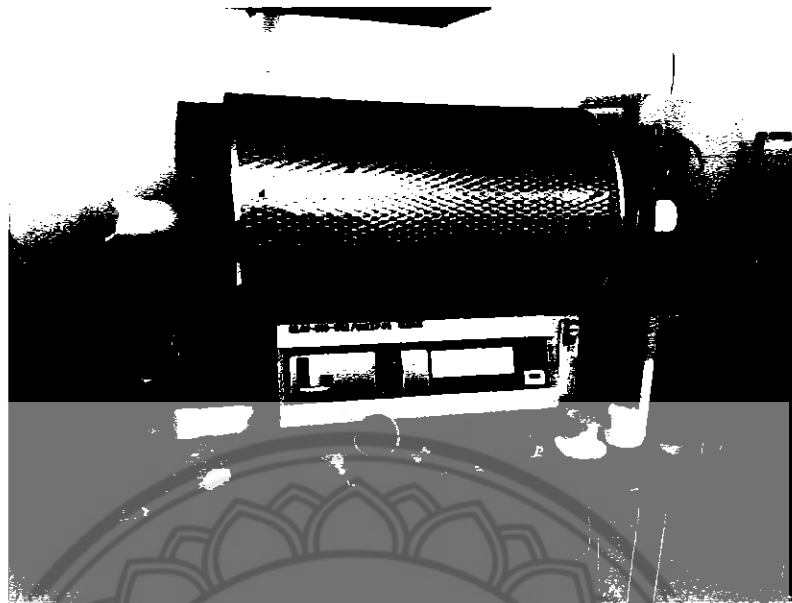
- [1] P. Vipul Naidu and P. K. Pandey, Replacement of Cement in Concrete, International Journal of Environmental Research and Development, 4, 91-98 (2014).
- [2] M. Schneider, M. Romer, M. Tschudin and H. Bolio, Sustainable cement production—present and future, Cement and Concrete Research, 41, 642–6505 (2011).
- [3] P. C. Hewlett, Chemistry of cement and concrete, Butterworth-Heinemann (2003).
- [4] Bodil Hokfors, Phase chemistry in process models for cement clinker and lime production, Print and media Umea University, Sweden (2014).
- [5] V. Corinaldesi, G. Moriconi and T. R. Naik, Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete, Construction and Building Materials, 24, 113–117 (2010).
- [6] Taner Kavas and Asim Olgun, Properties of cement and mortar incorporating marble dust and crushed brick, Ceramics-Silikaty 24-28 (2008).
- [7] P. C. Hewlett, Chemistry of cement and concrete, Butterworth-Heinemann (2003).
- [8] Bodil Hokfors, Phase chemistry in process models for cement clinker and lime production, Print and media Umea University, Sweden (2014).
- [9] V. Corinaldesi, G. Moriconi and T. R. Naik, Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete, Construction and Building Materials, 24, 113–117 (2010).

