



โครงการ  
การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ	การวิเคราะห์เชิงปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี		
	Quantitative determination of calcium hydroxide in cement by		
	Near Infrared spectroscopy		
ชื่อนิสิต	นางสาวจิตรานุช จันทร์สมบุญ	เลขประจำตัว	6033013323
ภาควิชา	เคมี		
ปีการศึกษา	2563		

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การวิเคราะห์เชิงปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์ด้วยเทคนิคเนียร์  
อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

Quantitative determination of calcium hydroxide in cement by  
Near Infrared spectroscopy

โดย  
นางสาวจิตรานุช จันท์สมบูรณ์

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2563

โครงการ การวิเคราะห์เชิงปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์ด้วยเทคนิคเอนีร์อินฟราเรด  
สเปกโทรสโกปี

โดย นางสาวจิตรานุช จันทร์สมบุญ

ได้รับอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบโครงการ

- |   |                  |
|---|------------------|
| 1. รองศาสตราจารย์ ดร.ปกรณ์ วรานุศุภากุล | ประธานกรรมการ    |
| 2. รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ เพ็ชรวนิช | กรรมการ          |
| 3. รองศาสตราจารย์ ดร.คณศ วงษ์ระวี       | อาจารย์ที่ปรึกษา |

รายงานฉบับนี้ได้รับความเห็นชอบและอนุมัติโดยหัวหน้าภาควิชาเคมี



(รองศาสตราจารย์ ดร. คณศ วงษ์ระวี)  
อาจารย์ที่ปรึกษา



(รองศาสตราจารย์ ดร.วรวิทย์ โฮเวณ)  
หัวหน้าภาควิชาเคมี

วันที่ 27 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2564

ชื่อโครงการ การวิเคราะห์เชิงปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรสเปกโทรสโกปี

ชื่อนิสิตในโครงการ นางสาวจิตรา นุช จันทร์สมบุญ เลขประจำตัว 6033013323

ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. คณศ วงษ์ระวี

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2563

### บทคัดย่อ

แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เป็นผลิตภัณฑ์ในคอนกรีตที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของผงซีเมนต์กับน้ำ ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะก่อให้เกิดแผ่นออกไซด์บางๆมาป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีต ดังนั้นการตรวจวัดและระบุปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จึงมีความสำคัญอย่างมากในการประเมินระดับความเสียหายของคอนกรีต ในงานวิจัยนี้ได้ตรวจวัดหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์และคอนกรีตตัวอย่างด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (NIR) พบว่าค่าความเข้มสัญญาณเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมที่เลขคลื่น  $7081.33 \text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง  $1^{\text{st}}$  overtone ของ O-H stretching ในสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นเลขคลื่นที่ใช้บ่งบอกถึงปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากตัวอย่างซีเมนต์และคอนกรีตได้อย่างถูกต้อง กราฟเชิงปริมาณมาตรฐานของความสัมพันธ์ความเข้มข้น  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  กับความเข้มสัญญาณ  $\log(1/R)$  โดยความเข้มข้นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ 0.1-3 %w/w มีค่า  $R^2 = 0.99$  และ 4-10 %w/w มีค่า  $R^2 = 0.95$  ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคอนกรีตที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์(w/c) โดยพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) ที่ 0.63 จะทำให้คอนกรีตมีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์มากที่สุด นอกจากนั้นสัณฐานวิทยาของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วน w/c ต่าง ๆ ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) เพื่อดูลักษณะโครงสร้างภายในของคอนกรีตพบว่าโครงสร้างเฉพาะของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต นั้นมีความหนาแน่นขึ้นและมีการเรียงตัวกันเป็นกลุ่มก้อนคล้ายโครงสร้างรังผึ้งที่เรียกว่า Honeycomb-like structure เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงขึ้น จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคอนกรีตที่ถูกแช่ในน้ำทะเลเทียมเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ พบว่าค่าความเข้มสัญญาณสัมพันธ์ ( $\log 1/R$ ) ที่แสดงถึงปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคอนกรีตลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับคอนกรีตก่อนการแช่ในน้ำทะเลเทียม จากงานนี้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจึงเป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคอนกรีตเพราะเป็นวิธีการที่ไม่ทำลายตัวอย่างคอนกรีตและยังตรวจวัดที่ตัวอย่างได้อย่างรวดเร็ว

คำสำคัญ: แคลเซียมไฮดรอกไซด์, เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี, ซีเมนต์, คอนกรีต

Project Title Quantitative determination of calcium hydroxide in cement by Near Infrared spectroscopy

Student Name Miss Jitranut Jansombun Student ID 6033013323

Advisor Name Assoc. Prof. Dr. Kanet Wongrawee

Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Academic Year 2020

### Abstract

Calcium hydroxide ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) is a major by-product from hydration reaction of cement along with calcium silicate hydrate (C-S-H) gel. Its advantage is to promote the formation of passive oxide film on the steel reinforcements to prevent them from the corrosion process. Therefore, the detection and quantification of calcium hydroxide are important to evaluate the destructive level of concrete. In this research work, calcium hydroxide in cement and concrete samples was measured by using Near Infrared spectroscopy (NIR). Amount of calcium hydroxide could be quantified by an acquired intensity of the first overtone of OH group at wavenumber  $7081.33 \text{ cm}^{-1}$ . Calibration curve between concentration of calcium hydroxide and intensity  $\log(1/\text{Reflection})$  was constructed as the quantitative model to determine calcium hydroxide content in cement and concrete samples (Concentration of  $\text{Ca(OH)}_2$  0.1-3 %w/w,  $R^2 = 0.99$  and 4-10 %w/w,  $R^2 = 0.95$ ). The relation of the amount of calcium hydroxide and the water to cement ratio (w/c) was revealed in order to determine the optimal w/c ratio, which maximizes amount of calcium hydroxide in the concrete product. Concrete samples with w/c ratio of 0.63 generated the highest amount of calcium hydroxide. The morphological structures of concrete samples with various w/c was monitored by scanning electron microscopy (SEM). Microstructures of C-S-H,  $\text{Ca(OH)}_2$  and the honeycomb-like structure with less micro-cracks were found when w/c ratio increased. Moreover, the decay of calcium hydroxide contents in concrete was investigated by NIR when the concrete samples were soaked in the artificial sea solution for 1 week. It was found that the relative intensity of calcium hydroxide was decreased, which demonstrated that the amount of calcium carbonate was reduced. From the study, NIR spectroscopy becomes an interesting alternative method to determine the amount of calcium hydroxide. It is not only a non-destructive technique but it could be used for real time analysis.

Keywords: Calcium hydroxide, Near infrared spectroscopy, Cement, Concrete

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยและรายงานการวิจัยฉบับนี้สำเร็จด้วยดีเนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจากที่ปรึกษาโครงการ รองศาสตราจารย์ ดร. คณศ วังษ์ระวี อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการดำเนินวิจัย อีกทั้งเสียสละเวลาให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ เพื่อให้วิจัยครั้งนี้ผ่านไปด้วยดี และขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ปกรณ วรานุศุภากุล และ รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ เพ็ชรวิช ที่กรุณาสละเวลาในการตรวจทานวิจัยเล่มนี้ แก้ไขให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และให้เกียรติมาเป็นประธาน และกรรมการในการสอบงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ นางสาวสุรรัตน์ มากเมือง ที่ให้คำแนะนำและสอนเกี่ยวกับเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี การใช้และการดูแลเครื่องมือ และนายณลวัช ศรีเจริญ ที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการวิเคราะห์ผลจากเทคนิคต่างๆ ในทุกเรื่อง อีกทั้งขอขอบคุณพี่แลปทุกคนใน SRU lab

ขอขอบคุณโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณท่านอาจารย์ภาคเคมีทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนทั้งด้านความรู้และทักษะต่างๆ ตลอดจนทำให้สามารถนำทักษะที่ได้รับมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จ

## สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง	ง
กิตติกรรมประกาศ.....จ	จ
สารบัญ.....ฉ	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....ช	ช
บทที่1 บทนำ.....1	1
1.1 ความสำคัญและมูลเหตุจูงใจ.....1	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....4	4
1.3 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....7	7
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....7	7
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....7	7
บทที่2 ทฤษฎี.....8	8
2.1 ซีเมนต์.....8	8
2.2 กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์.....8	8
2.3 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์.....8	8
2.4 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ระหว่างผงซีเมนต์กับน้ำ.....9	9
2.5 ความเสียหายของคอนกรีตจากน้ำทะเล.....11	11
2.6 เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....12	12
2.7 รูปแบบการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....14	14
2.8 Standard Normal Variate (SNV).....15	15
2.9 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient).....16	16
บทที่3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....17	17
3.1 สัญญาณเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH) <sub>2</sub> ).....17	17
3.2 การวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....19	19
3.3 การวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....19	19

สารบัญ (ต่อ)

3.4 ศึกษาปริมาณน้ำส่งผลต่อปริมาณ $\text{Ca(OH)}_2$ ในคอนกรีตเมื่อทดสอบด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	20
3.5 วิเคราะห์เชิงปริมาณของสารประกอบ $\text{Ca(OH)}_2$ ในคอนกรีตที่ถูกแช่ในน้ำทะเลด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี .....	21
3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลจากเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ .....	22
3.7 เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	22
บทที่4 ผลวิจัย.....	23
4.1 สัญญาณเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ).....	23
4.2 การวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	24
4.3 การวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี .....	26
4.4 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ $\text{Ca(OH)}_2$ กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี .....	28
4.5 วิเคราะห์เชิงปริมาณของ $\text{Ca(OH)}_2$ ในคอนกรีตที่ถูกแช่ในน้ำทะเลด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	30
บทที่5 สรุปผลวิจัย.....	33
เอกสารอ้างอิง.....	34
ประวัติผู้วิจัย .....	36



## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1.1 ลักษณะเฉพาะของโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกต (C-S-H) และผลึกของสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ).....	1
รูปที่ 1.2 ชนิดของปูนหรือผงซีเมนต์ที่นิยมใช้ในประเทศไทย.....	2
รูปที่ 1.3 การเสื่อมสภาพของเสาคอนกรีต (www3.rdi.ku.ac.th).....	3
รูปที่ 1.4 XRD สเปกตรัมขององค์ประกอบภายในโครงสร้างคอนกรีต.....	5
รูปที่ 1.5 เนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่ wavenumber $7081.33 \text{ cm}^{-1}$ .....	6
รูปที่ 2.1 ผงซีเมนต์แบบต่าง (a) ซีเมนต์ที่ใช้ในการสร้างเสาคอนกรีต(ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่รับแรงอัดได้สูง), (b) ซีเมนต์ที่ใช้ในการวางพื้นคอนกรีต(ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา), (c) ซีเมนต์ที่ใช้ในการฉาบ, (d) ซีเมนต์ที่ใช้ในการซ่อมแซมรอยแตกของคอนกรีต .....	9
รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างของคอนกรีตที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (a) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) 0.30 ที่อุณหภูมิห้อง (b) อัตราส่วนน้ำ(w/c) 0.30 สภาวะ $\text{CO}_2$ curing ที่อุณหภูมิห้อง, (c) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) 0.30 ที่อุณหภูมิสูง และ (d) อัตราส่วนน้ำ(w/c) 0.30 สภาวะ $\text{CO}_2$ curing ที่อุณหภูมิสูง .....	11
รูปที่ 2.3 ผลกราฟปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ กับคลอไรด์ในน้ำทะเลเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของ $\text{CaCl}_2 \cdot 3\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (a) อัตราส่วน $\text{Ca}(\text{OH})_2 : \text{CaCl}_2$ มากกว่า 3, (b) อัตราส่วน $\text{Ca}(\text{OH})_2 : \text{CaCl}_2$ น้อยกว่าเท่ากับ 3 .....	12
รูปที่ 2.4 ช่วงแสงที่มีความยาวคลื่นย่านเนียร์อินฟราเรด.....	12
รูปที่ 2.5 แถบการดูดกลืนแสงของหมู่ฟังก์ชันและหมู่ข้างเคียงในช่วงความยาวคลื่น.....	13
รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง .....	13
รูปที่ 2.7 หลักการของ NIR Spectroscopy.....	14
รูปที่ 2.8 เนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมแบบ $2^{\text{nd}}$ derivative ของสารประกอบ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่ wavenumber $7082 \text{ cm}^{-1}$ .....	14
รูปที่ 2.9 รูปแบบในการวัดของเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	15
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวัดเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัม.....	18
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมการวัดสัญญาณเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) แบบ reflection mode.....	18
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ในการวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์สารผสมระหว่างสารประกอบ $\text{CaCO}_3$ กับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ น้ำหนัก 2 กรัม ที่มีช่วงความเข้มข้น 0.1-10 %w/w.....	19
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมวิธีทดสอบประสิทธิภาพของเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี .....	20
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการเตรียมบล็อกคอนกรีตเพื่อศึกษาปริมาณน้ำส่งผลต่อปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เมื่อทดสอบด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	21

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

**รูปที่ 3.6** ขั้นตอนการเตรียมการวิเคราะห์หาปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ในบล็อกคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเทียม เป็นเวลา 1 สัปดาห์..... 21

**รูปที่ 3.7** การจัดการข้อมูลหลังจากทำการตรวจวัดด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์..... 22

**รูปที่ 4.1** สัญญาณเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ในช่วงเลขคลื่นระหว่าง  $4000\text{-}10000\text{ cm}^{-1}$ .....23

**รูปที่ 4. 2** กราฟแสดงเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมระหว่างความเข้มข้น  $\log(1/R)$  ของสารผสม  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.5, 0.7, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9 และ 10 %w/w..... 24

**รูปที่ 4.3** กราฟเชิงปริมาณมาตรฐานของความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเข้มข้น  $\log(1/R)$  ของ  $\text{Ca(OH)}_2$  กับความเข้มข้น  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่ 0.1, 0.5, 0.7, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9 และ 10 %w/w ..... 25

**รูปที่ 4.4** (a) เนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมในช่วง wavenumber  $5,000\text{-}9,000\text{ cm}^{-1}$  ของสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  (เส้นสีน้ำเงิน) และ  $\text{CaCO}_3$  (เส้นสีแดง) (b) เนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  (เส้นสีน้ำเงิน) และผงซีเมนต์ (เส้นสีแดง) ..... 26

**รูปที่ 4.5** เนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  ในผงซีเมนต์ (เส้นสีแดง), สารผสมของผงซีเมนต์กับ  $\text{Ca(OH)}_2$ (เส้นสีดำ) และบล็อกซีเมนต์หรือคอนกรีต (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ตรวจวัดด้วยเทคนิคNIR ในช่วง wavenumber  $7,050\text{-}7,100\text{ cm}^{-1}$  โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) 1:2 จากระบบที่ใช้สารผสมของผงซีเมนต์กับ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่สัดส่วน..... 27

**รูปที่ 4.6** กราฟเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของคอนกรีต และ (b) กราฟความสัมพันธ์ของค่าสัญญาณที่  $7081.33\text{ cm}^{-1}$  (ปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$ ) ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) 0.25, 0.38, 0.50, 0.63, 0.75 และ 0.88 %v/v ตามลำดับ ..... 28

**รูปที่ 4.7** ลักษณะโครงสร้างของบล็อกคอนกรีตด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย  $\times 2,000$  และ  $\times 5,000$  (a) แผนภาพแสดงลักษณะเฉพาะของแคลเซียมซิลิเกต (CSH), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) และเอททริงไกต์ (Ettringite) อ้างอิงจาก [www.cpacacademy.com](http://www.cpacacademy.com), (b) บล็อกคอนกรีต w/c ที่ 0.25, (c) บล็อกคอนกรีต w/c ที่ 0.50, (d) บล็อกคอนกรีต w/c ที่ 0.88..... 30

**รูปที่ 4.8** เนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  ในบล็อกคอนกรีต (เส้นสีแดง)และบล็อกคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ตรวจวัดด้วยเทคนิคNIR ในช่วง wavenumber  $7,050\text{-}7,100\text{ cm}^{-1}$  โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) (a) 0.25 w/c, (b) 0.38 w/c, (c) 0.50 w/c, (d) 0.63 w/c, (e) 0.75 w/c, (f) 0.88 w/c และกราฟแท่ง  $\log(1/R)$  สัมพัทธ์ (relative intensity) ที่  $7081.33\text{cm}^{-1}$  ..... 32

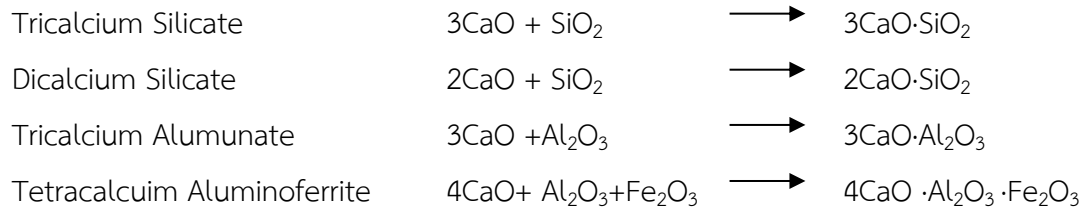
# บทที่ 1

## บทนำ

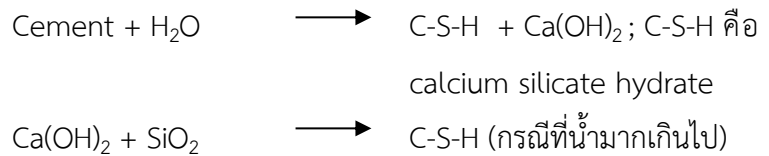
### 1.1. ความสำคัญและมูลเหตุจูงใจ

ในปัจจุบันซีเมนต์ถูกใช้อย่างแพร่หลายในงานก่อสร้างเนื่องจากมีคุณสมบัติที่สำคัญคือก่อนการใช้งานนั้นจะอยู่ในรูปแบบของผงแห้งเป็นผง ซึ่งมีความสะดวกในการขนส่ง อย่างไรก็ตามเมื่อผงซีเมนต์ผสมกับน้ำในสัดส่วนที่เหมาะสมนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ก่อให้เกิดการยึดเหนี่ยวกันของพันธะระหว่างสารประกอบที่ผสมอยู่ในผงซีเมนต์ ซึ่งเป็นพันธะที่มีความแข็งแรงสูงที่ยึดอนุภาคของแข็งเข้าด้วยกัน ซึ่งผงซีเมนต์ที่ผสมกับน้ำแล้วปล่อยให้แห้งแล้วนั้นเรียกว่า คอนกรีต สารประกอบของคอนกรีตนั้นเกิดจากผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบทางเคมีในซีเมนต์ ได้ผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้น คือสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต calcium silicate hydrate (C-S-H) กับ สารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ )<sup>1</sup> โดยปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นดังนี้

