



# รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการพัฒนาวิธีหาสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

โดย ดร. วราภคณา แสงสร้อย

พฤษภาคม 2557



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการพัฒนาวิธีหาสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

ดร. วราภรณ์ แสงสร้อย

ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา

สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

และสถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ต้นสังกัด)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)



## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์อย่างยิ่งจาก ศ.ดร. สมนึก ตั้ง เต็มสิริกุล นักวิจัยที่ปรึกษา และ หัวหน้าศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา ที่ให้คำแนะนำปรึกษาในกระบวนการทำวิจัย และให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม ทำให้งานวิจัยฉบับนี้มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของท่านเป็นอย่างยิ่ง และขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบคุณ รศ.ดร.บุญไชย สถิตมั่นในธรรม และ ผศ.ดร. ทวีชัย สำราญวานิช ที่ช่วยให้ข้อเสนอแนะขอขอบคุณ น.ส. ธิดาพร เชื้อสวัสดิ์ และนักศึกษา ที่ช่วยดำเนินงานทดสอบจนเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบคุณ บริษัทสยามวิจัยและนวัตกรรม จำกัด ที่อนุเคราะห์เครื่องมือในการทดสอบบางส่วน

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ให้การสนับสนุนทุนการวิจัย



## **Abstract**

---

**Project Code :** TRG5380015

**Project Title :** METHOD DEVELOPMENT FOR ESTIMATION OF MIX PROPORTION OF HARDENED CONCRETE

**Investigator :** Dr. Warangkana Saengsoy

Construction & Maintenance Technology Research Center (CONTEC),  
Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University

**E-mail Address :** warangkana@siit.tu.ac.th

**Project Period :** May 2010 – May 2014

This study is aimed to develop a method for determination of mix proportion of hardened concrete. The method for determining concrete mix proportion, consisting of contents of cement, fly ash, coarse aggregate, sand, and w/b ratio was proposed in this study. In the analysis, three major investigation techniques were implemented. Image processing technique was used for determination of coarse aggregate content. Water to binder ratio was calculated from data back analysis of the compressive strength by using a computer software developed at CONTEC. Cement, fly ash and sand contents were obtained based on the residues after selective dissolution of the sample. The developed method was applied to estimate mix proportions of concrete prepared in the laboratory with known mix design in order to verify its efficiency. The analytical results indicated that the developed procedure and analysis method can be applied for determining the mix proportion of hardened concrete with a satisfactory accuracy.

**Keywords :** Mix proportion, Hardened concrete, Fly ash, Water to binder ratio



## บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: TRG5380015

ชื่อโครงการ: การพัฒนาวิธีหาสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

ชื่อนักวิจัย: ดร. วรangkan แสงสร้อย

ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร  
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

E-mail Address : warangkana@siit.tu.ac.th

ระยะเวลาโครงการ: พฤษภาคม 2553 – พฤษภาคม 2557

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาวิธีการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่แข็งตัวแล้ว โดยได้คำนึงถึงคุณสมบัติที่หลากหลายของเถ้าลอยที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในเมืองไทย ซึ่งได้นำทั้งวิธีวิเคราะห์ทางกายภาพและทางเคมีมาใช้ในการวิเคราะห์หาเถ้าลอยในคอนกรีต และการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีต ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ร้อยละการแทนที่เถ้าลอย ปริมาณปูนซีเมนต์ เถ้าลอย น้ำ มวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบในคอนกรีต สำหรับทั้งคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ล้วนและคอนกรีตผสมเถ้าลอย ซึ่งการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย ประกอบไปด้วยการวิเคราะห์ 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่ การหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธี Image analysis การหาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยการคำนวณย้อนกลับจากค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรม "FACOMP" และการทดสอบทางเคมีโดยทำการทดสอบ Selective dissolution เพื่อหามวลรวมละเอียดและเถ้าลอยที่เหลือจากการทำละลาย และการทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมี เช่น ปริมาณ CaO จากนั้นนำค่าที่ทดสอบได้ทั้งหมดมาคำนวณหาปริมาณส่วนผสมต่างๆในคอนกรีต ทั้งนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคอนกรีตที่ผสมขึ้นเองในห้องปฏิบัติการเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของวิธีการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่ได้พัฒนาขึ้น จากผลการตรวจสอบพบว่า วิธีการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่พัฒนาขึ้น สามารถใช้ในการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วได้อย่างแม่นยำ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

คำหลัก : สัดส่วนผสมคอนกรีต คอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เถ้าลอย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน



## สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ	i
Abstract	ii
บทคัดย่อ	iii
สารบัญ	iv
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 วิธีการหาสัดส่วนผสมของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ล้วนที่แข็งตัวแล้ว	3
2.2 การวิเคราะห์หาปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว	4
2.3 การวิเคราะห์หาปริมาณเถ้าลอยในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว	5
2.4 การวิเคราะห์หาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) ในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว	6
2.5 การวิเคราะห์หามวลรวมหยาบโดยวิธี Image processing	8
บทที่ 3 วิธีดำเนินการทดลอง	10
3.1 ภาพรวมวิธีดำเนินการทดลอง	10
3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	11
3.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ	12
3.4 วิธีการทดสอบ	14
บทที่ 4 การวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ล้วน	19
4.1 ทั่วไป	19
4.2 สัดส่วนผสม	19
4.3 วิธีการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ล้วน	19
4.4 ผลการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ล้วน	23
4.5 สรุปผลการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ล้วน	27
บทที่ 5 การวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย	28
5.1 ทั่วไป	28



5.2 สัดส่วนผสมและคุณสมบัติของวัสดุ	28
5.3 การวิเคราะห์หาการมีอยู่ของเถาลอยในคอนกรีต	31
5.4 การวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมเถาลอย	36
บทที่ 6 การวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมของคอนกรีตจากโครงสร้างจริง	45
6.1 ทั่วไป	45
6.2 ตัวอย่างการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมของคอนกรีตจากโครงสร้างจริง กรณีที่ 1	45
6.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมของคอนกรีตจากโครงสร้างจริง กรณีที่ 2	48
6.2 สรุปผลการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมของคอนกรีตจากโครงสร้างจริง	55
บทที่ 7 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	56
7.1 สรุปผลการทดลอง	56
7.2 ข้อเสนอแนะ	56
เอกสารอ้างอิง	58
Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.	61



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า สัดส่วนผสมคอนกรีตมีผลกระทบต่อทั้งคุณสมบัติทางกลและความคงทนของคอนกรีต อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ก็เป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญที่สุดปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบอย่างมากต่อคุณสมบัติของคอนกรีตโดยเฉพาะอย่างยิ่งมีผลต่อกำลังรับแรงและความคงทนของคอนกรีต ซึ่งอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์จะมีความสัมพันธ์กับช่องว่างในเนื้อคอนกรีตและจะบ่งบอกถึงความหนาแน่นหรือความทึบของคอนกรีตในการทนต่อการกัดกร่อนจากสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ ปัจจุบันได้มีการใช้สารผสมเพิ่มอย่างเช่นเถ้าลอยในงานคอนกรีตกันอย่างแพร่หลาย โดยใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติหลายประการของคอนกรีต เถ้าลอยถือได้ว่าเป็นของเสียที่ได้จากการเผาถ่านหินในโรงไฟฟ้า ดังนั้น การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตนั้นมีประโยชน์ทั้งในแง่ของการลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แต่อย่างไรก็ตาม การใช้เถ้าลอย จะลดอัตราการพัฒนากำลังรับแรงในช่วงอายุต้นและชะลอการแข็งตัวของคอนกรีต ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพและปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอย ซึ่งจะเห็นได้ว่านอกจากอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตแล้วร้อยละการแทนที่เถ้าลอยยังมีผลกระทบด้วยเช่นกัน

เนื่องจากทั้งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและร้อยละการแทนที่เถ้าลอยเป็นตัวชี้วัดคุณภาพคอนกรีต ดังนั้นในบางครั้งในการใช้งานจริงที่คุณภาพคอนกรีตมีปัญหา และเกิดข้อโต้แย้งที่คาดว่าสัดส่วนผสมคอนกรีตนั้นไม่เป็นไปตามที่กำหนดในสเปค จึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเริ่มต้นและการแทนที่เถ้าลอยในคอนกรีตนั้น ในบางงานยังได้กำหนดให้มีการใช้ปูนซีเมนต์หรือวัสดุประสานตามปริมาณที่กำหนดเพื่อให้ได้คุณสมบัติคอนกรีตตามต้องการ เพราะฉะนั้นจะเห็นได้ว่าการหาปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอยและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่ง และยังมีความสำคัญต่อการควบคุมและการประกันคุณภาพคอนกรีต

อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันยังไม่มีวิธีการหาสัดส่วนผสมคอนกรีตใดที่แม่นยำและเป็นมาตรฐานการตรวจสอบที่เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปได้ ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการทำคอนกรีตนั้นมีหลากหลาย อีกทั้งการวิเคราะห์ก็จะมี ความความยุ่งยากและซับซ้อนมากขึ้นเมื่อมีการใช้เถ้าลอยหรือสารผสมเพิ่มอื่นในคอนกรีตด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมียุติวิธีที่แตกต่างกันไป จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าได้มีการพัฒนาหลายวิธีในการหาปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีต ทั้งด้วยวิธีการทางเคมีและวิธีการทางนิวเคลียร์ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการเหล่านี้ ก็ยังไม่เป็นที่ยอมรับและใช้กันอย่างกว้างขวาง ถึงแม้ว่าจะมีมาตรฐานการตรวจสอบหาปริมาณส่วนประกอบต่างๆในคอนกรีต เช่น BS 1881: Part 124 ซึ่งได้อธิบายถึงวิธีการหาปริมาณปูนซีเมนต์, มวลรวม, และปริมาณน้ำเริ่มต้นในคอนกรีต แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการตรวจสอบนั้นเน้น



ไปทางการตรวจสอบด้านเคมี ต้องใช้เครื่องมือที่ค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อน และไม่มีการนำเครื่องมือวิเคราะห์สมัยใหม่มาใช้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้วิธีการตรวจสอบที่ใช้กันในต่างประเทศ อาจยังไม่มี ความเหมาะสมที่จะใช้ในเมืองไทย ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างระหว่างคุณลักษณะของวัสดุผสมคอนกรีต อย่างเช่น แก้วลอย

ดังนั้นวัตถุประสงค์ในโครงการนี้จึงได้พัฒนาและดัดแปลงวิธีการตรวจสอบให้มีความเหมาะสม โดยจะใช้หลายๆเทคนิคประกอบกัน และคำนวณหาปริมาณแก้วลอย และส่วนประกอบต่างๆของคอนกรีต ซึ่งองค์ความรู้ในการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ในการทำให้สามารถตรวจสอบกลับหาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่แท้จริงใน โครงสร้างคอนกรีตได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการหาสาเหตุความเสียหายของคอนกรีตและการด้อย คุณภาพของคอนกรีต อีกทั้งยังสามารถใช้ทำนายพฤติกรรมคอนกรีตตามอายุการใช้งานได้อีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- พัฒนารูปแบบการตรวจสอบหาแก้วลอยในคอนกรีต รวมถึงบ่งบอกชนิดและปริมาณ
- พัฒนารูปแบบการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีต เช่นปริมาณปูนซีเมนต์ แก้วลอย น้ำ มวลรวม ละเอียด และมวลรวมหยาบ ที่มีประสิทธิภาพและสามารถนำไปใช้ได้จริง

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- การตรวจสอบหาสัดส่วนผสมคอนกรีต จะไม่คำนึงถึงการตรวจสอบหาปริมาณน้ำยาผสมเพิ่มใน คอนกรีต ซึ่งมีอยู่ในปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับองค์ประกอบอื่นในคอนกรีต
- การวิจัยนี้จะพิจารณาถึงคอนกรีตที่ผสมแก้วลอยเท่านั้น จะไม่รวมถึงวัสดุประสานอื่นที่อาจจะมีการ ใช้งานอยู่บ้าง
- คอนกรีตที่ทำการศึกษาคือจะเป็นคอนกรีตที่ยังไม่ถูกทำลายอย่างรุนแรงจากสารเคมีในสิ่งแวดล้อม เช่น กรดซัลฟิวริกและคลอไรด์ ซึ่งอาจจะทำให้องค์ประกอบทางเคมีในคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไป แต่ การตรวจสอบหาสัดส่วนผสมคอนกรีตในสภาพแวดล้อมเหล่านี้ก็เป็นที่น่าสนใจที่จะต้อง ทำการศึกษาต่อไปในอนาคต

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

องค์ความรู้ในการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ในการทำให้สามารถตรวจสอบกลับหาสัดส่วนผสมคอนกรีต ที่แท้จริงในโครงสร้างคอนกรีตได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการหาสาเหตุความเสียหายของคอนกรีต และการด้อยคุณภาพของคอนกรีต อีกทั้งยังสามารถใช้ทำนายพฤติกรรมคอนกรีตตามอายุการใช้งานได้อีก ด้วย



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้ จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการหาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.1 วิธีการหาสัดส่วนผสมของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ล้วนที่แข็งตัวแล้ว

BS 1881: Part 124 [1] is a standard test method for analysis of hardened concrete. This method describes the sampling procedures, treatment of sample, and analytical methods to be used on a sample of concrete to determine the cement content, aggregate content and other concrete compositions in hardened concrete. The techniques used in this standard are such as oxide analysis, extracting soluble silica or loss on ignition method. Subsequently, those data are indirectly used to calculate percentage of cement or other compositions. However, some procedures have limitation such as aggregate grading test is only applicable to concrete containing essentially insoluble in dilute hydrochloric acid. Moreover, this standard can be applied to concrete made with Portland cements and, in favorable circumstances, contained ground granulated blast-furnace slag, but the determination of pulverized-fuel ash content are outside the scope of this standard.

M.S. Jung et al. [2] presented a new technique of analyzing the acid neutralization capacity (ANC) data to identify a concrete mix design. The suspension of concrete was formed in still water and nitric acid to produce the variation in the pH. As a result, the pH of the suspension for concrete at a given concentration of the nitric acid was dramatically decreased at around 10 in the pH, depending on the aggregate content, of which characteristics was used to determine the aggregate content in a concrete mix. Simultaneously, an increase in the w/c resulted in decrease pH, of which the empirical equation was adopted to determine the w/c. As there is no difference in the ANC characteristics between coarse and fine aggregate, only total aggregate content encompassing coarse and fine aggregates was determined in this study. This method is limited in applying for all unknown concrete mixes, because the fitted equation (the aggregate content vs acid concentration) may be dependent on binder type. Thus, the variation in binder type must be preliminary known, although information for determining the aggregate content was applicable to only OPC in this study.



## 2.2 การวิเคราะห์หาปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

G.G. Clemena [3] evaluated the method of selective dissolution by methanolic maleic acid, developed by Tabikh et al. for the determination of cement content in hardened concrete. It was found to be relatively simple and inexpensive, and is accurate to within  $\pm 1\%$  point cement at the 95% confidence level with the use of calibration curve. Such factors as aggregate and cement compositions, curing time, and water-cement ratio were investigated as to their effects on the method. Among these factors, aggregate composition was the only one found to have a significant effect on the analytical results. In addition, the determination of cement content by the measurement of the specific gravity increase in a methanolic maleic acid solution was also investigated, but was found to have unsatisfactory precision.

American Society for Testing and Materials (ASTM) C1084-02 [4] is standard test method for determination of Portland cement content of a sample of hardened hydraulic-cement concrete. This test method consists of two independent procedures: an oxide-analysis procedure and an extraction procedure. Nevertheless, the procedure is also applicable estimating the combined content of Portland cement and pozzolan or slag in concrete made with blended hydraulic cement and blends of Portland cement with pozzolans or slag. But, the test method should be applied to determination of the blended cement content of the pozzolanic content only by use of calibration concrete samples on other information. Then, indirectly calculating the percentage of cement by assuming from analyses of silica and calcium oxide in the original cement used; consequently, it is not applicable to concrete that contains aggregates that yield simultaneously significant amounts of silica and calcium oxide under the conditions of the test.

Lucia Linares et al. [5] proposed the stain method for determining cement content in hardened concrete by image capture and treatment of the stained specimen images. The samples resulting from this process are stained the cement paste through immersion in a solution of tannic acid (3% in weight) acidified with tartaric acid (3% in weight). This stain process is equally valid for young concretes with an abundant alkaline reserve and for old concretes with an advanced carbonation degree and it can be used for concretes manufactured using cements with admixture as long as there is a calibration curve prepared with this type of cement. The result obtained with this method is similar to those achieved by the ASTM reference method. In addition, the method developed has no dependence on the composition of the coarse aggregates, whereas the ASTM method.



H.S. Wong and N.R. Buenfeld [6] proposed a new method to estimate the initial cement content, water content and free water/cement ratio (w/c) of hardened cement-based materials made with Portland cements that have unknown mixture proportions and degree of hydration. This method first measures the volume fractions of the unreacted cement, hydration products and capillary pores, using high resolution field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) in the backscattered electron (BSE) mode and image analysis. From the obtained data and the volumetric increase of solids during cement hydration, we can calculate the degree of hydration. The proposed method has the advantage that it is quantitative and does not require comparison with calibration graphs or reference samples made with the same materials and cured to the same degree of hydration as the tested sample. The original cement content is calculated. The result is plotted against its actual values. For each data point indicate the 95% confidence interval calculate student's t-distribution. However, the preliminary results show that the proposed method is applicable to ordinary Portland cement pastes with a range of w/c ratios (0.25–0.50) and curing ages (3–90 days).

## 2.3 การวิเคราะห์หาปริมาณเถ้าลอยในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

S. Ohsawa et al. [7] studied the quantitative determination of fly ash in hydrated fly ash- $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  - $\text{Ca}(\text{OH})_2$  system, various kinds of selective dissolution were evaluated using pastes made from a single representative fly ash. Selective dissolution using picric acid - methanol solution was found to be adequate. Selective dissolution using picric acid - methanol + water can also be used, when it is necessary to save time, although rather bigger corrections are needed. Reproducibility of the determination by both methods was found to be satisfactory, as the standard deviation of the measurement was within 0.23 - 0.55%. Several dissolution experiments were also carried out to obtain the basic information related to this technique.

R. Doug Hooton and C.A. Rogers [8] proposed methods developed for determination of slag and fly ash content in hardened concrete. The optical microscopy method involves preparation of thin sections of the concrete and point counting to obtain the number of fly ash grains for estimating fly ash content substitution in Portland cements. These are compared to a set of calibration standard sections. This technique is satisfactory where the engineer wishes to know rough proportions on the scale used, and the importance of knowing the particle size distribution of the fly ash is crucial to obtaining an estimate



F.J. Presuel-Moreno and A.A. Sagues [9] investigated of conduction to assess the applicability of magnetic methods for determining FA presence and content in hardened concrete. Reproducible measurements of magnetic susceptibility  $\chi_m$  of laboratory and field extracted concrete core samples were achieved with simple instrumentation. There was a nearly linear relationship between  $\chi_m$  and the mass of fly ash per unit volume, or its volume fraction. The magnetic response of a given FA was not significantly affected by the process of curing and subsequent evolution of the concrete over two years, or by carbonation of the concrete. Field extracted concrete cores exhibited a wide range of  $\chi_m$  values. The group of specimens with the highest values of  $\chi_m$  also had the lowest chloride ion diffusivity, consistent with the presence of admixed FA. Conversely, specimens with nil magnetic response included those from concrete with the highest chloride diffusivity. The magnetic measurements provided reasonable order-of-magnitude indications of FA presence in field extracted cores. However, precise determination of FA content from magnetic measurements of field cores does not appear feasible in the absence of additional information.

## 2.4 การวิเคราะห์หาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) ในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

J. Elsen et al. [10] presented results of the w/c ratio determination of hardened cement paste and concrete samples on thin sections using automated image analysis techniques. Two series of samples prepared in laboratory conditions have been used as 'reference samples' to develop and to evaluate procedures for measuring the w/c ratio by image analysis techniques: a series of pure cement paste samples and one of concrete samples. Three different image analysis methods have been employed: an interactive, an automatic method with thresholding of grey values by the operator, and a fully automatic method without thresholding. The measurements on the pure cement paste samples confirm the direct relationship between the w/c ratio of the samples and the mean grey value measured on thin sections. The results of the measurements of the thin sections prepared out of the reference concrete series also indicate a clear relationship between the w/c ratio and the mean grey value but these measurements are less reproducible. The main cause of this variability with the concrete samples is the difficulty in selecting threshold level values.



All the measurements here have been performed for cement paste and concrete samples which have been cured under laboratory conditions for 28 days. The results cannot of course be transferred in a simple way to field concrete.

S. Sahu et al. [11] developed methodology for the determination of the water–cement ratio (w/c) in hardened concrete using backscattered electron imaging (BEI) by a scanning electron microscope. The method is based on concrete sections that have been vacuum impregnated with epoxy and polished to a flat surface. The backscattered intensity of the epoxy is the lowest compared to all other phases present within a concrete. By using image analysis program and setting an appropriate threshold of the gray scale the capillary porosity of the concrete can be quantified. The technique has been tested for laboratory specimens of known w/c ratio and shows good linear correlation. w/c ratios determined on field concretes show very good correlation with results obtained on the same specimens using the standardized fluorescence microscopy Nordtest method (NT Build 361-1999) except in the range of extremely high water–cement ratios exceeding 1.

H.S. Wong and N.R. Buenfeld [6] proposed a new method to estimate the initial cement content, water content and free water/cement ratio (w/c) of hardened cement-based materials made with Portland cements that have unknown mixture proportions and degree of hydration. This method first measures the volume fractions of the unreacted cement, hydration products and capillary pores, using high resolution field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) in the backscattered electron (BSE) mode and image analysis. From the obtained data and the volumetric increase of solids during cement hydration, we can calculate the degree of hydration. The proposed method has the advantage that it is quantitative and does not require comparison with calibration graphs or reference samples made with the same materials and cured to the same degree of hydration as the tested sample. The original water content is calculated. The result is plotted against its actual values. For each data point indicate the 95% confidence interval calculate student's t-distribution. However, the preliminary results show that the proposed method is applicable to ordinary Portland cement pastes with a range of w/c ratios (0.25–0.50) and curing ages (3–90 days).



## 2.5 การวิเคราะห์หามวลรวมหยาบโดยวิธี Image processing

Weixing Wang [12] studied a local thresholding algorithm for binarizing gray scale images of aggregates from gravitational flow-falling particles. The algorithm repeatedly thresholds an aggregate image until no object can be thresholded any further. Before thresholding an object, in each iteration of the thresholding process, the algorithm calculates the size, shape and range of gray levels of the object. The algorithm has been implemented in an on-line system and the field test result show that it works under certain conditions.

Larry Banta et al. [13] described to approach for predicting particle mass based on 2D electronic images. Crushed limestone aggregates, similar to those used in asphalt pavement mixtures were placed on a light table and imaged using a CCD video camera and frame grabber. The images were processed to separate touching and overlapping particles, define the edges of the particles and to calculate certain features of the particle silhouettes, such as area, centroid and shape-related features. A multiple linear regression model was created, using the dimensionless parameters as regress or variables to predict particle mass. Regress or coefficients were found by fitting to a sample of 501 particles ranging in size from  $4.75 \text{ mm} < \text{particle sieve size} < 25 \text{ mm}$ . When tested against a different aggregate sample, the model predicted the mass of the batch to within  $\pm 2\%$ . The approach was based on a low cost vision system and image analysis. The algorithms were tested on a limited number of samples, and have produced encouraging results.

J.M.R. Fernlund [14] proposed a 3-D method for particle shape determination of coarse aggregates using image analysis, IA, is presented. It is based on the measures the axial length of all three axis of every particle in a coarse aggregate sample. Two images of the entire aggregate sample are taken, in lying and standing positions. Since the particle's intermediate axes are measured in both images they can be used to couple the shortest and longest axial dimensions for each particle. The method allows an interpretation of length/thickness, length/width and width/thickness ratios of all the particles and is thus comparable to the flakiness and shape index tests. This method for shape determination gives a very good measure of both the size distribution and shape distribution of all the particles in the aggregate sample. The reproducibility of results is good. As previously stated sieving does not directly measure any particle in the sample. In contrast the IA measures every particle. This new IA method can be used to evaluate the results of other aggregate tests that use sieving in the methodology.

A. Abbas et al. [15] developed method to determine the residual mortar content of recycled concrete, to serve as a quality control tool for such aggregates. In order to validate the results



obtained by that laboratory test procedure, image analysis was used to quantify the residual mortar content in the different size fractions of the recycled concrete aggregates tested. The results confirmed that the quick laboratory test provides an accurate measurement of the residual mortar content in recycled concrete aggregates.



### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการทดลอง

#### 3.1 ภาพรวมวิธีดำเนินการทดลอง

งานวิจัยนี้ ได้มีการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว โดยมีขั้นตอนในการดำเนินงาน ดังนี้

1) ศึกษาและทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ เช่น ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย มวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบ โดยเลือกทำการศึกษาเฉพาะวัสดุที่นิยมใช้งานจริงในปัจจุบัน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 เถ้าลอย 2 ชนิด ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันทางฟิสิกส์และทางเคมี ทราแยมน้ำ และมวลรวมหยาบจากแหล่งหินปูน ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ในงานวิจัย ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3

2) ศึกษาหาวิธีการตรวจสอบหาเถ้าลอยในคอนกรีต รวมถึงบ่งบอกชนิดหรือแหล่งที่มาของเถ้าลอยที่ใช้ โดยจะทำการศึกษากับคอนกรีตที่ผสมขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ ที่มีข้อมูลคุณสมบัติของเถ้าลอยและองค์ประกอบอื่นๆในคอนกรีตที่ใช้ผสม ซึ่งจะทำการทดสอบกับคอนกรีตผสมเถ้าลอยชนิดต่างๆ

ในการศึกษา จะใช้หลายๆเทคนิคประกอบกัน ได้แก่

- Physical properties by Scanning Electron Microscope (SEM) analysis
- Chemical compositions by X-Ray Fluorescent (XRF) analysis
- Mineral compositions by X-Ray Diffraction (XRD) analysis

โดยรายละเอียด ได้อธิบายไว้ในบทที่ 5

3) ศึกษาหาวิธีการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีต ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ร้อยละการแทนที่เถ้าลอย ปริมาณปูนซีเมนต์ เถ้าลอย น้ำ มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ โดยจะทำการศึกษากับคอนกรีตที่ผสมขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะทดสอบกับคอนกรีตที่มีสัดส่วนผสมที่แตกต่างกันทั้งคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย และคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยด้วยร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่แตกต่างกันด้วย ซึ่งในการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมจะคำนึงถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอสโซลานของเถ้าลอยที่เปลี่ยนแปลงไปตามอายุของคอนกรีตด้วย ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษากับคอนกรีตที่อายุต่างๆกันด้วย เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของวิธีการตรวจสอบ

ในการศึกษา จะใช้หลายๆเทคนิคประกอบกัน ได้แก่

- Chemical compositions by X-Ray Fluorescent (XRF) analysis
- Mineral compositions by X-Ray Diffraction (XRD) analysis
- Image analysis



- Selective dissolution
- Computer Software

ในการหาปริมาณมวลรวมหยาบจะใช้วิธี Image Analysis จากนั้นนำคอนกรีตมาทุบเพื่อแยกมวลรวมหยาบออกมาให้เหลือแต่มอร์ตาร์ซึ่งประกอบด้วยปูนซีเมนต์ แก้วลอย และทราย จากนั้นนำมอร์ตาร์มาบดเป็นผงเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี เช่นหาปริมาณ CaO โดยใช้ XRF และตรวจหา ปริมาณ Quartz โดยการใช้ XRD นอกจากนี้จะทำการทดสอบ Selective dissolution ซึ่งจะใช้กรดเพื่อทำละลายเฟสและจะได้ทรายและแก้วลอยเป็นส่วนที่เหลือจากการทำละลาย จากนั้นปริมาณส่วนผสมต่างๆในคอนกรีตจะสามารถคำนวณได้จากผลจากการวัดองค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตและการทำ Selective dissolution ในส่วนของปริมาณน้ำหรืออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ สามารถคำนวณกลับจากข้อมูลกำลังรับแรงอัดร่วมกับการใช้คอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์

โดยรายละเอียดการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ล้วนและคอนกรีตผสมแก้วลอย ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 และ บทที่ 5 ตามลำดับ

4) ศึกษาเพื่อยืนยันวิธีการตรวจสอบหาสัดส่วนผสมคอนกรีตกับแท่งตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากการเจาะ (cored sampling) จากโครงสร้างคอนกรีต ซึ่งการตรวจสอบจะกระทำร่วมกับการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากเอกสารคอนกรีตที่ผู้ผลิตคอนกรีต หรือผู้รับเหมาบันทึกไว้ รวมถึงข้อมูลของกำลังรับแรงอัดที่วัดจาก Cored Sample โดยตัวอย่างการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่เจาะมาจากโครงสร้างจริง จะอธิบายในบทที่ 6

### 3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

#### 1) ปูนซีเมนต์

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

#### 2) แก้วลอย

ใช้แก้วลอย 2 ชนิด จาก 2 แหล่งในการทดสอบ ได้แก่ แก้วลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ. ลำปาง (FA1) และแก้วลอยจากโรงไฟฟ้าใน จ. ระยอง (FA2) องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของแก้วลอย แสดงได้ดังตารางที่ 3.1

#### 3) มวลรวม

ใช้ทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ซึ่งทราย 3 ชนิดได้แก่ A, B และ C มีค่าความถ่วงจำเพาะที่สภาพอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.59, 2.60 และ 2.60 ตามลำดับ



ส่วนมวลรวมหยาบจากแหล่งหินปูน มีขนาดโตสุด 19 mm ซึ่งมวลรวมหยาบ 3 ชนิดได้แก่ A, B และ C มีค่าความถ่วงจำเพาะที่สภาพอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.70, 2.70 และ 2.73 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

Chemical Compositions	OPC	FA1	FA2
SiO <sub>2</sub> (%)	19.36	31.56	65.15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	5.10	18.18	22.06
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.35	15.86	4.17
CaO (%)	64.36	20.91	1.25
MgO (%)	0.81	3.38	0.68
SO <sub>3</sub> (%)	2.83	4.70	0.18
Na <sub>2</sub> O (%)	0.15	2.35	0.02
K <sub>2</sub> O (%)	0.51	1.92	1.09
TiO <sub>2</sub> (%)	0.25	0.37	1.00
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0.08	0.23	0.35
LOI (%)	3.01	0.14	3.78
Specific gravity	3.15	2.29	2.24

### 3.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

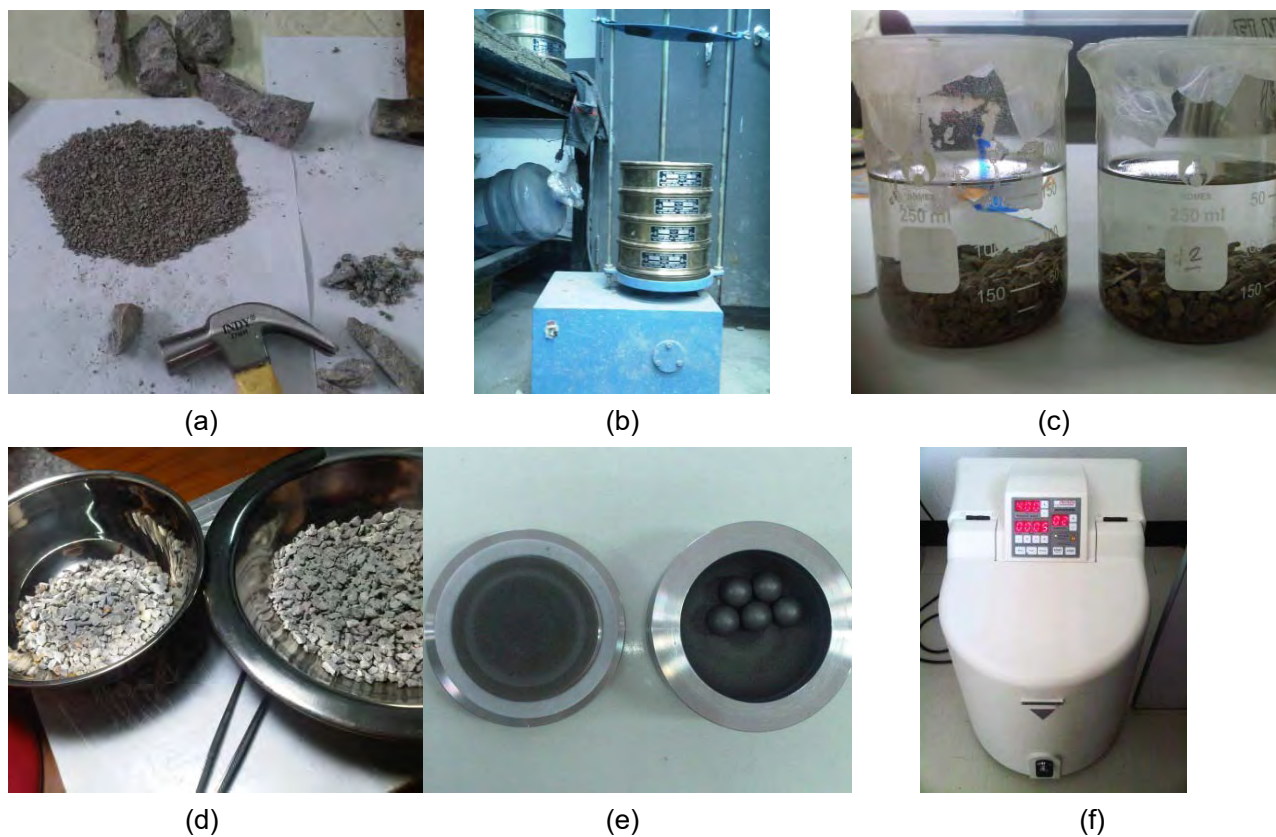
ได้เตรียมหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm จำนวน 5 ตัวอย่างสำหรับในแต่ละอายุการทดสอบของแต่ละส่วนผสม โดยแกะแบบหล่อที่อายุ 24 ชั่วโมง แล้วบ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำจนถึงอายุทดสอบ รูปที่ 3.1 แสดงการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ

เมื่อครบอายุทดสอบ นำตัวอย่างคอนกรีตจำนวน 3 ตัวอย่าง ไปทดสอบกำลังอัดด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM) จากนั้นนำเศษคอนกรีตที่เหลือจากการทดสอบกำลังอัด ไปแยกเอามวลรวมหยาบออกให้เหลือแต่เศษมอร์ตาร์ (รูปที่ 3.2 (a)) เพื่อนำไปทดสอบทางเคมีต่อไป ซึ่งเศษมอร์ตาร์จะมีขนาดประมาณ 3-5 cm โดยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และค้างตะแกรงเบอร์ 8 (รูปที่ 3.2 (b)) จากนั้นทำการหยุดปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยนำเศษมอร์ตาร์ไปแช่ในสารละลายอะซิโตน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (รูปที่ 3.2 (c)) จากนั้นเทอะซิโตนออกแล้วนำตัวอย่างไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งตัวอย่างที่ได้บางส่วน (รูปที่ 3.2 (d)) จะนำไปใช้ทดสอบหาเถ้าลอยในคอนกรีตโดยวิธี SEM และบางส่วนนำไปบดเป็นผงจนมีขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน โดยใช้เครื่องบด Planetary Mill (รูปที่ 3.2 (e) และ (f)) แล้วนำไปทดสอบ XRF, XRD และ Selective dissolution





รูปที่ 3.1 การเตรียมหล่อตัวอย่างคอนกรีต



รูปที่ 3.2 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเพื่อนำไปทดสอบทางเคมี



สำหรับตัวอย่างคอนกรีตอีกจำนวน 2 ตัวอย่าง นำไปตัดเป็นแว่น ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (a) และ (b) เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตโดยวิธี Image analysis และหา Unit weight ของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C642 และบางส่วนนำไปตัดเป็นรูปลูกบาศก์ขนาด  $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$  ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (c) เพื่อนำไปทดสอบ SEM/BSE



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 3.3 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเพื่อนำไปทดสอบ Image analysis, Unit weight และ SEM/BSE

### 3.4 วิธีการทดสอบ

#### 3.4.1 การทดสอบ Scanning Electron Microscope (SEM)

ก่อนทำการทดสอบ นำเศษตัวอย่างคอนกรีตไปเคลือบด้วยทอง เครื่องมือและตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ SEM แสดงได้ดังรูปที่ 3.4 ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง SEM รุ่น JEOL JSM-6301F ประกอบกับ Oxford-INCA 350 และใช้ Accelerating voltage 20 kV.



(a) เครื่องเคลือบทอง



(b) ตัวอย่างสำหรับทดสอบ



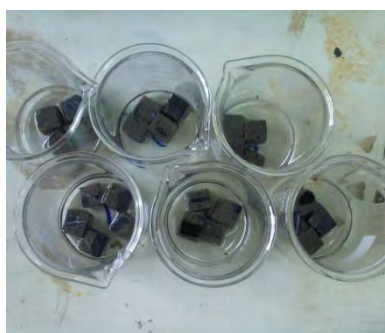
(c) เครื่อง SEM

รูปที่ 3.4 เครื่องมือและตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ SEM



### 3.4.2 การทดสอบ Scanning Electron Microscope on Back-Scattered Electrons (BSE) technique

สำหรับการเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ ด้วย SEM (Scanning Electron Microscope) และ Back-Scattered Electrons (BSE) ทำโดยการตัดแท่งตัวอย่างคอนกรีตเป็นชิ้นเล็กๆ ขนาด  $1 \times 1 \times 1$  ซม. ด้วยใบตัดเพชร แล้วทำให้แห้งก่อนนำตัวอย่างไปหล่อเรซิน โดยใช้เครื่องดูดสุญญากาศเพื่อให้เรซินแทรกเข้าไปในช่องว่างในตัวอย่าง แล้วทิ้งตัวอย่างไว้ 24 ชั่วโมงเพื่อให้เรซินแข็งตัว หลังจากนั้น ขัดผิวหน้าตัวอย่างที่หล่อเรซินแล้วให้เรียบโดยใช้กระดาษทรายเบอร์ 240, 400, 800 และ 1,000 ตามลำดับ และขัดด้วยผงเพชรขนาด 3, 1 และ  $1/4$  ไมครอน ตามลำดับ ซึ่งตลอดขั้นตอนการขัด ได้ใช้เอทานอลเป็นสารหล่อลื่น หลังจากนั้นทำความสะอาดตัวอย่างด้วย Ultrasonic Cleanser รูปที่ 3.5 แสดงขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ด้วย SEM (Scanning Electron Microscope) และ Back-Scattered Electrons (BSE)



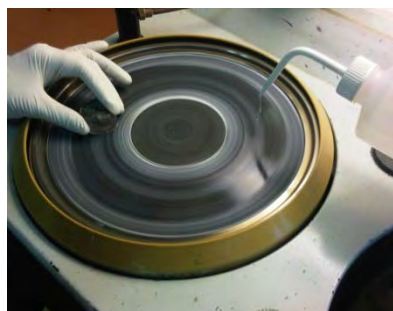
(a) ตัวอย่างที่เตรียมหล่อเรซิน



(b) หล่อเรซิน



(c) กระดาษทราย



(d) ขัดผิวหน้าตัวอย่าง



(e) Ultrasonic Cleanser



(f) ตัวอย่างที่ขัดผิวแล้ว

รูปที่ 3.5 แสดงขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ด้วย SEM (Scanning Electron Microscope) และ Back-Scattered Electrons (BSE)



### 3.4.3 การทดสอบโดย X-Ray Diffraction (XRD) technique

ทดสอบโดยใช้ตัวอย่างที่บดเป็นผงแล้วประมาณ 5g โดยผสม Corundum 10% ของตัวอย่างเพื่อเป็น Internal standard เครื่อง XRD ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ รุ่น Bruker-D8 Discover, CuK $\alpha$  X-Ray type โดยวิเคราะห์  $2\theta = 5-80^\circ$  และ Step scan ที่ 0.01 $^\circ$ /sec รูปที่ 3.6 แสดงตัวอย่างและเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffraction (XRD)



(a) ตัวอย่างสำหรับทดสอบ



(b) แบบใส่ตัวอย่าง



(c) เครื่อง XRD

รูปที่ 3.6 แสดงตัวอย่างและเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffraction (XRD)

### 3.4.4 การทดสอบโดย X-Ray Fluorescent (XRF) technique

ทดสอบโดยใช้ตัวอย่างที่บดเป็นผงแล้วประมาณ 5g รูปที่ 3.7 แสดงเครื่อง XRF สำหรับวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี

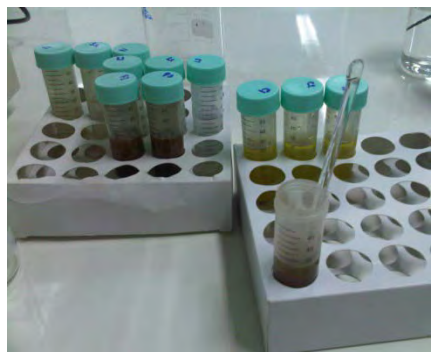


รูปที่ 3.7 เครื่อง XRF สำหรับวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี



### 3.4.5 การทดสอบ Selective dissolution

สำหรับการทดสอบ Selective solution ใช้ผงตัวอย่างที่บดเป็นผงแล้ว 1 g ต่อการทดสอบ และใช้กรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2N เพื่อทำละลายเฟสดีต์และส่วนที่มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ รูปที่ 3.8 แสดงตัวอย่างและเครื่องมือ สำหรับการทำให้ Selective dissolution



(a) ตัวอย่างสำหรับทดสอบ



(b) Water Bath Shaker



(c) เครื่อง Centrifuge

รูปที่ 3.8 ตัวอย่างและเครื่องมือ สำหรับการทำให้ Selective dissolution

### 3.4.6 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM) รูปที่ 3.9 แสดงการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

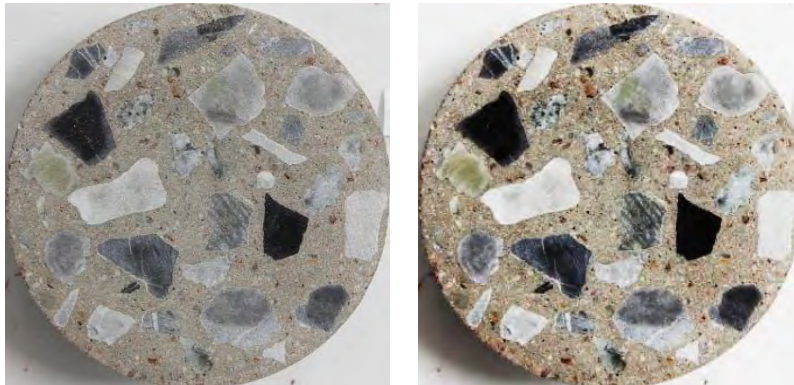


รูปที่ 3.9 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

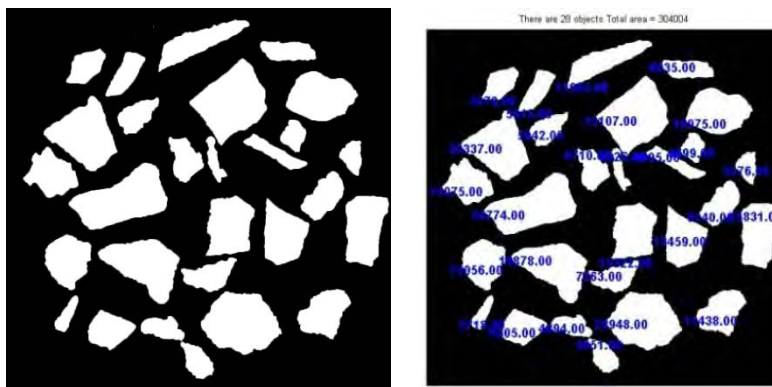


### 3.4.7 การทดสอบหาปริมาณมวลรวมหยาบ โดย Image processing technique

ในการหาปริมาณมวลรวมหยาบจะใช้วิธี Image Analysis โดยนำคอนกรีตมาตัดและถ่ายรูปหน้าตัด ดังแสดงในรูปที่ 3.10 จากนั้นใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ “MATLAB” เพื่อวิเคราะห์หาพื้นที่ของมวลรวมหยาบ ต่อพื้นที่หน้าตัดดังรูปที่ 3.11 และคำนวณกลับเป็นปริมาณมวลรวมหยาบต่อหนึ่งหน่วยคอนกรีต



รูปที่ 3.10 รูปหน้าตัดคอนกรีต



รูปที่ 3.11 การหาพื้นที่มวลรวมหยาบด้วย “MATLAB”

### 3.4.8 การทดสอบหา Unit weight ของคอนกรีต

ทดสอบหา Unit weight ของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C642 [16] โดยใช้ตัวอย่างเดียวกับที่ใช้วิเคราะห์หาปริมาณมวลรวมรวมหยาบ



## บทที่ 4

### การวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ล้วน

#### 4.1 ทัวไป

ในบทนี้จะอธิบายการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ล้วน ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ปริมาณปูนซีเมนต์ น้ำ มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ โดยจะทำการศึกษากับคอนกรีตที่ผสมขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ

#### 4.2 สัดส่วนผสม

คอนกรีตที่ผสมขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.45, 0.55, และ 0.65 สำหรับ w/c = 0.45 ใช้มวลรวมแตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ A, B1, และ B2 ซึ่งตัวอย่างคอนกรีตทั้งหมด ยกเว้น W45C-A เตรียมในห้อง ปฏิบัติการเดียวกัน สัดส่วนผสมคอนกรีตสำหรับการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ล้วน แสดงได้ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งจะวิเคราะห์หา สัดส่วนผสมคอนกรีต ที่อายุ 14, 28 และ 91 วัน

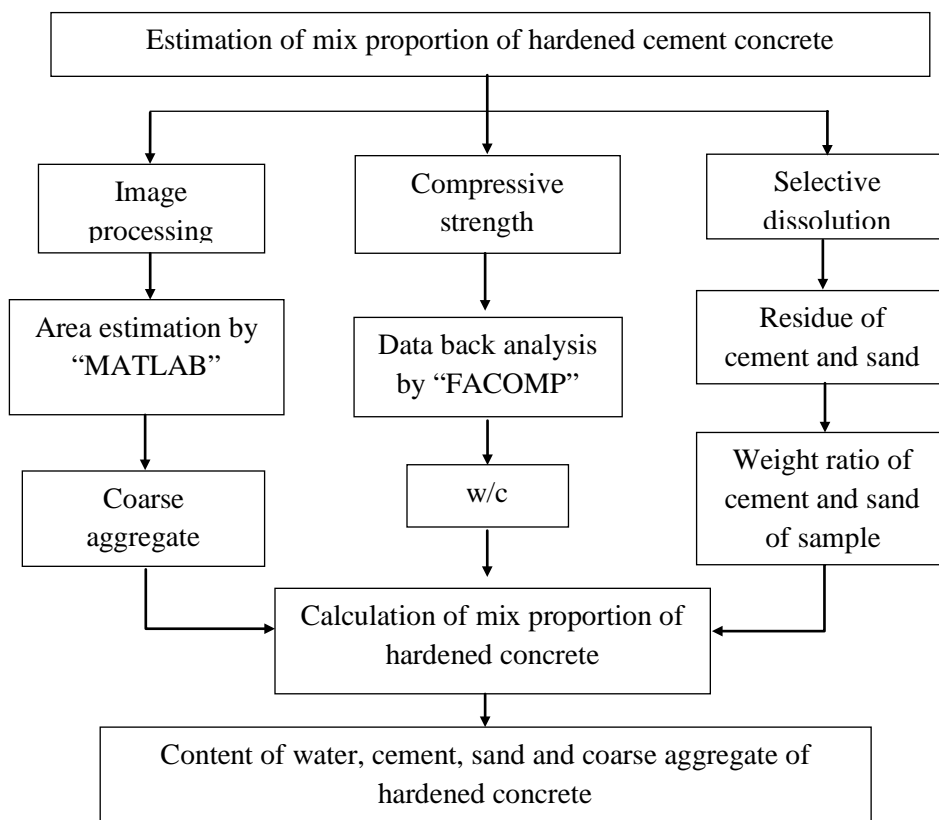
ตารางที่ 4.1 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมในห้องปฏิบัติการ

Sample	w/c	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Water (kg/m <sup>3</sup> )	s/a	Sand (kg/m <sup>3</sup> )	Limestone (kg/m <sup>3</sup> )	Age (days)
W45C-A	0.45	419	188	0.42	727	1047	28,91
W45C-B1	0.45	407	183	0.42	737	1061	28,91
W45C-B2	0.45	407	183	0.44	776	1025	14,91
W55C-B2	0.55	360	198	0.44	776	1025	14,91
W65C-B2	0.65	322	210	0.44	776	1025	14,91

#### 4.3 วิธีการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ล้วน

การวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ล้วน ประกอบไปด้วยการวิเคราะห์ 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่ การหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธี Image analysis การหาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยการคำนวณย้อนกลับจากค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรม “FACOMP” และการทดสอบทางเคมีโดยการทดสอบ Selective dissolution เพื่อหามวลรวมละเอียดที่เหลือจากการทำละลาย จากนั้นนำค่าที่ทดสอบได้ทั้งหมดมาคำนวณหาปริมาณส่วนผสมต่างๆในคอนกรีต ขั้นตอนวิธี การวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ล้วน แสดงได้ดังรูปที่ 4.1





รูปที่ 4.1 ขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ล้วน

#### 4.3.1 การหาปริมาณมวลรวมหยาบ

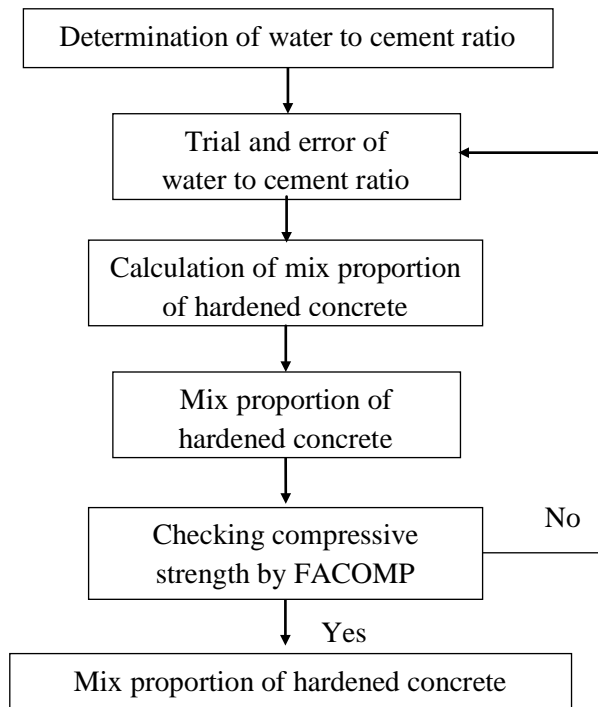
ในการหาปริมาณมวลรวมหยาบจะใช้วิธี Image Analysis โดยนำคอนกรีตมาตัดและถ่ายรูปหน้าตัด จากนั้นใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ “MATLAB” เพื่อวิเคราะห์หาพื้นที่ของมวลรวมหยาบต่อพื้นที่หน้าตัด และคำนวณกลับเป็นปริมาณมวลรวมหยาบต่อหนึ่งหน่วยคอนกรีต ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้ใน 3.4.7 ทั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์หลาย ๆ หน้าตัดต่อแต่ละสัดส่วนผสม และใช้หลักการทางสถิติมาร่วมในการวิเคราะห์ให้ได้ผลที่น่าเชื่อถือยิ่งขึ้น

#### 4.3.2 การหาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

ในการหาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน สามารถทำได้จากการคำนวณย้อนกลับจากค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรม “FACOMP” ซึ่งได้พัฒนาขึ้นที่ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในการหาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เริ่มจากสมมติค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเริ่มต้นสำหรับใช้ในขั้นตอนการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีต จากนั้นค่ากำลังอัดของคอนกรีตของสัดส่วนผสมที่ได้จากการวิเคราะห์ สามารถคำนวณได้จากคอมพิวเตอร์โปรแกรม “FACOMP” ซึ่งค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แท้จริงจะสามารถหา



ได้โดยการทำ Trial and errors จนกระทั่งค่ากำลังอัดของคอนกรีตของสัดส่วนผสมที่ได้จากการวิเคราะห์ มีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบ ขั้นตอนการหาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแสดงได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการหาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

#### 4.3.3 การทดสอบทางเคมี

ในการทดสอบทางเคมีโดยการทดสอบ Selective dissolution ซึ่งจะใช้กรดเพื่อทำละลายเฟสและส่วนที่มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ และจะได้ทราบเป็นส่วนที่เหลือจากการทำละลาย แต่อย่างไรก็ตาม จะมีปูนซีเมนต์เพียงเล็กน้อยที่เหลือจากการทำละลายด้วย ดังนั้นสามารถสร้างสมการเพื่อคำนวณหาปริมาณอัตราส่วนต่อหน่วยน้ำหนักแห้งของปูนซีเมนต์ และมวลรวมละเอียดในตัวอย่างทดสอบ โดยการแก้สมการ 2 ตัวแปร ดังแสดงในสมการที่ (4.1) และ (4.2)

$$r_t = r_c w_{cs} + r_s w_{ss} \quad (4.1)$$

$$1 = w_{cs} + w_{ss} + w_{ns} ; w_{ns} = 0.23(\alpha_c w_{cs}) \quad (4.2)$$



โดยที่  $r_t, r_c$  และ  $r_s$  คือน้ำหนักคงเหลือหลังการทดสอบ Selective dissolution ของตัวอย่าง ปูนซีเมนต์ และมวลรวมละเอียด ตามลำดับ  $w_{cs}, w_{ss}$  และ  $w_{ns}$  คือหน่วยน้ำหนักแห้งของปูนซีเมนต์ มวลรวมละเอียด และ Combined water ในตัวอย่างทดสอบ ตามลำดับ  $\alpha_c$  คืออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ในงานวิจัยนี้ มีค่าเท่ากับ 0.65, 0.70 และ 0.80 สำหรับคอนกรีตอายุ 14, 28 และ 91 วัน ตามลำดับ [17, 18, 19] 0.23 คือ Combined water สำหรับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สมบูรณ์ของปูนซีเมนต์ [1, 19, 20, 21].