## ภาคผนวก ก



รูปที่ ก.1 ตู้อบ

รูปที่ ก.2 เครื่องชั่งตวงวัด 4 ตำแหน่ง



รูปที่ ก.3 เตาเผาอุณหภูมิสูง



รูปที่ ก.4 เครื่อง Ball milling

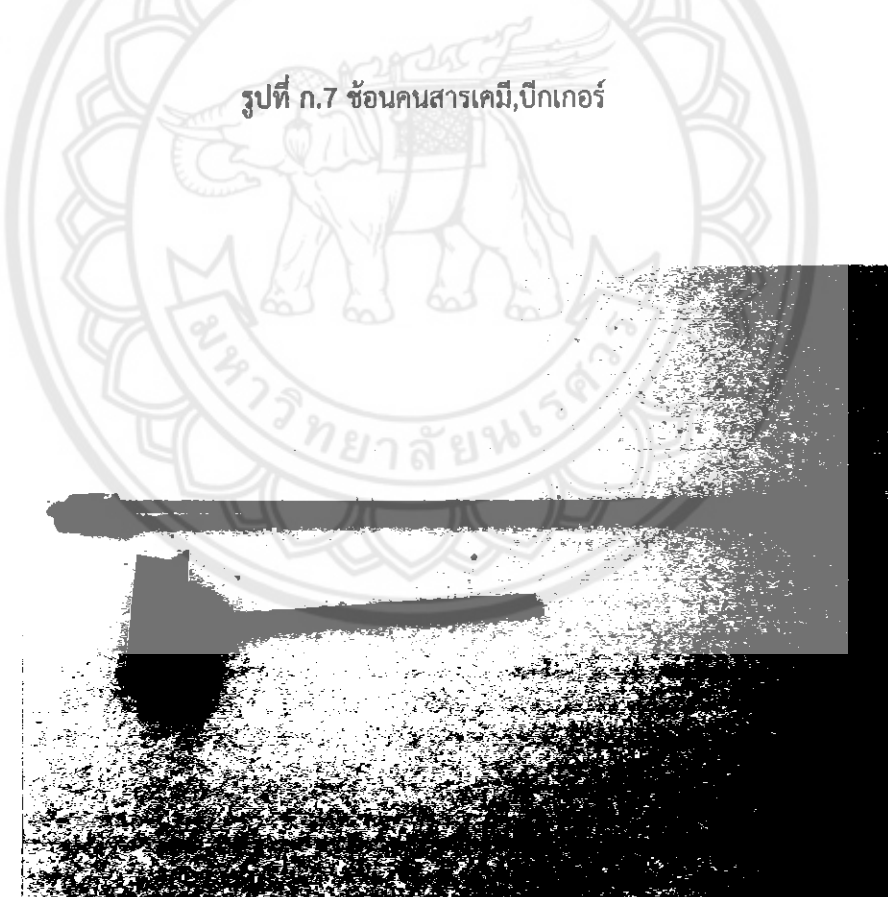




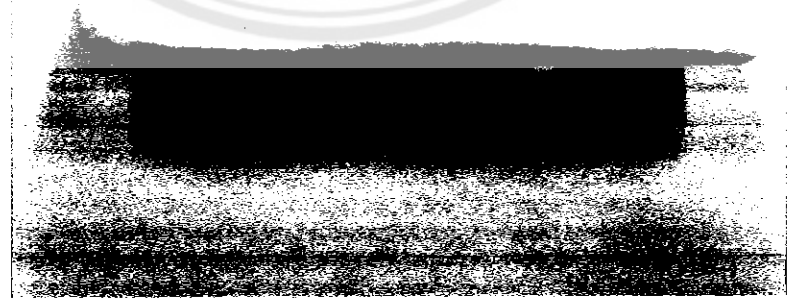
รูปที่ ก.6 อะลูมิเนียมฟรอยด์



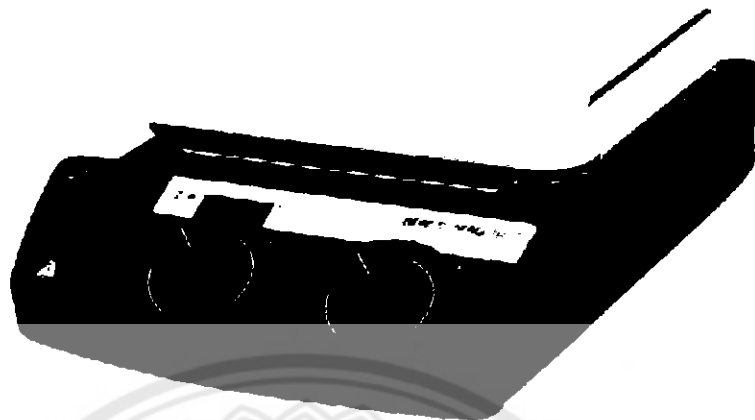
รูปที่ ก.7 ซ่อนคนสารเคมี,ปีกเกอร์



รูปที่ ก.8 อุปกรณ์ นำตัวอย่างออกจากเตาเผา



รูปที่ ก.10 อิฐทนไฟ



รูปที่ ก.11 Hot Plate



รูปที่ ก.12 พัดลม



รูปที่ ก.13 กระป๋อง Ball ขนาด 500 ml