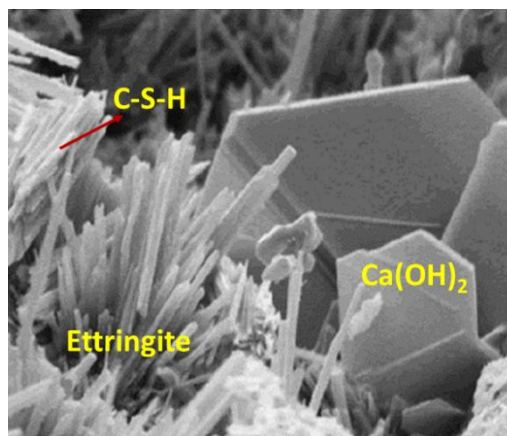
#### ซีเมนต์



#### ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) :



สำหรับลักษณะโครงสร้างโดยทั่วไปของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต (C-S-H) นั้นจะเป็นคลัสเตอร์รูปเข็มขนาดเล็กในขณะที่ผลึกของสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะเป็นแผ่นที่มีขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ลักษณะเฉพาะของโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกต (C-S-H) และผลึกของสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ )

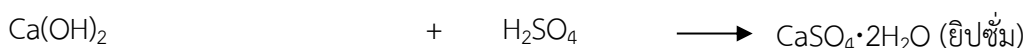
คุณสมบัติของคอนกรีตนั้นจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและอัตราส่วนผสมของน้ำกับผงซีเมนต์เป็นหลัก เพราะฉะนั้นการเลือกใช้ประเภทของปูนซีเมนต์ให้เหมาะสมแก่การใช้งาน จึงถือเป็นเรื่องสำคัญเพราะช่วยประหยัดค่าใช้จ่าย ระยะเวลา และป้องกันปัญหาจากการแตกร้าวก่อนเวลาซึ่งอาจเกิดเนื่องมาจากการใช้งานปูนซีเมนต์ที่ไม่ถูกประเภทจึงมีการจำแนกประเภทของปูนซีเมนต์ตามการใช้งาน ดังรูปที่ 1.2 ยกตัวอย่างเช่นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดาซึ่งเป็นประเภทที่นิยมใช้มากที่สุดในประเทศไทยเหมาะกับงานโครงสร้างคอนกรีตทั่วไปและโครงสร้างคอนกรีตที่มีความแข็งแรงสูง เช่น สะพานขนาดใหญ่และอาคารสูง ปูนซีเมนต์ที่ใช้สำหรับงานก่อ, งานฉาบและปูนซีเมนต์ที่ใช้สำหรับงานพิเศษเช่นการซ่อมแซมรอยร้าวหรือใช้ในการปิดขอบกันการรั่วซึม ซึ่งปูนซีเมนต์ในกลุ่มนี้จะมีราคาสูง ปูนซีเมนต์แต่ละชนิดก็จะนำไปใช้ในสิ่งก่อสร้างและอุตสาหกรรมสิ่งก่อสร้างที่แตกต่างกันซึ่งโดยปกติแล้วปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่ใช้สิ่งก่อสร้าง อาคาร จะมีอายุของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กอยู่ที่ประมาณ 50-60 ปี โดยเฉลี่ยแล้วเมื่อใช้งานไป 30 ปีก็จะมีส่วนที่ชำรุดและมีรอยร้าวก็ควรที่จะซ่อมแซมใหม่เช่นโครงสร้างเสา คาน และพื้น

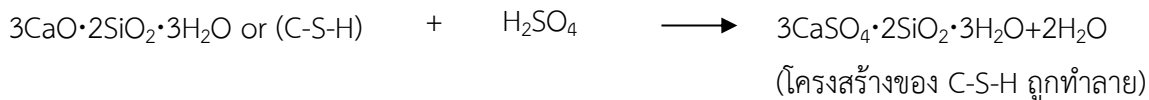


รูปที่ 1.2 ชนิดของปูนหรือผงซีเมนต์ที่นิยมใช้ในประเทศไทย (www.onestockhome.com)

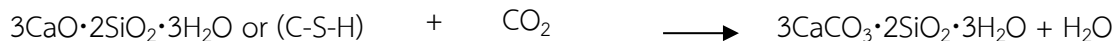
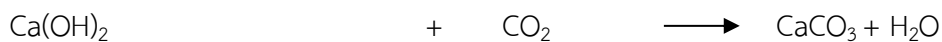
ปัจจัยที่ทำให้คอนกรีตเกิดความเสียหายหรือขาดความทนทาน นั้นเกิดจากสภาพแวดล้อมหรือการใช้งานที่ไม่เหมาะสม หรืออาจเกิดจากความเสียหายที่สะสมเมื่อเริ่มใช้งานหรือใช้งานไปแล้วในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ความเสียหายกับคอนกรีตนี้อาจเกิดมาจากสาเหตุหลัก 2 สาเหตุดังนี้ 1) สาเหตุด้านกายภาพ เช่น ความเสียหายจากความร้อนหรือรองรับน้ำหนักมากเกินไป ทำให้เกิดการแตกร้าว และ 2) สาเหตุด้านเคมี มีการซึมผ่านของสารเคมีที่เป็นกรดหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ผิวของคอนกรีตมีการเสื่อมสภาพตลอดเวลาเนื่องจากคอนกรีตสามารถทำปฏิกิริยากับแก๊ส  $\text{CO}_2$  ในอากาศได้หรือเสื่อมสภาพเมื่ออยู่ในที่ที่มีสภาพเป็นกรด ดังสมการเคมี

ในสภาวะกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )

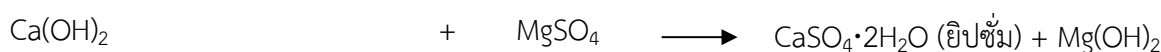




ในสภาวะแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>)



อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาดังกล่าวนั้นเป็นปฏิกิริยาที่ดำเนินไปอย่างช้า ๆ เป็นผลเนื่องจากการทำปฏิกิริยาของสารประกอบต่างเฟส (ของแข็งและแก๊ส) และยังมีควมเสียหายอื่น ๆ อีก เช่น ความเสียหายที่เกิดจากน้ำทะเลที่ไปกัดกร่อนโครงสร้างภายในของคอนกรีตทำให้ความหนาแน่นของโครงสร้างคอนกรีตลดลง ดังสมการ ความเสียหายที่เกิดจากแมกนีเซียมซัลเฟต(MgSO<sub>4</sub>)ในน้ำทะเล



เมื่อ MSH คือ แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Magnesium Silicate Hydrate) เป็นสารประกอบที่ไม่มีความสามารถในการประสานหรือยึดเหนี่ยวจึงทำให้โครงสร้างคอนกรีตเกิดความเสียหาย

และเมื่อคอนกรีตเกิดความเสียหายเป็นรอยร้าวจะทำให้สภาวะแวดล้อมรอบ ๆ ไม่ว่าจะเป็นของเหลวและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แทรกซึมเข้าไปสร้างความเสียหายให้กับวัสดุภายใน (เช่น เหล็กเส้น) ซึ่งจะทำให้โครงสร้างหลักของคอนกรีตและวัสดุภายในเสียหายโดยสมบูรณ์ไม่สามารถซ่อมแซมได้ (ดังรูปที่ 1.3)



รูปที่ 1.3 การเสื่อมสภาพของเสาคอนกรีต (www3.rdi.ku.ac.th)

ความเสียหายที่เกิดจากการกัดกร่อนนั้นจะสามารถชะลอได้ด้วยปริมาณสารประกอบ Ca(OH)<sub>2</sub> ในโครงสร้างของคอนกรีตที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างผงซีเมนต์และน้ำ สารประกอบดังกล่าวมีความเป็นด่างสูงทำให้เกิดการก่อเป็นฟิล์มบาง ๆ ของเหล็กออกไซด์บนผิวเหล็กเสริมในคอนกรีต อีกทั้งยังช่วยชะลอการถูกกัดกร่อนของคอนกรีตได้เพราะเข้าทำปฏิกิริยากับกรดและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แทนสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต เป็นการยืดอายุการใช้งานของคอนกรีตอย่างมีประสิทธิภาพ จะเห็นได้ว่าปริมาณ Ca(OH)<sub>2</sub> ในคอนกรีตนั้นมีความสัมพันธ์กับการเสื่อมสภาพโดยรวมของคอนกรีต โดยถ้าปริมาณ Ca(OH)<sub>2</sub> ในคอนกรีต มี

ค่ามากแสดงถึงว่าการเสื่อมสภาพของคอนกรีตจะยังคงถูกชะลอ ในทางตรงกันข้ามถ้าปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ในคอนกรีต มีค่าน้อยนั้นแสดงว่าใกล้ถึงสภาวะเร่งการเสื่อมสภาพของคอนกรีต เพราะฉะนั้นการวิเคราะห์ปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  บนผิวของคอนกรีตจะทำให้เราประเมินคุณภาพและสภาพการกัดกร่อนของคอนกรีตได้ ซึ่งข้อมูลนี้สามารถนำประยุกต์ใช้ในการก่อสร้างหรือซ่อมแซมให้คอนกรีตยังมีความทนทานและช่วยชะลอการสึกกร่อนของผิวของกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

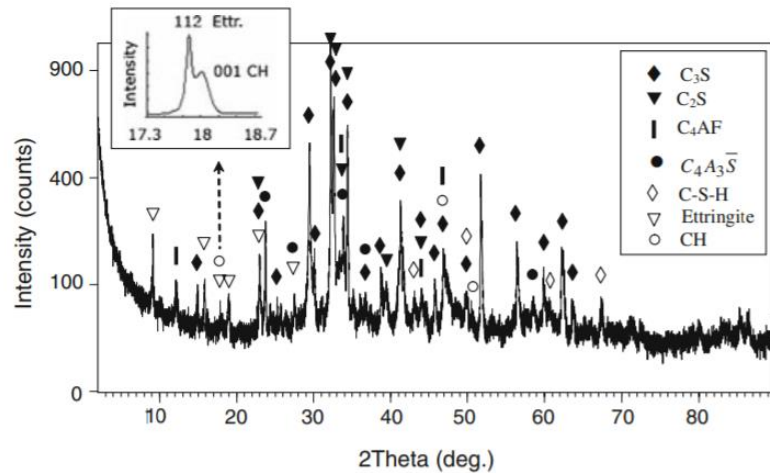
วิธีวิเคราะห์เชิงปริมาณของ  $\text{Ca(OH)}_2$  บนผิวของของแข็งนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยส่วนมากนิยมใช้เทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)<sup>3</sup> และเทคนิค Quantitative X-ray diffraction (QXRD)<sup>2</sup> อย่างไรก็ตามทั้งสองเทคนิคนั้น จำเป็นต้องทำการเก็บตัวอย่างมาที่ห้องปฏิบัติการไม่สามารถวิเคราะห์จากพื้นผิวได้โดยตรง และยังเป็นเทคนิคที่เป็นการตรวจวัดที่ทำลายตัวอย่าง ทำให้ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ถูกจำกัดอยู่เพียงแค่บางส่วนเท่านั้น ไม่เหมาะสำหรับการนำไปวิเคราะห์โดยใช้จำนวนตัวอย่างมาก ๆ ได้ นอกจากนี้การตรวจวัดยังไม่เป็นไปแบบปัจจุบัน (real time analysis) ตามที่กล่าวไว้ข้างต้น ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะวิเคราะห์หาปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  บนผิวของคอนกรีตโดยใช้เทคนิคเชิงแสงเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (NIR) มาช่วยในการวิเคราะห์ เพื่อพิสูจน์ทราบระยะเวลาการใช้งานของคอนกรีตและสัดส่วนของน้ำที่ใช้ผสมผงซีเมนต์ที่จะให้ค่าปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  สูงที่สุด

## 1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อุตสาหกรรมสิ่งก่อสร้างเป็นอุตสาหกรรมที่มีความเติบโตและจำเป็นในปัจจุบันอย่างมาก การเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุหลักที่ใช้ในงานก่อสร้าง เช่น ซีเมนต์จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง

Midgley, H. และคณะ<sup>3</sup> ศึกษาหาปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วย เทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) เท่ากับ  $15.8 \pm 0.2\%$ , X-Ray diffraction (XRD) เท่ากับ  $12.0 \pm 0.9\%$ , Glycol extraction เท่ากับ  $19.9 \pm 0.3\%$  และ Alcohol glycerol extraction เท่ากับ  $12.7\%$ .

Harutyunyan, V. และคณะ<sup>4</sup> วิเคราะห์หาปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  จากปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์ด้วยเทคนิค soft X-ray transmission microscopy imaging (ASTM) และเทคนิค X-Ray diffraction (XRD) พบว่าจะเห็นผลึกของ  $\text{Ca(OH)}_2$  ดังรูปที่ 1.4 และยังทราบสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายรวมถึงพารามิเตอร์ที่สำคัญอื่นๆบอกถึงการเกิดผลึก  $\text{Ca(OH)}_2$  ในซีเมนต์



รูปที่ 1.4 XRD สเปกตรัมขององค์ประกอบภายในโครงสร้างคอนกรีต

Scrivener, K. และคณะ<sup>5</sup> ได้ศึกษาปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ในสารผสมของซีเมนต์กับ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่ 15%, 20%, 25% ด้วยเทคนิค TGA และ XRD พบว่าทั้งสองเทคนิคตรวจวัดได้ปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ใกล้เคียงกับปริมาณจริงๆ ในซีเมนต์ อีกทั้งยังได้ศึกษาจากภาพ Backscattered electron images (BSE/IA) เพื่อดูโครงสร้างภายในของซีเมนต์และพบว่าเห็นผลึกของ  $\text{Ca(OH)}_2$

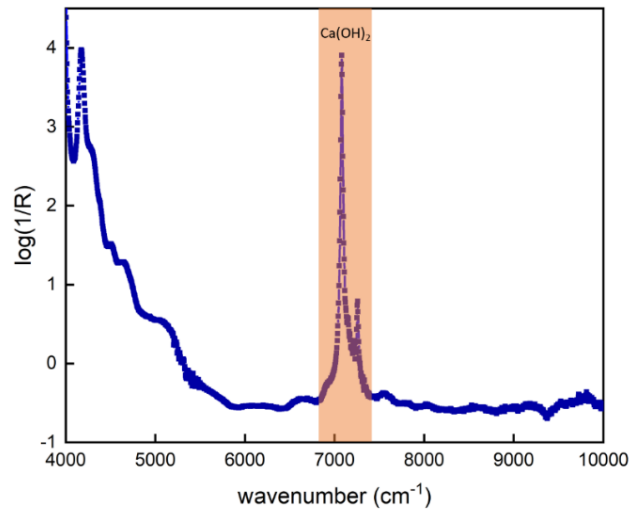
Francioso, V. และคณะ<sup>6</sup> ศึกษาพบว่า 0.5%  $\text{TiO}_2$  nanoparticles เมื่อผสมเข้าไปซีเมนต์จะเป็นตัวเร่งก่อให้เกิดสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  ตั้งแต่วันแรกที่ผสมซีเมนต์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) ที่อุณหภูมิ 45 °C

Hlaváček, P. และคณะ<sup>7</sup> ศึกษาองค์ประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  ในซีเมนต์ที่เป็นองค์ประกอบที่บอกถึงความแข็งแรงด้วยเทคนิค XRD, TGA และ SEM เพื่อดูลักษณะโครงสร้างภายในคอนกรีตและทดสอบความแข็งแรงโดยดูความสามารถในการรับแรงอัดของคอนกรีต

ซึ่งจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นพบว่าเทคนิคที่ใช้ต้องมีการตัดชิ้นคอนกรีตหรือทำลายชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเพื่อนำมาตรวจวัดทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์หน้างานได้ อีกทั้งจำนวนตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์นั้นวิเคราะห์ได้แค่บางส่วนของโครงสร้างเท่านั้นเนื่องจากการทำลายตัวอย่างทำให้เป็นข้อจำกัดในการตรวจวัด การพัฒนาอุตสาหกรรมด้านนี้จึงมีความจำเป็นต้องอาศัยเทคโนโลยีที่ทันสมัย ไม่ทำลายสิ่งก่อสร้างหรือพื้นผิวของสิ่งก่อสร้างที่เป็นตัวอย่างเพื่อให้มีคุณภาพ ประสิทธิภาพและความปลอดภัย เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (NIR) เป็นเทคนิคเชิงแสงที่ไม่ทำลายสารตัวอย่างจึงมีการนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในด้านอุตสาหกรรมสิ่งก่อสร้างเป็นเทคนิคที่น่าสนใจในการวิเคราะห์เนื่องจากไม่ทำลายสารตัวอย่างและตรวจวัดได้รวดเร็วและมีความแม่นยำในการวัดเชิงปริมาณของสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$

Sangpongpitthaya, T. และคณะ<sup>8</sup> ได้ทำการศึกษาหาปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ในคอนกรีตด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-NIR) พบตำแหน่งการดูดกลืนของ O-H stretching ของสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่บริเวณ  $7082 \text{ cm}^{-1}$  ดังรูปที่ 1.5 อีกทั้งยังได้ศึกษาปริมาณน้ำส่งผลต่อปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ในซีเมนต์ที่มีความแตกต่างของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) อยู่ที่ 0.35, 0.40, 0.45, และ 0.55 พบว่าตัวอย่างซีเมนต์อัตราส่วน

w/c ที่ 0.55 มีปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ในซีเมนต์สูงถึง 9.4% จึงบอกได้ว่าอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) 0.55 จะมีปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  สูงสุด



รูปที่ 1.5 เนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่ wavenumber  $7081.33 \text{ cm}^{-1}$

Watanabe, A. และคณะ<sup>9</sup> ได้ศึกษาหาปริมาณคลอไรด์และน้ำในซีเมนต์เพลสด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีซึ่งเป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง พบค่าสัญญาณเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัม หมู่ O-H stretching ของสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 1400 nm.