#### 4.3.4 การคำนวณสัดส่วนผสมของคอนกรีต

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีต และหน่วยน้ำหนักแห้งของปูนซีเมนต์และมวลรวมละเอียดในตัวอย่างทดสอบ สามารถหาได้ตามที่ได้อธิบายไว้เบื้องต้น ดังนั้น อัตราส่วนต่อหน่วยน้ำหนักแห้งของมวลรวมหยาบ ปูนซีเมนต์และมวลรวมละเอียดในคอนกรีต สามารถหาได้จากสมการที่ (4.3) และ (4.4)

$$w_G = \frac{W_G}{(1 + a_G) \times UW_d} \quad (4.3)$$

$$1 = w_{cc} + w_{sc} + w_{nc} + w_G \quad (4.4)$$

โดยที่  $w_{cc}, w_{sc}, w_{nc}$  และ  $w_G$  หน่วยน้ำหนักแห้งของปูนซีเมนต์ มวลรวมละเอียด Combined water และมวลรวมหยาบในคอนกรีต ตามลำดับ  $W_G$  คือปริมาณมวลรวมหยาบในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) ( $\text{kg/m}^3$ )  $a_G$  คือค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ  $UW_d$  คือหน่วยน้ำหนักแห้งของคอนกรีต ( $\text{kg/m}^3$ ) สามารถหาได้จากการทดสอบตาม ASTM C642 [16]

เมื่อหาปริมาณอัตราส่วนต่อหน่วยน้ำหนักแห้งของปูนซีเมนต์ และมวลรวมละเอียด ได้แล้วสัดส่วนผสมของคอนกรีตสามารถหาได้จากสมการที่ (4.5)

$$\left. \begin{aligned} W_{cc} &= w_{cc} \times UW_d \\ W_{wc} &= W_{cc} \times (w/c) \\ W_{sc} &= w_{sc} \times UW_d \times (1 + a_s) \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$



โดยที่  $W_{cc}, W_{sc}$  และ  $W_{wc}$  คือมวลของปูนซีเมนต์ มวลรวมละเอียด และน้ำ ตามลำดับ (kg)  $a_s$  คือค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด  $w/c$  คืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

โดยทั่วไป สัดส่วนผสมของคอนกรีตจะคิดต่อปริมาตรคอนกรีต  $1 \text{ m}^3$  และมวลรวมในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) ดังนั้น ปริมาตรของสัดส่วนผสมคอนกรีตต่อ 1000 ลิตร ของคอนกรีตแสดงได้ดังสมการที่ (4.6) ซึ่งปริมาตรของแต่ละส่วนผสม สามารถหาได้จากการเอาค่าความถ่วงจำเพาะของแต่ละส่วนผสมมาหารมวลในสมการที่ (4.5) ดังนั้น ปริมาณปูนซีเมนต์ มวลรวมละเอียด และน้ำ ในสัดส่วนผสมคอนกรีต สามารถหาได้จากสมการที่ (4.7)

$$V_t = 1000 = V_c + V_s + V_w + V_G + V_{air} \quad (4.6)$$

$$\left. \begin{aligned} W_c &= V_c \times SG_c \\ W_s &= V_s \times SG_s \\ W_w &= W_c \times (w/c) \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

โดยที่  $V_t, V_c, V_s, V_w, V_G$  และ  $V_{air}$  คือ ปริมาตรของคอนกรีต ปูนซีเมนต์ มวลรวมละเอียด น้ำ มวลรวมลอยและอากาศของคอนกรีต 1000 ลิตร ตามลำดับ ( $\text{liters/m}^3$ )  $SG_c, SG_s$  และ  $SG_G$  คือค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ มวลรวมละเอียด และ มวลรวมลอย ตามลำดับ  $W_c, W_s$  และ  $W_w$  คือ ปริมาณปูนซีเมนต์ มวลรวมละเอียด และน้ำ ในสัดส่วนผสมคอนกรีต ( $\text{kg/m}^3$ )

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ล้วน

##### 4.4.1 ผลการหาปริมาณมวลรวมลอย

ปริมาณมวลรวมลอยในตัวอย่างคอนกรีต สามารถหาได้โดยการนำคอนกรีตมาตัดและถ่ายรูปหน้าตัด จากนั้นใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์หาพื้นที่ของมวลรวมลอยต่อพื้นที่หน้าตัด ซึ่งปริมาณมวลรวมลอยในคอนกรีตที่คำนวณได้ แสดงในตารางที่ 4.2 จากผลการวิเคราะห์ พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนระหว่าง 0.93 ถึง 5.28% ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 5.28% หรือ  $54 \text{ kg/m}^3$  นั้นถือว่าไม่มากและอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้



ตารางที่ 4.2 ปริมาณมวลรวมหยาบที่วิเคราะห์ได้

Sample	Design Coarse Aggregate Content (kg/m <sup>3</sup> )	Estimated Coarse Aggregate Content (kg/m <sup>3</sup> )	% Err.
W45C-A	1047	1033.3	-1.31
W45C-B1	1062	1071.6	+0.93
W45C-B2	1025	1037.7	+1.24
W55C-B2	1025	1079.1	+5.28
W65C-B2	1025	1054.1	+2.84

Note: - and + is underestimate and overestimate respectively.

#### 4.4.2 ผลการหาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 4.3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับจากค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ “FACOMP” แสดงดังตารางที่ 4.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของสัดส่วนผสมที่ออกแบบไว้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 6.67% ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าวิธีที่น่าเสนอ สามารถใช้ในการวิเคราะห์หาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วได้

ตารางที่ 4.3 กำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบ

Sample	Compressive strength (MPa)		
	14 days	28 days	91 days
W45C-A	-	43.99	48.95
W45C-B1	-	41.30	46.81
W45C-B2	33.96	-	41.87
W55C-B2	22.61	-	33.04
W65C-B2	17.66	-	23.23



ตารางที่ 4.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่คำนวณได้

Sample	Design	w/c					
		14 days		28 days		91 days	
		Estimated	Error (%)	Estimated	Error (%)	Estimated	Error (%)
W45C-A	0.45	-	-	0.42	-6.67	0.44	-2.22
W45C-B1	0.45	-	-	0.43	-4.44	0.45	0
W45C-B2	0.45	0.45	0	-	-	0.48	+6.67
W55C-B2	0.55	0.57	+3.64	-	-	0.56	+1.82
W65C-B2	0.65	0.65	0	-	-	0.69	+6.15

Note: - and + is underestimate and overestimate, respectively.

#### 4.4.3 ผลการทดสอบทางเคมี

จากการทดสอบทางเคมีโดยการทดสอบการทำละลาย ( Selective Dissolution) ของวัสดุและตัวอย่างคอนกรีต ซึ่งผลการทดสอบการทำละลาย ( Selective Dissolution) โดยใช้กรดเพื่อทำละลายเฟสดี และส่วนที่มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ แสดงได้ในตารางที่ 4.5 และ 4.6 ซึ่งผลการทดสอบที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตตามสมการที่กล่าวไว้เบื้องต้น

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการทำละลาย (Selective Dissolution) ของปูนซีเมนต์และมวลรวมละเอียด

Materials	Residue (%)		
	A	B1	B2
Cement	0.420	0.417	0.417
Sand	94.935	96.671	96.671

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการทำละลาย (Selective Dissolution) ของตัวอย่างคอนกรีต

Sample	Residue (%)		
	14 days	28 days	91 days
W45C-A	-	55.837	55.442
W45C-B1	-	59.437	59.323
W45C-B2	61.374	-	60.965
W55C-B2	64.380	-	64.011
W65C-B2	66.628	-	64.405



#### 4.4.4 ผลการคำนวณสัดส่วนผสมของคอนกรีต

สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่คำนวณได้ และค่าความคลาดเคลื่อน ของแต่ละสัดส่วนผสม แสดงได้ในตารางที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ที่ได้พบว่า สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ออกแบบไว้ โดยค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของน้ำ ปูนซีเมนต์ มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ มีค่าเท่ากับ 5.88 %, 7.56 %, 4.49 %, และ 5.28 % ตามลำดับ สำหรับค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของน้ำ ปูนซีเมนต์ มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ มีค่า เท่ากับ 5.88 %, 7.56 %, 4.49 %, และ 5.28 % ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่นำเสนอ สามารถวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและมวลรวมที่แตกต่างกันได้ นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่อายุต่าง ๆ กันได้อย่างแม่นยำ ทั้งนี้เนื่องจากได้มีการพิจารณาถึงผลของอายุของคอนกรีต โดยการนำอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมาร่วมในการวิเคราะห์ด้วย

ตารางที่ 4.7 สัดส่วนผสมของคอนกรีต

Mixer	Age	w/c	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Water (kg/m <sup>3</sup> )	Sand (kg/m <sup>3</sup> )	Limestone (kg/m <sup>3</sup> )
<b>W45C-A</b>	<b>Design</b>	<b>0.45</b>	<b>419</b>	<b>188</b>	<b>727</b>	<b>1047</b>
	28	0.42	430	181	751	1033
	91	0.44	424	187	741	1033
<b>W45C-B1</b>	<b>Design</b>	<b>0.45</b>	<b>407</b>	<b>183</b>	<b>737</b>	<b>1061</b>
	28	0.43	405	174	757	1072
	91	0.45	394	181	747	1072
<b>W45C-B2</b>	<b>Design</b>	<b>0.45</b>	<b>407</b>	<b>183</b>	<b>776</b>	<b>1025</b>
	14	0.45	393	177	790	1038
	91	0.48	384	184	779	1038
<b>W55C-B2</b>	<b>Design</b>	<b>0.55</b>	<b>360</b>	<b>198</b>	<b>776</b>	<b>1025</b>
	14	0.57	333	190	766	1079
	91	0.56	333	186	776	1079
<b>W65C-B2</b>	<b>Design</b>	<b>0.65</b>	<b>322</b>	<b>210</b>	<b>776</b>	<b>1025</b>
	14	0.65	307	200	786	1054
	91	0.69	312	215	741	1054



ตารางที่ 4.8 ค่าความคลาดเคลื่อนของสัดส่วนผสมของคอนกรีต

Mixer	Age	% Error				
		w/c	Cement	Water	Sand	Limestone
W45C-A	28	-6.67	+2.79	-4.06	+3.21	-1.31
	91	-2.22	+1.26	-0.99	+1.88	-1.31
W45C-B1	28	-4.44	-0.57	-4.99	+2.58	+0.93
	91	0	-3.26	-1.11	+1.29	+0.93
W45C-B2	14	0	-3.32	-3.32	+1.75	+1.24
	91	+6.67	-5.70	+0.66	+0.39	+1.24
W55C-B2	14	+3.64	-7.50	-4.13	+1.23	+5.28
	91	+1.82	-7.56	-5.88	0	+5.28
W65C-B2	14	0	-4.63	-4.94	+1.34	+2.84
	91	+6.15	-3.04	+2.58	-4.49	+2.84

Note: - and + is underestimate and overestimate respectively.

#### 4.5 สรุปผลการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ล้วน

วิธีการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่นำเสนอ สามารถวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและมวลรวมที่แตกต่างกันได้ โดยค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของน้ำ ปูนซีเมนต์ มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ มีค่า เท่ากับ 5.88 %, 7.56 %, 4.49 %, และ 5.28 % ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่อายุต่าง ๆ กันได้อย่างแม่นยำ ทั้งนี้เนื่องจากได้มีการพิจารณาถึงผลของอายุของคอนกรีต โดยการนำอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมาร่วมในการวิเคราะห์ด้วย



## บทที่ 5

### การวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย

#### 5.1 ทัวไป

ในบทนี้จะอธิบายการวิเคราะห์หาการมีอยู่ของเถ้าลอยในคอนกรีต และการวิเคราะห์หา สัดส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ร้อยละการแทนที่เถ้าลอย ปริมาณปูนซีเมนต์ เถ้าลอย น้ำ มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ โดยจะทำการศึกษากับคอนกรีตที่ผสมขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ

#### 5.2 สัดส่วนผสมและคุณสมบัติของวัสดุ

##### 5.2.1 สัดส่วนผสม

คอนกรีตที่ผสมขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ มีอัตราส่วนน้ำต่อ วัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.45, และ 0.55 ร้อยละการแทนที่เถ้าลอย 0.3 และ 0.5 โดยใช้มวลรวมแตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ A และ C ซึ่งตัวอย่างคอนกรีตทั้งหมดยกเว้น W45FA150-C เตรียมในห้องปฏิบัติการเดียวกัน สัดส่วนผสมคอนกรีตสำหรับการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย แสดงได้ดังตารางที่ 5.1 ซึ่งจะวิเคราะห์หา สัดส่วนผสมคอนกรีต ที่อายุ 28 และ 91 วัน

ตารางที่ 5.1 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมในห้องปฏิบัติการ

Sample	w/b	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Fly ash			Water (kg/m <sup>3</sup> )	Sand (kg/m <sup>3</sup> )	Limestone (kg/m <sup>3</sup> )
			Type	% rep.	(kg/m <sup>3</sup> )			
W45FA130-A	0.45	280	FA1	30	120	180	727	1047
W55FA130-A	0.55	249	FA1	30	107	196	727	1047
W45FA230-A	0.45	279	FA2	30	120	179	727	1047
W45FA150-C	0.45	193	FA1	50	193	174	729	1058

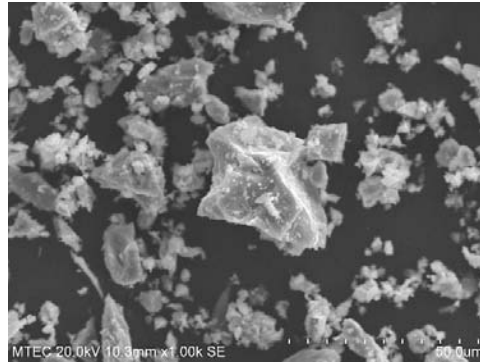
##### 5.2.2 คุณสมบัติของวัสดุ

คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ มีรายละเอียด ดังนี้

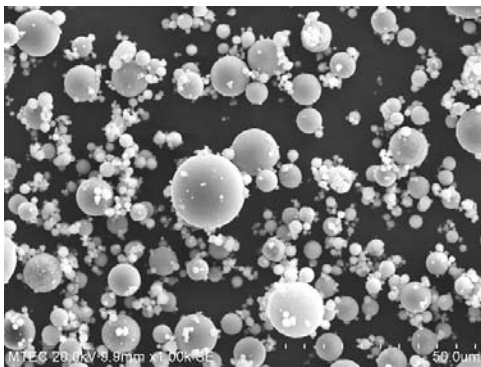
- 1) รูปร่างอนุภาคปูนซีเมนต์และเถ้าลอย



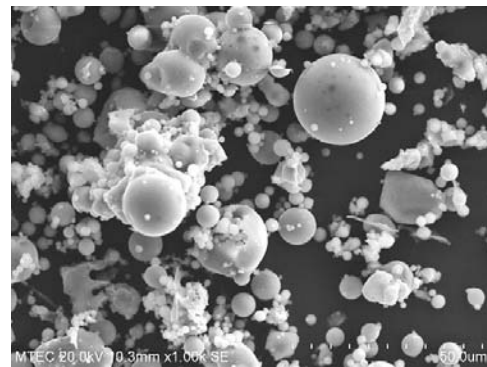
รูปร่างของอนุภาคปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทดสอบโดย SEM พบว่าปูนซีเมนต์มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม ดังแสดงในรูปที่ 5.1 (a) ในขณะที่เถ้าลอย FA1 มีรูปร่างกลมเกือบทุกอนุภาค (รูปที่ 5.1 (b)) ส่วนเถ้าลอย FA2 มีรูปร่างกลมเป็นบางอนุภาค (รูปที่ 5.1 (c))



(a) Portland Cement Type I



(b) FA1



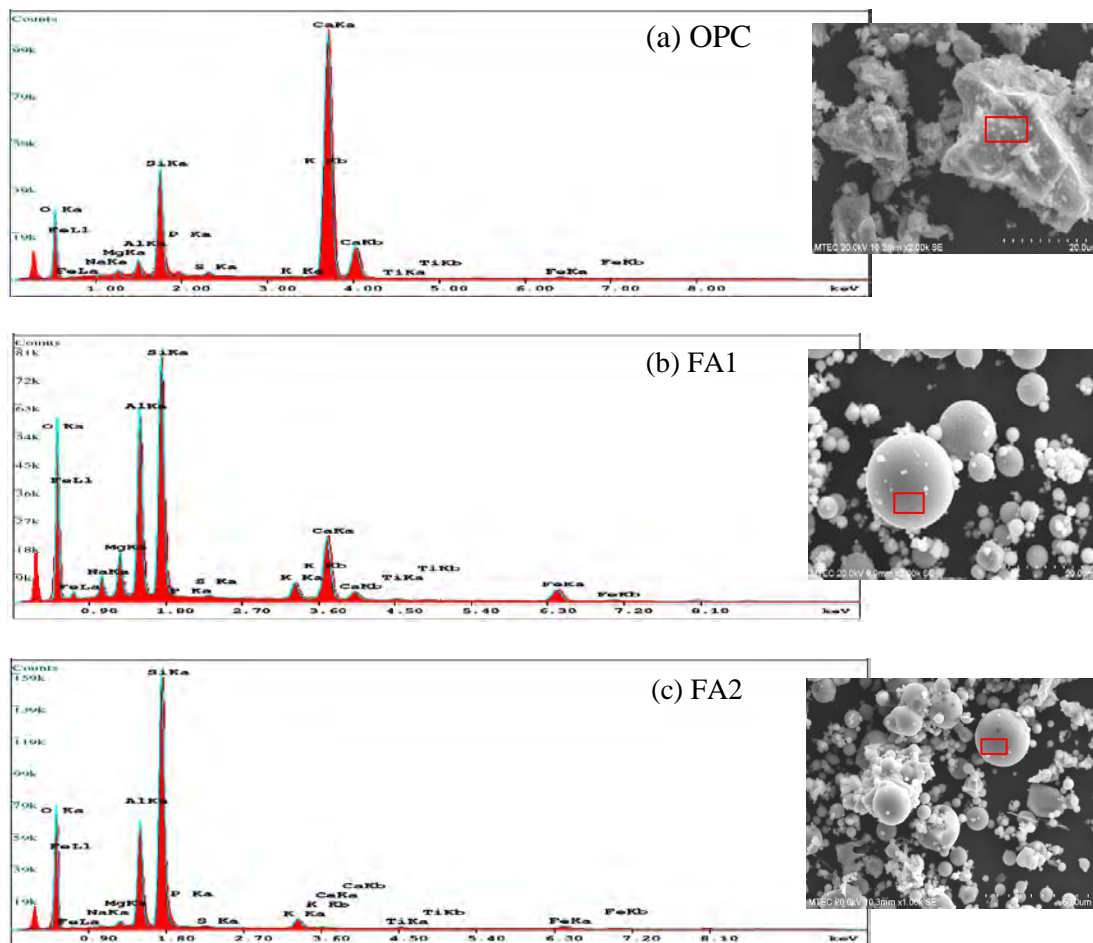
(c) FA2

รูปที่ 5.1 อนุภาคปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

## 2) คุณสมบัติทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย แสดงใน ตารางที่ 3.1 สำหรับธาตุองค์ประกอบทดสอบโดย SEM/EDX ของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย แสดงได้ในรูปที่ 5.2 อัตราส่วน Ca/Si ของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย แสดงในตารางที่ 5.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่า อัตราส่วน Ca/Si ของปูนซีเมนต์มีค่ามากกว่า 1 และเถ้าลอย FA1 ซึ่งมีปริมาณ Ca สูงกว่า FA2 ก็มีค่าอัตราส่วน Ca/Si ที่สูงกว่าด้วยเช่นกัน ส่วนตารางที่ 5.3 และ 5.4 แสดงปริมาณผลึกแร่ในเถ้าลอยโดยวิธี XRD และผลการทดสอบการทำละลาย (Selective Dissolution) ของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และทราย ตามลำดับ





รูปที่ 5.2 ธาตุองค์ประกอบ ทดสอบโดย SEM/EDX ของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

ตารางที่ 5.2 ปริมาณ Ca, Si และ อัตราส่วน Ca/Si ของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

Element	Cement	FA1	FA2
Ca (%)	39.79	7.34	0.18
Si (%)	13.38	23.93	38.83
Ca/Si Ratio	2.974	0.307	0.005



ตารางที่ 5.3 ปริมาณผลึกแร่ในตัวอย่างโดยวิธี XRD

Phase	FA1	FA2
Mullite (%)	1.867	10.929
Hematite (%)	0.602	0.455
Periclase (%)	1.574	0.276
Magnetite (%)	3.396	0.651
Lime (%)	0.389	0.039
Thernardite (%)	1.110	0.767
Quartz (%)	0.993	11.887
Anhydrite (%)	3.640	-
Rutile (%)	-	0.098
Arcanite (%)	0.313	0.572
Portlandite (%)	1.118	-
Tobermorite (%)	4.008	-
Amorphous (%)	80.989	74.290

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบการทำให้ละลาย (Selective Dissolution) ของปูนซีเมนต์ ตัวอย่าง และทราย

Samples	Residual weight %
OPC I	0.420
FA1	60.327
FA2	93.345
Sand-A	94.935
Sand-C	96.671