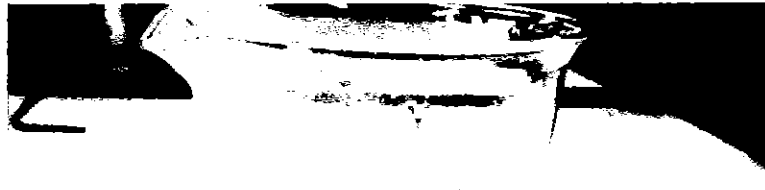
รูปที่ ก.14 Ethanol 99.8%



รูปที่ ก.15 ตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 40



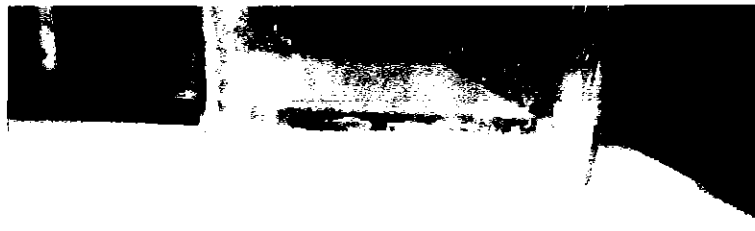
รูปที่ ก.16 ตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 200



รูปที่ ก.17 ผุ่นหินอ่อน



รูปที่ ก.18 ผุ่นศิลาแลง

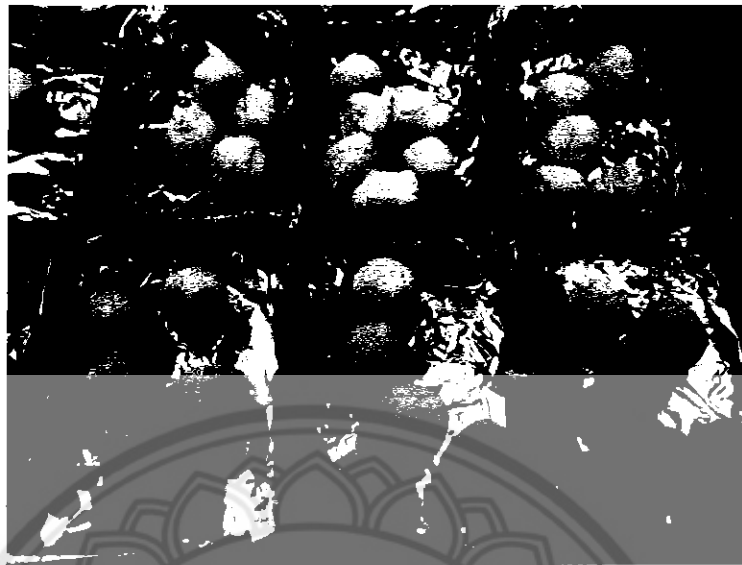


KaO

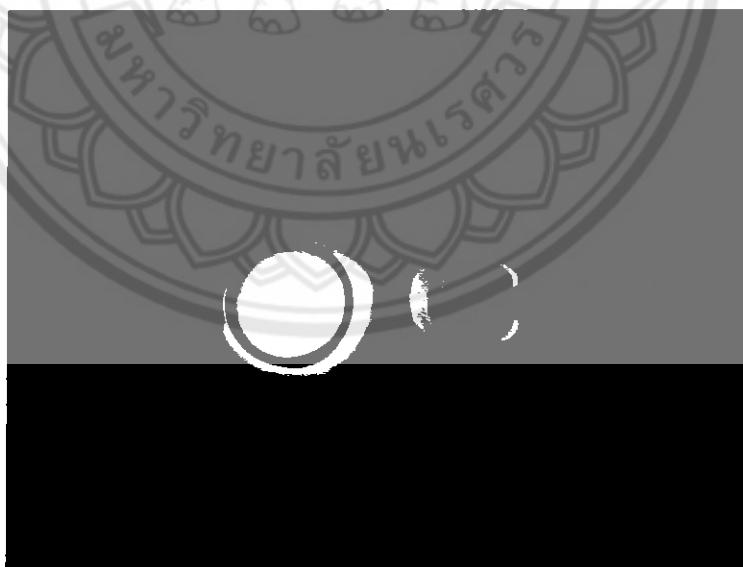


รูปที่ ก.20 สารตัวอย่าง(CMD)





รูปที่ ก.21 CMD ปั่นเม็ด



รูปที่ ก.22 CMD ขณะออกจากเตาเผา