Yang, Z. และคณะ<sup>10</sup> วัดสัญญาณเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบออกไซด์  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ในซีเมนต์ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พบค่าการดูดกลืนสัญญาณเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัม ที่  $7080 \text{ cm}^{-1}$ ,  $5200 \text{ cm}^{-1}$ ,  $4526 \text{ cm}^{-1}$  และ  $4270 \text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ และได้ทำการลดค่าสัญญาณรบกวนระหว่างการวัดด้วยการทำ Standard Normal Variate (SNV)

Tsuno, K. และคณะ<sup>11</sup> ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโคปีตรวจวัดซีเมนต์จากระยะไกลโดยไม่ทำลายตัวอย่าง พบค่าสัญญาณเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัม O-H stretching ของสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 1400 nm.

Ridi, F. และคณะ<sup>12</sup> พบว่าเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโคปีเป็นเทคนิคที่สำคัญที่บอกคุณสมบัติของไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{C}_3\text{A}$ ) อีกทั้งยังพบตำแหน่งการดูดกลืนค่าสัญญาณเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัม O-H stretching ของสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่บริเวณ  $7082 \text{ cm}^{-1}$

จากงานวิจัยอ้างอิงข้างต้นทั้งหมดเราจึงต้องการที่จะศึกษาหาปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ในซีเมนต์และคอนกรีตด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (NIR) โดยการเริ่มวัดสัญญาณเนียร์อินฟราเรดของสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$ , วัดค่าสัญญาณเนียร์อินฟราเรดของสารประกอบผสมระหว่าง  $\text{Ca(OH)}_2$  กับ  $\text{CaCO}_3$ , ตรวจวัดหาปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ในซีเมนต์และคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ (W/C) ที่ 1:2, ศึกษาหาอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ส่งผลต่อปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ในคอนกรีตและตรวจวัดความเสียหายจากน้ำทะเลโดยดูจากปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่หายไปเมื่อนำคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่แตกต่างกันไปแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 1 สัปดาห์



### 1.3 วัตถุประสงค์งานวิจัย

วิเคราะห์หาปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  บนผิวของคอนกรีตด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี สำหรับประเมินคุณภาพของคอนกรีตและหาความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมผงซีเมนต์กับปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

### 1.4 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการตรวจวัดหาปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ในผงซีเมนต์และคอนกรีตด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี โดยจะเป็นการวัดปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเท่านั้น โดยอาศัยความเข้มของสัญญาณสัมพันธ์ (Relative intensity) ไม่ได้ทำการตรวจปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  เทียบกับเครื่องมือมาตรฐานอื่น ๆ โดยสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) จากบริษัท MAY & BAKER LTD DAGENHAM ENGLAND, สารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) จากบริษัท Allied Chemicals International Company Limited, คอนกรีตถุงตราฟีนิง เบอร์ 400 GP น้ำหนัก 40 กิโลกรัมและเกลือน้ำทะเล เกลือสำหรับปลาและปะการัง Aquariuma ReefSaltMixed เครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Near infrared spectrometer) รุ่น Thermo Scientific Nicolet iS5N ช่วงเลขคลื่นระหว่าง 4000-10000  $\text{cm}^{-1}$  โดยปรับ Laser power 5 มิลลิวัตต์ ใช้ Number of scans เท่ากับ 32 และปรับ smooth เท่ากับ 9 และได้ดูโครงสร้างภายในของบล็อกคอนกรีตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น JEOLJSM-6501A โดยใช้ลำอิเล็กตรอนพลังงาน 10-15kv ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ใช้กำลังขยายที่ x2000 และ x5000 เท่า

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

กระบวนการที่ใช้ตรวจวัดหาปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ซึ่งไม่ทำลายโครงสร้างตัวอย่างและพื้นผิวของตัวอย่างคอนกรีตทำให้สามารถไปวิเคราะห์หน้างานได้ และยังรวดเร็ว ประหยัดเวลาและมีความแม่นยำสูง

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 ซีเมนต์

ซีเมนต์ (cement) เป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมก่อสร้างเนื่องจากมีคุณสมบัติที่สำคัญคือเมื่อผงซีเมนต์ผสมกับน้ำจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีก่อให้เกิดการยึดเหนี่ยวของพันธะระหว่างสารประกอบที่อยู่ในผงซีเมนต์ เกิดเป็นพันธะที่มีความแข็งแรงที่ยึดส่วนต่าง ๆ หรืออนุภาคที่เป็นของแข็งให้รวมตัวกัน วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์แบ่งได้ 3 ชนิดใหญ่ ๆ ดังนี้

1) วัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของปูนขาว (Lime component) เป็นวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ซึ่งมีความบริสุทธิ์ประมาณ 85-95% ตัวอย่างวัตถุดิบเหล่านี้ตามธรรมชาติ ได้แก่ หินปูน (Limestone), ชอล์ก (chalk) และดินขาว (Marl)

2) วัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของดินดำ (Clay) เป็นวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบทางเคมีคือซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ), อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ตัวอย่างวัตถุดิบเหล่านี้ตามธรรมชาติ ได้แก่ ดินดำและดินดาน

3) วัตถุดิบปรับแต่งคุณสมบัติ เป็นวัตถุดิบที่ใช้สำหรับเพิ่มเติมสารประกอบบางตัวที่มีไม่เพียงพอในดินดำหรือดินดาน วัตถุดิบเหล่านี้ได้แก่ ททราย, แร่, เหล็กหรือดินลูกรังและดินอะลูมินา เป็นต้น

#### 2.2 กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์

กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ จำแนกได้ตามลักษณะของวัตถุดิบที่นำมาใช้ได้เป็น 2 วิธีด้วยกัน

1) กรรมวิธีการผลิตแบบเปียก (Wet Process) วัตถุดิบที่ใช้คือดินสอพองและดินเหนียวถูกนำมาผสมให้ได้สัดส่วนที่พอเหมาะตามต้องการ โดยเติมน้ำลงไปช่วยผสมแล้วบดให้ละเอียดก่อนนำเข้าหม้อเผา

2) กรรมวิธีการผลิตแบบแห้ง (Dry Process) วัตถุดิบส่วนใหญ่ที่ใช้ได้แก่ หินปูนและหินดินดาน จะถูกนำมาผสมแห้งๆให้ได้อัตราส่วนที่ต้องการแล้วบดให้ละเอียดก่อนที่จะนำเข้าไปในหม้อเผา

ซึ่งทั้ง 2 วิธีเมื่อส่วนผสมของวัตถุดิบบดได้ที่แล้วก็จะถูกป้อนเข้าสู่หม้อเผาซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นหม้อเผาแบบหมุน (Rotary kiln) อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาประมาณ 1,400-1,500 องศาเซลเซียส ซึ่งที่อุณหภูมิสูงนี้วัตถุดิบต่างๆจะถูกหลอมรวมกันเป็น clinker แล้วก็ทิ้งให้เย็นตัวลง จากนั้นนำเม็ดปูนที่เย็นตัวลงนี้มาบดให้ละเอียดอีกครั้งหนึ่งในขณะที่บดจะมีการเติมยิบซัมลงไปเล็กน้อยประมาณ 3-6 % เพื่อหวังเวลาการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ทำให้สะดวกต่อการนำไปใช้งานต่อไป

#### 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์

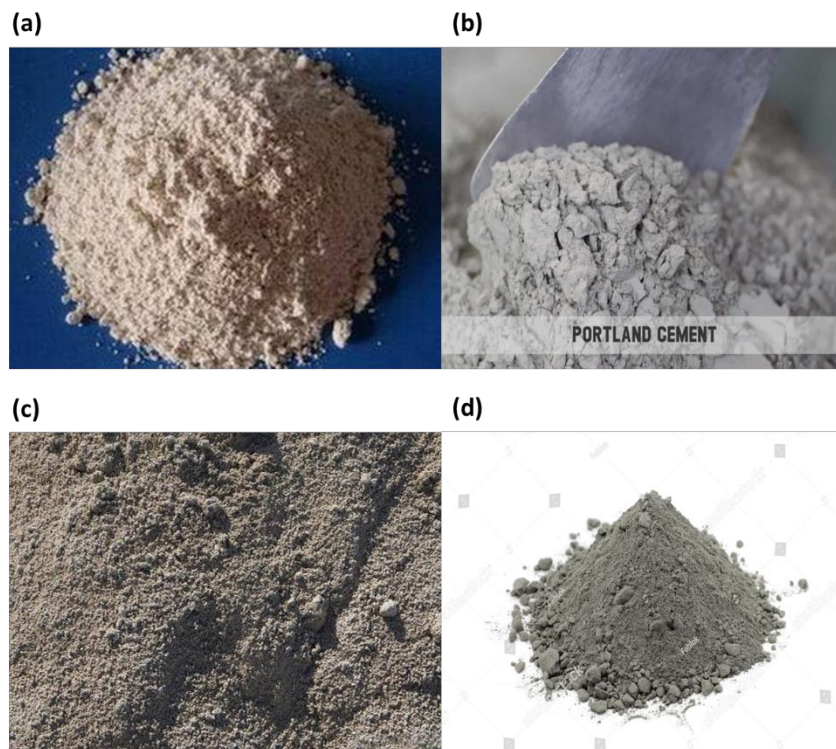
เมื่อวัตถุดิบต่างๆถูกเผาในหม้อเผา ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเป็นขั้นตอนดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 น้ำจะระเหยออกจากส่วนผสมทั้งหมด
- ขั้นตอนที่ 2 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) จะถูกขับออกจากหินปูนดินสอพองเหลือเพียง CaO

- ขั้นตอนที่ 3 เกิดการหลอมตัวของออกไซด์ ระหว่าง CaO จากหินปูนและดินสอพอง, ซิลิกา, อลูมินา และเหล็กออกไซด์จากดินดำหรือดินเหนียวและดินดาน
  - ขั้นตอนที่ 4 เกิดการรวมตัวทางเคมีของออกไซด์ต่างๆและเกิดการตกผลึกเมื่อทำให้เย็นตัวลง
- ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่คือ

- 1) ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ซึ่งรวมกันประมาณ 90% ของน้ำหนัก
- 2) ออกไซด์รอง ได้แก่ MgO, Na<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> และยิปซัม

ทั้งนี้สัดส่วนของสารประกอบในซีเมนต์นั้นจะมีส่วนผสมที่แตกต่างกันไปอยู่กับลักษณะการใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นซีเมนต์ที่ใช้ในการสร้างเสาคอนกรีต ซีเมนต์ที่ใช้ในการวางพื้นคอนกรีต ซีเมนต์ที่ใช้ในการฉาบ และซีเมนต์ที่ใช้ในการซ่อมแซมรอยแตกของคอนกรีต ดังรูปที่ 2.1



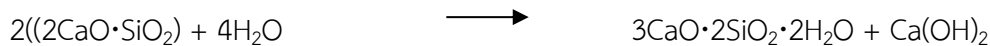
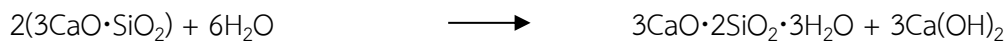
รูปที่ 2.1 ผงซีเมนต์แบบต่าง (a) ซีเมนต์ที่ใช้ในการสร้างเสาคอนกรีต(ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่รับแรงอัดได้สูง), (b) ซีเมนต์ที่ใช้ในการวางพื้นคอนกรีต(ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดา), (c) ซีเมนต์ที่ใช้ในการฉาบ, (d) ซีเมนต์ที่ใช้ในการซ่อมแซมรอยแตกของคอนกรีต ([www.decorapro.com](http://www.decorapro.com))

#### 2.4 ปฏิกริยาไฮเดรชัน (Hydration) ระหว่างผงซีเมนต์กับน้ำ

เมื่อซีเมนต์ผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์ เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบในซีเมนต์ โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะ คืออาศัยการละลาย ซึ่งส่วนผสมในซีเมนต์จะเกิดการละลายในน้ำบางส่วนก่อให้เกิดเป็นไอออนในสารละลายและไอออนในสารละลายนี้จะเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้เกิดสารประกอบขึ้นมาใหม่ และอีกลักษณะคือการเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็งซึ่งจะเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็ง โดยไม่จำเป็นต้องมีการละลาย เรียกปฏิกิริยาประเภทนี้ว่า

“Solid State Reaction” ซึ่งปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์นั้นจะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ พร้อม ๆ กัน โดยในช่วงแรกจะอาศัยการละลายและในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ผงซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิดจึงได้แยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักซีเมนต์แต่ละประเภท ดังนี้

1. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ ,  $C_2S$ ) แคลเซียมซิลิเกต ( $CaO \cdot 2SiO_2$ ) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิด  $Ca(OH)_2$  ที่ช่วยทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติเป็นต่างอย่างมาก ที่ pH ประมาณ 12.5 ช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริม และเกิด Calcium Silicate Hydrate (CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน ดังแสดงในสมการเคมีนี้



2. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ ) ปฏิกิริยาไฮเดรชันในขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นทันทีและก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของคอนกรีต ดังสมการ

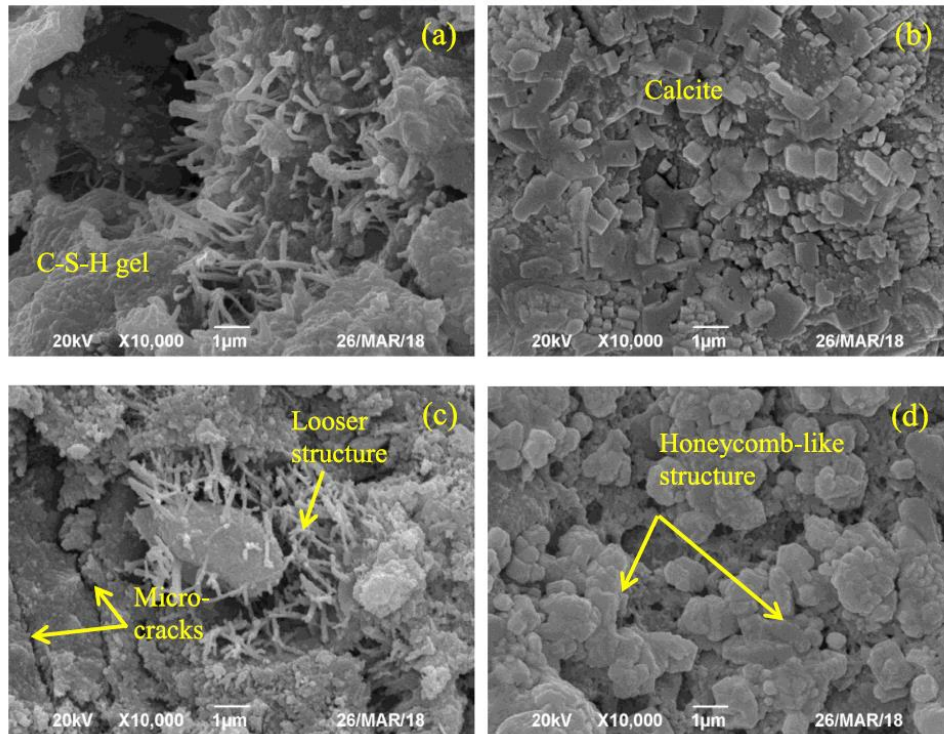


เพื่อหวังไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิปซัม ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) เข้าไปซึ่งจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับ  $C_3A$  ก่อให้เกิดขึ้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาค  $C_3A$  ดังสมการ



ซึ่งหลังจากที่ซีเมนต์เริ่มก่อตัวหลังจาก 24 ชั่วโมงไปแล้วพบว่าไอออนของซัลเฟตถูกใช้หมดไป อะลูมิเนียมและเหล็กออกไซด์จะเริ่มก่อตัว และสารประกอบ Ettringite ถูกเปลี่ยนไปเป็น Monosulphate ส่วน  $C_3S$  และ  $C_2S$  จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อไปได้ CSH ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยนั้นจะไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์ทำให้ความพรุนของโครงสร้างลดลงในระยะยาว

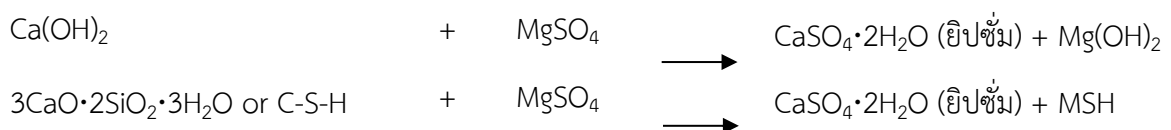
ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ได้แก่ อายุของเพลสต์โดยปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดมากสุดในช่วงแรกของการแข็งตัวของซีเมนต์, องค์ประกอบของซีเมนต์, ความละเอียดของซีเมนต์ โดยซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูงจะมีพื้นที่ผิวที่จะสัมผัสกับน้ำมาก และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) โดยงานวิจัยนี้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะใช้ในหน่วยความเข้มข้น %v/v (ให้สอดคล้องกับการผสมซีเมนต์ใช้ในงานก่อสร้างจริง) ซึ่งในช่วงต้นอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะไม่มีผลกระทบในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่จะมีผลอย่างมากในการเกิดปฏิกิริยาในช่วงหลังโดยที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเฉลี่ยจะลดลงแสดงให้เห็นว่าน้ำปริมาณมากเกินไปจะส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและคุณสมบัติของคอนกรีต เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันโครงสร้างของคอนกรีตจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงดังรูปที่ 2.2 <sup>13</sup>



รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างของคอนกรีตที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)<sup>13</sup> (a) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) 0.30 ที่อุณหภูมิห้อง (b) อัตราส่วนน้ำ(w/c) 0.30 สภาวะ CO<sub>2</sub> curing ที่อุณหภูมิห้อง, (c) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) 0.30 ที่อุณหภูมิสูง และ (d) อัตราส่วนน้ำ(w/c) 0.30 สภาวะ CO<sub>2</sub> curing ที่อุณหภูมิสูง