### 5.3 การวิเคราะห์หาการมีอยู่ของตัวอย่างในคอนกรีต

#### 5.3.1 วิธีการวิเคราะห์หาการมีอยู่ของตัวอย่างในคอนกรีต

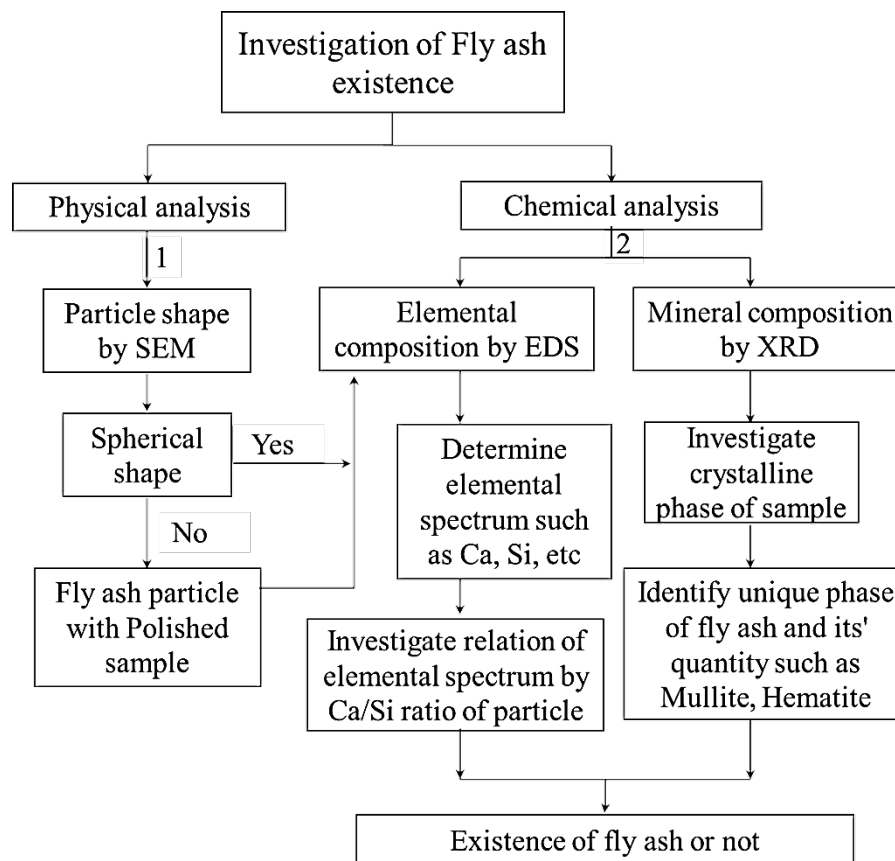
ในการตรวจสอบหาตัวอย่างในคอนกรีต ได้มีการใช้หลาย ๆ เทคนิคประกอบกัน ได้แก่

- Physical properties by Scanning Electron Microscope (SEM) analysis
- Physical and chemical analysis by Scanning Electron Microscope (SEM) equipped with Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer (EDX)



○ Mineral compositions by X-Ray Diffraction (XRD) analysis

โดยขั้นตอนการตรวจสอบหาเถ้าลอยในคอนกรีตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แผนผังแสดงวิธีการตรวจสอบหาการมีอยู่ของเถ้าลอยในคอนกรีต

### 1) การวิเคราะห์โดย SEM

ในการตรวจสอบทางด้านกายภาพสามารถทำได้โดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อตรวจสอบอนุภาคเถ้าลอยในคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วเถ้าลอยจะมีอนุภาคกลม เช่นเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ แต่ก็จะมีเถ้าลอยจากบางแหล่งที่รูปร่างไม่กลม มีลักษณะเป็นเหลี่ยม ขรุขระคล้ายอนุภาคของปูนซีเมนต์ หรือบางแหล่งอาจจะมีทั้งรูปร่างกลมและไม่กลมคละกัน ซึ่งถ้าคอนกรีตที่มีเถ้าลอยรูปร่างกลมผสมอยู่ในคอนกรีต การนำเศษคอนกรีตไปวิเคราะห์ด้วย SEM จะสามารถมองเห็นอนุภาคเถ้าลอยที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาได้อย่างชัดเจน แต่ถ้าเถ้าลอยที่ใช้มีรูปร่างเป็นเหลี่ยม วิธีนี้ก็ไม่สามารถใช้ตรวจสอบหาเถ้า



ล่อยได้ เนื่องจากไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างอนุภาคเถ้าลอย และอนุภาคปูนซีเมนต์ได้ ทั้งนี้ จึงต้องใช้การวิเคราะห์ทางเคมีร่วมด้วย

## 2) การวิเคราะห์โดย SEM/EDX/BSE

การวิเคราะห์โดยใช้ SEM ร่วมกับ Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer (EDX) จะสามารถวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคได้ โดยการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ Ca และ Si ของอนุภาคที่คาดว่าจะเป็อนุภาคของเถ้าลอยในเนื้อคอนกรีต ซึ่งอัตราส่วน Ca/Si โดยมวลของเถ้าลอยจะมีค่าต่ำกว่าปูนซีเมนต์มาก (ค่า Ca/Si ของปูนซีเมนต์จะมีค่าสูงกว่า 1)

## 3) การวิเคราะห์โดย XRD

สำหรับการทดสอบโดยใช้ X-Ray Diffraction (XRD) นั้น จะใช้เพื่อหาผลึกแร่ในเถ้าลอย โดยจะตรวจสอบหาผลึกแร่ที่มีอยู่แต่เฉพาะในเถ้าลอยแต่ไม่มีในส่วนประกอบอื่นของคอนกรีต เช่น Mullite, Thenardite, Hematite, และ Magnetite ในการตรวจสอบนั้นจะนำคอนกรีตมาทุบเพื่อแยกมวลรวมหยาบออกมา จากนั้นก็นำมอร์ตาร์ ที่เหลือ มาบดละเอียดก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วย XRD ซึ่งถ้าพบผลึกแร่ชนิดเดียวกันกับที่มีอยู่แต่เฉพาะในเถ้าลอย ก็สามารถสรุปได้ว่าคอนกรีตนั้นมีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม

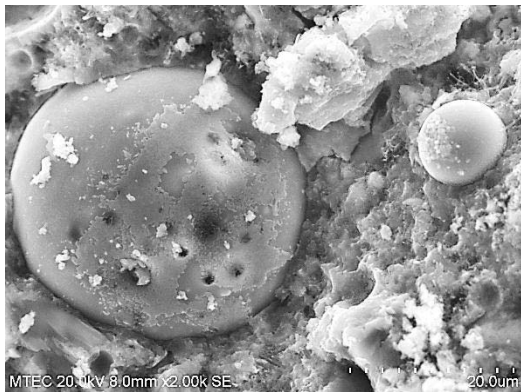
### 5.3.2 ผลการวิเคราะห์หาการมีอยู่ของเถ้าลอยในคอนกรีต

ได้ทำการวิเคราะห์หาการมีอยู่ของเถ้าลอยในคอนกรีตที่ผสมในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ W45FA130-A และ W45FA230-A ซึ่งผลการทดสอบมีดังนี้

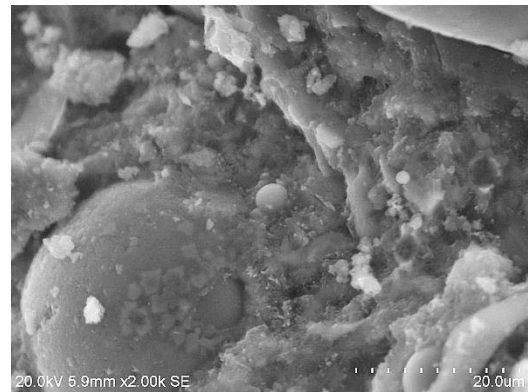
#### 1) ผลการวิเคราะห์โดย SEM

จากการวิเคราะห์เพื่อหาอนุภาคเถ้าลอยในคอนกรีต W45FA130-A และ W45FA230-A ที่อายุ 28 และ 91 วัน โดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) ดังรูปที่ 5.4 พบว่ามีอนุภาคกลมของเถ้าลอยในเนื้อคอนกรีต แต่ยังไม่สามารถระบุได้ว่าเป็นเถ้าลอย FA1 หรือ FA2 เนื่องจากเถ้าลอยทั้งสองชนิดมีอนุภาคกลมเช่นเดียวกัน ทั้งนี้จึงต้องมีการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคเหล่านั้นโดยใช้ EDX ร่วมด้วย

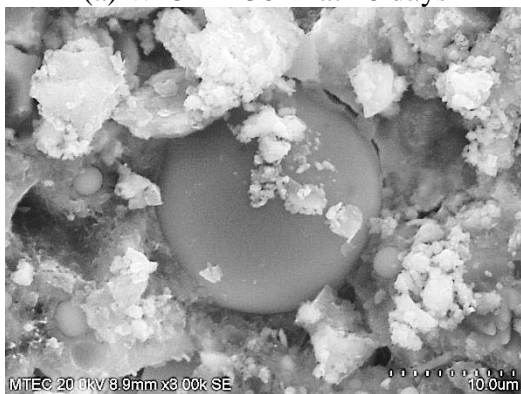




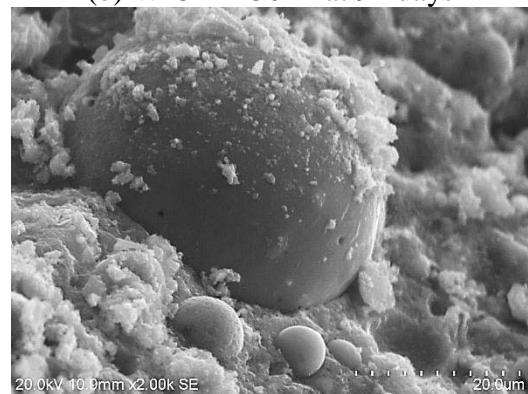
(a) W45FA130-A at 28 days



(b) W45FA130-A at 91 days



(c) W45FA230-A at 28 days

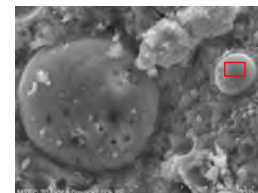
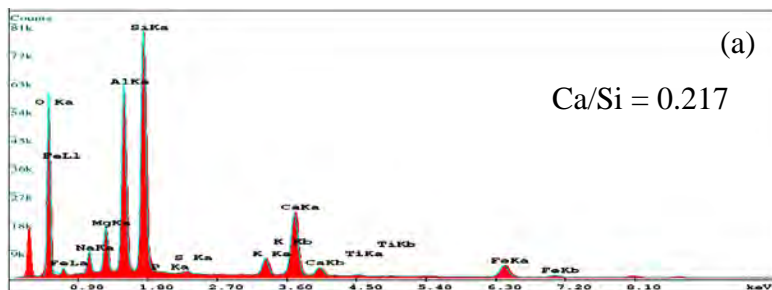


(d) W45FA230-A at 91 days

รูปที่ 5.4 ผลการวิเคราะห์ด้วย SEM ของตัวอย่างคอนกรีต

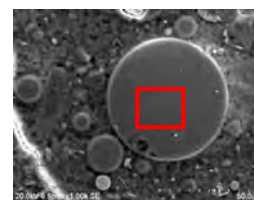
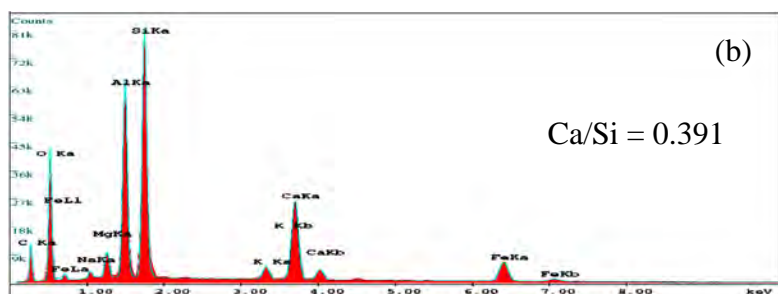
## 2) ผลการวิเคราะห์โดย SEM/EDX/BSE

ผลการวิเคราะห์ด้วย EDX ของเถ้าลอยในคอนกรีต W45FA130-A และ W45FA230-A ที่อายุ 28 และ 91 วัน แสดงได้ในรูปที่ 5.5 ซึ่ง Ca/Si ของอนุภาคเถ้าลอยในคอนกรีตแสดงได้ดังตารางที่ 5.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่า Ca/Si ของอนุภาคเถ้าลอยในคอนกรีต W45FA130-A มีค่าใกล้เคียงกับ Ca/Si ของเถ้าลอย FA1 ส่วน Ca/Si ของอนุภาคเถ้าลอยในคอนกรีต W45FA230-A มีค่าใกล้เคียงกับ Ca/Si ของเถ้าลอย FA2

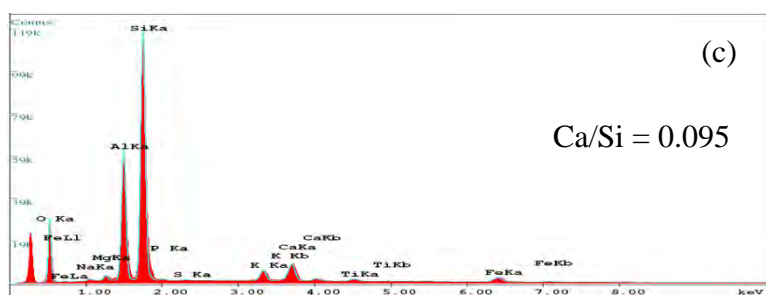


W45FA130-A  
at 28 days

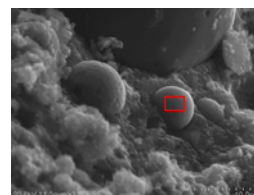
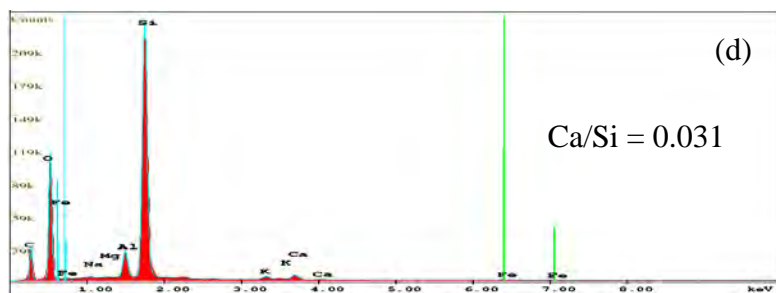




W45FA130-A  
at 91 days



W45FA230-A  
At 28 days



W45FA230-A  
at 91 days

รูปที่ 5.5 ผลการวิเคราะห์ด้วย SEM และ EDX ของตัวอย่างคอนกรีต

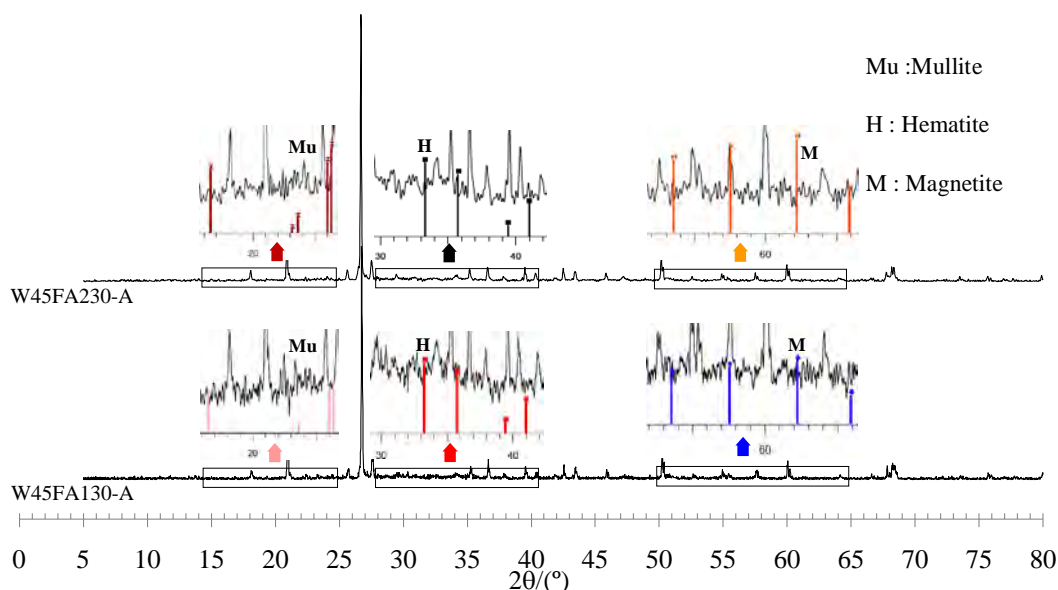
ตารางที่ 5.5 Ca/Si วิเคราะห์ด้วย SEM/ EDX ของตัวอย่างคอนกรีต

Element	Cement	FA1	FA2	W45FA130-A		W45FA230-A	
				28 days	91 days	28 days	91 days
Ca (%)	39.79	7.34	0.18	5.25	7.87	4.02	1.31
Si (%)	13.38	23.93	38.83	24.23	20.13	42.31	42.09
Ca/Si Ratio	2.974	0.307	0.005	0.217	0.391	0.095	0.031

### 3) ผลการวิเคราะห์โดย XRD

จากการวิเคราะห์ด้วย XRD ดังแสดงในรูปที่ 5.6 พบว่ามีผลึกแร่ Mullite, Hematite, และ Magnetite ในคอนกรีต ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าคอนกรีตมีเถ้าลอยผสมอยู่จริง





รูปที่ 5.6 XRD pattern ของตัวอย่างคอนกรีต

### 5.3.3 สรุปผลการวิเคราะห์หาการมีอยู่ของเถ้าลอยในคอนกรีต

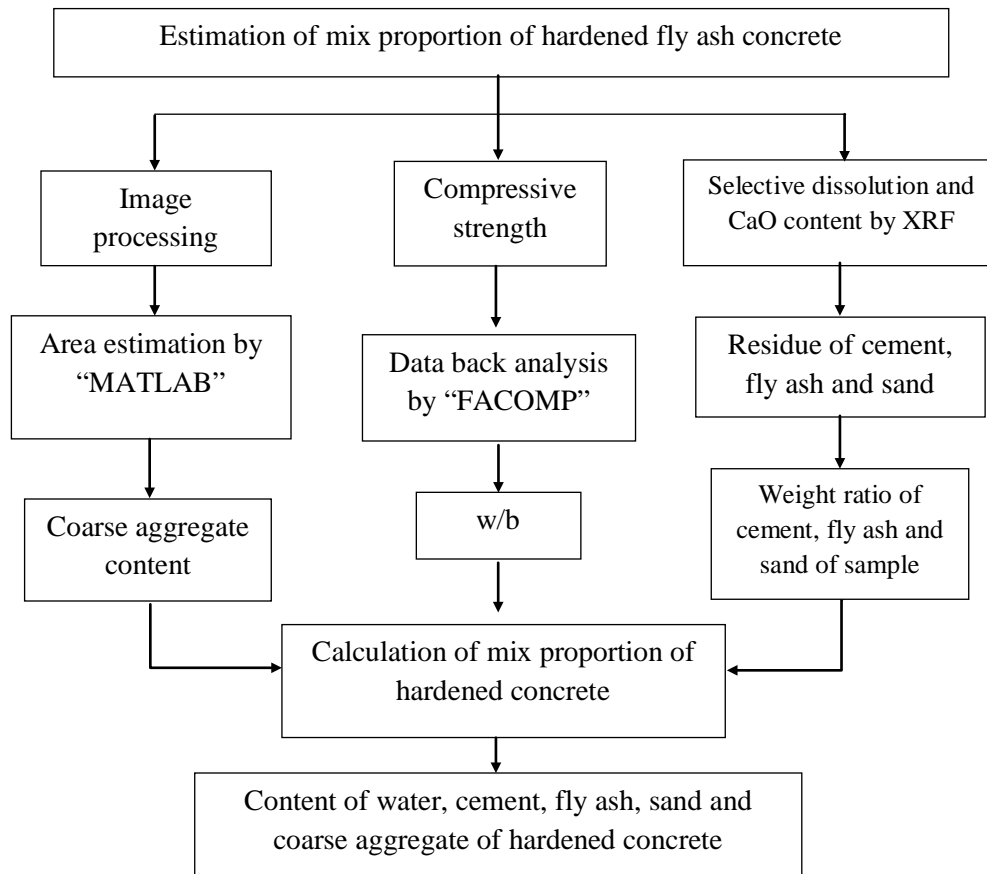
จากผลการวิเคราะห์ข้างต้น สรุปได้ว่าคอนกรีตมีเถ้าลอยผสมอยู่ และวิธีการวิเคราะห์หาการมีอยู่ของเถ้าลอยในคอนกรีตที่นำเสนอ สามารถใช้ในการตรวจสอบหาการมีอยู่ของเถ้าลอยในคอนกรีตได้อย่างแม่นยำ และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ยังสามารถวิเคราะห์หาชนิดของเถ้าลอยที่ผสมอยู่ในคอนกรีตได้ด้วย

## 5.4 การวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย

### 5.4.1 วิธีการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย

การวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย ประกอบไปด้วยการวิเคราะห์ 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่ การหาปริมาณมวลรวมหยาบด้วยวิธี Image analysis การหาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยการคำนวณย้อนกลับจากค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรม "FACOMP" และการทดสอบทางเคมีโดยทำการทดสอบ Selective dissolution เพื่อหามวลรวมละเอียดและเถ้าลอยที่เหลือจากการทำละลาย และการทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมี เช่น ปริมาณ CaO จากนั้นนำค่าที่ทดสอบได้ทั้งหมดมาคำนวณหาปริมาณส่วนผสมต่างๆในคอนกรีต ขั้นตอนวิธี การวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอยแสดงได้ดังรูปที่ 5.7





รูปที่ 5.7 ขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย

### 1) การหาปริมาณมวลรวมหยาบ

ในการหาปริมาณมวลรวมหยาบจะใช้วิธี Image Analysis โดยนำคอนกรีตมาตัดและถ่ายรูปหน้าตัด จากนั้นใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ “MATLAB” เพื่อวิเคราะห์หาพื้นที่ของมวลรวมหยาบต่อพื้นที่หน้าตัด และคำนวณกลับเป็นปริมาณมวลรวมหยาบต่อหนึ่งหน่วยคอนกรีต ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้ใน 3.4.7 ทั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์หลาย ๆ หน้าตัดต่อแต่ละสัดส่วนผสม และใช้หลักการทางสถิติมาร่วมในการวิเคราะห์ให้ได้ผลที่น่าเชื่อถือยิ่งขึ้น

### 2) การหาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

ในการหาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน สามารถทำได้จากการคำนวณย้อนกลับจากค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรม “FACOMP” ซึ่งได้พัฒนาขึ้นที่ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้ใน 4.3.2



### 3) การทดสอบทางเคมี

ในการทดสอบทางเคมีโดยการทดสอบ Selective dissolution ซึ่งจะใช้กรดเพื่อทำละลายเฟสและส่วนที่มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ และจะได้ทรายและเถ้าลอยเป็นส่วนที่เหลือจากการทำละลาย แต่อย่างไรก็ตาม จะมีปูนซีเมนต์เพียงเล็กน้อยที่เหลือจากการทำละลายด้วย และผลการทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมี เช่น ปริมาณ CaO ดังนั้นสามารถสร้างสมการเพื่อคำนวณหาปริมาณอัตราส่วนต่อหน่วยน้ำหนักแห้งของปูนซีเมนต์ เถ้าลอยและมวลรวมละเอียดในตัวอย่างทดสอบ โดยการแก้สมการ 3 ตัวแปร ( $w_{cs}$ ,  $w_{fs}$  และ  $w_{ss}$ ) ดังแสดงในสมการที่ (5.1) ถึง (5.3)

$$r_t = r_c w_{cs} + (1 - \alpha_f) r_f w_{fs} + r_s w_{ss} \quad (5.1)$$

$$C_t = C_c w_{cs} + C_f w_{fs} + C_s w_{ss} \quad (5.2)$$

$$1 = w_{cs} + w_{fs} + w_{ss} + w_{ns} ; w_{ns} = w_{nc}(\alpha_c w_{cs}) + w_{nf}(\alpha_f w_{fs}) \quad (5.3)$$

โดยที่  $r_t, r_c, r_f$  และ  $r_s$  คือน้ำหนักคงเหลือหลังการทดสอบ Selective dissolution ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และมวลรวมละเอียด ตามลำดับ  $C_t, C_c, C_f$  และ  $C_s$  คือปริมาณ CaO ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และมวลรวมละเอียด ตามลำดับ  $w_{cs}, w_{fs}, w_{ss}$  และ  $w_{ns}$  คือหน่วยน้ำหนักแห้งของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย มวลรวมละเอียด และ Combined water ในตัวอย่างทดสอบ ตามลำดับ  $\alpha_c$  และ  $\alpha_f$  คืออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และปฏิกิริยาปอสโซลานิกของเถ้าลอย ตามลำดับ  $w_{nc}$  คือ Combined water สำหรับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สมบูรณ์ของปูนซีเมนต์ ในงานวิจัยนี้ มีค่าเท่ากับ 0.23 [1, 19, 20, 21]  $w_{nf}$  คือ Combined water สำหรับการปฏิกิริยาปอสโซลานิกที่สมบูรณ์ของเถ้าลอย ในงานวิจัยนี้ มีค่าเท่ากับ 0.20 และ 0.18 สำหรับร้อยละการแทนที่เถ้าลอย FA1 ที่ 30% และ 50% ตามลำดับ และมีค่าเท่ากับ 0.173 สำหรับเถ้าลอย FA2 [19]

### 4) การคำนวณสัดส่วนผสมของคอนกรีต

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีต และหน่วยน้ำหนักแห้งของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และมวลรวมละเอียดในตัวอย่างทดสอบ สามารถหาได้ตามที่ได้อธิบายไว้เบื้องต้น ดังนั้นอัตราส่วนต่อหน่วยน้ำหนักแห้งของมวลรวมหยาบ ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และมวลรวมละเอียดในคอนกรีต สามารถหาได้จากสมการที่ (5.4) และ (5.5)



$$w_G = \frac{W_G}{(1+a_G) \times UW_d} \quad (5.4)$$

$$1 = w_{cc} + w_{fc} + w_{sc} + w_n + w_G \quad (5.5)$$

โดยที่  $w_{cc}, w_{fc}, w_{sc}, w_n$  และ  $w_G$  หน่วยน้ำหนักแห้งของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย มวลรวมละเอียด Combined water และ มวลรวมหยาบในคอนกรีต ตามลำดับ  $W_G$  คือปริมาณมวลรวมหยาบในสภาวะอิ่มตัว ผิวแห้ง (SSD) ( $\text{kg/m}^3$ )  $a_G$  คือค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ  $UW_d$  คือหน่วยน้ำหนักแห้งของ คอนกรีต ( $\text{kg/m}^3$ ) สามารถหาได้จากการทดสอบตาม ASTM C642 [16]