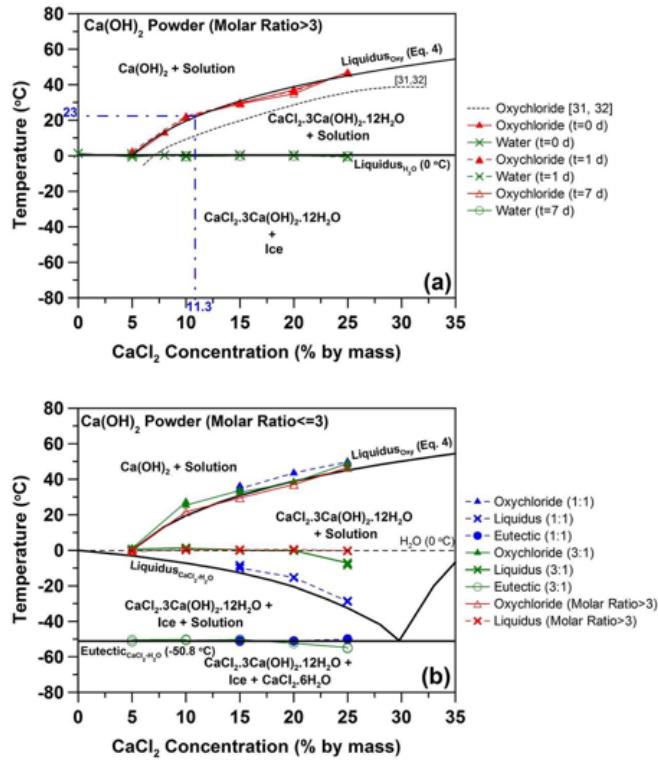
## 2.5 ความเสียหายของคอนกรีตจากน้ำทะเล

ความเสียหายของคอนกรีตในน้ำทะเลเนื่องมาจากไอออนของซัลเฟตและคลอไรด์ ไอออนของซัลเฟต โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากสารประกอบแมกนีเซียมซัลเฟต(MgSO<sub>4</sub>) จะส่งผลต่อโครงสร้างหลักของคอนกรีต เกิดการแลกเปลี่ยนไอออน ดังสมการ



เมื่อ MSH คือ แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Magnesium Silicate Hydrate) เป็นสารประกอบที่ไม่มีความสามารถในการประสานหรือยึดเหนี่ยวจึงทำให้โครงสร้างคอนกรีตเกิดความเสียหาย

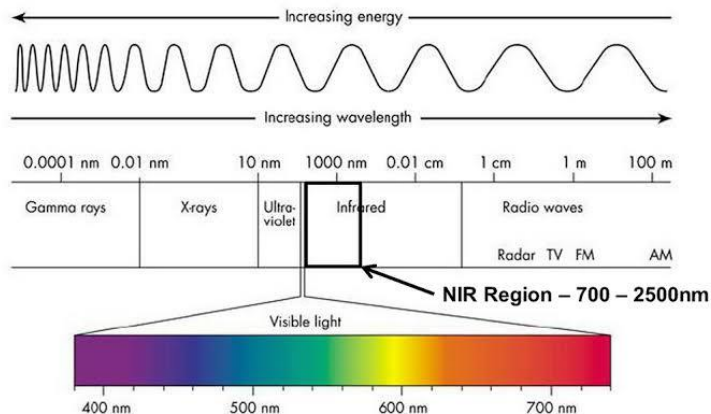
ในขณะที่ไอออนของคลอไรด์จะซึมเข้าทำอันตรายต่อเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในเนื้อคอนกรีต คอนกรีตในน้ำทะเลอาจถูกทำให้เสียหาย ความทนทานของคอนกรีตในน้ำทะเลจะขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญคือ ความหนาแน่นของคอนกรีต คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) 0.45-0.50 รวมทั้งการเทลงแบบและการอัดแน่นอย่างดีจะมีความหนาแน่นมาก รวมถึงปริมาณสารประกอบ Ca(OH)<sub>2</sub> ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับคลอไรด์ในน้ำทะเลเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของ CaCl<sub>2</sub>·3Ca(OH)<sub>2</sub>·12H<sub>2</sub>O ส่งผลทำให้โครงสร้างหลักของแคลเซียมซิลิเกตนั้นยังไม่ถูกทำลายเป็นการรักษาสภาพของคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3<sup>14</sup> ผลกราฟปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  กับคลอไรด์ในน้ำทะเลเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของ  $\text{CaCl}_2 \cdot 3\text{Ca(OH)}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  (a) อัตราส่วน  $\text{Ca(OH)}_2 : \text{CaCl}_2$  มากกว่า 3, (b) อัตราส่วน  $\text{Ca(OH)}_2 : \text{CaCl}_2$  น้อยกว่าเท่ากับ 3

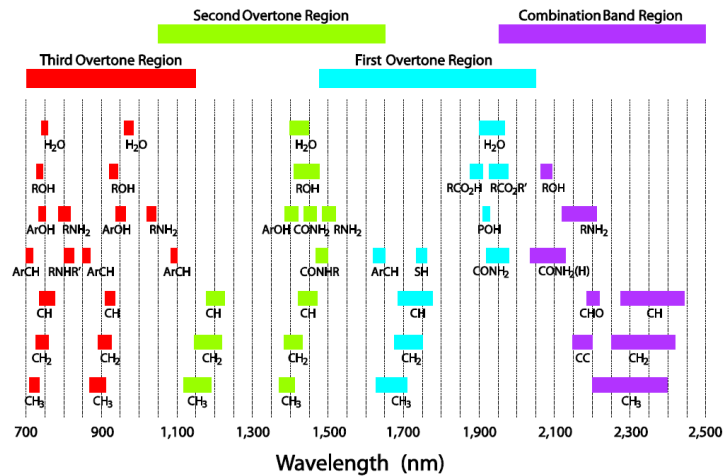
### 2.6 เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Near Infrared Spectroscopy ; NIR) เป็นเทคนิคที่ใช้หลักการการดูดกลืนแสงของตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 700 – 2500 นาโนเมตร หรือ ในช่วงเลขคลื่น 4000 – 14285  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นช่วงรังสีที่อยู่ระหว่างรังสีอัลตราไวโอเล็ตและรังสีอินฟราเรดดังแสดงดังรูปที่ 2.4



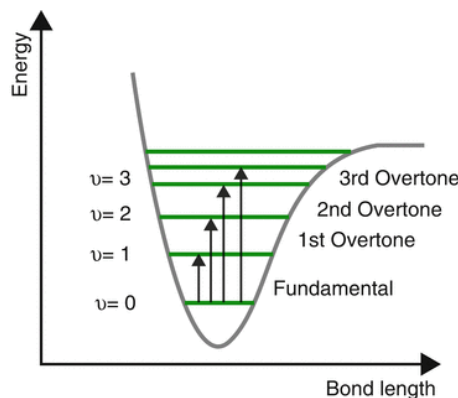
รูปที่ 2.4 ช่วงแสงที่มีความยาวคลื่นย่านเนียร์อินฟราเรด (www.bbbsales.com)

หลักการของเทคนิคนี้คือรังสีอินฟราเรดจากแหล่งกำเนิดจะถูกดูดกลืนเข้าไปยังตัวอย่างที่จะทำการตรวจวัดโดยแสงที่ถูกดูดกลืนเข้าไบนั้นจะกระตุ้นหมู่ฟังก์ชันและหมู่ข้างเคียง (Neighboring group) ในโมเลกุลให้เกิดการสั่นทั้งการยืดหด (Stretching) และการเปลี่ยนมุม (Bending) ช่วงความถี่โอเวอร์โทน (Overtones) และคอมบิเนชัน (Combination) ของหมู่ฟังก์ชัน O-H, C-H, N-H และ C=O ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันหลักของสารอินทรีย์ดังแสดงดังรูปที่ 2.5

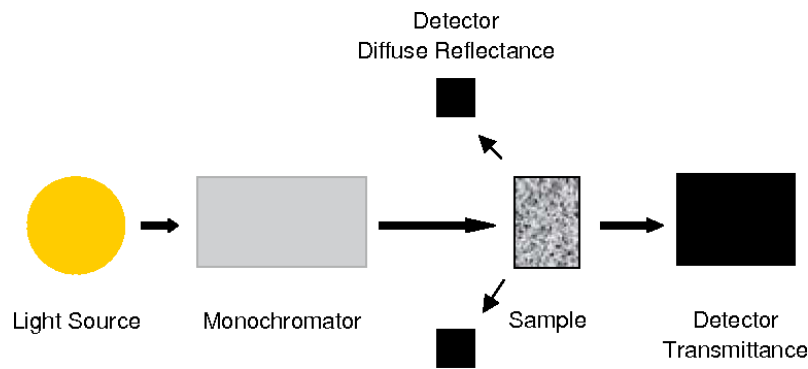


รูปที่ 2.5 แถบการดูดกลืนแสงของหมู่ฟังก์ชันและหมู่ข้างเคียงในช่วงความยาวคลื่น 700 – 2500 นาโนเมตร (www.ipgphotonics.com)

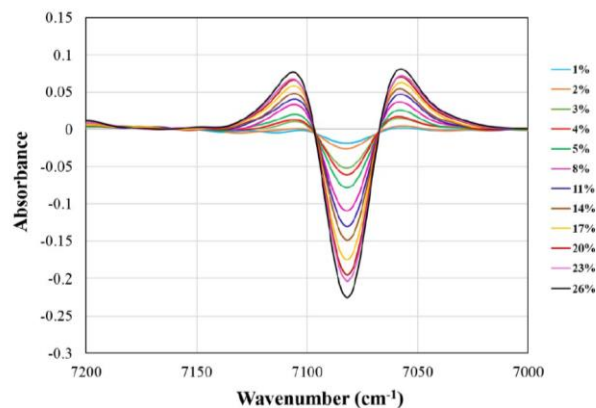
โดยการสั่นของหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุล (Molecular vibrations) เกิดจากอิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจากระดับพลังงานของการสั่นในโมเลกุลที่สถานะพื้น (Ground state) ไปยังระดับพลังงานที่สูงขึ้น ซึ่งอิเล็กตรอนสามารถเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงาน (Energy level) ของการสั่นโดยมีการเปลี่ยนแปลงเลขควอนตัม (Vibration quantum number) มากกว่า 1 ได้ หรือที่เรียกว่าโอเวอร์โทน (Overtone) ดังแสดงดังรูปที่ 2.6 แล้วทำการตรวจวัดคลื่นแสงที่ไม่ถูกดูดกลืนที่ความยาวคลื่นต่างๆหรือเป็นคลื่นแสงที่สะท้อนกลับออกมาจากตัวอย่างแล้วประมวลผลเป็นค่าการดูดกลืนแสงดังแสดงดังรูปที่ 2.7 ซึ่งเกิดเป็นสเปกตรัมที่มีลักษณะเฉพาะตัวดังแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงอินฟราเรด (Müllertz, A. (n.d.). *Analytical Techniques in the Pharmaceutical Sciences*.)



รูปที่ 2.7 หลักการของ NIR Spectroscopy (www.semanticscholar.org)



รูปที่ 2.8 เนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมแบบ 2<sup>nd</sup> derivative ของสารประกอบ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ที่ wavenumber  $7082 \text{ cm}^{-1}$

แม้หลักการของเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจะสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงปริมาณ (Quantitative analysis) และเชิงคุณภาพ (Qualitative analysis) ได้อย่างรวดเร็วโดยไม่ต้องมีการเตรียมหรือทำลายตัวอย่างก่อนการทดสอบแต่การใช้งานด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ยังมีข้อจำกัดคือไม่สามารถแสดงผลได้ทันทีเหมือน Classical spectrochemical methods อื่นๆ เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากเนียร์อินฟราเรดจะอยู่ในรูปของสเปกตรัมที่มีรายละเอียดของข้อมูลมาก ทำให้ไม่สามารถแปลผลคุณลักษณะต่างๆ ของตัวอย่างที่นำมาศึกษาได้ทันที ต้องนำเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมที่ได้มาผ่านวิธีการทางสถิติและหลักการทางคณิตศาสตร์เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลก่อนที่จะนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมกับค่าคุณลักษณะของตัวอย่างที่จะทำการวิเคราะห์

## 2.7 รูปแบบการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

รูปแบบการตรวจวัดด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีนั้นมีหลากหลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละรูปแบบจะแตกต่างกันเล็กน้อยที่หลักการในการวางตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง (Light source) และตัว

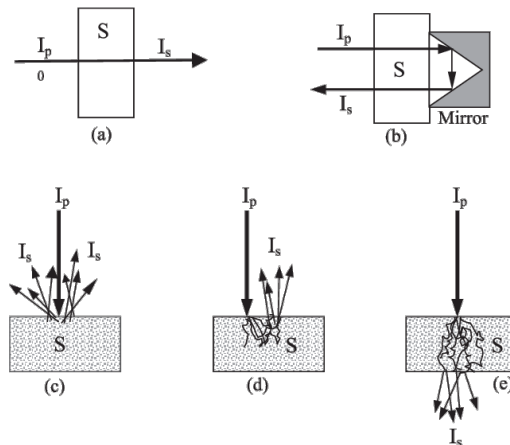


ตรวจวัด (Detector) โดยรูปแบบหลักๆของการตรวจวัดด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีมีดังนี้และจะแสดงดังรูปที่ 2.9

1.) รูปแบบสะท้อน (Reflectance) เป็นรูปแบบที่ง่ายต่อการจัดวางตัวอย่างที่สุด เนื่องจากเป็นรูปแบบที่ให้แสงจากแหล่งกำเนิดส่องไปยังวัตถุ เพื่อให้แสงเกิดการกระจายลงไปบริเวณพื้นผิวของวัตถุบางส่วน โดยแสงที่แพร่ไปยังวัตถุจะเกิดอันตรกิริยากับหมู่ฟังก์ชันจากนั้นจะสะท้อนกลับขึ้นสู่ตัวตรวจวัด ถึงรูปแบบการสะท้อนนี้จะเหมาะกับตัวอย่างที่แสงไม่สามารถส่องผ่านได้แต่ก็ยังมีข้อจำกัดคือจะเกิดการสะท้อนแค่บริเวณพื้นผิวเท่านั้น ดังนั้นถ้าอยากให้แสงเกิดการแพร่เข้าไปในตัวอย่างต้องใช้รูปแบบ Interactance-Reflectance แทน

2.) รูปแบบการส่องผ่าน (Transmittance) เป็นรูปแบบที่นิยมใช้กับของเหลว โดยหลักการคือจะนำตัวอย่างบรรจุลงในคิวเว็ตแล้วให้แสงผ่านเข้าไป โดยจะมีแสงในบางช่วงที่มีความถี่ตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะในโมเลกุลเท่านั้นที่จะถูกดูดกลืนไป ทำให้แสงส่วนที่ไม่ถูกดูดกลืนจะผ่านไปยังตัวตรวจวัด

3.) รูปแบบการส่องผ่านสะท้อน (Transflectance) เป็นการส่งคลื่นผ่านตัวอย่าง ซึ่งโดยปกติตัวอย่างที่เหมาะสมกับรูปแบบนี้จะเป็นของเหลว โดยจะมีหลักการคล้ายกับรูปแบบการส่องผ่าน (Transmittance) แต่เทคนิคนี้แสงจะเดินทางผ่านตัวอย่าง 2 ครั้ง โดยเมื่อแสงผ่านตัวอย่างไปแล้วจะถูกสะท้อนกลับไปด้วยอีกครั้ง แล้วถึงเดินทางไปยังตัวตรวจวัด



รูปที่ 2.9 รูปแบบในการวัดของเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

(a) Transmittance (b) Transflectance (c) Diffuse reflectance (d) Interactance  
(e) Transmittance through scattering medium. (www.researchgate.net)

## 2.8 Standard Normal Variate (SNV)

เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ปรับเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมให้ปกติ โดยการลดการกระจายและผลกระทบจากการเลื่อนของฐานสเปกตรัม ซึ่งเทคนิคนี้จะต้องทำที่ละสเปกตรัมจนครบทุกสเปกตรัมในฐานข้อมูล ซึ่งมีสูตรดังนี้

$$a_{ij}(SNV) = \frac{a_{ij} - \bar{x}_i}{SDev}$$

โดย	$i$	คือ ลำดับของสเปกตรัม
	$j$	คือ ลำดับของค่า Reflectance ในสเปกตรัมลำดับที่ $i$
	$a_{ij}(\text{SNV})$	คือ ค่าของสเปกตรัมที่ผ่านการทำ SNV แล้ว
	$a_{ij}$	คือ ค่าของสเปกตรัมที่วัดได้
	$\bar{x}_i$	คือ ค่าเฉลี่ยของค่า Reflectance ในสเปกตรัมลำดับที่ $i$
	$SDev$	คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Reflectance ในสเปกตรัมลำดับที่ $i$

## 2.9 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะใช้สัญลักษณ์  $R$  แทนสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของกลุ่มตัวอย่าง โดยเป็นค่าที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนอง ( $y$ ) ในที่นี้คือค่าปริมาณ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  และตัวแปรอิสระ ( $y_{\text{prediction}}$ ) คือค่าการทำนายปริมาณ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  หากค่าที่คำนวณได้มีค่าเข้าใกล้ 1 หมายความว่า ค่าตอบสนอง ( $y$ ) และตัวแปรอิสระ ( $y_{\text{prediction}}$ ) มีความสัมพันธ์กันมาก แสดงว่าสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองสามารถทำนายค่าที่ต้องการวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R$ ) มายกกำลังสองจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) คือค่าที่แสดงอิทธิพลของตัวแปรอิสระ ( $y_{\text{prediction}}$ ) ที่มีต่อตัวค่าตอบสนอง ( $y$ ) ซึ่งเป็นการบอกสัดส่วนที่ตัวแปรอิสระ ( $y_{\text{prediction}}$ ) สามารถอธิบายความแปรผันของค่าตอบสนอง ( $y$ ) ได้ หากค่า  $R^2$  มีค่าเข้าใกล้ 1 มากแสดงว่าการทำนายค่าตอบสนอง ( $y$ ) มีค่าที่สอดคล้องกัน

### บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่พัฒนาเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) บนพื้นผิวของคอนกรีตแบบแม่พิมพ์ สำหรับการประเมินคุณภาพของคอนกรีตโดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (NIR) สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยมีดังนี้

1. สารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) มีลักษณะเป็นผง จากบริษัท MAY & BAKER LTD DAGENHAM ENGLAND
2. สารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) มีลักษณะเป็นผง จากบริษัท Allied Chemicals International Company Limited
3. คอนกรีตถุงตราฟ้าง์ เบอร์ 400 GP น้ำหนัก 40 กิโลกรัม
4. เกลื่อน้ำทะเล เกลือสำหรับปลาและปะการัง Aquariuma ReefSaltMixed

#### 3.1 สัญญาณเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ )

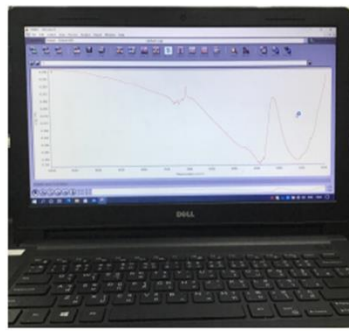
ในการดูสัญญาณเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี เริ่มต้นด้วยการเตรียมสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  2 กรัม ใส่ในภาชนะทรงกระบอกปลายเปิดที่มีความสูงเท่ากับ 1.00 cm และพื้นที่ฐานเท่ากับ 12.6  $\text{cm}^2$  จนเต็ม จากนั้นวัดเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  ทั้งนี้เพื่อควบคุมการสะท้อนของแสงและการทะลุของแสงให้มีปริมาณเท่ากันในทุกตัวอย่าง จากนั้นวัดสัญญาณเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  ด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Near infrared spectrometer) รุ่น Thermo Scientific Nicolet iS5N ช่วงเลขคลื่นระหว่าง 4,000-10,000  $\text{cm}^{-1}$  โดยเริ่มต้นจากการเตรียมอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวัดเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของสารตัวอย่างผสมและซีเมนต์ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และสรุปขั้นตอนการเตรียมแสดงดังรูปที่ 3.2

- โดยจะทำการตรวจวัดโดยใช้สภาวะดังนี้
  - Mode: Reflection
  - Intensity:  $\text{Log}(1/\%R)$
  - Number of scans: 32
  - Laser power: 5 mW
  - smooth 9



01

เครื่อง NIR spectrometer  
Thermo Scientific Nicolet



02

เครื่องคอมพิวเตอร์



03

เครื่องสำรองไฟ  
Micropower LCD line Interactive UPS



04

ทองคำ



05

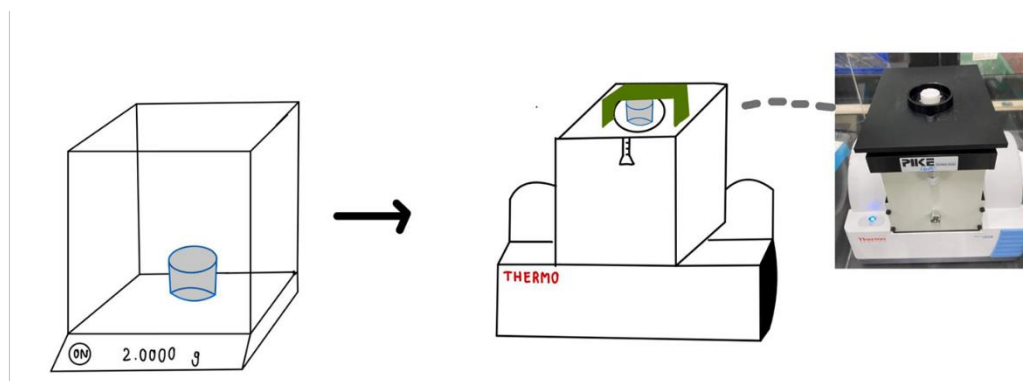
อุปกรณ์วาง Aperture  
สำหรับวัดตัวอย่าง



06

กระดาษสำหรับใช้ทำความสะอาด

### รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวัดเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัม



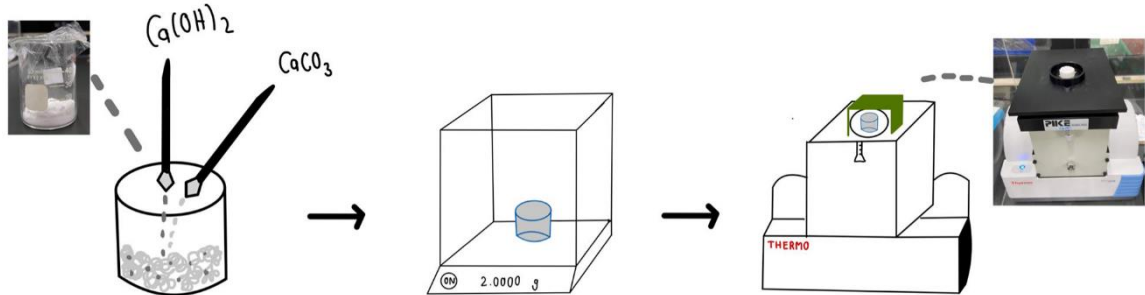
ชั่งสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  2.000 กรัม

วัดปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ด้วยเครื่อง NIR spectroscopy  
และเอากล่องมาปิดคลุมแสงเพื่อไม่ให้มีแสงออกมา

### รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมการวัดสัญญาณเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) แบบ reflection mode

### 3.2 การวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

ประสิทธิภาพของเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณของสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในสารผสมระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) กับแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ทำได้โดย เตรียมสารผสมระหว่างสารประกอบ  $\text{CaCO}_3$  กับ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  น้ำหนัก 2 กรัมที่ความเข้มข้น  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ที่ 0.1, 0.5, 0.7, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, และ 10 %w/w ตามลำดับ ในการวัดสัญญาณแต่ละครั้งจะนำสารผสมดังกล่าวใส่ในภาชนะทรงกระบอกปลายเปิดที่มีความสูงเท่ากับ 1.00 cm และพื้นที่ฐานเท่ากับ  $12.6 \text{ cm}^2$  จนเต็ม ทั้งนี้เพื่อควบคุมการสะท้อนของแสงและการทะลุของแสงให้มีปริมาณเท่ากันในทุกตัวอย่าง จากนั้นวัดสัญญาณเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของสารผสมตัวอย่าง ด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Near infrared spectrometer) รุ่น Thermo Scientific Nicolet iS5N ช่วงเลขคลื่นระหว่าง  $4000\text{-}10000 \text{ cm}^{-1}$  โดยใช้สภาวะในการวัดเหมือนกับในการทดลองหัวข้อ 3.1 การเตรียมอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวัดเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของสารผสมระหว่าง  $\text{CaCO}_3$  กับ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  สรุปขั้นตอนการเตรียมดังรูปที่ 3.3



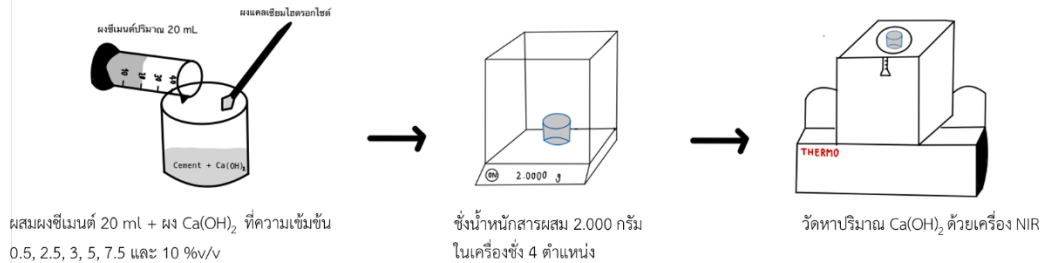
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ในการวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์สารผสมระหว่างสารประกอบ  $\text{CaCO}_3$  กับ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  น้ำหนัก 2 กรัม ที่มีช่วงความเข้มข้น 0.1-10 %w/w

### 3.3 การวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

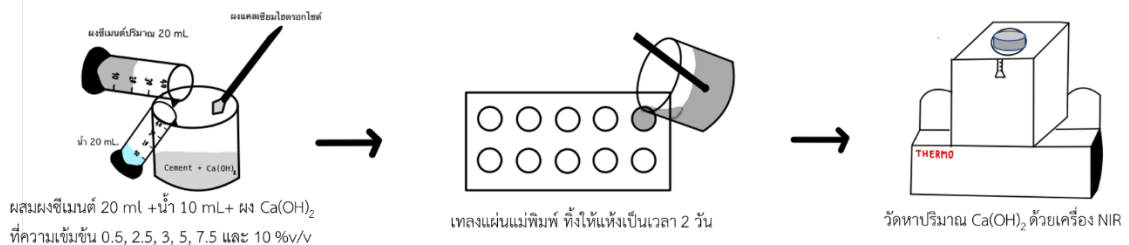
ประสิทธิภาพของเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ในการวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ในซีเมนต์ ทำได้โดยควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) อยู่ที่ 1:2 หรือ 0.5 แล้วแยกเตรียม 2 ส่วน คือผงซีเมนต์กับบล็อกคอนกรีต ในการเตรียมผงซีเมนต์ทำได้โดยเตรียมสารผสมระหว่างซีเมนต์กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) น้ำหนักรวม 2 กรัม โดยมีความเข้มข้นของ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ที่ 0.5, 2.5, 3, 5, 7.5 และ 10 %v/v ตามลำดับการวัดสัญญาณแต่ละครั้งจะนำสารผสมดังกล่าวใส่ในภาชนะทรงกระบอกปลายเปิดที่มีความสูงเท่ากับ 1.00 cm และพื้นที่ฐานเท่ากับ  $12.6 \text{ cm}^2$  จนเต็ม ทั้งนี้เพื่อควบคุมการสะท้อนของแสงและการทะลุของแสงให้มีปริมาณเท่ากันในทุกตัวอย่าง ถัดมาในการเตรียมบล็อกคอนกรีต ทำได้โดย นำผงซีเมนต์ 20 ml ที่ผสมกับ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ที่ความเข้มข้น %v/v ดังข้างต้นมาเติมน้ำ 10 ml (ให้เป็น w/c ที่ 1:2) จากนั้นเทลงแม่พิมพ์ที่เตรียมไว้แล้วทิ้งให้แห้งเป็นเวลา 2-3 วัน แล้ววัดสัญญาณเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของบล็อก

คอนกรีตด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Near infrared spectrometer) รุ่น Thermo Scientific Nicolet iS5N ช่วงเลขคลื่นระหว่าง  $4000-10000\text{ cm}^{-1}$  โดยใช้สภาวะในการวัดเหมือนกับในการทดลองหัวข้อ 3.1 การเตรียมอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวัดเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมในซีเมนต์ สรุปขั้นตอนการเตรียมดังรูปที่ 3.4

#### ผงซีเมนต์



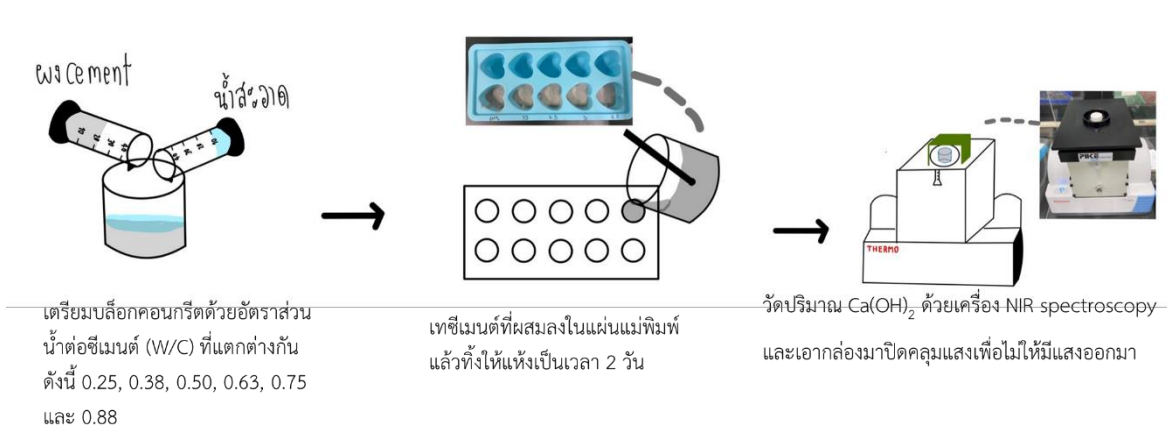
#### บล็อกคอนกรีต



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมวิธีทดสอบประสิทธิภาพของเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ในการวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์

### 3.4 ศึกษาปริมาณน้ำส่งผลต่อปริมาณ $\text{Ca(OH)}_2$ ในคอนกรีตเมื่อทดสอบด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

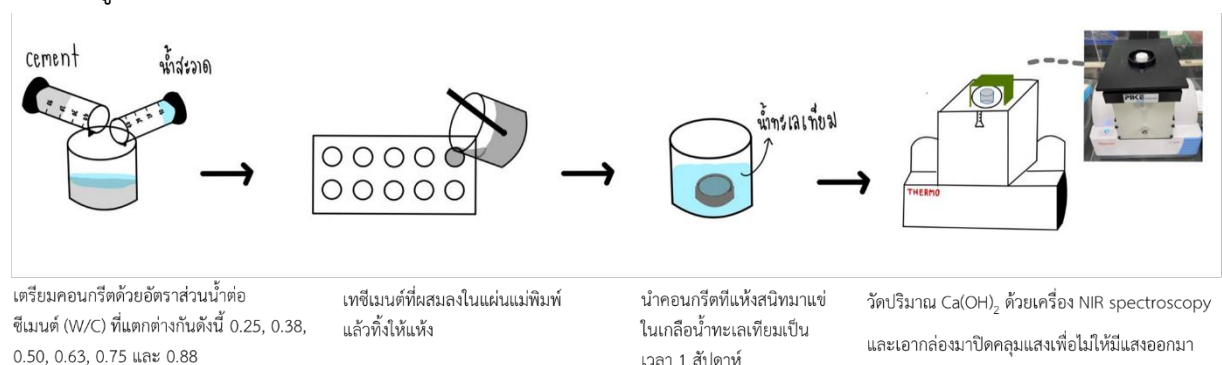
ประสิทธิภาพของเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ในการวิเคราะห์ปริมาณน้ำส่งผลต่อปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ในคอนกรีต ทำได้โดย เตรียมอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) ที่แตกต่างกัน ดังนี้ 0.25, 0.38, 0.50, 0.63, 0.75 และ 0.88 ลงในแผ่นแม่พิมพ์แล้วทิ้งให้แห้งเป็นเวลา 2-3 วัน จากนั้นวัดสัญญาณเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของคอนกรีตตัวอย่าง นำด้านที่ผิวเรียบมาวัดเนื่องจากต้องการควบคุมการสะท้อนของแสงและการทะลุของแสงให้มีปริมาณเท่ากันในทุกตัวอย่าง แล้ววัดด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Near infrared spectrometer) รุ่น Thermo Scientific Nicolet iS5N ช่วงเลขคลื่นระหว่าง  $4000-10000\text{ cm}^{-1}$  โดยใช้สภาวะในการวัดเหมือนกับในการทดลองหัวข้อ 3.1 การเตรียมอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวัดเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมในคอนกรีตที่ w/c แตกต่างกัน สรุปขั้นตอนการเตรียมดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการเตรียมบล็อกคอนกรีตเพื่อศึกษาปริมาณน้ำส่งผลต่อปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  เมื่อทดสอบด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

### 3.5 วิเคราะห์เชิงปริมาณของสารประกอบ $\text{Ca(OH)}_2$ ในคอนกรีตที่ถูกแช่ในน้ำทะเลด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

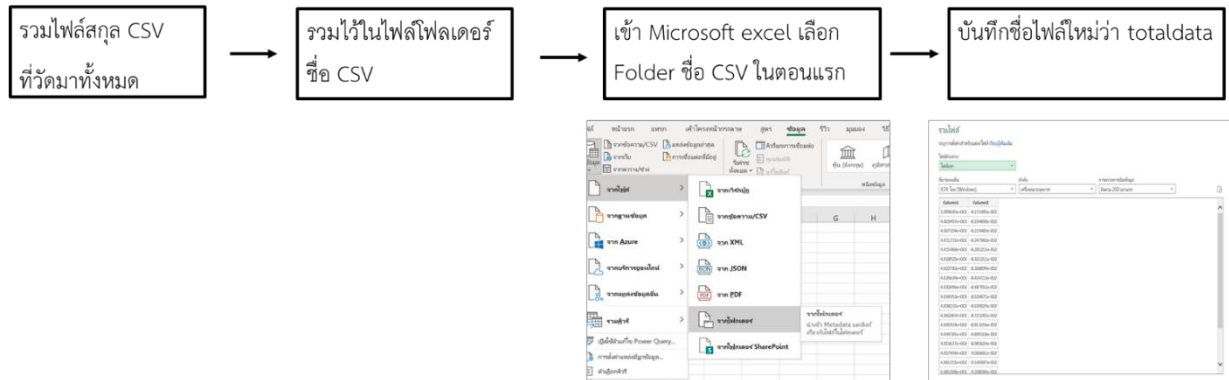
ประสิทธิภาพของเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ในการวิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ถูกแช่ในน้ำทะเลเทียม ทำได้โดย เตรียมอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) ที่แตกต่างกันดังนี้ 0.25, 0.38, 0.50, 0.63, 0.75 และ 0.88 %v/v ลงในแผ่นแม่พิมพ์แล้วทิ้งให้แห้งเป็นเวลา 2-3 วัน หลังจากนั้นนำบล็อกคอนกรีตทุกตัวอย่างไปแช่ในน้ำทะเลเทียมเป็นเวลา 1 สัปดาห์ ตากให้แห้งแล้ววัดสัญญาณเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของบล็อกคอนกรีตตัวอย่างในน้ำทะเล นำด้านที่ผิวเรียบมาวัดเนื่องจากต้องการควบคุมการสะท้อนของแสงและการทะลุของแสงให้มีปริมาณเท่ากันในทุกตัวอย่าง แล้ววัดด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Near infrared spectrometer) รุ่น Thermo Scientific Nicolet iS5N ช่วงเลขคลื่นระหว่าง  $4000-10000 \text{ cm}^{-1}$  โดยใช้สภาวะในการวัดเหมือนกับในการทดลองหัวข้อ 3.1 การเตรียมอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวัดเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมในบล็อกคอนกรีตที่ถูกแช่ในน้ำทะเลเทียมเป็นเวลา 1 สัปดาห์ สรุปขั้นตอนการเตรียมดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการเตรียมการวิเคราะห์หาปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ในบล็อกคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเทียมเป็นเวลา 1 สัปดาห์