เมื่อหาปริมาณอัตราส่วนต่อหน่วยน้ำหนักแห้งของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และมวลรวมละเอียด ได้แล้ว สัดส่วนผสมของคอนกรีตสามารถหาได้จากสมการที่ (5.6)

$$\left. \begin{aligned} W_{cc} &= w_{cc} \times UW_d \\ W_{fc} &= w_{fc} \times UW_d \\ W_{sc} &= w_{sc} \times UW_d \times (1+a_s) \\ W_{wc} &= (W_{cc} + W_{fc}) \times (w/b) \end{aligned} \right\} \quad (5.6)$$

โดยที่  $W_{cc}, W_{fc}, W_{sc}$  และ  $W_{wc}$  คือมวลของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย มวลรวมละเอียด และน้ำ ตามลำดับ (kg)  $a_s$  คือค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด  $w/c$  คืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

โดยทั่วไป สัดส่วนผสมของคอนกรีตจะคิดต่อปริมาตรคอนกรีต  $1 \text{ m}^3$  และมวลรวมในสภาวะอิ่มตัว ผิวแห้ง (SSD) ดังนั้น ปริมาตรของสัดส่วนผสมคอนกรีตต่อ 1000 ลิตร ของคอนกรีตแสดงได้ดังสมการที่ (5.7) ซึ่งปริมาตรของแต่ละส่วนผสม สามารถหาได้จากการเอาค่าความถ่วงจำเพาะของแต่ละส่วนผสมมาหารมวลในสมการที่ (5.6) ดังนั้น ปริมาณปูนซีเมนต์ เถ้าลอย มวลรวมละเอียด และน้ำ ในสัดส่วนผสม คอนกรีต สามารถหาได้จากสมการที่ (5.8)



$$V_t = 1000 = V_c + V_f + V_s + V_w + V_G + V_{air} \quad (5.7)$$

$$\left. \begin{aligned} W_c &= V_c \times SG_c \\ W_f &= V_f \times SG_f \\ W_s &= V_s \times SG_s \\ W_w &= (W_c + W_f) \times (w/b) \end{aligned} \right\} \quad (5.8)$$

โดยที่  $V_t, V_c, V_f, V_s, V_w, V_G$  และ  $V_{air}$  คือ ปริมาตรของคอนกรีต ปูนซีเมนต์ แก้วลอย มวลรวมละเอียด น้ำ มวลรวมหยาบและอากาศของคอนกรีต 1000 ลิตร ตามลำดับ (liters/m<sup>3</sup>)  $SG_c, SG_f, SG_s$  และ  $SG_G$  คือค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ แก้วลอย มวลรวมละเอียด และ มวลรวมหยาบ ตามลำดับ  $W_c, W_f, W_s$  และ  $W_w$  คือ ปริมาณปูนซีเมนต์ แก้วลอย มวลรวมละเอียด และน้ำ ในสัดส่วนผสมคอนกรีต ตามลำดับ (kg/m<sup>3</sup>)

#### 5.4.2 ผลการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมแก้วลอย

##### 1) ผลการหาปริมาณมวลรวมหยาบ

ปริมาณมวลรวมหยาบในตัวอย่างคอนกรีต สามารถหาได้โดยการนำคอนกรีตมาตัดและถ่ายรูปหน้าตัด จากนั้นใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์หาพื้นที่ของมวลรวมหยาบต่อพื้นที่หน้าตัด ซึ่งปริมาณมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่คำนวณได้ แสดงในตารางที่ 5.6 จากผลการวิเคราะห์ พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนระหว่าง 0.06 ถึง 4.58% ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 4.58% หรือ 48 kg/m<sup>3</sup> นั้นถือว่าไม่มากและอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

ตารางที่ 5.6 ปริมาณมวลรวมหยาบที่วิเคราะห์ได้

Sample	Design Coarse Aggregate Content (kg/m <sup>3</sup> )	Estimated Coarse Aggregate Content (kg/m <sup>3</sup> )	% Err.
W45FA130-A	1047	1048	+0.06
W55FA130-A	1047	1095	+4.58
W45FA230-A	1047	1087	+3.86
W45FA150-C	1058	1103	+4.34

Note: - and + is underestimate and overestimate respectively.



## 2) ผลการหาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 5.7 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับจากค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ “FACOMP” แสดงดังตารางที่ 5.8 ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของสัดส่วนผสมที่ออกแบบไว้ ยกเว้น W45FA150-C ที่อายุ 91 วัน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณ 10% ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าวิธีที่นำเสนอ สามารถใช้ในการวิเคราะห์หาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วได้

ตารางที่ 5.7 กำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบ

Sample	Compressive strength (MPa)	
	28 days	91 days
W45FA130-A	34.79	42.02
W55FA130-A	19.28	25.32
W45FA230-A	29.13	41.80
W45FA150-C	17.12	32.79

ตารางที่ 5.8 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่คำนวณได้

Sample	Design	w/b			
		28 days		91 days	
		Estimated	Error (%)	Estimated	Error (%)
W45FA130-A	0.45	0.40	-11.11	0.43	-4.44
W55FA130-A	0.55	0.58	+5.45	0.61	+10.91
W45FA230-A	0.45	0.49	+8.89	0.47	+4.44
W45FA150-C	0.45	0.43	-4.44	0.37	-17.78

Note: - and + is underestimate and overestimate, respectively.

## 3) ผลการทดสอบทางเคมี

จากการทดสอบทางเคมีโดยการทดสอบการทำละลาย ( Selective Dissolution) ของตัวอย่างคอนกรีต ซึ่งผลการทดสอบการทำละลาย (Selective Dissolution) โดยใช้กรดเพื่อทำละลายเฟสดีและส่วนที่มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ และผลการทดสอบหาปริมาณ CaO ของตัวอย่างคอนกรีต แสดงได้ในตารางที่



## 5.9 ซึ่งผลการทดสอบที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตตามสมการที่กล่าวไว้เบื้องต้น

ตารางที่ 5.9 ผลการทดสอบการทำการละลาย (Selective Dissolution) และปริมาณ CaO ของตัวอย่างคอนกรีต

Sample	Residue (%)		CaO (%)	
	28 days	91 days	28 days	91 days
W45FA130-A	61.041	59.361	17.699	18.298
W55FA130-A	64.165	62.245	16.285	16.570
W45FA230-A	66.230	65.101	16.719	16.675
W45FA150-C	66.230	66.212	13.977	13.121

### 4) ผลการคำนวณสัดส่วนผสมของคอนกรีต

สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่คำนวณได้ และค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละสัดส่วนผสม แสดงได้ในตารางที่ 5.10 และ 5.11 ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ที่ได้พบว่า สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่คำนวณได้ ยกเว้นถั่วลอย มีค่าใกล้เคียงกับสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ออกแบบไว้ โดยค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของน้ำ ปูนซีเมนต์ ถั่วลอย มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ มีค่าเท่ากับ 13.84%, 47.55%, 6.44%, 11.26%, และ 3.21% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่นำเสนอ สามารถวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและมวลรวมที่แตกต่างกันได้ นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่อายุต่าง ๆ กันได้อย่างแม่นยำ ทั้งนี้เนื่องจากได้มีการพิจารณาถึงผลของอายุของคอนกรีต โดยการนำอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมาร่วมในการวิเคราะห์ด้วย



ตารางที่ 5.10 สัดส่วนผสมของคอนกรีต

Mixer	w/b	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Fly ash		Water (kg/m <sup>3</sup> )	Sand (kg/m <sup>3</sup> )	Crush Limestone (kg/m <sup>3</sup> )
			% rep.	(kg/m <sup>3</sup> )			
<b>W45FA130-A</b>	<b>0.45</b>	<b>280</b>	<b>30</b>	<b>120</b>	<b>180</b>	<b>727</b>	<b>1047</b>
28 days	0.40	248	43.7	193	176	680	1048
91 days	0.43	276	34.6	146	181	698	1048
<b>W55FA130-A</b>	<b>0.55</b>	<b>249</b>	<b>30</b>	<b>107</b>	<b>196</b>	<b>727</b>	<b>1047</b>
28 days	0.58	216	37.4	129	200	672	1095
91 days	0.61	231	30.5	101	203	685	1095
<b>W45FA230-A</b>	<b>0.45</b>	<b>279</b>	<b>30</b>	<b>120</b>	<b>179</b>	<b>727</b>	<b>1047</b>
28 days	0.49	304	0.03	10	154	862	1088
91 days	0.47	297	12.8	44	160	811	1088
<b>W45FA150-C</b>	<b>0.45</b>	<b>193</b>	<b>50</b>	<b>193</b>	<b>174</b>	<b>729</b>	<b>1062</b>
28 days	0.43	127	71.5	319	192	547	1103
91 days	0.37	140	67.8	294	160	648	1103

ตารางที่ 5.11 ค่าความคลาดเคลื่อนของสัดส่วนผสมของคอนกรีต

Mixer	Age (days)	% Error					
		w/b	Cement	Fly ash	Water	Sand	Crush Limestone
W45FA130-A	28	-11.11	-11.34	+60.69	-1.99	-6.55	+0.06
	91	-4.44	-1.51	+21.44	+0.69	-4.05	+0.06
W55FA130-A	28	+5.45	-13.30	+20.71	+2.19	-7.55	+4.58
	91	-10.91	-7.30	-5.15	+3.53	-5.88	+4.58
W45FA230-A	28	+8.89	+8.76	-91.72	-14.39	+18.54	+3.86
	91	+4.44	+6.59	-63.51	-10.64	+11.46	+3.86
W45FA150-C	28	-4.44	-34.16	+65.08	+10.33	-24.95	+4.34
	91	-17.78	-27.78	+52.07	-7.79	-11.12	+4.34
Mean error (%)		8.43	13.84	47.55	6.44	11.26	3.21



#### 5.4.3 สรุปผลการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย

วิธีการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่นำเสนอ สามารถวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและมวลรวมที่แตกต่างกันได้ โดยค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของน้ำ ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ มีค่า เท่ากับ 13.84 %, 47.55 %, 6.44 %, 11.26%, และ 3.21 % ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่อายุต่างๆกันได้อย่างแม่นยำ ทั้งนี้ เนื่องจากการได้มีการพิจารณาถึงผลของอายุของคอนกรีต โดยการนำอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมารวมในการวิเคราะห์ด้วย



## บทที่ 6

### การวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมของคอนกรีตจากโครงสร้างจริง

#### 6.1 ทั่วไป

ในบทนี้ เป็นการนำเสนอตัวอย่างการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่เจาะมาจากโครงสร้างจริง เพื่อยืนยันวิธีการตรวจสอบหาสัดส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งการตรวจสอบ ได้กระทำร่วมกับการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากเอกสารคอนกรีตที่ผู้ผลิตคอนกรีต หรือผู้รับเหมาบันทึกไว้ รวมถึงข้อมูลของกำลังรับแรงอัดที่วัดจาก Cored Sample โดยเป็นการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตเพื่อหาสาเหตุที่ทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่าที่กำหนด

#### 6.2 ตัวอย่างการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมของคอนกรีตจากโครงสร้างจริง กรณีที่ 1

ในกรณีนี้ เป็นกรณีศึกษาการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตของตัวอย่างคอนกรีตที่เจาะจากโครงสร้างจริง ซึ่งเป็นคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดค่อนข้างต่ำประมาณ 180 ksc ที่อายุหนึ่งปี จากที่ได้ออกแบบไว้ในข้อกำหนดสำหรับกำลังรับแรงอัด 280 ksc ที่อายุ 28 วัน ทั้งนี้การวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตก็เพื่อต้องการหาสาเหตุที่ทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดต่ำ

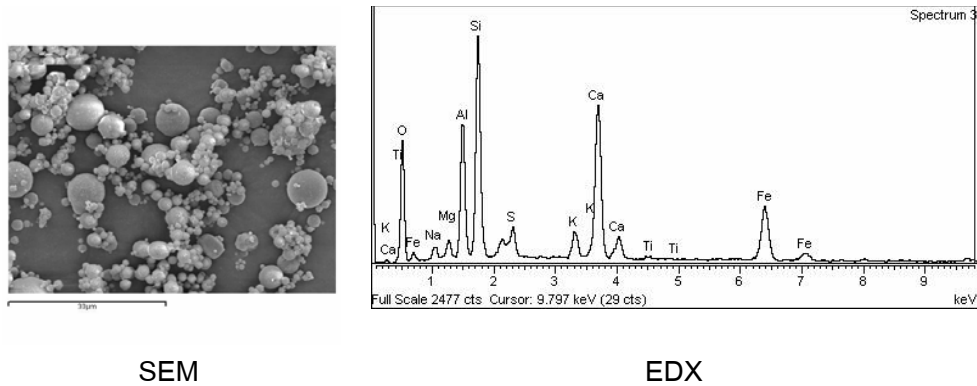
โดยทั่วไป การวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตจะมีความแม่นยำมากขึ้นหากมีข้อมูลองค์ประกอบหรือตัวอย่างวัตถุดิบที่ใช้ในคอนกรีตนั้น แต่เนื่องจากในกรณีศึกษาไม่มีข้อมูลเหล่านั้น ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์จากตัวอย่างคอนกรีตและสัดส่วนผสมคอนกรีตที่ได้จากผู้ผลิตคอนกรีต ทั้งนี้ได้มีการนำตัวอย่างตัวอย่างสามชนิดจากสามแหล่งที่มีคุณสมบัติต่างกันและเป็นตัวอย่างที่คาดว่าจะมีการใช้ในโรงงานผลิตคอนกรีตบริเวณนั้นมาใช้ในการวิเคราะห์เพิ่มเติมด้วย

##### 6.2.1 การตรวจสอบหาเอกลักษณ์ในตัวอย่างคอนกรีต

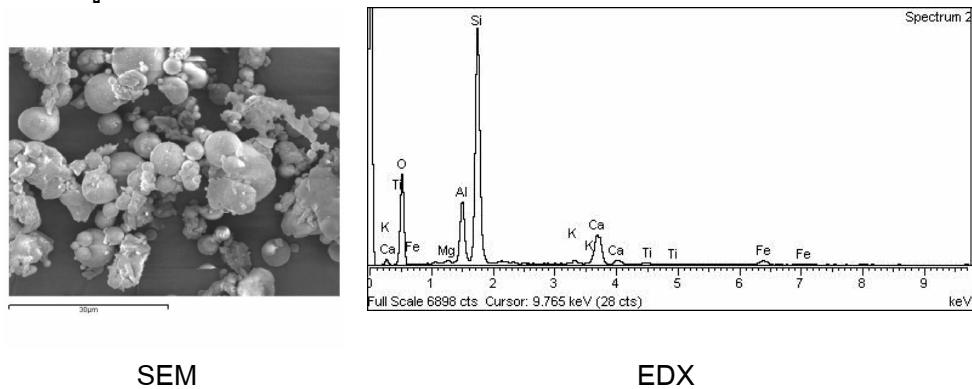
จากการวิเคราะห์ทางด้านกายภาพของตัวอย่างโดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) จะเห็นได้ว่าเอกลักษณ์ชนิดที่ 1 มีอนุภาคกลม ส่วนเอกลักษณ์ชนิดที่ 2 ส่วนมากมีอนุภาคกลมและเป็นเหลี่ยมบางส่วน ส่วนเอกลักษณ์ชนิดที่ 3 มีอนุภาคขรุขระ ดังแสดงในรูปที่ 6.1 ถึง 6.3 ตามลำดับ จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์เพื่อหาอนุภาคเอกลักษณ์ในคอนกรีต ดังรูปที่ 6.4 จะเห็นได้ว่าไม่ปรากฏอนุภาคกลมของเอกลักษณ์ในเนื้อคอนกรีต แต่พบว่าบางอนุภาค ทั้งขนาดและรูปร่างมีลักษณะคล้ายกับเอกลักษณ์ชนิดที่ 3 ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าคอนกรีตนี้มีเอกลักษณ์ผสมอยู่ ทั้งนี้จึงต้องมีการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคเหล่านั้นโดยใช้ EDX ร่วมด้วย



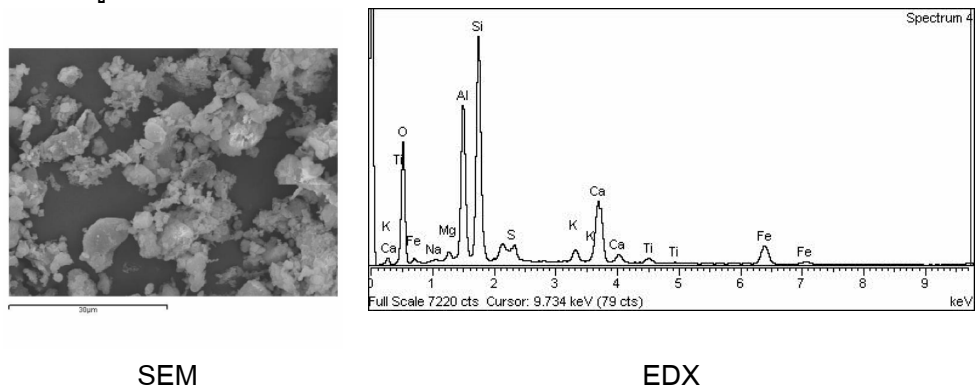
ผลการวิเคราะห์ด้วย EDX ของเถ้าลอยทั้งสามชนิดได้แสดงในรูปที่ 6.1 ถึง 6.3 เถ้าลอยชนิดที่ 1 เถ้าลอยชนิดที่ 2 และเถ้าลอยชนิดที่ 3 มีค่า Ca/Si เท่ากับ 0.98, 0.21, และ 0.39 ตามลำดับ และผลการวิเคราะห์ด้วย EDX ของอนุภาคในคอนกรีตได้แสดงในรูปที่ 6.4 ซึ่ง Ca/Si ของอนุภาคในคอนกรีตเท่ากับ 0.36 และจะเห็นได้ว่ามีลักษณะคล้ายกับผลการวิเคราะห์ของเถ้าลอยชนิดที่ 3 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า คอนกรีตน่าจะมีเถ้าลอยผสมอยู่ และหากเป็นเช่นนั้นเถ้าลอยที่ผสมอยู่ก็น่าจะเป็นเถ้าลอยชนิดที่ 3



รูปที่ 6.1 ผลการวิเคราะห์ด้วย SEM และ EDX ของเถ้าลอยชนิดที่ 1

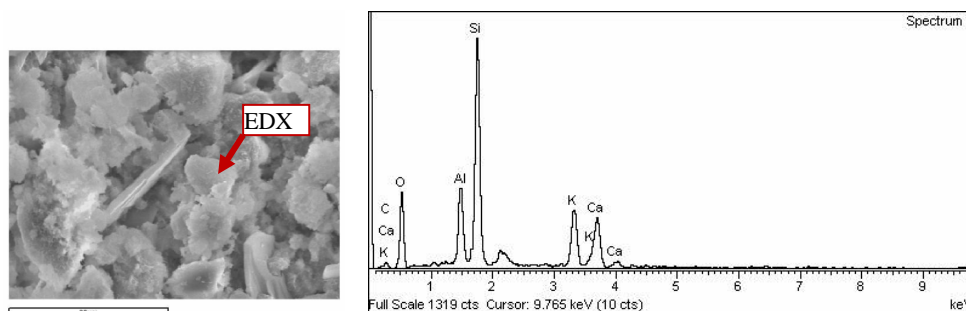


รูปที่ 6.2 ผลการวิเคราะห์ด้วย SEM และ EDX ของเถ้าลอยชนิดที่ 2



รูปที่ 6.3 ผลการวิเคราะห์ด้วย SEM และ EDX ของเถ้าลอยชนิดที่ 3





SEM

EDX

รูปที่ 6.4 ผลการวิเคราะห์ด้วย SEM และ EDX ของตัวอย่างคอนกรีต

ทั้งนี้ผลจากการวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่าคอนกรีตไม่มีผลึกแร่ Mullite, Hematite, และ Magnetite ในคอนกรีต ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณผลึกแร่เหล่านี้ มีน้อยมากเมื่อเทียบกับผลึกแร่หลักอย่างเช่น Quartz อย่างไรก็ตามยังพบ Thenardite 0.19% ในคอนกรีต ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าคอนกรีตมีเกลือผสมอยู่จริง

นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณ amorphous ในเกลือซึ่งบ่งบอกถึงส่วนที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ของ เกลือชนิดที่ 3 มีน้อยกว่าของเกลือชนิดที่ 1 ประมาณ 30% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ้ามีการใช้เกลือทั้งสองชนิดนี้ในคอนกรีตในปริมาณที่เท่ากัน คุณสมบัติของคอนกรีตเช่นกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมเกลือชนิดที่ 3 จะต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมเกลือชนิดที่ 1

## 6.2.2 การวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมในตัวอย่างคอนกรีต

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้น สรุปได้ว่าคอนกรีตมีเกลือผสมอยู่ และเป็นเกลือที่มีอนุภาคขรุขระ และมีคุณสมบัติคล้ายกับของเกลือชนิดที่ 3 ดังนั้นจึงใช้องค์ประกอบทางเคมีของเกลือชนิดที่ 3 ในการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีต

คอนกรีตมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 180 ksc ซึ่งสามารถคำนวณอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจากการคำนวณย้อนกลับจากค่ากำลังรับแรงอัดโดยใช้คอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์ “FACOMP” ได้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.83 และจากการวิเคราะห์โดยใช้วิธี Image Analysis สามารถคำนวณหาปริมาตรมวลรวมหยาบต่อหนึ่งหน่วยคอนกรีตได้ 0.39 และคิดเป็นปริมาณมวลรวมหยาบได้เท่ากับ  $1087.40 \text{ kg/m}^3$

สำหรับปริมาณองค์ประกอบอื่นในคอนกรีตสามารถคำนวณได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี selective dissolution และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี เช่น ปริมาณ CaO ซึ่งในการวิเคราะห์จะคำนวณ ส่วนผสมคอนกรีตเป็นร้อยละโดยน้ำหนักแห้งก่อน (oven-dried weight ratio) จากนั้นจึงคำนวณเป็นปริมาณ ส่วนประกอบคอนกรีตในหนึ่งหน่วยปริมาตรคอนกรีตโดยใช้หน่วยน้ำหนักแห้งของคอนกรีตตาม ASTM C642 โดยสัดส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตที่คำนวณได้สามารถแสดงได้ในตารางที่ 1



จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตค่อนข้างสูง ซึ่งอาจเป็นเพราะปริมาณวัสดุประสานน้อยกว่าที่ต้องการ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าปริมาณวัสดุประสานที่น้อย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมาก และร้อยละการแทนที่เถ้าลอยที่มากส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำ

อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์หาละการแทนที่เถ้าลอยและปริมาณวัสดุประสานอาจมีความคลาดเคลื่อนได้บ้าง เนื่องจากไม่ทราบคุณสมบัติของเถ้าลอยที่ใช้จริงในตัวอย่างคอนกรีต

ตารางที่ 6.1 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่คำนวณได้

องค์ประกอบคอนกรีต	ปริมาณ
ปูนซีเมนต์ ( $\text{kg/m}^3$ )	176.89
เถ้าลอย ( $\text{kg/m}^3$ )	87.57
ทราย ( $\text{kg/m}^3$ )	649.65
มวลรวมหยาบ ( $\text{kg/m}^3$ )	1,087.40
น้ำ ( $\text{kg/m}^3$ )	220.64
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b)	0.83
ร้อยละการแทนที่เถ้าลอย	0.33

### 6.2.3 สรุปผลการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมของคอนกรีตจากโครงสร้างจริง กรณีที่ 1

วิธีวิเคราะห์ทั้งทางกายภาพและทางเคมีที่ได้นำเสนอสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่แข็งตัวแล้วได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการหาสาเหตุกำลังรับแรงอัดต่ำของตัวอย่างคอนกรีตได้

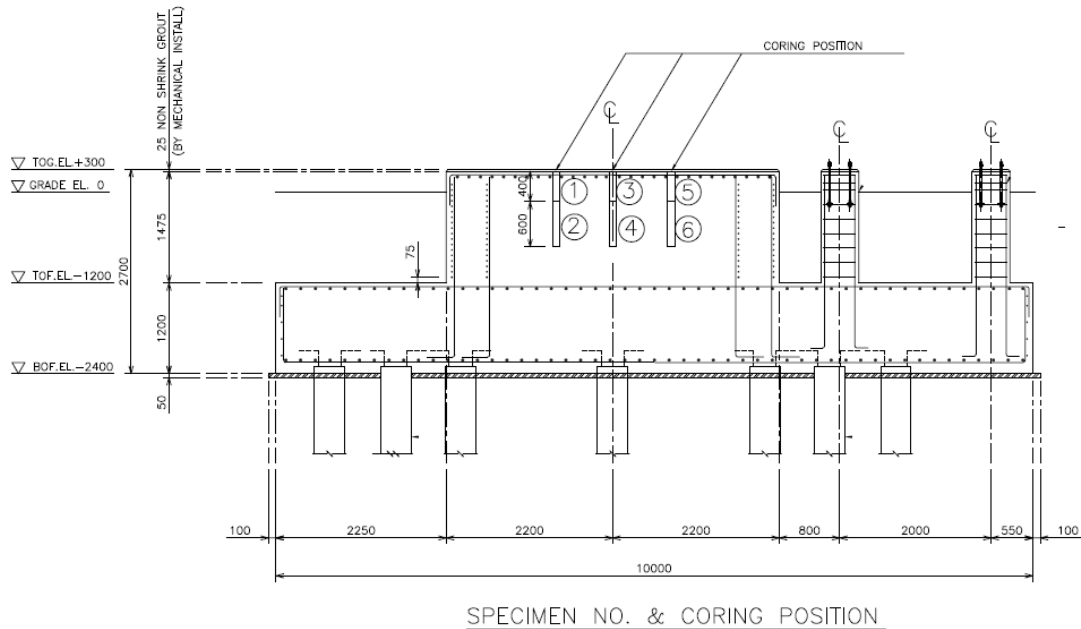
จากการตรวจสอบเถ้าลอยในคอนกรีตดังที่ได้กล่าวถึงไปแล้วนั้น สามารถสรุปได้ว่าคอนกรีตมีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม ซึ่งเถ้าลอยนั้นมีคุณภาพค่อนข้างต่ำ ดังนั้นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตต่ำนั้นมาจากการใช้เถ้าลอยที่ไม่มีการควบคุมคุณภาพอย่างเพียงพอ นอกจากนี้ปริมาณวัสดุประสานที่น้อย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมาก และร้อยละการแทนที่เถ้าลอยที่มากยังส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำด้วยเช่นกัน