### 3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลจากเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์

เมื่อทำการหาปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ในซีเมนต์ด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์จะได้ข้อมูลของสเปกตรัมซึ่งเป็นไฟล์นามสกุล .CSV ซึ่งสามารถเปิดได้ด้วยโปรแกรม Microsoft excel แต่เนื่องจากไฟล์ที่ได้ 1 ไฟล์คือ 1 เส้นสเปกตรัมดังนั้นจึงต้องมีการจัดการข้อมูลก่อนนำไปวิเคราะห์ต่อโดยการจัดเรียงสเปกตรัม (Spectrum) ที่ได้ให้สอดคล้องกับตำแหน่งที่ทำการวัด (Position) ครั้งที่ทำการวัดซ้ำ (Repetition), ค่ามาจากเลขคลื่น (Wavenumber) ทำได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การจัดการข้อมูลหลังจากทำการตรวจวัดด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์

จากนั้นใช้โปรแกรม MATLAB (Matrix laboratory) เวอร์ชัน R2018a ในการปรับแต่งข้อมูลโดยทำการสร้างตัวแปรข้อมูล (Data) หลังจากนั้นทำการปรับข้อมูลด้วยเทคนิค Standard Normal Variate (SNV) แล้วนำข้อมูลที่ได้จากการปรับแล้วไปทำการวิเคราะห์ต่อไป ใช้โปรแกรม MATLAB เวอร์ชัน R2018a ในการวิเคราะห์ข้อมูล โดยได้กำหนดช่วงความถี่ มีการหาค่าเฉลี่ยของทั้งสเปกตรัม, ค่าเฉลี่ย  $\log(1/R)$  ที่เลขคลื่น  $7081.33 \text{ cm}^{-1}$ , หาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D) สำหรับการใช้นำปริมาณ  $\log(1/R)$  ของ  $\text{Ca(OH)}_2$  โดยความถูกต้องและความแม่นยำในการทำนายของสมการสอบเทียบที่สร้างขึ้นจะถูกประเมินด้วยค่าทางสถิติคือ Correlation coefficient ( $R$ )

### 3.7 เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

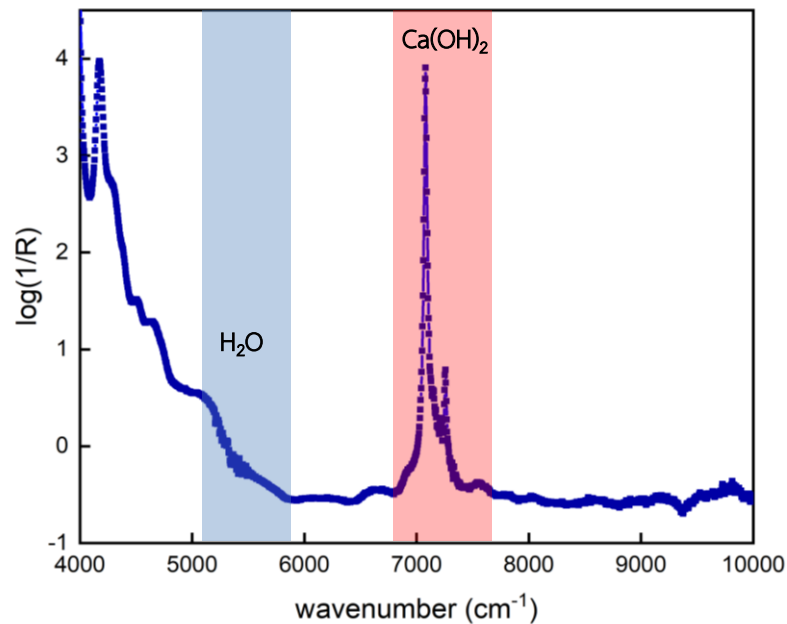
ลักษณะพื้นผิว ขนาด รูปร่างของวัสดุและโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนของน้ำต่อผงซีเมนต์ที่แตกต่างกัน ถูกตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JEOLJSM-6501A โดยใช้ลำอิเล็กตรอนพลังงาน 10-15kv ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ใช้กำลังขยายที่  $\times 2000$  และ  $\times 5000$  เท่า ในงานวิจัยนี้เราเปรียบเทียบบล็อกคอนกรีตในหัวข้อที่ 3.4 และบล็อกคอนกรีตที่ถูกแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 1 สัปดาห์ตามหัวข้อที่ 3.5 เพื่อเปรียบเทียบดูโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปของทั้งสองสภาวะ



## บทที่ 4 ผลการวิจัย

### 4.1 สัญญาณเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )

สารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในซีเมนต์ที่ช่วยชะลอการสึกกร่อนของโครงสร้างคอนกรีต การตรวจวัดหาปริมาณ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ในซีเมนต์จึงมีความสำคัญสำหรับการประเมินคุณภาพของซีเมนต์ที่ทนต่อการกัดกร่อน โดยลักษณะเฉพาะสัญญาณเนียร์อินฟราเรดของสารประกอบ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  มีความจำเป็นในการใช้เป็นตัวอ้างอิงเพื่อตรวจสอบปริมาณของสารประกอบ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของปริมาณโดยอ้างอิงจากสัญญาณเนียร์อินฟราเรดของสารประกอบ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ในช่วงความถี่ที่เห็นการเปลี่ยนแปลง ซึ่งสัญญาณเนียร์อินฟราเรดที่ได้นั้นจะทำการปรับข้อมูลด้วยเทคนิค Standard Normal Variate (SNV) เพื่อลดการรบกวนของสัญญาณอื่น ๆ จากวิธีการวัดแบบสะท้อน (Reflection) ที่ไม่เกี่ยวข้องกับการทดลอง และเป็นการลดสัญญาณพื้นฐาน (Baseline) ของสเปกตรัมสัญญาณเนียร์อินฟราเรดเฉลี่ยของสารประกอบ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ตั้งแต่ช่วงเลขคลื่น 4,000 - 10,000  $\text{cm}^{-1}$  แสดงดังรูปที่ 4.1



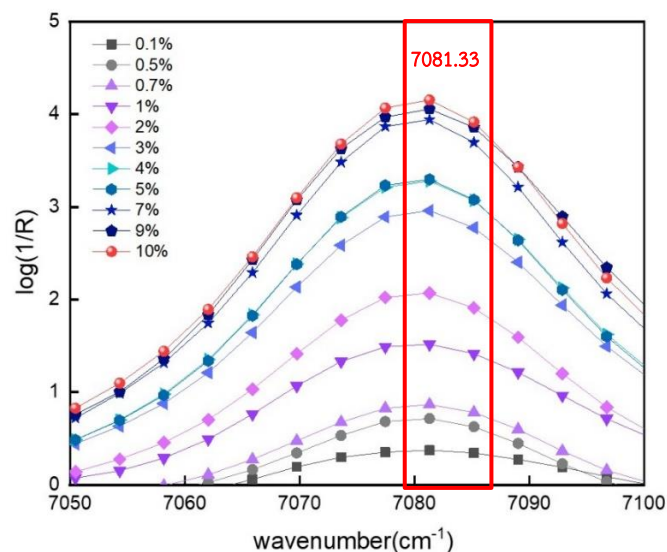
รูปที่ 4.1 สัญญาณเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ในช่วงเลขคลื่นระหว่าง 4,000 - 10,000  $\text{cm}^{-1}$

จากสัญญาณเนียร์อินฟราเรดของสารประกอบ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  พบว่าเลขคลื่นในช่วง 5200 กับ 7082  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงการสั่นของหมู่ OH ซึ่งในกรณีนี้ช่วงเลขคลื่น 5240-5260  $\text{cm}^{-1}$  เป็นช่วงเลขคลื่นที่ค่าสัญญาณเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมแสดงถึง 1<sup>st</sup> overtone ของน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) เนื่องจากการวัดหรือการเก็บสารตัวอย่างที่มีความชื้นในอากาศทำให้พบค่าสัญญาณการสั่น O-H stretching ของน้ำ และช่วงเลขคลื่น  $\sim 7081$   $\text{cm}^{-1}$  เป็นช่วงความถี่ที่ค่าสัญญาณเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมแสดงถึง 1<sup>st</sup> overtone O-H stretching ของหมู่ O-H ในสารประกอบ

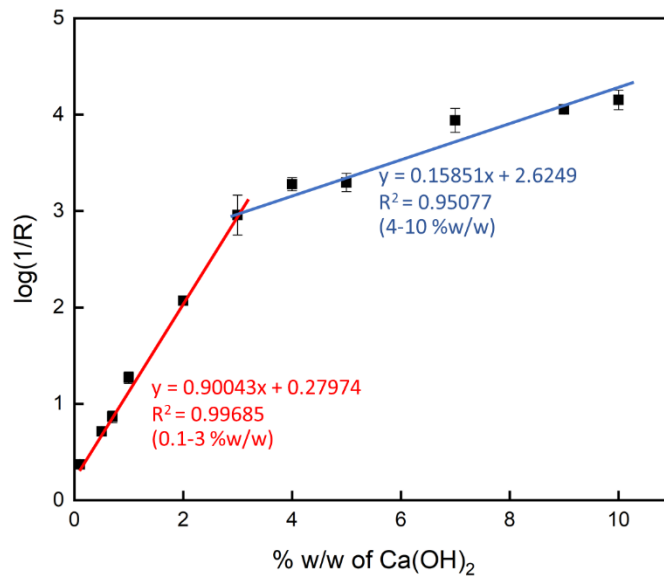
$\text{Ca(OH)}_2$  <sup>8</sup> จากการทดลองพบว่าช่วงเลขคลื่น 7050-7100  $\text{cm}^{-1}$  นั้นสอดคล้องกับปริมาณของสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  ในตัวอย่าง

#### 4.2 การวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

จากการทดลองในหัวข้อที่แล้วพบว่าเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  ค่าสัญญาณจะมีความเข้มมากที่สุดที่เลขคลื่น 7081.33  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะแสดงถึง 1<sup>st</sup> overtone O-H stretching ของหมู่ OH ในสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  ในการทดลองนี้ได้พยายามสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อแสดงว่าปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  สามารถตรวจสอบได้ด้วยสัญญาณเนียร์อินฟราเรดได้อย่างถูกต้อง โดยการทดลองนี้ได้เตรียมสารผสมระหว่าง  $\text{Ca(OH)}_2$  กับ  $\text{CaCO}_3$  ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ จากนั้นตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างสัญญาณเนียร์อินฟราเรดกับปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ในวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในสารผสมระหว่าง  $\text{Ca(OH)}_2$  กับ  $\text{CaCO}_3$  ที่ความเข้มข้น  $\text{Ca(OH)}_2$  ในหน่วยของ %w/w ที่ 0.1, 0.5, 0.7, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9 และ 10 ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี จากกราฟเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของสารผสมแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าในความเข้มของสัญญาณช่วงเลขคลื่น 7050-7100  $\text{cm}^{-1}$  จะเห็นการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมมากที่สุดที่เลขคลื่น 7081.33  $\text{cm}^{-1}$  และการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณนี้ขึ้นตรงกับปริมาณสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  เพราะเป็นสัญญาณของ 1<sup>st</sup> overtone O-H stretching ของหมู่ OH ในสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  เหมือนกับการทดลองในหัวข้อ 4.1 และเพื่อดูความเป็นไปได้ที่จะใช้ค่าความเข้มข้น (intensity) หรือ  $\log(1/R)$  ในการทำนายปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  จึงได้สร้างกราฟมาตรฐานเชิงปริมาณของความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเข้ม  $\log(1/R)$  สารผสมที่ใช้ความเข้มข้น  $\text{Ca(OH)}_2$  %w/w 0.1, 0.5, 0.7, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9 และ 10 ในช่วงความถี่ช่วงเลขคลื่น 7050-7100  $\text{cm}^{-1}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าได้กราฟเชิงปริมาณมาตรฐานที่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงได้ 2 ช่วง คือในช่วงแรกที่มีความเข้มข้น  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่ %w/w 0.1-3 ได้กราฟที่มีค่า  $R^2 = 0.99$  และช่วงที่สองที่มีความเข้มข้น  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่ %w/w 4 -10 ได้กราฟที่มีค่า  $R^2 = 0.95$



รูปที่ 4. 2 กราฟแสดงเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมระหว่างความเข้ม  $\log(1/R)$  ของสารผสม  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.5, 0.7, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9 และ 10 %w/w



รูปที่ 4.3 กราฟเชิงปริมาณมาตรฐานของความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเข้ม  $\log(1/R)$  ของ  $\text{Ca(OH)}_2$  กับ ความเข้มข้น  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่ 0.1, 0.5, 0.7, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9 และ 10 %w/w

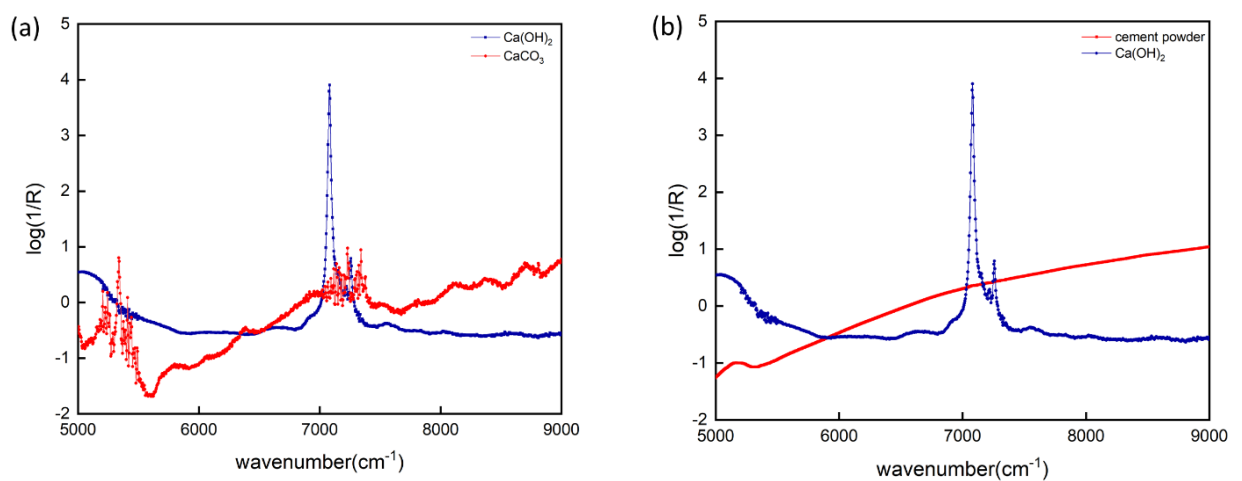
อีกทั้งยังพบว่าเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี(NIR) มีความไว (sensitivity) ในการวิเคราะห์ในแต่ละช่วงความเข้มข้นไม่เท่ากันซึ่งเมื่อดูจากค่าความชันของกราฟเชิงปริมาณมาตรฐานพบว่าในช่วงแรกที่มีความเข้มข้น  $\text{Ca(OH)}_2$  0.1 - 3 %w/w มีค่าความชันสมการเส้นตรง  $y = 0.90043x + 0.27974$  เมื่อ  $y$  เป็นค่าความเข้มของสัญญาณ  $\log(1/R)$  และ  $x$  เป็นความเข้มข้นของ  $\text{Ca(OH)}_2$  และในช่วงสองที่มีความเข้มข้น  $\text{Ca(OH)}_2$  %w/w 4, 5, 7, 9 และ 10 มีค่าความชันสมการเส้นตรง  $y = 0.15851x + 2.6249$  จากผลเบื้องต้นสามารถวิเคราะห์ได้ว่าเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสามารถตรวจวัดปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่มีปริมาณน้อยได้ดีกว่าระบบที่มี  $\text{Ca(OH)}_2$  ปริมาณมาก เมื่อพิจารณาจากความไวในการตรวจวัดจะมากกว่าเนื่องจากมีค่าความชันน้อยกว่าความชันของกราฟมาตรฐานในช่วงแรกประมาณ 5 เท่า เหตุที่เป็นเช่นนั้นอาจเนื่องมาจากค่าความเข้ม (intensity) หรือ  $\log(1/R)$  ที่วัดได้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากเพราะเข้าใกล้ค่าการดูดกลืนแบบ over-absorbed ของเครื่องมือในกรณีที่สารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  มีความเข้มข้นสูง และจากการสร้างกราฟมาตรฐานจากการวัดตัวอย่างสารผสมถึง 30 ครั้งต่อตัวอย่าง พบว่าผลที่ได้มีความเที่ยงสูง (พิจารณาจาก error bar ที่ต่ำ) เพราะมีค่าความแปรปรวนต่ำ (S.D.<sup>2</sup>) ยกเว้นในช่วงบริเวณความเข้มข้น  $\text{Ca(OH)}_2$  เท่ากับ 3.5 %w/w จะมีค่าความแปรปรวนที่มากกว่าความเข้มข้นอื่น ๆ เนื่องจากเป็นช่วงความเข้มข้นที่เป็นรอยต่อของกราฟมาตรฐานทั้ง 2 เส้น และมีการเปลี่ยนความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงตามกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer-Lambert law) ไปเป็นการดูดกลืนในช่วงการดูดกลืนแบบ over-absorbed

เพื่อเป็นการพิสูจน์ความใช้ได้ (validation) ของสมการเส้นตรงจากกราฟมาตรฐานทั้งสองเส้น โดยใช้สารผสมที่ความเข้มข้นของ  $\text{Ca(OH)}_2$  เท่ากับ 1.56 %w/w และ 2.34 %w/w และใช้สมการจากกราฟมาตรฐานในช่วงความเข้มข้น 0.1 - 3 %w/w (สมการเส้นตรง  $y = 0.90043x + 0.27949$ ) ในการทำนายความเข้มข้นของสารผสมดังกล่าว พบว่าจากสมการเส้นตรงสามารถทำนายความเข้มข้นของ  $\text{Ca(OH)}_2$  ได้ที่

1.68 %w/w และ 2.14 %w/w ตามลำดับ และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ เท่ากับ 7.69 และ 8.55 ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นของสารผสม  $\text{Ca(OH)}_2$  เท่ากับ 4.50 %w/w เมื่อใช้สมการเส้นตรง  $y = 0.15851x + 2.6249$  ทำนายพบว่าได้ค่าความเข้มข้นเป็น 4.35 %w/w มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ เท่ากับ 3.33 % ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นที่เตรียมจึงสรุปได้ว่าจากกราฟเชิงปริมาณมาตรฐานที่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงแบ่งได้ 2 เส้น และกราฟมาตรฐานเชิงปริมาณนี้สามารถนำมาใช้ทำนายปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  โดยใช้ค่าความเข้ม (intensity) หรือ  $\log(1/R)$  ได้โดยมีความผิดพลาดอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

#### 4.3 การวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

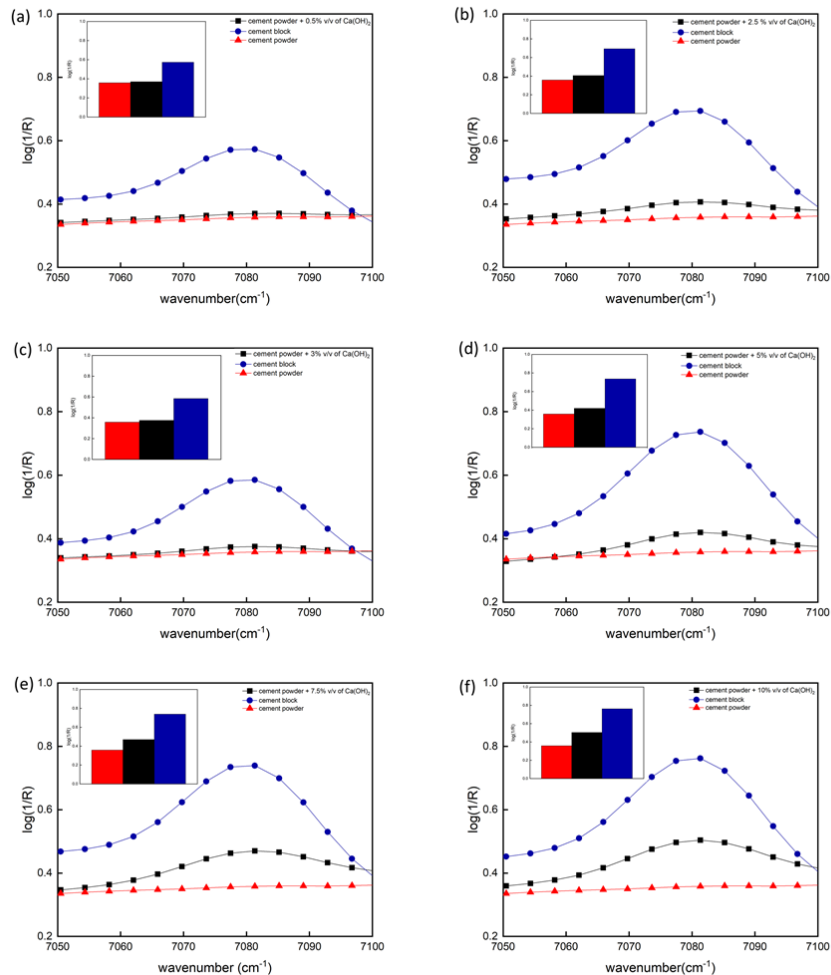
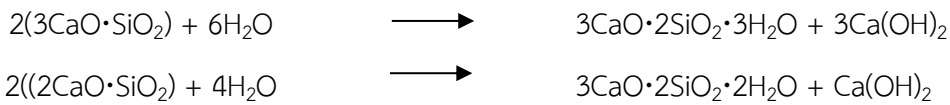
จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.2 ทำให้เราทราบว่าเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี สามารถใช้ตรวจวัดปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ในสารผสมระหว่าง  $\text{CaCO}_3$  กับ  $\text{Ca(OH)}_2$  ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อาจเนื่องด้วยสัญญาณเนียร์อินฟราเรดของสารประกอบ  $\text{CaCO}_3$  ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อในการวัดหาปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  เนื่องจากสารประกอบ  $\text{CaCO}_3$  มีหมู่ฟังก์ชันของ  $\text{V(CO)}$  ที่มีการสั่นแบบ 2<sup>nd</sup> overtone แตกต่างจาก  $\text{Ca(OH)}_2$  มีหมู่ฟังก์ชัน  $\text{V(OH)}$  1<sup>st</sup> overtone อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.4a ด้วยเหตุนี้เองในการทดลองเพื่อหาปริมาณสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  จึงต้องทำการตรวจสอบในเบื้องต้นว่าผงซีเมนต์ที่ได้ว่าไม่มีสัญญาณของสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่จะรบกวนการวิเคราะห์เชิงปริมาณในขั้นตอนต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 4.4b พบว่าในผงซีเมนต์ก่อนผสมน้ำที่จะเปลี่ยนเป็นคอนกรีตไม่มีสัญญาณของสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$



รูปที่ 4.4 (a) เนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมในช่วง wavenumber 5,000-9,000  $\text{cm}^{-1}$  ของสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  (เส้นสีน้ำเงิน) และ  $\text{CaCO}_3$  (เส้นสีแดง) (b) เนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  (เส้นสีน้ำเงิน) และผงซีเมนต์ (เส้นสีแดง)

จากรูปที่ 4.4b พบว่าผงซีเมนต์ก่อนผสมน้ำไม่มีสัญญาณรบกวนสัญญาณของสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  จึงได้ทำการใส่สารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่ 0.5, 2.5, 3, 5, 7.5 และ 10 %v/v ลงไปในผงซีเมนต์ก่อนการผสมน้ำเพื่อทำเป็นคอนกรีต จากนั้นแล้วเปรียบเทียบสัญญาณของสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่ผสมในผงซีเมนต์กับสัญญาณของสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่ได้จากบล็อกคอนกรีต ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีแสดงกราฟเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมดังรูปที่ 4.5 จากกราฟพบว่า ผงซีเมนต์ที่เดิมไม่มีสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  เมื่อ

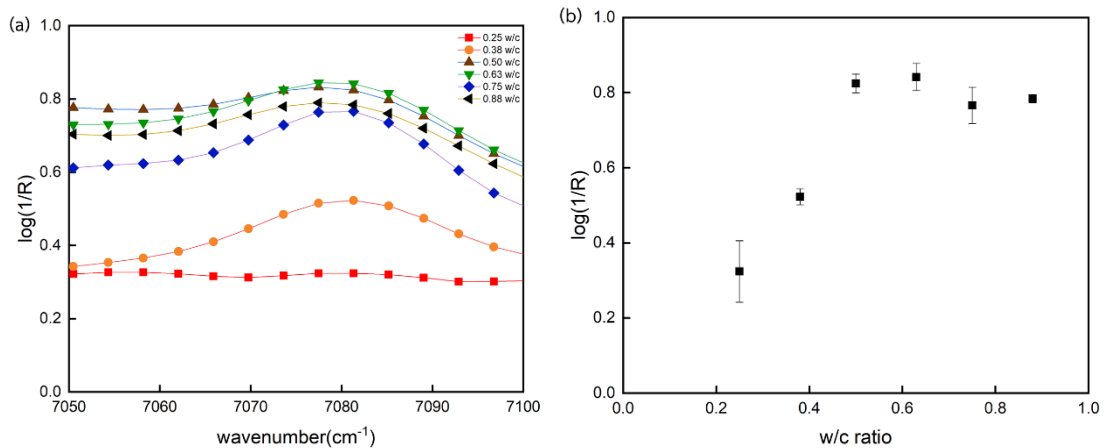
ผสมสารประกอบ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ก่อนการละลายน้ำทำเป็นคอนกรีตนั้นไม่มีสัญญาณของสารประกอบ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  เลย ในขณะที่เมื่อผสมผงซีเมนต์กับสารประกอบ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ด้วยสัดส่วนที่กำหนดนั้นมีความสำคัญของสารประกอบ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนที่ได้ผสมลงไปกับผงซีเมนต์ อย่างไรก็ตามเมื่อนำผงซีเมนต์ที่มีสารประกอบ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ไปผสมน้ำเพื่อทำเป็นคอนกรีต พบว่าค่าสัญญาณแสดงปริมาณ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  เพิ่มขึ้นมากอย่างมีนัยสำคัญในทุก ๆ การทดลอง ทั้งนี้เป็นการยืนยันว่าการที่ผงซีเมนต์ผสมกับน้ำแล้วกลายเป็นคอนกรีตนั้น นอกจากจะเกิดปฏิกิริยาเป็นแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2$ ) แล้วนั้นยังมีสารประกอบ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  เกิดขึ้นด้วยเช่นกันดังสมการ ซึ่งปริมาณของสารประกอบ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ที่เกิดขึ้นนั้น จากสมการเคมีจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปในปฏิกิริยา



รูปที่ 4.5 เนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมแสดงสัญญาณของสารประกอบ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ในผงซีเมนต์ (เส้นสีแดง), สารผสมของผงซีเมนต์กับ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (เส้นสีดำ) และบล็อกซีเมนต์หรือคอนกรีต (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ตรวจวัดด้วยเทคนิคNIR ในช่วง wavenumber  $7,050-7,100 \text{ cm}^{-1}$  โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) 1:2 จากระบบที่ใช้สารผสมของผงซีเมนต์กับ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ที่สัดส่วน (a) 0.5 %v/v, (b) 2.5 %v/v, (c) 3 %v/v, (d) 5 %v/v, (e) 7.5%v/v, (f) 10 %v/v และกราฟแท่งแสดงค่า  $\log(1/R)$  สัมพัทธ์ (relative intensity) ที่  $7081.33 \text{ cm}^{-1}$

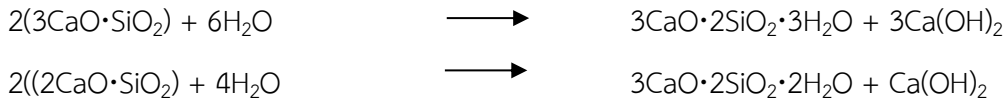
#### 4.4 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ $\text{Ca(OH)}_2$ กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

ปริมาณน้ำเป็นปัจจัยสำคัญอย่างมากในการผสมคอนกรีต โดยน้ำมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันรวมทั้งทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทได้ ใช้บ่มคอนกรีตให้มีกำลังความแข็งแรงและเพิ่มความทนทานของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ใช้ล้างมวลรวมสิ่งสกปรกได้ นอกจากนี้จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.3 พบว่าผงซีเมนต์เมื่อผสมน้ำกลายเป็นคอนกรีตแล้วนั้นนอกจากจะเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตแล้วนั้นจะเกิดสารประกอบ  $\text{Ca(OH)}_2$  ร่วมขึ้นมาด้วย โดยจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ใส่ลงไประหว่างการผสมทำเป็นคอนกรีต ในการทดลองนี้ผู้วิจัยต้องการหาความสัมพันธ์ของปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่เกิดขึ้นในคอนกรีตกับสัดส่วนของน้ำที่ใช้ในการผสมที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) 0.25, 0.38, 0.50, 0.63, 0.75 และ 0.88 %v/v จากนั้นรอเป็นเวลา 2-3 วัน เพื่อให้คอนกรีตแห้งสนิทที่อุณหภูมิห้อง นำคอนกรีตที่ได้ไปตรวจวัดปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กราฟเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของคอนกรีต และ (b) กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัญญาณที่  $7081.33 \text{ cm}^{-1}$  (ปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$ ) ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) 0.25, 0.38, 0.50, 0.63, 0.75 และ 0.88 %v/v ตามลำดับ

จากกราฟเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมและกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัญญาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) ที่ 0.25 (น้อยที่สุด) มีค่าเฉลี่ยของสัญญาณ  $\log(1/R)$  จาก  $\text{Ca(OH)}_2$  น้อยที่สุด เท่ากับ 0.33 อย่างไรก็ตามค่าสัญญาณของ  $\text{Ca(OH)}_2$  จะสูงขึ้นเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มากขึ้น และเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงจนถึง (w/c) ที่ 0.63 พบว่าค่าเฉลี่ยของสัญญาณ  $\log(1/R)$  จาก  $\text{Ca(OH)}_2$  สูงขึ้นเป็น 0.84 และมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงกว่านั้นแสดงว่าซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดีที่สุดที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.63 สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากว่าองค์ประกอบในซีเมนต์เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ของแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ) เมื่อแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ) ทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิด  $\text{Ca(OH)}_2$  และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสานให้คอนกรีตมีความแข็งแรง ตามสมการการเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังนี้

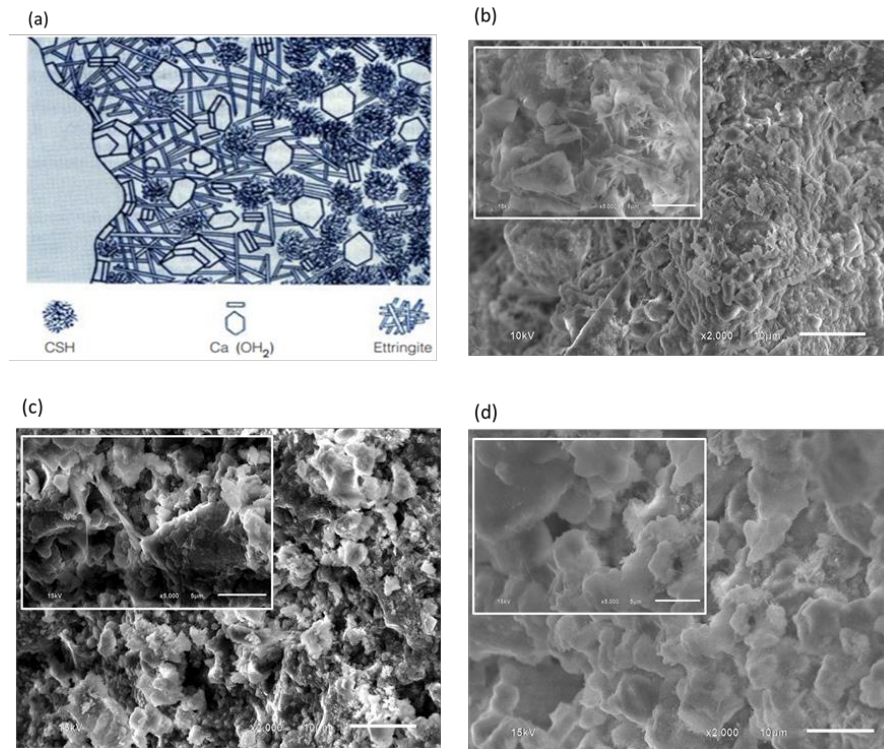


และจากผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ให้ค่าสัญญาณของ  $\text{Ca(OH)}_2$  สูงสุด นั้นสอดคล้องที่อยู่กับผลากของซีเมนต์ที่แนะนำว่าต้องใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เป็น 0.50

เพื่อเป็นการยืนยันว่าบล็อกคอนกรีตมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นไปตามสมการข้างต้น จึงได้ทำการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วน w/c ต่างกันด้วยกล้องด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) เพื่อดูลักษณะโครงสร้างภายในของบล็อกคอนกรีต โดยใช้กำลังขยาย x2000 และ x5000 ในทุกตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 4.7 จากรูปที่ 4.7a เป็นโครงสร้างของคอนกรีตจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่อ้างอิงจาก The Concrete Product and Aggregate co.,Ltd. พบว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( Calcium Silicate Hydrate, CSH) จะมีลักษณะเป็นคลัสเตอร์คล้ายเข็มขนาดเล็กรวมกัน ในขณะที่  $\text{Ca(OH)}_2$  จะมีลักษณะคล้ายแผ่นหรือแท่งขนาดใหญ่และโครงสร้างของ Ettringite จะเป็นคลัสเตอร์ของแท่งขนาดใหญ่ จากผลการทดลองพบว่าการผสมซีเมนต์โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์น้อย (w/c) ที่ 0.25 นั้นให้โครงสร้างที่มีขนาดเล็กเรียงตัวกันแบบไม่เป็นระเบียบ โดยที่กำลังขยาย x5000 จะสามารถระบุลักษณะเฉพาะของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้บ้างเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (รูปที่ 4.7b) เนื่องจากปริมาณน้ำน้อยทำให้ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้อย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.88 แสดงดังรูปที่ 4.7(d) พบว่าอนุภาคภายในคอนกรีตเรียงตัวกันเป็นกลุ่มก้อนแบบเดียวกันเป็นลักษณะโครงสร้างเกิดการเชื่อมกันทำให้มีลักษณะพื้นผิวที่เรียบคล้ายโครงสร้างรังผึ้งที่เรียกว่า Honeycomb-like structure<sup>13</sup> และเห็นโครงสร้างที่เป็นคลัสเตอร์แบบเข็มของแคลเซียมซิลิเกต CSH ได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามไม่สามารถสังเกตเห็นโครงสร้างที่เป็นลักษณะเฉพาะของ  $\text{Ca(OH)}_2$  ได้ แต่สัญญาณของ  $\text{Ca(OH)}_2$  นั้นสามารถตรวจวัดได้อย่างชัดเจนด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี อาจเป็นไปได้ว่าลักษณะโครงสร้างของ  $\text{Ca(OH)}_2$  นั้นเป็นผลึกที่มีขนาดเล็ก จนไม่สามารถสังเกตจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากโครงสร้างคอนกรีตพบว่าไม่มีชั้นของ Ettringite เกิดขึ้นเนื่องจากในการทดลองนี้ผสมแคล้งซีเมนต์กับน้ำ ไม่ได้มีส่วนผสมของยิบซั่ม ( $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ที่จะทำให้เกิดเป็นโครงสร้างของ Ettringite ตามสมการเคมี



ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวหน่วงการแข็งตัวของปูนซีเมนต์เข้าไป เพราะฉะนั้นในการทดลองจึงไม่สามารถมองเห็นโครงสร้างแบบ Ettringite จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 4.7 ลักษณะโครงสร้างของบล็อกคอนกรีตด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย  $\times 2,000$  และ  $\times 5,000$  (a) แผนภาพแสดงลักษณะเฉพาะของแคลเซียมซิลิเกต (CSH), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) และเอททริงไกต์ (Ettringite) อ้างอิงจาก [www.cpacacademy.com](http://www.cpacacademy.com), (b) บล็อกคอนกรีต w/c ที่ 0.25, (c) บล็อกคอนกรีต w/c ที่ 0.50, (d) บล็อกคอนกรีต w/c ที่ 0.88

การที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) มากหรือปริมาณน้ำมากก็จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันส่งผลให้เกิดสารประกอบ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ในโครงสร้างหลักของคอนกรีตซึ่งเป็นตัวช่วยให้คอนกรีตมีสมบัติเป็นต่างมากขึ้น โดยมี  $\text{pH} = 12.5$  องค์ประกอบนี้จะช่วยป้องกันการสึกกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตแต่การที่ปริมาณน้ำมากเกินไปจะทำให้ปริมาณ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ที่ตรวจวัดได้อาจมีค่าลดลงเล็กน้อยเนื่องจาก  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ถูกเปลี่ยนไปเป็น CSH คอนกรีตจึงมีปริมาณ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  และความแข็งแรงที่ลดลง

#### 4.5 วิเคราะห์เชิงปริมาณของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ในคอนกรีตที่ถูกแช่ในน้ำทะเลด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

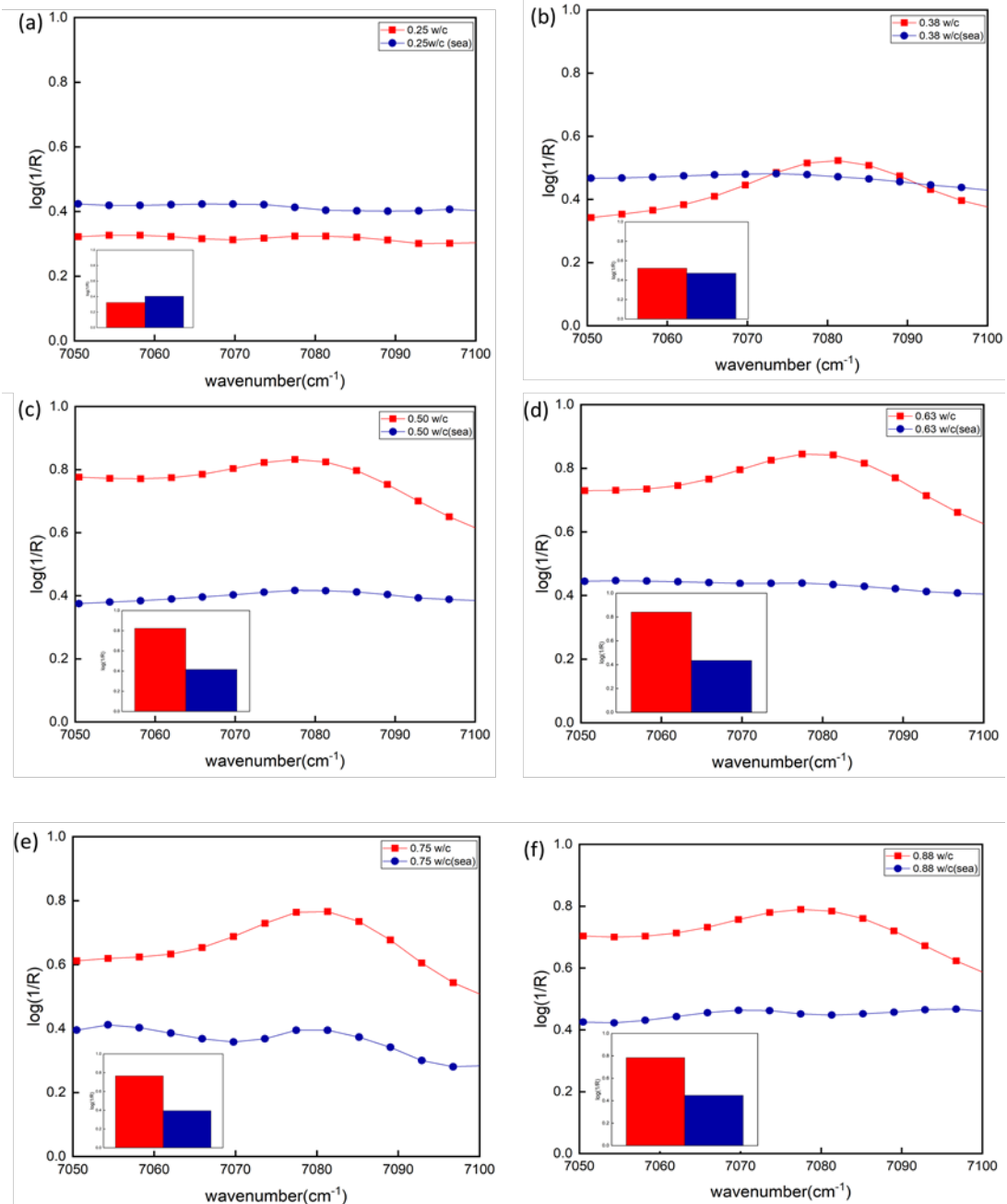
อย่างที่ทราบแล้วในการทดลองข้างต้นว่าซีเมนต์เมื่อผสมกับน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะทำให้มีปริมาณ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  มาก ซึ่งสารประกอบ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  จะมีส่วนสำคัญในการช่วยป้องกันการสึกกร่อนของเหล็กเสริมในโครงสร้างของคอนกรีต เนื่องจากสารประกอบ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  จะทำปฏิกิริยากับคลอไรด์ในน้ำทะเลเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของ  $\text{CaCl}_2 \cdot 3\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  ซึ่งจะทำให้โครงสร้างหลักของแคลเซียมซิลิเกตนั้นยังไม่ถูกทำลายเป็นการรักษาสภาพของคอนกรีต เพราะฉะนั้นการตรวจวัดเพื่อดูปริมาณสารประกอบ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  จึงมีความจำเป็นอย่างมากในการทำนายสภาพและช่วงระยะเวลาในการบำรุงรักษาคอนกรีตก่อนที่น้ำทะเลจะเข้า



ไปทำลายเหล็กเสริมในคอนกรีต ซึ่งจะทำให้โครงสร้างหลักเสียหายจนไม่สามารถดำเนินการซ่อมแซมได้ ต้องทำลายและเปลี่ยนใหม่เท่านั้น

ในการทดลองนี้เป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ในการประเมินปริมาณของ  $\text{Ca(OH)}_2$  โดยใช้คอนกรีตที่สร้างจากการใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) ที่แตกต่างกัน 0.25, 0.38, 0.50, 0.63, 0.75 และ 0.88 %v/v หลังจากนั้นนำคอนกรีตดังกล่าวไปตรวจวัดสัญญาณของ  $\text{Ca(OH)}_2$  แล้วนำคอนกรีตไปแช่ในน้ำทะเลเทียมเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อดูสัญญาณของ  $\text{Ca(OH)}_2$  ของคอนกรีตหลังจากแช่ในน้ำทะเลเทียม ความเสียหายของคอนกรีตในน้ำทะเล เนื่องมาจากซัลเฟตและคลอไรด์ ซัลเฟตโดยเฉพาะอย่างยิ่งแมกนีเซียมซัลเฟต ( $\text{Mg(SO)}_4$ ) ส่วนคลอไรด์จะซึมเข้าไปในคอนกรีตทำอันตรายต่อเหล็กที่ฝังอยู่ในเนื้อคอนกรีต

จากการทดลองได้กราฟเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัม ดังรูปที่ 4.8 พบว่าปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ในทุกๆ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) ที่แตกต่างกันเมื่อแช่ในน้ำทะเลเทียมมีค่าสัญญาณของ  $\text{Ca(OH)}_2$  ลดลงในทุก ๆ การทดลอง (วิเคราะห์จากค่าสัญญาณที่ wavenumber  $7081.33 \text{ cm}^{-1}$ ) โดยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) ที่ 0.25 มีค่าเฉลี่ย  $\log(1/R)$  ของ  $\text{Ca(OH)}_2$  เท่ากับ  $0.404 \pm 0.025$  ในขณะที่คอนกรีตจากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) ที่ 0.50 มีค่าเฉลี่ย  $\log(1/R)$  ของ  $\text{Ca(OH)}_2$  เท่ากับ  $0.456 \pm 0.012$  และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) ที่ 0.63 มีค่าเฉลี่ย  $\log(1/R)$  ของ  $\text{Ca(OH)}_2$  เท่ากับ  $0.434 \pm 0.014$  ซึ่งทั้งสองมีปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่มากที่สุดและยังใกล้เคียงกัน สาเหตุเนื่องมาจากที่ w/c 0.50 และ 0.65 เป็นอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมส่งผลให้คอนกรีตมีปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  มากแม้จะลดลงจากหัวข้อที่ 4.4 ก็ตาม จากการทดสอบพบว่าเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี สามารถใช้ในการประเมินปริมาณของ  $\text{Ca(OH)}_2$  ในโครงสร้างของคอนกรีตได้ ซึ่งเป็นการทดสอบที่ไม่ทำลายตัวอย่าง อีกทั้งยังสามารถไปทดสอบที่สถานที่จริงและได้ข้อมูลผลการวิเคราะห์ทันที



รูปที่ 4.8 เนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมแสดงสัญญาณของสารประกอบ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ในบล็อกคอนกรีต (เส้นสีแดง)และบล็อกคอนกรีตที่แช่น้ำทะเล (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ตรวจวัดด้วยเทคนิคNIR ในช่วง wavenumber 7,050-7,100  $\text{cm}^{-1}$  โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) (a) 0.25 w/c, (b) 0.38 w/c, (c) 0.50 w/c, (d) 0.63 w/c, (e) 0.75 w/c, (f) 0.88 w/c และกราฟแท่งแสดงค่า  $\log(1/R)$  สัมพัทธ์ (relative intensity) ที่  $7081.33 \text{ cm}^{-1}$

## บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีแบบสะท้อน (Reflection mode) ในการตรวจวัดปริมาณสารประกอบ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ในซีเมนต์และคอนกรีต โดยการติดตามความเข้มของสัญญาณเนียร์อินฟราเรดของสารประกอบ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ที่จะขึ้นที่เลขคลื่น  $7,081.33 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นสัญญาณเฉพาะของ 1<sup>st</sup> overtone (O-H stretching) ในสารประกอบ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ก่อนทำการวิเคราะห์สัญญาณ สเปกตรัมถูกปรับด้วยเทคนิค Standard Normal Variate (SNV) เพื่อป้องกันปัญหาจากสัญญาณรบกวน (Baseline shift) เนื่องจากการสะท้อนกลับของสารตัวอย่าง ซึ่งจะส่งผลให้การวิเคราะห์เกิดความคลาดเคลื่อนและผิดพลาดสูง จากกราฟมาตรฐานเชิงเส้นตรงระหว่างความเข้มของสัญญาณ  $\log(1/R)$  และปริมาณ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  พบว่ากราฟเชิงเส้นมาตรฐานที่แสดงปริมาณสารประกอบ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  แบ่งได้ 2 ช่วง โดยช่วงแรกที่มีความเข้มข้น  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  เท่ากับ 0.1-3%w/w มีค่าความชันสมการเส้นตรง  $y = 0.90043 x + 0.27974$  ที่  $R^2 = 0.99$ , เมื่อ  $y$  เป็นค่าความเข้มของสัญญาณ  $\log(1/R)$  และ  $x$  เป็นความเข้มข้นของ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ในขณะที่ช่วงที่สองที่มีความเข้มข้น  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ระหว่าง 4-10%w/w มีค่าความชันสมการเส้นตรง  $y = 0.15851 x + 2.6249$  ที่  $R^2 = 0.95$  บอกได้ว่าเทคนิค NIR สามารถวิเคราะห์ปริมาณ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ได้อย่างถูกต้องแม่นยำในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ศึกษาถึงปริมาณน้ำที่ส่งผลต่อปริมาณ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ในคอนกรีต ซึ่งจะเป็นตัวชี้วัดที่บ่งบอกถึงความแข็งแรงและความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีต พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) ที่ 0.50-0.63 เป็นอัตราส่วนที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตมีปริมาณสารประกอบ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  มากที่สุด โดยระบุจากความเข้มของสัญญาณ ( $\log 1/R$ ) ที่ได้จากเนียร์อินฟราเรด

นอกจากนั้นสัณฐานวิทยาของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วน w/c ต่าง ๆ ถูกวิเคราะห์ด้วยกล้องเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อดูลักษณะโครงสร้างภายในของคอนกรีตพบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงขึ้น โครงสร้างเฉพาะของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต นั้นมีความหนาแน่นขึ้น และมีการเรียงตัวกันเป็นกลุ่มก้อนคล้ายโครงสร้างรังผึ้งที่เรียกว่า Honeycomb-like structure

จากนั้นนำคอนกรีตที่ได้จากการใช้อัตราส่วนต่อซีเมนต์ (w/c) ไปแช่ในน้ำทะเลเทียมเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์เพื่อวิเคราะห์ถึงปริมาณ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ในคอนกรีตในสภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อสภาพของคอนกรีต พบว่าจากสัญญาณสัมพันธ์ที่ได้จากเนียร์อินฟราเรด วิเคราะห์ได้ว่าคอนกรีตจากทุกอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) มีปริมาณ สารประกอบ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ลดลง จากการทดลองทั้งหมดสรุปได้ว่าเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสามารถใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณของ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ในโครงสร้างของคอนกรีตได้ ซึ่งเป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่าง และเป็นเทคนิคที่วิเคราะห์ได้แบบทันที (Real time analysis)

## เอกสารอ้างอิง

1. Peter, C., Hewlett, Lea's Chemistry of Cement and Concrete. *John Wiley and Sons Inc* 2005, 605, 10158-0012.
2. Valenti, G. L.; Cioffi, R., Quantitative determination of calcium hydroxide in the presence of calcium silicate hydrates. Comparison between chemical extraction and thermal analysis. *Journal of Materials Science Letters* 1985, 4 (4), 475-478.
3. Midgley, H., The determination of calcium hydroxide in set Portland cements. *Cement and concrete research* 1979, 9(1), 77-82.
4. Harutyunyan, V.; Kirchheim, A.; Monteiro, P.; Aivazyan, A.; Fischer, P., Investigation of early growth of calcium hydroxide crystals in cement solution by soft X-ray transmission microscopy. *Journal of Materials Science* 2009, 44 (4), 962-969.
5. Scrivener, K.; Füllmann, T.; Gallucci, E.; Walenta, G.; Bermejo, E., Quantitative study of Portland cement hydration by X-ray diffraction/Rietveld analysis and independent methods. *Cement and Concrete Research* 2004, 34 (9), 1541-1547.
6. Francioso, V.; Moro, C.; Martinez-Lage, I.; Velay-Lizancos, M., Curing temperature: A key factor that changes the effect of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on mechanical properties, calcium hydroxide formation and pore structure of cement mortars. *Cement and Concrete Composites* 2019, 104, 103374.
7. Hlaváček, P.; Šulc, R.; Šmilauer, V.; Rößler, C.; Snop, R., Ternary binder made of CFBC fly ash, conventional fly ash, and calcium hydroxide: Phase and strength evolution. *Cement and Concrete Composites* 2018, 90, 100-107.
8. Sangsongpitthaya, T.; Christy, A. A.; Thorstensen, R. T., Quantitative Determination of Calcium Hydroxide by Using Near-Infrared Spectroscopy. *Key Engineering Materials* 2018, 765, 300-304.
9. Watanabe, A.; Furukawa, H.; Miyamoto, S.; Minagawa, H., Non-destructive chemical analysis of water and chlorine content in cement paste using near-infrared spectroscopy. *Construction and Building Materials* 2019, 196, 95-104.
10. Yang, Z.; Xiao, H.; Zhang, L.; Feng, D.; Zhang, F.; Jiang, M.; Sui, Q.; Jia, L., Fast determination of oxides content in cement raw meal using NIR spectroscopy combined with synergy interval partial least square and different preprocessing methods. *Measurement* 2020, 149, 106990.

**เอกสารอ้างอิง(ต่อ)**

11. Tsuno, K.; Akahori, Y.; Yui, T.; Furukawa, H.; Watanabe, A.; Fujimaki, M.; Oto, M.; Katsuyama, T.; Iguchi, Y.; Inada, H., Highly-Sensitive Near-Infrared Spectroscopy System for Remote Monitoring of Concrete Structures. *Journal of Disaster Research* 2017, 12(3), 536-545.
12. Ridi, F.; Fratini, E.; Milani, S.; Baglioni, P., Near-infrared spectroscopy investigation of the water confined in tricalcium silicate pastes. *The Journal of Physical Chemistry B* 2006, 110(33), 16326-16331.
13. Meng, Y.; Ling, T.-C.; Mo, K. H.; Tian, W., Enhancement of high temperature performance of cement blocks via CO<sub>2</sub> curing. *Science of The Total Environment* 2019, 671, 827-837.
14. Farnam, Y.; Dick, S.; Wiese, A.; Davis, J.; Bentz, D.; Weiss, J., The influence of calcium chloride deicing salt on phase changes and damage development in cementitious materials. *Cement and Concrete Composites* 2015, 64, 1-15.

### ประวัติผู้วิจัย

นางสาวจิตรานุช จันทร์สมบูรณ์ เกิดเมื่อวันที่ 27 เดือนธันวาคม พ.ศ. 2541 ที่จังหวัดสมุทรสาคร สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสมุทรสาครบูรณะ จังหวัดสมุทรสาคร เมื่อปีการศึกษา 2559 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2560 ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ บ้านเลขที่ 1010/22จ ตำบลมหาชัย อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสาคร รหัสไปรษณีย์ 74000 อีเมล Gewpeko@gmail.com