### 6.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมของคอนกรีตจากโครงสร้างจริง กรณีที่ 2

เป็นการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่เจาะจากโครงสร้างฐานราก เพื่อที่จะสามารถนำไปประเมินหาสาเหตุของค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ต่ำกว่าค่าที่กำหนด ซึ่ง ค่ากำลังอัดที่กำหนดที่อายุ 28 วัน คือ 210 ksc แต่ค่าที่ได้จากการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่เจาะเก็บจากโครงสร้างฐานรากที่อายุ 3 เดือน จำนวน 6 ตัวอย่าง มีค่าเฉลี่ยประมาณ 168 ksc เท่านั้น โดยตัวอย่างที่นำมาทดสอบหาสัดส่วนผสม



คอนกรีต เป็นตัวอย่างคอนกรีตที่เจาะเก็บจากฐานราก 6 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูป 6.5 ซึ่งตัวอย่างทั้งหมดผ่านการทดสอบกำลังอัดมาแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.5 ตำแหน่งการเจาะเก็บตัวอย่างจากฐานราก

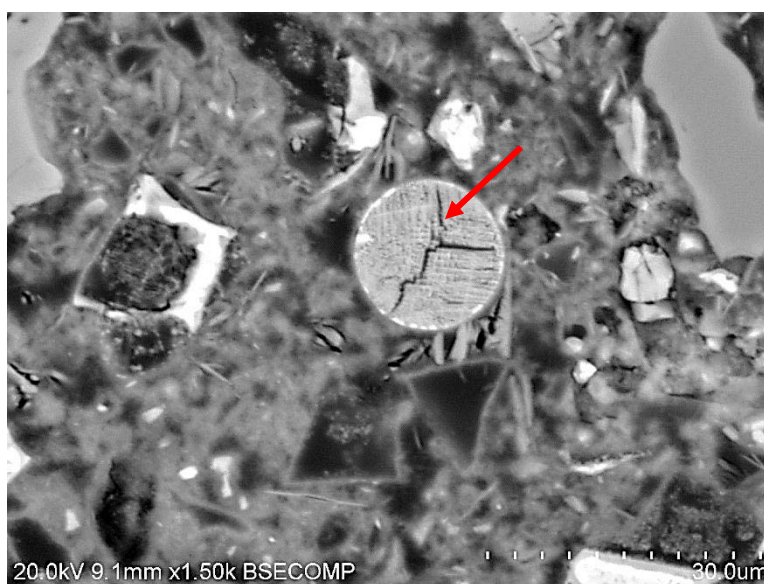


รูปที่ 6.6 ตัวอย่างที่เจาะเก็บจากฐานรากและผ่านการทดสอบกำลังอัดแล้ว



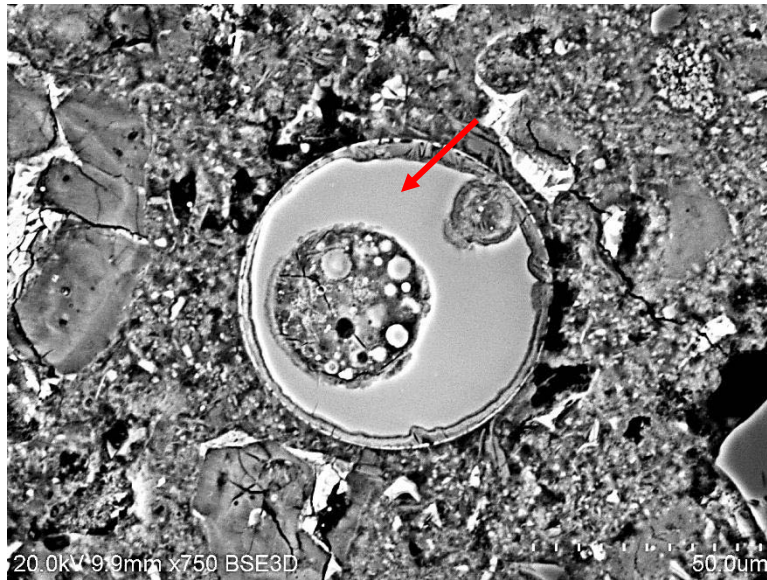
### 6.3.1 การตรวจสอบหาธาตุในตัวอย่างคอนกรีต

จากการตรวจสอบหาการมีอยู่ของธาตุในคอนกรีต โดยใช้ SEM พบว่ามีอนุภาคกลมของธาตุในตัวอย่างคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 6.7 แต่พบปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคธาตุในรูปที่ 6.7(c) ด้วย EDX ดังแสดงในรูปที่ 6.8 พบว่ามีปริมาณธาตุ Ca ต่ำกว่า Si และมีอัตราส่วน Ca/Si โดยมวลประมาณ 0.175 เท่านั้น นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคธาตุในรูปที่ 6.7(b) ซึ่งเป็น Cenosphere fly ash ด้วยเทคนิค SEM-EDX elemental mapping ดังแสดงในรูปที่ 6.9 พบว่าบริเวณที่เป็นอนุภาคของธาตุ มี Intensity ของธาตุ Ca ต่ำ แต่มี Intensity ของธาตุ Si และ Al สูงกว่าบริเวณที่เป็นเนื้อปูน ซึ่งเป็นการยืนยันว่าอนุภาคนั้นเป็นอนุภาคของธาตุ



(a)





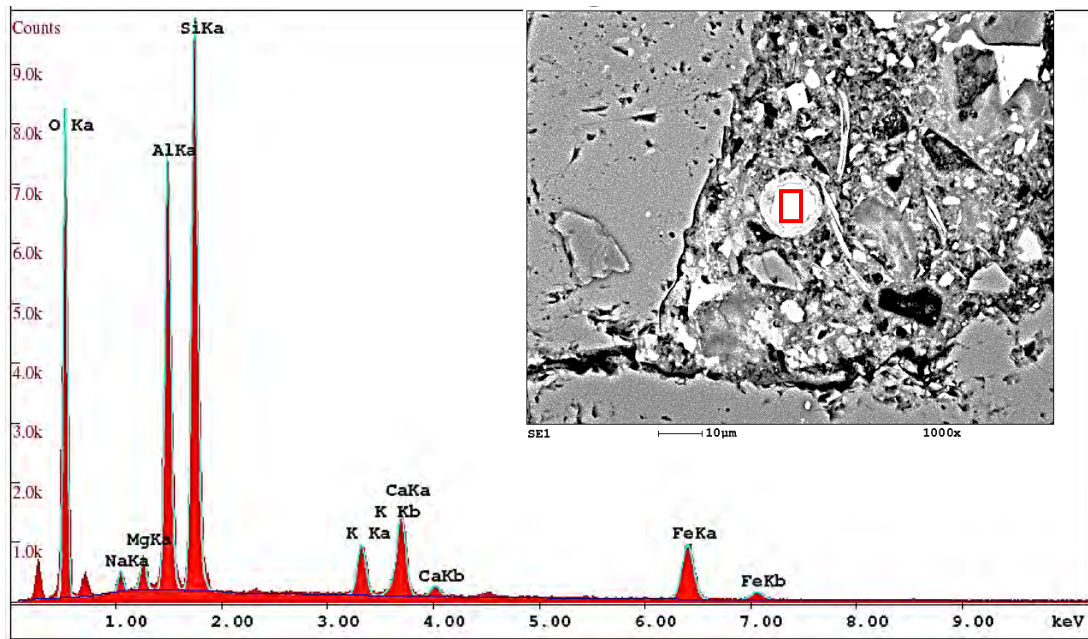
(b)



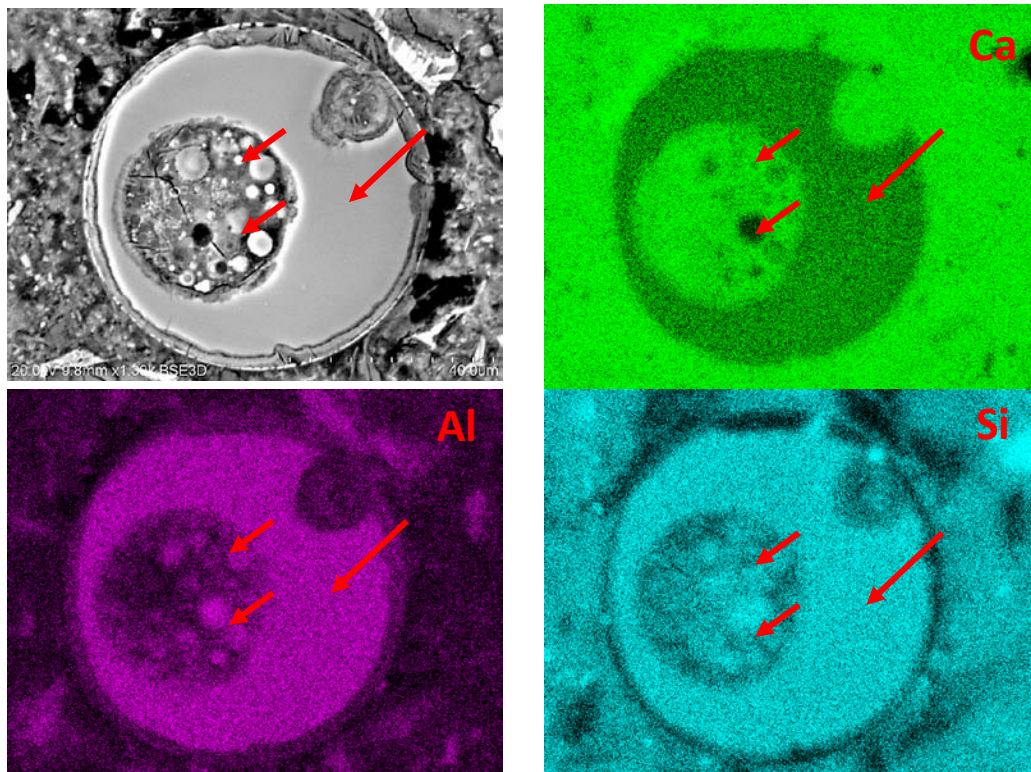
(c)

รูปที่ 6.7 อนุภาคกลมของเถ้าลอยในตัวอย่างคอนกรีต





รูปที่ 6.8 EDX ของถ้ำลอย



รูปที่ 6.9 การวิเคราะห์ด้วย SEM-EDX elemental mapping ของอนุภาคถ้ำลอย



### 6.3.2 การวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมในตัวอย่างคอนกรีต

#### 1) ผลการหาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับจากค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ “FACOMP” มีค่าเท่ากับ 0.86 ซึ่งมีค่าสูงกว่าคอนกรีตโดยทั่วไป

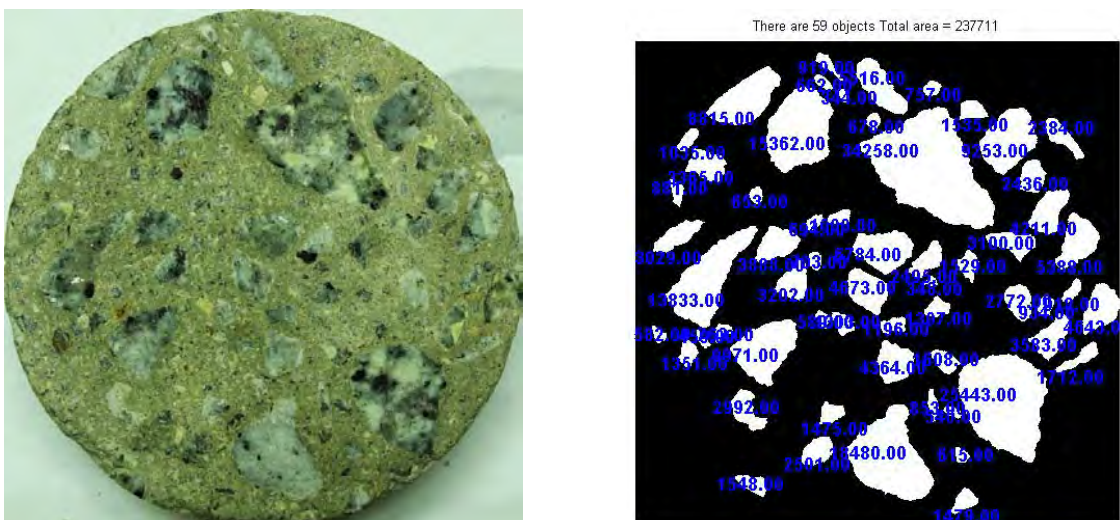
#### 2) ผลการหาปริมาณมวลรวมหยาบ

ปริมาณมวลรวมหยาบในตัวอย่างคอนกรีต สามารถหาได้โดยการนำคอนกรีตมาตัดและถ่ายรูปหน้าตัด จากนั้นใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์หาพื้นที่ของมวลรวมหยาบต่อพื้นที่หน้าตัด ดังแสดงในรูปที่ 6.10 ซึ่งอัตราส่วนของมวลรวมหยาบต่อพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตและปริมาณมวลรวมหยาบที่คำนวณได้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.326 และ 909 kg/m<sup>3</sup> ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 อัตราส่วนของมวลรวมหยาบต่อพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตและปริมาณมวลรวมหยาบ

หน้าตัด	อัตราส่วนมวลรวมหยาบต่อพื้นที่หน้าตัด คอนกรีต	ปริมาณมวลรวมหยาบ (kg/m <sup>3</sup> )
1	0.320	864
2	0.288	777
3	0.300	811
4	0.346	934
5	0.424	1146
6	0.394	1064
7	0.343	925
8	0.348	939
9	0.304	822
10	0.337	911
11	0.309	833
12	0.327	883
เฉลี่ย	<b>0.326</b>	<b>909</b>





รูปที่ 6.10 ตัวอย่างภาพถ่ายของหน้าตัดคอนกรีต

### 3) ผลการทดสอบทางเคมี

ผลการทดสอบหองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี XRF และผลการทดสอบการทำให้ละลาย ( Selective Dissolution) โดยใช้กรดเพื่อทำละลายเพสต์และส่วนที่มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ แสดงได้ในตารางที่ 6.3 ซึ่งผลการทดสอบที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตตามสมการที่กล่าวไว้เบื้องต้น

ทั้งนี้ เนื่องจากไม่มีตัวอย่างปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และทราย ที่ใช้จริงในคอนกรีตฐานรากที่ตรวจสอบ ดังนั้นจึงใช้ผลการทดสอบที่มีอยู่แล้วมาร่วมในการวิเคราะห์ด้วย

ตารางที่ 6.3 องค์ประกอบทางเคมีและผลการทดสอบการทำให้ละลาย (Selective Dissolution)

Materials	CaO Content (%)	Residual weight (%)
ปูนซีเมนต์*	64.17	2.233
เถ้าลอยแม่เมาะ*	18.07	64.471
ทราย*	1.03	96.671
ตัวอย่างคอนกรีต	14.70	71.533

หมายเหตุ \* ผลการทดสอบที่มีอยู่แล้ว



#### 4) ผลการคำนวณสัดส่วนผสมของคอนกรีต

สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่คำนวณได้ แสดงในตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 สัดส่วนผสมของคอนกรีต

สัดส่วนผสมของคอนกรีต	ปริมาณ
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b)	0.86
ร้อยละการแทนที่เถ้าลอย	2.95
ปูนซีเมนต์ ( $\text{kg/m}^3$ )	259.32
เถ้าลอย ( $\text{kg/m}^3$ )	7.88
น้ำ ( $\text{kg/m}^3$ )	229.79
มวลรวมละเอียด ( $\text{kg/m}^3$ )	894.91
มวลรวมหยาบ ( $\text{kg/m}^3$ )	909.00

#### 6.3.3 สรุปผลการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมของคอนกรีตจากโครงสร้างจริง กรณีที่ 2

จากการตรวจสอบการมีอยู่ของเถ้าลอยในคอนกรีตดังที่ได้กล่าวถึงไปแล้วนั้น สามารถสรุปได้ว่าคอนกรีตมีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม แต่มีปริมาณเพียงเล็กน้อย ซึ่งจากการวิเคราะห์สัดส่วนผสมคอนกรีต พบว่ามีร้อยละการแทนที่เถ้าลอยประมาณ 3% แต่จะเห็นได้ว่าคอนกรีตมีปริมาณวัสดุประสานที่น้อยและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมาก ซึ่งส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่ต่ำได้ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์หาร้อยละการแทนที่เถ้าลอยและปริมาณวัสดุประสานอาจจะมีคลาดเคลื่อนได้บ้าง เนื่องจากไม่ทราบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์และเถ้าลอยที่ใช้จริงในตัวอย่างคอนกรีต

#### 6.4 สรุปผลการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมของคอนกรีตจากโครงสร้างจริง

วิธีวิเคราะห์ทั้งทางกายภาพและทางเคมีที่ได้นำเสนอ สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่แข็งตัวแล้วได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการหาสาเหตุกำลังรับแรงอัดต่ำของตัวอย่างคอนกรีตได้ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์หาร้อยละการแทนที่เถ้าลอยและปริมาณวัสดุประสานอาจจะมีคลาดเคลื่อนได้บ้าง เนื่องจากไม่ทราบคุณสมบัติของเถ้าลอยที่ใช้จริงในตัวอย่างคอนกรีต



## บทที่ 7

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 สรุปผลการทดลอง

##### 7.1.1 การวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ล้วน

วิธีการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่นำเสนอ สามารถวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและมวลรวมที่แตกต่างกันได้ โดยค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของน้ำ ปูนซีเมนต์ มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ มีค่า เท่ากับ 5.88 %, 7.56 %, 4.49 %, และ 5.28 % ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่อายุต่าง ๆ กันได้อย่างแม่นยำ ทั้งนี้เนื่องจากได้มีการพิจารณาถึงผลของอายุของคอนกรีต โดยการนำอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมาร่วมในการวิเคราะห์ด้วย

##### 7.1.2 การวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย

วิธีการวิเคราะห์หาการมีอยู่ของเถ้าลอยในคอนกรีตที่นำเสนอ สามารถใช้ในการตรวจสอบหาการมีอยู่ของเถ้าลอยในคอนกรีตได้อย่างแม่นยำ และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ยังสามารถวิเคราะห์หาชนิดของเถ้าลอยที่ผสมอยู่ในคอนกรีตได้ด้วย และวิธีการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่นำเสนอ สามารถวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมได้โดยค่าความคลาดเคลื่อน เฉลี่ยของน้ำ ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ มีค่าเท่ากับ 13.84 %, 47.55 %, 6.44 %, 11.26%, และ 3.21 % ตามลำดับ

##### 7.1.3 การวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมของคอนกรีตจากโครงสร้างจริง

วิธีวิเคราะห์ทั้งทางกายภาพและทางเคมีที่ได้นำเสนอ สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอยจากโครงสร้างจริงได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการหาสาเหตุกำลังรับแรงอัดต่ำของตัวอย่างคอนกรีตได้ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์หาร้อยละการแทนที่เถ้าลอยและปริมาณวัสดุประสาน อาจมีความคลาดเคลื่อนได้บ้าง เนื่องจากไม่ทราบคุณสมบัติของเถ้าลอยที่ใช้จริงในตัวอย่างคอนกรีต

#### 7.2 ข้อเสนอแนะ

ถึงแม้วิธีการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่นำเสนอ สามารถใช้ในการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วได้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ แต่ยังมีบางกรณีที่ยังคงมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงอยู่ ดังนั้นจึงควรมีการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมคอนกรีตให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ การวิจัยนี้ได้พิจารณาถึงคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเท่านั้น ยังไม่ได้นำถึงวัสดุประสานอื่นที่มีการใช้งานอยู่จริง เช่น ผุ่นหินปูน ดังนั้น การพัฒนาวิธีการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสม



คอนกรีตให้ครอบคลุมถึงคอนกรีตผสมปูนหินปูน หรือคอนกรีตผสมวัสดุประสานอื่นด้วย ก็จะเป็นประโยชน์  
อย่างยิ่ง



## เอกสารอ้างอิง

- [1] BSI 1881:Part 124 (1998). British Standard Testing concrete Part 124. Methods for analysis of hardened concrete, British Standards Institution.
- [2] M.S. Jung, M.C.Shin, and K.Y. Ann (2012). "Fingerprinting of a concrete mix proportion using the acid neutralization capacity of concrete matrices", Construction and Building Materials 26: 65-71.
- [3] G. G. Clemana (1972). "Determination of the cement content of hardened concrete by selective solution", Virginia Highway Research Council. Charlottesville, Virginia. September 1972.
- [4] ASTM-C1084-02. Standard Test Method for Portland-Cement Content of Hardened Hydraulic-Cement Concrete, American Society for Testing and Materials.
- [5] L. Linares, M. Lopez-Atalaya, et al. (2009). "Cement content determination through selective stain in hardened concrete", Cement and Concrete Research 39: 1105-1109.
- [6] H.S. Wong, N.R. Buenfeld (2009). "Determining the water-cement ratio, cement content, water content and degree of hydration of hardened cement paste: Method development and validation on paste samples", Cement and Concrete Research 39: 957-965
- [7] S. Ohsawa, K. Asaga, et al. (1985). "Quantitative determination of fly ash", Cement and Concrete Research 15: 357-366.
- [8] R. Doug Hooton, C.A. Rogers (1995). "Determination of slag and fly ash content in hardened concrete", Cement, Concrete, and Aggregates 17: 55-60.
- [9] F.J. Presuel-Moreno and A. A. Sagues (2009). "Bulk magnetic susceptibility measurement for determination of fly ash presence in concrete", Cement and Concrete Research 30: 95-101.



- [10] J. Elsen, N. Lens, et al. (1994). "Determination of the w/c ratio of hardened cement paste and concrete samples on thin sections using automated image analysis techniques", *Cement and Concrete Research* 25: 827-834.
- [11] S. Sahu, S. Badger, et al. (2004). "Determination of water-cement ratio of hardened concrete by scanning electron microscopy", *Cement and Concrete Composites* 26: 987-992.
- [12] W. Wang (1999). "Image analysis of aggregate", *Computer and Geosciences* 25: 71-81.
- [13] L. Banta, K. Cheng, J. Zaniewski (2003). "Estimation of limestone particle mass from 2D images", *Power Technology* 132 : 184-189.
- [14] J.M.R. Fernlund (2005). "Image analysis method for determining 3-D shape of coarse aggregate", *Cement and Concrete Research* 35: 1629-1637.
- [15] A. Abbas, G. Fathifazl, et al. (2009). "Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregate by image analysis", *Materials Characterization* 60: 716-728.
- [16] ASTM C642-06, "Standard test Method for density, absorption, and voids in hardened concrete". American Society for Testing and Materials.
- [17] S. Warangkana. "Simulation of thermal properties and adiabatic temperature rise of fly ash concrete." SIIT thesis, Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University, Thailand, 2002.
- [18] L. Lam, Y.L. Wong, C.S. Poon (2000). "Degree of hydration and gel/space ratio of high-volume fly ash/cement systems", *Cement and Concrete Research* 30:747-756.
- [19] Q. Zeng, K. Li, T. Fen-chong, and P. Dangla (2012) "Determination of cement hydration and pozzolanic reaction extents for fly-ash cement pastes". *Construction and Building Materials*, 27: 560-569.



[20] J.I. Escalante-Garcia. "Nonevaporable water from neat OPC and replacement materials in composite cements hydrated at different temperatures". *Cement and Concrete Research*, 33(11), pp. 1883-1888, November. 2003.

[21] Harold F.W. Taylor. *Cement Chemistry*. Academic press London, 1990, pp. 206.



## Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ (ระบุชื่อผู้แต่ง ชื่อเรื่อง ชื่อวารสาร ปี เล่มที่ เลขที่ และหน้า) ไม่มี
2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์
  - เชิงพาณิชย์ (มีการนำไปผลิต/ขาย/ก่อให้เกิดรายได้ หรือมีการนำไปประยุกต์ใช้โดยภาคธุรกิจบุคคลทั่วไป)  
มีการนำผลงานวิจัยไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาถ้ำลอยในคอนกรีตของบริษัท เอส ที เอส เอ็น จิเนียร์ คอนสตรัคชั่น จำกัด การวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมของคอนกรีตเพื่อนำไปประเมินหาสาเหตุที่คอนกรีตมีค่ากำลังอัดต่ำกว่าที่กำหนด ของบริษัทบริษัทโตโย-ไทย คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) และการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมของคอนกรีตเพื่อนำไปใช้ในการตรวจสอบพฤติกรรมโครงสร้างทางพิเศษ ของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย
  - เชิงวิชาการ (มีการพัฒนาการเรียนการสอนสร้างนักวิจัยใหม่)  
งานวิจัยนี้มีการสร้างผู้ช่วยวิจัย ระดับนักศึกษาปริญญาเอก 1 คน
3. อื่นๆ (เช่น หนังสือ การจดสิทธิบัตร)
  - 1) Saengsoy, W., and Tangtermsirikul, S., Determination of Mix Proportion of Hardened Concrete containing Fly Ash with Different Characteristics, 4th ACF International Conference, Tue-S4.1-05, Taipei, Taiwan, November 2010.
  - 2) Chuosavasdi, T., Saengsoy, W., Stitmannaitum, B., Sumranwanich, T., and Tangtermsirikul, S., Determination of Mix Proportion of Hardened OPC Concrete, In Proceeding of the 19th National Convention on Civil Engineering (NCCE19), Khon Kaen, May 2014.



# Determination of Mix Proportion of Hardened Concrete containing Fly Ash with Different Characteristics

W. Saengsoy<sup>1</sup> and S. Tangtermsirikul<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Construction and Maintenance Technology Research Center (CONTEC), Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University, Pathumthani, Thailand

<sup>2</sup>Construction and Maintenance Technology Research Center (CONTEC), School of Civil Engineering and Technology, Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University, Pathumthani, Thailand  
E-mail: warangkana@siit.tu.ac.th

**ABSTRACT:** Determination of mix proportion of concrete as well as fly ash existence and its content in the concrete mixture are essential in order to evaluate durability and estimate service life of the structures. Several existing standards and methods are available for determining cement content and other concrete compositions in the hardened concrete. However, these methods are applicable only for OPC concrete but not appropriate for fly ash concrete. This study is aimed at developing a method for determining mix proportion of hardened fly ash concrete by taking into account various properties of the fly ash. The developed method was adopted for determining the fly ash existence and the mix proportion of the hardened concrete samples taken from existing structures. In the analysis, several techniques including physical and chemical methods are implemented. From the analytical results, the proposed method can be efficiently used for determining the mix proportion of the hardened fly ash concrete.

## 1. INTRODUCTION

It is generally known that concrete mix proportion is one of the most important factors which influence mechanical and durability properties of concrete structures. The most imperative parameter in concrete mix proportioning is the water to cement ratio. Moreover, when mineral admixtures such as fly ash are used in the concrete as cement replacing materials, its amount and quality are also the significant factors affecting properties of the concrete. Therefore, the mix proportion of the concrete in particular the water to binder ratio and the replacement ratio of the fly ash is essentially known in order to evaluate the durability and estimate service life of the existing structures. Accordingly, the mix proportion of such concrete is necessarily examined after the concrete has been hardened. Moreover, this is often conducted when noncompliance with the mix specification is suspected along with conflicts among project owner, concrete supplier and contractor.

Nowadays, a universally applicable method for accurately determining mix proportion of hardened concrete does not exist owing to the wide variety of materials from which concrete is made and the conditions to which it may have been subjected [1]. The analysis is more complicated if fly ash or other admixtures are used in the concrete. Many different approaches are therefore necessary in those situations.

Even though several standards such as ASTM C1084 [2], BS 1881: Part 124 [1], and Concrete committee of CAJ (F-18) [3] described the methods for determining the cement content and other concrete compositions in the hardened concrete, they are applicable only for OPC concrete but not appropriate for fly ash concrete. It has been reported that the presence of fly ash and fly ash content in the concrete can be detected and estimated by an optical method which is based on an identification of a spherical shape of the fly ash [4]. Since fly ash generally used in Thailand has different characteristics especially fly ash from some sources which has non-sphere particles, the existing analysis method for determining the mix proportion of the fly ash concrete may not be applicable.

Recently, the authors have made an effort to develop a method for estimating the mix proportion of hardened concrete incorporating fly ash. The varying properties of fly ashes generally used in Thailand were taken into consideration. In the study, both physical and chemical methods were adopted for the analysis.

In this paper, a case study on estimation of mix proportion of the hardened concrete samples cored from an existing structure is presented. The analytical procedures for evaluating fly ash existence and determination of water to binder ratio, fly ash replacement ratio, and content of concrete compositions are described. In this case, the mix proportion of the concrete is desired to examine the causes of poor strength of the concrete.

## 2. SAMPLES AND MATERIALS

In addition to the concrete samples, information on the composition of the cement, fly ash, and aggregate used in the concrete will be useful for accurately examining the mix proportion. Unfortunately, the representative samples and the information of such constituents of the concrete were not available. Hence, the investigation was performed based on the cored concrete samples and the information of mix design reported from the concrete supplier. The concrete samples were cored from a 1-year old concrete structure which had relatively low compressive strength. The compressive strength of the concrete at 1 year was about 18 MPa from the designed specification of 28.5 MPa at 28 days.

In this study, physical and chemical properties of three kinds of fly ashes were additionally investigated and used for estimating the mix proportion. There were Mae Moh fly ash, BLCP fly ash, and a Rayong fly ash.

## 3. METHODOLOGY

### 3.1 Determination of fly ash existence in concrete

In order to determine fly ash existence in concrete, both physical and chemical analytical methods were adopted. The procedure for determining fly ash existence in concrete is illustrated in Figure 1.

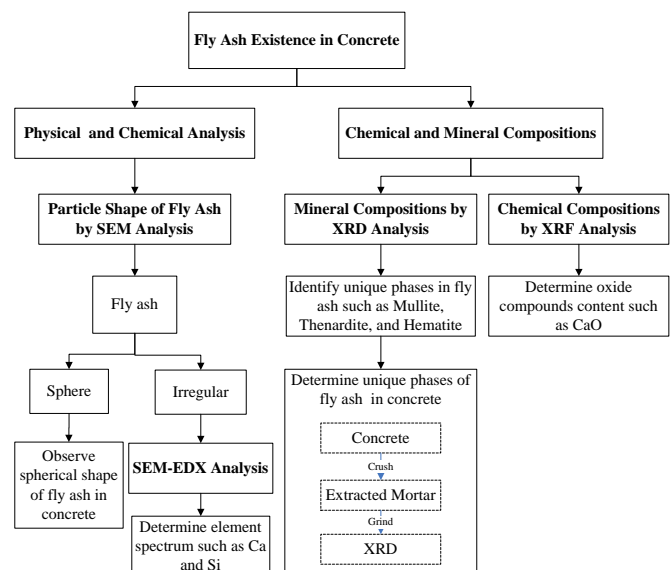


Figure 1 Procedure for determining fly ash existence in concrete



### 3.1.1 Physical analysis by Scanning Electron Microscope (SEM)

The concrete samples were broken into small pieces and were taken to investigate fly ash existence by the SEM. Normally, most fly ash particles are spherical but it is possible that fly ash particles from some sources may be irregular. It is expected that if the sphere-shaped fly ash was used in the concrete mixture, its sphere-shaped particles should be observed in the concrete samples by the SEM analysis. Hence, fly ash existence in concrete could be verified. However, if the particle shape of fly ash is irregular, similar to that of cement, the SEM analysis could not be applied due to difficulty in distinguishing between cement particles and fly ash particles. Therefore, additional chemical analysis is needed.

In this study, the particle shape of the Mae Moh fly ash, BLCP fly ash and a Rayong fly ash were determined to demonstrate different particle shapes of fly ash from different sources.

### 3.1.2 Physical and chemical analysis by Scanning Electron Microscope (SEM) equipped with Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer (EDX)

The concrete sample was physically analyzed by the SEM. Further, the EDX was used to measure the spectrum of elements such as Ca and Si of the irregular particles in the concrete sample. In order to identify the irregular particles whether it is fly ash or not, the relationship of the spectrum of elements such as Ca and Si of the irregular particles in concrete sample and the fly ash samples were determined.

### 3.1.3 Mineral compositions by X-Ray Diffraction (XRD) analysis

The XRD-Rietveld analysis is capable of extracting the amount of each crystal phase component in materials. It was used to quantify the mineral compositions of fly ash. Then, the composition of fly ash was compared with that of cement, sand and coarse aggregate. The unique phases of fly ash that presented in fly ash but not presented in the cement, sand, and coarse aggregate could be identified.

The mineral compositions of concrete were also quantified by the XRD analysis. In order to carry out the XRD analysis of the concrete sample, the concrete was broken into small pieces and the coarse aggregates were removed. After that, the extracted mortar was ground until its particle size was smaller than 75  $\mu\text{m}$ . The powdered sample was mixed with 10% by weight of the standard corundum in order to quantify the amorphous content of the sample. Then, the sample was taken to measure the mineral phases by the XRD. If the unique phases of fly ash were observed in the sample, the concrete contained fly ash.

### 3.1.4 Chemical compositions by X-Ray Fluorescent (XRF) analysis

The chemical compositions of the powdered samples were examined by XRF analysis. The fly ash existence was obtained from the relationship of the chemical compositions such as CaO content in the concrete sample, Portland cement and fly ash.

## 3.2 Estimation of mix proportion of hardened concrete

In order to estimate the mix proportion of hardened concrete, several testing techniques were implemented. The procedure for estimating the mix proportion of hardened concrete is shown in Figure 2.

### 3.2.1 Determination of water to binder ratio

The compressive strength of the cored concrete samples was obtained by using the universal testing machine. Then, the water to binder ratio can be calculated from data back analysis of the compressive strength by using the computer software, "FACOMP", which was developed at Sirindhorn International Institute of Technology (SIIT), Thammasat University, Thailand.

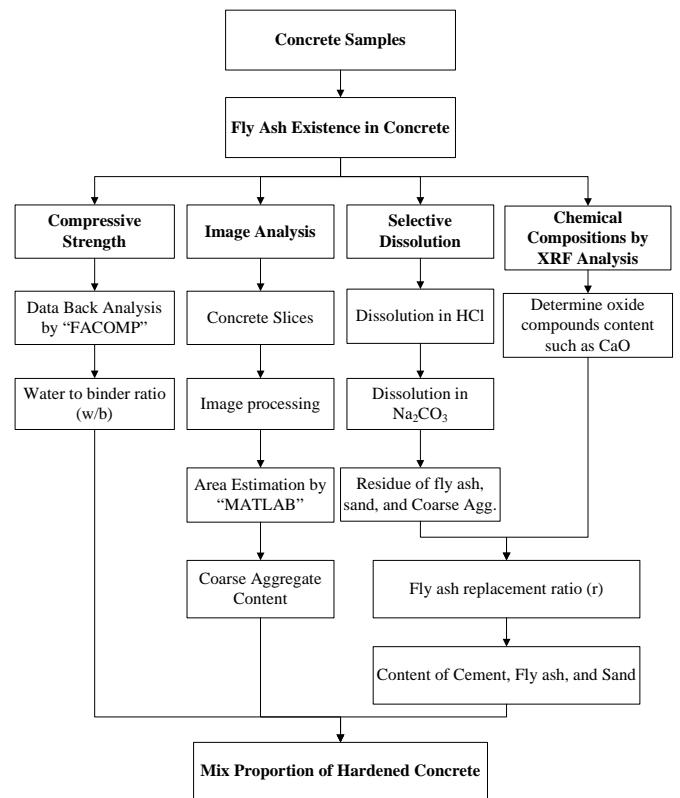


Figure 2 Procedure for estimating mix proportion of hardened concrete

### 3.2.2 Image processing for determining coarse aggregate content

The concrete samples were cut with a diamond saw into many slices. The concrete slices were brought to take photos of their cut faces with sufficient resolution. The concrete pictures were then processed with the image processing software. The image size and quality of the photographs were adjusted for the sake of easiness to identify the boundaries of coarse aggregate as shown in Figure 3. After that, the boundaries of the coarse aggregate were identified. The areas of the selected boundaries of the coarse aggregate were determined by programming in MATLAB as shown in Figure 4. The ratios between the area of the coarse aggregate and the total cross-sectional area of the concrete slices were then converted to volumetric ratios of the coarse aggregate to the concrete.

### 3.2.3 Selective dissolution

The concrete was broken into small pieces and ground to the size smaller than 75  $\mu\text{m}$ . The powdered sample was dissolved by the hydrochloric acid (HCl). The 2N HCl was used to dissolve calcium components in cement and hydrated product. Further, the 5%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  was used to dissolve silica gel. The residues left from being dissolved were unhydrated fly ash, sand, and coarse aggregate.

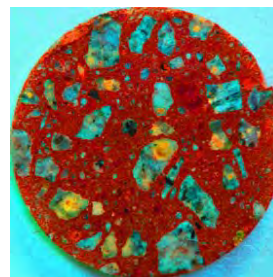


Figure 3 Image of concrete slice after adjusting color

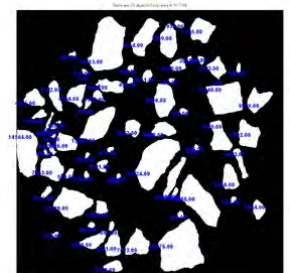


Figure 4 Determination of area of coarse aggregate



## 4. RESULTS AND DISCUSSION

### 4.1 Determination of fly ash existence in concrete

#### 4.1.1 Physical analysis by Scanning Electron Microscope (SEM)

It is shown in Figure 5 that all particles of Mae Moh fly ash are sphere. For the BLCP fly ash, most particles are sphere but some are irregular as shown in Figure 6. The particle shape of the Rayong fly ash is irregular and agglomerated as shown in Figure 7. If sphere-shaped fly ashes such as the Mae Moh fly ash and the BLCP fly ash were used in the concrete mixture, their sphere-shaped particles should be observed in the concrete sample by the SEM analysis. On the other hand, if irregular-shaped fly ash similar to the Rayong fly ash was used, the determination of fly ash existence by this technique is impractical.

The SEM analysis of the concrete is shown in Figure 8. It can be seen that the sphere-shaped fly ash does not present in the concrete sample. However, unhydrated particles similar to the irregular-shaped fly ash in terms of size and shape are observed. It is indicated that the concrete may contain the irregular-shaped fly ash. Hence, the fly ash existence should be confirmed by the chemical analysis.

Moreover, it is remarkably seen that the matrix of the concrete samples is quite porous and this may contribute to the poor compressive strength of the concrete.

#### 4.1.2 Physical and chemical analysis by Scanning Electron Microscope (SEM) equipped with Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer (EDX)

From the EDX analysis, Ca/Si ratios by weight of the Mae Moh fly ash, BLCP fly ash, and Rayong fly ash were 0.98, 0.21, and 0.39, respectively. The EDX was applied on several unhydrated particles of the concrete and found that some particles had element spectrum and Ca/Si ratio similar to that of the fly ash. A typical EDX analysis of the unhydrated particle of the concrete is shown in Figure 9. The Ca/Si ratio by weight of the unhydrated particle was 0.36 which was closed to that of the Rayong fly ash. This amount of Ca/Si cannot be that of either cement or other hydrated products since their Ca/Si ratios are quite high (normally higher than 1). As a result, it can be concluded that the concrete may contain the Rayong fly ash.

#### 4.1.3 Mineral compositions by X-Ray Diffraction (XRD) analysis

It is generally known that almost 100% of mineral phase in river siliceous sand is quartz ( $\text{SiO}_2$ ). In case of cement, the main mineral compositions are  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$ , and  $\text{C}_4\text{AF}$ . Therefore, the concrete without fly ash should possess these mineral phases including the hydrated product such as ettringite and portlandite.

The mineral compositions of fly ashes were quantified by the XRD analysis. It was found that the fly ashes have some mineral phases which are different from that in cement and sand. These minerals are Mullite, Thenardite, Hematite, and Magnetite.

The mineral compositions of the concrete were obtained and found that there was no Mullite, Hematite, and Magnetite in the concrete sample. This may be possibly due to their little amount in the fly ash when compared to the major phase such as Quartz. However, 0.19% of Thenardite was found in the concrete samples. This can be implied that the concrete contains fly ash. It is noted that this result does not represent fly ash content in the concrete mixture unless additional data of chemical compositions by XRF analysis and selective dissolution are obtained.

Moreover, the amorphous content in Mae Moh fly ash, BLCP fly ash and Rayong fly ash were 90.38%, 67.02% and 59.01%, respectively. This indicated that the reactive portion for the pozzolanic reaction of the Rayong fly ash is less than that of the Mae Moh fly ash by about 30%. It implies that if the Rayong fly ash and the Mae Moh fly ash are used in concrete with the same mix proportion, the concrete property such as compressive strength of the Rayong fly ash concrete can be lower than that of the Mae Moh

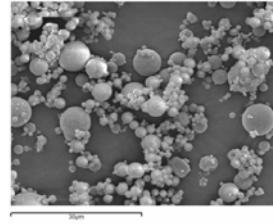


Figure 5 Mae Moh fly ash

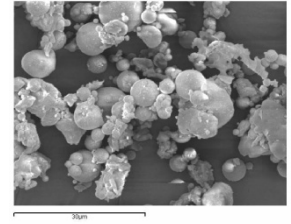


Figure 6 BLCP fly ash

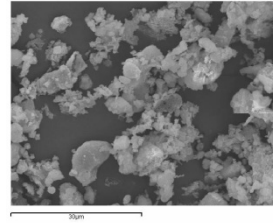


Figure 7 Rayong fly ash

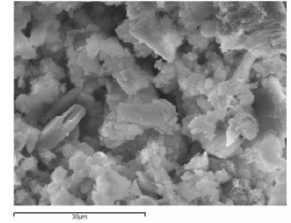


Figure 8 Concrete

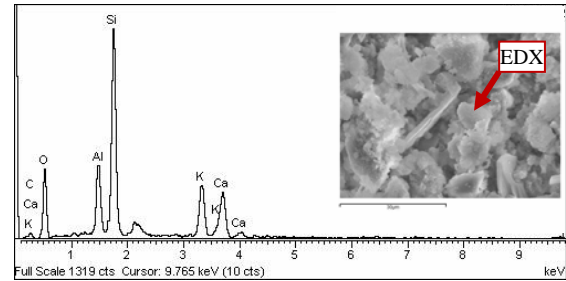


Figure 9 EDX analysis of concrete

Table 1 Chemical compositions of fly ashes and concrete by XRF

Chemical Compositions	Mae Moh Fly Ash	BLCP Fly Ash	Rayong Fly Ash	Concrete
$\text{SiO}_2$	35.96	63.94	45.82	68.22
$\text{Al}_2\text{O}_3$	20.12	16.27	21.29	7.17
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	13.57	3.75	6.98	1.44
$\text{CaO}$	18.08	9.96	12.63	13.50
$\text{MgO}$	2.69	0.96	1.55	0.33
$\text{SO}_3$	4.42	0.48	2.94	0.89
$\text{Na}_2\text{O}$	1.47	< 0.01	0.26	< 0.01
$\text{K}_2\text{O}$	2.51	0.70	1.41	2.22
$\text{TiO}_2$	0.38	0.78	0.00	0.24
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.27	0.16	0.00	0.05
LOI	0.50	2.93	3.19	5.92

fly ash concrete.

#### 4.1.4 Chemical compositions by X-Ray Fluorescent (XRF) analysis

The chemical compositions of fly ashes and concrete are shown in Table 1. From the results, the Mae Moh fly ash has the highest CaO content. On the other hand, the BLCP fly ash and the Rayong fly ash have lower CaO content. It is expected that the concrete samples contain different CaO contents. In general, the CaO content in OPC is about 60-65%. The lower CaO content in the concrete samples is because of the partial replacement of cement by an admixture that has lower CaO content than that of the cement, such as fly ash.

### 4.2 Estimation of mix proportion of hardened concrete

#### 4.2.1 Determination of water to binder ratio

The obtained compressive strength of the cored concrete samples was 18 MPa. The water to binder ratio obtained from the data back



analysis of the compressive strength by using FACOMP was equal to 0.83.

#### 4.2.2 Image processing for determining coarse aggregate content

The amount of the coarse aggregate is estimated by the image processing. From the result, the volume of coarse aggregate per unit volume of concrete and the coarse aggregate content were obtained to be equal to 0.39 and 1087.40 kg/m<sup>3</sup>, respectively.

#### 4.2.3 Selective dissolution

Since fly ash contains calcium component which can be dissolved in the hydrochloric acid. The selective dissolution of the fly ash and concrete was performed and the residues left from the selective dissolution of the concrete, Mae Moh fly ash, BLCP fly ash and Rayong fly ash were 69.57%, 31.33%, 84.59% and 73.81%, respectively. It can be seen that the residual weight of the fly ash is correlated with the CaO content (Table 1) as the fly ash with lower CaO content has higher residual weight. Moreover, the coarse aggregate was removed from the concrete samples and taken to test the selective dissolution. It was found that the coarse aggregate dissolved very little (2.12%) in the hydrochloric acid solution since it is granite which has low CaO content. Therefore, the residues after selective dissolution of concrete consist of unreacted fly ash, sand, and coarse aggregate.

#### 4.2.4 Chemical compositions by X-Ray Fluorescent (XRF) analysis

The chemical compositions of fly ash and concrete sample are shown in Table 1. The CaO contents in both fly ash and concrete sample were used for estimating the mix proportion of the concrete.

#### 4.2.5 Calculation of mix proportion of hardened concrete

From the results, it can be remarked that fly ash exists in the concrete. The fly ash used in the concrete is irregular in shape and its quality is considered to be similar to the Rayong fly ash. Therefore, the chemical compositions of the Rayong fly ash are used for the analysis.

The water to binder ratio and the content of the coarse aggregate in the concrete mixture were obtained as mentioned earlier.

In order to determine the content of the concrete components, it is estimated primarily based on their oven-dried weight ratio. The weight ratio of the coarse aggregate can be obtained by Eq. (1). Eqs. (2) to (4) are used to determine the weight ratio of cement, fly ash, and sand since three unknowns can be solved by three equations.

$$w_G = \frac{W_G}{(1 + a_G)UW_d} \quad (1)$$

$$1 = w_c + w_f + w_s + w_G + 0.23(\alpha_c w_c + \alpha_f w_f) \quad (2)$$

$$r_i = (1 - \alpha_f)r_f w_f + r_s w_s + r_G w_G \quad (3)$$

$$CaO_i = CaO_c w_c + CaO_f w_f + CaO_G w_G \quad (4)$$

Where  $w_c$ ,  $w_f$ ,  $w_s$ , and  $w_G$  are oven-dried weight ratio of cement, fly ash, sand, and coarse aggregate, respectively.  $W_G$  is aggregate content in SSD state (kg/m<sup>3</sup>).  $a_G$  is absorption of aggregate.  $UW_d$  is oven-dried unit weight of concrete (kg/m<sup>3</sup>). It can be obtained according to ASTM C642 [5].  $\alpha_c$  and  $\alpha_f$  are degree of hydration of cement and degree of pozzolanic reaction of fly ash, respectively.  $r_i$  is residual weight of concrete sample (%).  $r_f$ ,  $r_s$ , and  $r_G$  are residual weights of fly ash, sand, and coarse aggregate (%), respectively.  $CaO_i$ ,  $CaO_c$ ,  $CaO_f$ , and  $CaO_G$  are CaO contents in concrete sample, cement, fly ash, and coarse aggregate (%), respectively.  $CaO_c$  and  $CaO_G$  are 64.5% and 0.4%, respectively.

Table 2 Mix proportion of concrete

Compositions	Mix Design	Estimation
Cement, $W_c$ (kg/m <sup>3</sup> )	350	176.89
Fly Ash, $W_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	0	87.57
Sand, $W_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	785	649.65
Coarse Aggregate, $W_G$ (kg/m <sup>3</sup> )	1,101	1,087.40
Water, $W_w$ (kg/m <sup>3</sup> )	151	220.64
Water to binder ratio (w/b)	0.43	0.83
Fly ash replacement ratio	0	0.33

Once the oven-dried weight ratio of the concrete components such as cement, fly ash, and sand are obtained, their contents in the concrete mixture can be estimated by Eqs. (5), (6), and (7), respectively. The water content can be obtained based on the water to binder ratio as in Eq. (8).

$$W_c = w_c U W_d \quad (5)$$

$$W_f = w_f U W_d \quad (6)$$

$$W_s = (1 + a_s) w_s U W_d \quad (7)$$

$$W_w = (W_c + W_f) w / b \quad (8)$$

Where  $W_c$ ,  $W_f$ ,  $W_s$ , and  $W_w$  are mass of cement, fly ash, sand, and water, respectively (kg/m<sup>3</sup>).  $a_s$  is absorption of sand.  $w/b$  is water to binder ratio.

Hence, the mix proportion of the hardened concrete can be estimated and shown in Table 2. The water to binder ratio of the concrete is rather high. It is mainly because the amount of the binder materials is less than the required. It can be concluded that low binder content, high water to binder ratio, and excessive low quality fly ash replacement ratio may contribute to poor strength of the concrete.

It is noted that the estimation of the fly ash replacement ratio and the binder content may have some errors since the property of actual fly ash contained in the concrete sample is unknown.

## 5. CONCLUSIONS

The proposed physical and chemical methods can be used for evaluating fly ash existence and estimating mix proportion of hardened concrete. Moreover, it is capable to identify the causes of strength drop of the concrete samples.

Based on the investigation of the fly ash existence in concrete as mentioned, it can be concluded that the concrete sample contains fly ash. The fly ash used is not from Mae Moh but it has similar properties to a Rayong fly ash which has lower quality than the Mae Moh fly ash. So, one of the causes of poor strength of the concrete can be due to the use of low quality fly ash. Moreover, low binder content, high water to binder ratio, and excessive low quality fly ash replacement ratio also contribute to the low strength of the concrete.

## 6. REFERENCES

- [1] BS 1881: Part 24: 1998, Methods for Analysis of Hardened Concrete, British Standards Institution.
- [2] ASTM C1084 - 02 Standard Test Method for Portland-Cement Content of Hardened Hydraulic-Cement Concrete.
- [3] Concrete committee of CAJ: A Joint Report on Estimating the Mix Proportions of Hardened Concrete (F-18), Sep., 1967.
- [4] Hooton, R.D., and Rogers, C.A., 1995. "Determination of Slag and Fly Ash Content in Hardened Concrete", Cement, Concrete & Aggregates, Vol. 17, Issue 1.
- [5] ASTM C642 - 06 Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.





## Determination of Mix Proportion of Hardened OPC Concrete

Thidaporn Chuosavadi<sup>1,\*</sup> Warangkana Saengsoy<sup>2</sup> Boonchai Stitmannathum<sup>3</sup>

Tawechai Sumranwanich<sup>4</sup> and Somnuk Tangtermsirikul<sup>5</sup>

<sup>1,3</sup> Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand

<sup>2</sup> Construction and Maintenance Technology Research Center (CONTEC), Sirindhorn International Institute of Technology (SIIT), Thammasat University, Thailand

<sup>4</sup> Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Thailand.

<sup>5</sup> School of Civil Engineering and Technology, Sirindhorn International Institute of Technology (SIIT), Thammasat University, Thailand

### Abstract

This study is aimed to develop method for determination of mix proportion of hardened cement concrete. The mix proportion of concrete is essentially known in order to evaluate the durability and to estimate service life of the existing concrete structures. When concrete problems occurred such as poor strength development after casting of concrete, the mix proportion of concrete is very essential to be examined. The method for determining concrete mix proportion, consisting of content of coarse aggregate, cement, sand and w/c ratio was proposed in this study. In the analysis, three major investigation techniques were implemented. Image processing technique was used for determination of coarse aggregate content. Water to binder ratio was calculated from data back analysis of the compressive strength by using the computer software. Cement and sand contents were obtained based on the residues after selective dissolution of the sample. The developed method was applied to estimate mix proportions of concrete prepared in laboratory with known mix design in order to verify its efficiency. The analytical results indicated that the maximum error of water, cement, sand and coarse aggregate contents were 5.88%, 7.56%, 4.49% and 5.28%, respectively. Thus, it can be concluded that the developed procedure and analysis method can be applied for determining the mix proportion of hardened cement concrete.

**Keywords:** Mix proportion, Water to cement ratio, Hardened OPC concrete, Image analysis, Selective dissolution

\* Corresponding author

E-mail address: krati\_yam@hotmail.com

### 1. Introduction

It is well known that concrete mix proportion is important to mechanical and durability properties of concrete structures. The crucial parameters of concrete mix proportion are w/c and cement content. Once a concrete structure is damaged, the concrete mix proportion is required to evaluate the durability and estimate service life of the structures in order to assess the proper repair technique. However, the concrete mix design is often unavailable, leading to a difficulty in predicting the condition of structures. Accordingly, the mix proportion of such concrete is necessarily examined after the concrete has been hardened. Moreover, this is often conducted when non-compliance with the mix specification is suspected along with conflicts among project owner, concrete supplier and contractor.

To identify the mix proportion of hardened concrete, several techniques have been developed. Nevertheless, there is no universally applicable method for accurately determining mix proportion of hardened concrete because of the wide variety of materials from which concrete is made and the conditions to which it may have been subjected [1, 2]. Moreover, a promising method developed to identify the concrete mix design encompassing binder type, w/c, cement content and aggregate content does not exist [3-7]. Even though standards such as ASTM C1084 [3], and BS 1881: Part 124 [1] describe the methods for determining the cement content and other concrete compositions in the hardened concrete, each procedure requires a substantial degree of chemical skill and relatively complicated chemical instrumentation.



A method for estimating mix proportion of hardened concrete has been developed in this study. Both physical and chemical methods were adopted for the analysis. The analytical procedures for determination of water to cement ratio, and content of concrete compositions including cement, sand, and coarse aggregate are described.

In order to verify the accuracy of the developed method, the estimation of mix proportion of concrete has been conducted on concrete specimens prepared in laboratory with known mix design.

## 2. Materials and mix proportion

Portland cement type I was used. Chemical compositions of the cement are shown in Table 1. Concrete samples were prepared with water to cement ratio (w/c) of 0.45, 0.55, and 0.65. For w/c = 0.45, concrete samples were prepared by using different aggregates (A, B, and C). All concrete samples except W45-A were prepared in same laboratory. Specific gravity of sand A, B, and C were 2.59, 2.60, and 2.60, respectively. Specific gravity of all coarse aggregates (Limestone) was 2.70. Five mix designs of concrete samples are shown in Table 2.

**Table 1 Chemical properties of cement**

Chemical Compositions	Content (%)
SiO <sub>2</sub> (%)	19.36
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	5.10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.35
CaO (%)	64.36
MgO (%)	0.81
SO <sub>3</sub> (%)	2.83
Na <sub>2</sub> O (%)	0.15
K <sub>2</sub> O (%)	0.51
TiO <sub>2</sub> (%)	0.25
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0.08
LOI (%)	3.01

**Table 2 Mix design of concrete samples**

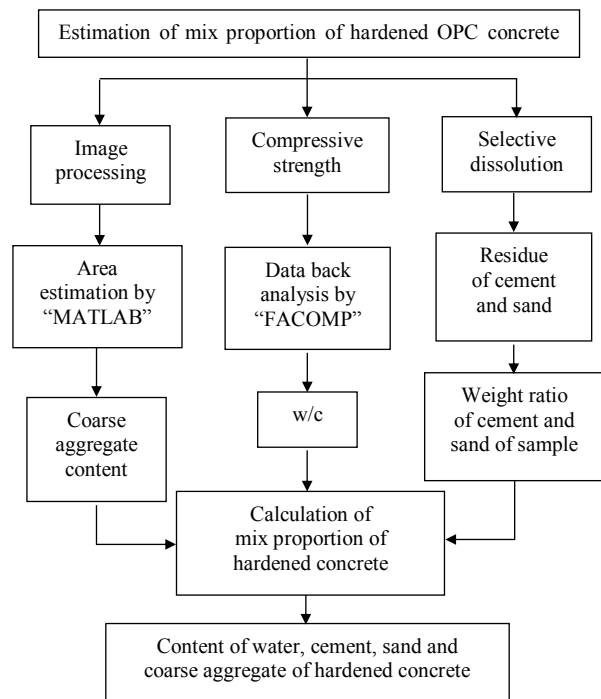
Sample	w/c	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Water (kg/m <sup>3</sup> )	s/a	Sand (kg/m <sup>3</sup> )	Limestone (kg/m <sup>3</sup> )	Age (days)
W45-A	0.45	419	188	0.42	727	1047	28,91
W45-B	0.45	407	183	0.42	737	1061	28,91
W45-C	0.45	407	183	0.44	776	1025	14,91
W55-C	0.55	360	198	0.44	776	1025	14,91
W65-C	0.65	322	210	0.44	776	1025	14,91

Cylindrical concrete samples with dimension of 10 cm in diameter and 20 cm in length were cast. The concrete samples were cured in water at room temperature until the specified test age. Three specimens were

prepared for compressive strength test at each test age. The broken specimens from the compressive strength test were subsequently used for selective dissolution testing. Moreover, two specimens were prepared for determining coarse aggregate content by image processing method and examining unit weight of concrete according to ASTM C642 [8].

## 3. Methodology

The procedure for estimating mix proportion of hardened OPC concrete has been developed. In the analysis, three major investigation techniques were implemented as shown in Fig. 1. Image processing technique was used for determination of coarse aggregate content. Water to binder ratio could be calculated from data back analysis of the compressive strength by using the computer software, "FACOMP" [9-11]. Cement and sand contents were obtained based on the residues after selective dissolution of the sample. Contents of all concrete compositions in 1 m<sup>3</sup> of concrete could be derived from a set of mass balance equations. The developed method was applied to estimate mix proportions of concrete prepared in laboratory with known mix design in order to verify its efficiency. Detail of the procedure for determination of mix proportion of hardened concrete is described below.



**Fig. 1 Procedure for determination of mix proportion of hardened concrete**

### 3.1 Determination of coarse aggregate content by image analysis

The image analysis method was used to determine coarse aggregate content of hardened concrete. Two cylindrical concrete specimens of



each mix were cut with a diamond saw into many slices. The concrete slices were brought to take photos of their cut faces with sufficient resolution. The concrete pictures were then processed with the image processing software. The image size and quality of the photographs were adjusted for the sake of easiness to identify the boundaries of coarse aggregate as shown in Fig. 2. After that, the boundaries of the coarse aggregate were identified. The aggregate particle greater than 4.75 mm (No. 4 Sieve) was considered as coarse aggregate. The areas of the selected boundaries of the coarse aggregate were determined by programming in MATLAB as shown in Fig. 2. The ratios between the area of the coarse aggregate and the total cross-sectional area of the concrete slices were then converted to volumetric ratios of the coarse aggregate to the concrete. The content of coarse aggregate could be obtained by multiplying its volume by the specific gravity. It is noted that gradation of coarse aggregate could not be evaluated by this method.

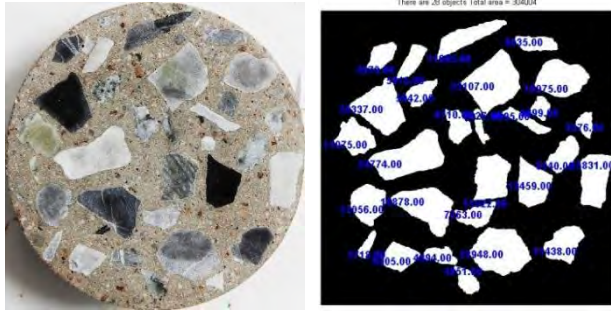


Fig. 2 Determination of coarse aggregate area by image processing technique

In order to determine how reliable the determination of coarse aggregate was made, a statistical method by standard score (Z-score) was used. The Z-score between -1 to 1 ( $-1 < Z < 1$ ) was applied to analyze the results. It also means that the set of data between  $\bar{x} - \mu$  to  $\bar{x} + \mu$ , where  $\bar{x}$  is the mean of the population and  $\mu$  is the standard deviation of the population, was considered.

### 3.2 Determination of water to cement ratio

The compressive strength of concrete samples was obtained by using the universal testing machine. Then, the water to binder ratio could be calculated from data back analysis of the compressive strength by using the computer software, “FACOMP”, which was developed at Sirindhorn International Institute of Technology (SIIT), Thammasat University, Thailand. Models for predicting compressive strength of fly ash concrete constructed based on experimental data were implemented in the FACOMP. There have been proven that the prediction models could be used to accurately predict the compressive strength of concrete within acceptable limits [10, 11].

Procedure for determination of water to cement ratio is shown in Fig. 3. Water to cement ratio was primarily assumed for calculating mix proportion of concrete. The compressive strength of the calculated mixture proportion was subsequently simulated by FACOMP. The valid water to cement ratio could be determined by means of trial and error until the compressive strength obtained by FACOMP is nearly equal to the compressive strength obtain from the test.

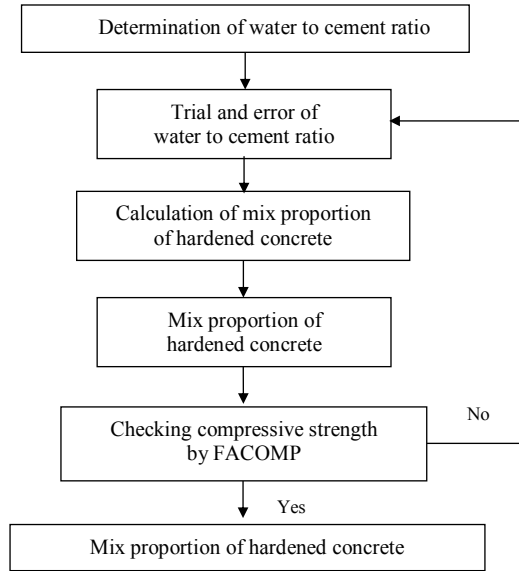


Fig. 3 Procedure for determination of water to cement ratio

### 3.3 Determination of weight ratio of cement and sand by selective dissolution

The concrete specimens after the compressive strength test were broken into small pieces and coarse aggregate was removed. The sample was immersed in acetone for 24 hours, before dried at 50°C in an oven to stop hydration reaction. Then, the sample was ground to the size smaller than 75  $\mu\text{m}$  (No. 200 Sieve). The powdered sample was dissolved by the hydrochloric acid (HCl). The 2N HCl was used to dissolve calcium components in cement and hydrated product. Further, the 5%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  was used to dissolve silica gel [12]. However, a few amount of cement was still insoluble. Therefore, the residues left from being dissolved were sand and a little amount of cement.

In order to determine contents of cement and sand in sample, they were estimated primarily based on their oven-dried weight ratio. Eq. (1) and Eq. (2) were formed based on the mass balance of sample without coarse aggregate. The equations were used to determine the weight ratio of cement and sand since two unknowns ( $w_{cs}$  and  $w_{ss}$ ) could be solved by two equations.



$$r_t = r_c w_{cs} + r_s w_{ss} \quad (1)$$

$$1 = w_{cs} + w_{ss} + w_{ns} ; w_{ns} = 0.23(\alpha_c w_{cs}) \quad (2)$$

Where  $r_t$ ,  $r_c$  and  $r_s$  are residual weights of sample, cement and sand, respectively.  $w_{cs}$ ,  $w_{ss}$  and  $w_{ns}$  are oven-dried weight ratio of cement, sand, and combined water of sample, respectively.  $\alpha_c$  is degree of hydration of cement. In this study, the degree of hydration of cement equals to 0.65, 0.70 and 0.80 at 14, 28 and 91 days, respectively [9, 13, 14]. 0.23 is combined water for full hydration of cement [1, 14, 15, 16].

### 3.4 Calculation of mix proportion of hardened concrete

The water to cement ratio, coarse aggregate content, and weight ratio of cement and sand in sample without coarse aggregate were obtained as mentioned earlier. The oven-dried weight ratio of cement and sand of concrete were obtained by Eq. (3) and Eq. (4).

$$w_G = \frac{W_G}{(1 + a_G) \times UW_d} \quad (3)$$

$$1 = w_{cc} + w_{sc} + w_{nc} + w_G \quad (4)$$

Where  $w_{cc}$ ,  $w_{sc}$ ,  $w_{nc}$  and  $w_G$  are oven-dried weight ratio of cement, sand, combined water, and coarse aggregate of concrete, respectively.  $W_G$  is aggregate content obtained from the image analysis ( $\text{kg/m}^3$ ).  $a_G$  is absorption of coarse aggregate.  $UW_d$  is oven-dried unit weight of concrete ( $\text{kg/m}^3$ ). It can be obtained according to ASTM C642 [8].

Then, the oven-dried weight ratios of concrete compositions were converted to mass of cement, sand and water at SSD state as shown in Eq. (5).

$$\left. \begin{aligned} W_{cc} &= w_{cc} \times UW_d \\ W_{sc} &= w_{sc} \times UW_d \times (1 + a_s) \\ W_{wc} &= W_{cc} \times (w/c) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Where  $W_{cc}$ ,  $W_{sc}$  and  $W_{wc}$  are mass of cement, sand, and water of concrete at SSD state, respectively (kg).  $a_s$  is absorption of sand. w/c is water to cement ratio.

Generally, the mix design of concrete is estimated based on SSD state content per  $1 \text{ m}^3$  (1000 liters). Hence, volume of each concrete ingredient per 1000 liters of concrete is shown in Eq. (6). The volume of each concrete ingredient could be obtained by dividing its mass (Eq. (5)) by the specific gravity. Then, the content of cement, sand, and water of the mix proportion were obtained by Eq. (7).

$$V_t = 1000 = V_c + V_s + V_w + V_G + V_{air} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} W_c &= V_c \times SG_c \\ W_s &= V_s \times SG_s \\ W_w &= W_c \times (w/c) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Where  $V_t$ ,  $V_c$ ,  $V_s$ ,  $V_w$ ,  $V_G$  and  $V_{air}$  are total volume of concrete, cement, sand, water, coarse aggregate and air of concrete for 1000 liters at SSD state, respectively ( $\text{liters/m}^3$ ).  $SG_c$ ,  $SG_s$  and  $SG_G$  are specific gravity of cement, sand and coarse aggregate, respectively.  $W_c$ ,  $W_s$  and  $W_w$  are mass of cement, sand, and water, respectively ( $\text{kg/m}^3$ ).

## 4. Results and discussion

### 4.1 Determination of coarse aggregate content by image analysis

The content of coarse aggregate estimated by image processing technique is shown in Table 3.

From the analytical results, the percentage errors are between 0.93 to 5.28%. The maximum error is 5.28% (or  $54 \text{ kg/m}^3$ ) which is within acceptable limits. This can be confirmed that the image processing technique can be efficiently used to determine coarse aggregate content of hardened concrete regardless of source and s/a of aggregate.

**Table 3 Coarse aggregate content obtained by image analysis**

Sample	Coarse aggregate content ( $\text{kg/m}^3$ )		Error	
	Real	Analysis	$\text{kg/m}^3$	% of real
W45-A	1047	1033.3	-13.7	-1.31
W45-B	1062	1071.6	+9.6	+0.93
W45-C	1025	1037.7	+12.7	+1.24
W55-C	1025	1079.1	+54.1	+5.28
W65-C	1025	1054.1	+29.1	+2.84

Note: - and + is underestimate and overestimate, respectively.

### 4.2 Determination of water to cement ratio

The compressive strength of concrete sample is shown in Table 4. The water to cement ratio obtained from the data back analysis of the compressive strength by using FACOMP is shown in Table 5.

From Table 5, it can be seen that the water to cement ratio obtained from data back analysis of the compressive strength by using FACOMP is close to the designed water to cement ratio for all mixtures and test ages. The maximum error is 6.67%. This can be confirmed that the proposed method can be efficiently used to determine water to cement ratio of hardened concrete.



**Table 4 Compressive strength results by UTM**

Sample	Compressive strength (MPa)		
	14 days	28 days	91 days
W45-A	-	43.99	48.95
W45-B	-	41.30	46.81
W45-C	33.96	-	41.87
W55-C	22.61	-	33.04
W65-C	17.66	-	23.23

**Table 5 Result of w/c ratio by FACOMP**

Sample	Design	w/c					
		14 days		28 days		91 days	
		Trial	Error (%)	Trial	Error (%)	Trial	Error (%)
W45-A	0.45	-	-	0.42	-6.67	0.44	-2.22
W45-B	0.45	-	-	0.43	-4.44	0.45	0
W45-C	0.45	0.45	0	-	-	0.48	+6.67
W55-C	0.55	0.57	+3.64	-	-	0.56	+1.82
W65-C	0.65	0.65	0	-	-	0.69	+6.15

Note: - and + is underestimate and overestimate, respectively.

#### 4.3 Residual weight by selective dissolution

Residual weights of sample by selective dissolution method are shown in Table 6. They were subsequently used to calculate weight ratio of cement and sand as mentioned earlier.

**Table 6 Residual weight of sample by selective dissolution method**

Sample	Residue (%)		
	14 days	28 days	91 days
W45-A	-	55.837	55.442
W45-B	-	59.437	59.323
W45-C	61.374	-	60.965
W55-C	64.380	-	64.011
W65-C	66.628	-	64.405

#### 4.4 Calculation of mix proportion of hardened concrete

Mix proportion of concrete estimated by the proposed method and its percentage error are shown in Tables 7 and 8, respectively.

From the analytical results, it can be seen that the proposed method can be used to estimate mix proportion of hardened concrete with good accuracy for all mixtures. The maximum errors of the determination of content of water, cement, sand, and limestone are 5.88 %, 7.56 %, 4.49

%, and 5.28 %, respectively. The mean errors of the determination of content of water, cement, sand, and limestone are 3.27 %, 3.96 %, 1.82 %, and 2.32 %, respectively. The results show that the proposed method can be used to estimate mix proportion of hardened concrete with different water to cement ratios and different sources of aggregate. Moreover, mix proportion at any age of concrete can also be accurately determined since the effect of age of concrete is governed by taking into account the degree of hydration in the analysis.

**Table 7 Mix proportion of concrete sample**

Mixer	Age	w/c	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Water (kg/m <sup>3</sup> )	Sand (kg/m <sup>3</sup> )	Limestone (kg/m <sup>3</sup> )
W45-A	Design	0.45	419	188	727	1047
	28	0.42	430	181	751	1033
	91	0.44	424	187	741	1033
W45-B	Design	0.45	407	183	737	1061
	28	0.43	405	174	757	1072
	91	0.45	394	181	747	1072
W45-C	Design	0.45	407	183	776	1025
	14	0.45	393	177	790	1038
	91	0.48	384	184	779	1038
W55-C	Design	0.55	360	198	776	1025
	14	0.57	333	190	766	1079
	91	0.56	333	186	776	1079
W65-C	Design	0.65	322	210	776	1025
	14	0.65	307	200	786	1054
	91	0.69	312	215	741	1054

**Table 8 Percentage error of mix proportion of concrete sample**

Mixer	Age	% Error				
		w/c	Cement	Water	Sand	Limestone
W45-A	28	-6.67	+2.79	-4.06	+3.21	-1.31
	91	-2.22	+1.26	-0.99	+1.88	-1.31
W45-B	28	-4.44	-0.57	-4.99	+2.58	+0.93
	91	0	-3.26	-1.11	+1.29	+0.93
W45-C	14	0	-3.32	-3.32	+1.75	+1.24
	91	+6.67	-5.70	+0.66	+0.39	+1.24
W55-C	14	+3.64	-7.50	-4.13	+1.23	+5.28
	91	+1.82	-7.56	-5.88	0	+5.28
W65-C	14	0	-4.63	-4.94	+1.34	+2.84
	91	+6.15	-3.04	+2.58	-4.49	+2.84

Note: - and + is underestimate and overestimate respectively.



## 5. Conclusions

The method for estimating mix proportion of hardened OPC concrete has been developed in this study. The developed method was applied to estimate mix proportions of concrete prepared in laboratory with known mix design in order to verify its efficiency. From the analytical results, it was found that the developed method could be used to estimate mix proportion of hardened concrete with different water to cement ratios and different sources and s/a of aggregate at any age of concrete. The accuracy was within acceptable limits. The maximum error of the determination of w/c was 6.67%. The maximum errors of the determination of content of water, cement, sand, and limestone were 5.88 %, 7.56 %, 4.49 %, and 5.28 %, respectively.

## Acknowledgement

The authors would like to gratefully acknowledge the research scholarship of CHE & AUN/SEED Net project with contract no. of CA3/2553 from Faculty of Engineering, Burapha University, Thailand, the research scholarship of Thailand research fund (TRF) and the research supporting from the Construction and Maintenance Technology Research Center (CONTEC), Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University, Thailand.

## References

- [1] BS1881: Part24, "Methods for Analysis of Hardened Concrete". *British Standards Institution*, 1998.
- [2] M.S. Jung, M.C. Shin, and K.Y. Ann. "Fingerprinting of a concrete mix proportion using the acid neutralisation capacity of concrete matrices". *Construction and Building Materials*, 26(1), pp. 65-71, January. 2012.
- [3] ASTM C1084-02, "Standard Test Method for Portland-Cement Content of Hardened Hydraulic-Cement Concrete". *American Society for Testing and Materials*.
- [4] L. Linares, M. Lopez-Atalaya, and S. Chinchon. "Cement content determination through selective stain in hardened concrete". *Cement and Concrete Research*, 39(11), pp. 1105-1109, November. 2009.
- [5] S. Sahu, S. Badger, and N. Thaulow. "Determination of water-cement ratio of hardened concrete by scanning electron microscopy". *Cement and Concrete Research*, 26(8), pp. 987-992, November. 2004.
- [6] T.P. Philippidis, and D.G. Aggelis. "An acousto-ultrasonic approach for the determination of water-to-cement ratio in concrete". *Cement and Concrete Research*, 33(4), pp. 525-538, April. 2003.
- [7] G.G. Clemena. "Determination of the cement content of hardened concrete by selective solution". Virginia Highway Research Council, September 1972.
- [8] ASTM C642-06, "Standard test Method for density, absorption, and voids in hardened concrete". *American Society for Testing and Materials*.
- [9] FACOMP, "The computer software was developed at SIIT, Thailand".
- [10] L.V. Hung and S. Tangtermsirikul. "A Strength Model for No-Slump Concrete with Fly Ash". *Magazine of Concrete Research*, 59(3), pp. 211-221, April. 2007.
- [11] S. Tangtermsirikul, T. Kaewkhluab and P. Jitvutikrai. "A compressive strength model for roller-compacted concrete with fly ash". *Magazine of Concrete Research*, 56(1), pp. 35-44, February. 2004.
- [12] S. Ohsawa, K. Asaga, S. Goto, and M. Daimon. "Quantitative determination of fly ash in the hydrated fly ash- $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - $\text{Ca}(\text{OH})_2$  system". *Cement and Concrete Research*, 15(2), pp. 357-366, May, 1985.
- [13] L. Lam, Y.L. Wong, and C.S. Poon. "Degree of hydration and gel/space ratio of high-volume fly ash/cement systems". *Cement and Concrete Research*, 30(5), pp. 747-756, May. 2000.
- [14] Q. Zeng, K. Li, T. Fen-chong, and P. Dangla. "Determination of cement hydration and pozzolanic reaction extents for fly-ash cement pastes". *Construction and Building Materials*, 27(1), pp. 560-569, February. 2012.
- [15] J.I. Escalante-Garcia. "Nonevaporable water from neat OPC and replacement materials in composite cements hydrated at different temperatures". *Cement and Concrete Research*, 33(11), pp. 1883-1888, November. 2003.
- [16] Harold F.W. Taylor. *Cement Chemistry*. Academic press London, 1990, pp. 206.