

การหาส่วนผสมของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วที่ใช้ประเภทปูนซีเมนต์แตกต่างกัน

Determination of Mix Proportion of Hardened Concrete with Different Cement Types

ธิดาพร เชื้อสวัสดิ์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

E-mail: thidaporn@eng.buu.ac.th



บทคัดย่อ

วิธีการหาส่วนผสมของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วถูกพัฒนาขึ้นมาหลายวิธี อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีวิธีการใดแสดงผลการวิเคราะห์เพื่อหาส่วนผสมของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วสำหรับปูนซีเมนต์ต่างประเภทกัน บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและแสดงผลการหาส่วนผสมของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ต่างกันด้วยวิธีการที่ได้เคยมีการพัฒนาไว้แล้ว โดยการศึกษาจะใช้ปูนซีเมนต์ 3 ประเภท ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 3 และประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะนำมาจาก 3 แหล่งผลิต นำมาใช้ในการเตรียมตัวอย่างคอนกรีต ผลการวิเคราะห์พบว่าส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทแตกต่างกัน คือ AC1W50, AC3W50, AC5W50 มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของปริมาณปูนซีเมนต์, น้ำ, ทราย, และหิน เท่ากับ 7.1%, 6.8%, 6.5% และ 5.1% ตามลำดับ และผลการทดสอบของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ต่างแหล่งผลิตกัน คือ AC1W50, BC1W50, DC1W50 มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของปริมาณปูนซีเมนต์, น้ำ, ทราย และ หิน เท่ากับ 7.1%, 6.8%, 6.7% และ 5.1% และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทแตกต่างกัน และผลการทดสอบของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ต่างแหล่งผลิตกัน ค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบในแต่ละกลุ่มมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าประเภทและแหล่งผลิตของปูนซีเมนต์ไม่ส่งผลกระทบต่อวิธีการวิเคราะห์ส่วนผสมที่ได้มีการศึกษานี้



คำสำคัญ: การเลือกทำเลลาย; คอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว; ปริมาณปูนซีเมนต์; ส่วนผสมคอนกรีต; อัตราน้ำต่อปูนซีเมนต์

 Abstract

Since many methods have been developed for determining the mix proportions of hardened concrete, there hasn't been a method to determine the hardened concrete proportions for different types of cement. This article aims to study and present the results of an analysis to estimate the hardened concrete proportions with different types of cement using previously proposed methods. Three types of cement; Portland Cement Type I, Type III and, Type V, and three sources of Portland Cement Type I were used to prepare concrete samples. The analytical results of the mix proportions of hardened concrete indicated that the samples of concrete with different cement types, as AC1W50, AC3W50, AC5W50, had maximum errors of 7.1%, 6.8%, 6.5%, and 5.1%, for water, cement, sand and rock contents respectively. Similarly, the analytical results of the mix proportions of hardened concrete with different sources, as AC1W50, BC1W50, DC1W50, had maximum errors of 7.1%, 6.8%, 6.7% and 5.1% for water, cement, sand and rock contents respectively. Additionally, the analytical results show that the samples of concrete with different cement types and the samples of concrete with different cement sources can be applied to determine the mix proportion of hardened cement concrete with a satisfactory accuracy.



Keywords: Cement content; Hardened concrete; Mix proportion; Selective dissolution; Water to cement ratio

 1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีความคงทน แข็งแรง สามารถหาได้ทุกพื้นที่ และที่สำคัญราคาไม่สูง แม้จะมีการใช้งานมานานแล้ว แต่ในปัจจุบันก็ยังคงเป็นที่นิยมนำมาใช้ในการงานก่อสร้าง สัดส่วนผสมของคอนกรีตเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในด้านกำลังและความสามารถในการต้านทานการเสื่อมสภาพต่าง ๆ ดังนั้น หากคอนกรีตมีสัดส่วนผสมไม่เป็นไปตามที่กำหนดไว้หรือ

เกิดปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพ ส่วนผสมของคอนกรีต จึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่เป็นต่อการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาหรือแนวทางแก้ไขปัญหานั้น ๆ

วิธีการหาสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วหลายวิธีที่ถูกพัฒนาขึ้นมา แต่ยังไม่มียังวิธีการใดเป็นที่นิยมและสามารถตรวจสอบได้อย่างครอบคลุมเนื่องจากความหลากหลายของวัสดุที่ถูกนำมาใช้ในการผลิตคอนกรีต ดังนั้น การวิเคราะห์หาปริมาณ



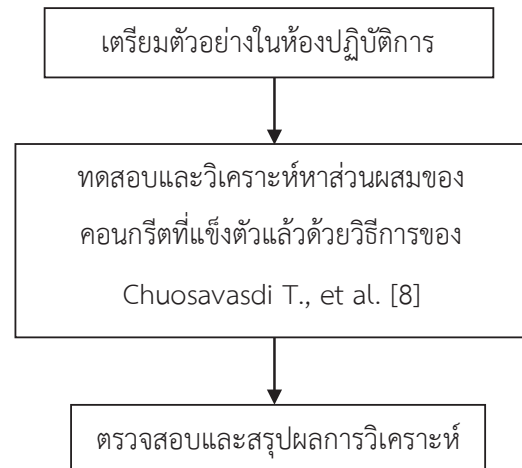
ของวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในส่วนผสมคอนกรีตของแต่ละวิธีจึงมีข้อจำกัดแตกต่างกัน เช่น ข้อจำกัดด้านชนิดของวัสดุประสานหรือมวลรวมที่ใช้หรือข้อจำกัดด้านการใช้อุปกรณ์เฉพาะและเทคนิควิเคราะห์ที่ยุ่ยากซับซ้อน เป็นต้น [1,2] แต่ก็มีวิธีการอื่น ๆ ที่สามารถหาได้เฉพาะบางค่าของสัดส่วนผสมคอนกรีต เช่น ปริมาณปูนซีเมนต์, ปริมาณน้ำ, อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน, ปริมาณมวลรวม เป็นต้น [3-7] อย่างไรก็ตาม ได้มีการเสนอวิธีการหาส่วนผสมของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ซึ่งสามารถหาปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณน้ำ ทราาย และหิน ได้ [8] แต่ยังไม่มีการนำไปศึกษากับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ต่างชนิดกัน

ดังนั้น ในงานนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อการศึกษาเพิ่มเติมถึงความเหมาะสมของวิธีการหาสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยวิธีการที่เสนอโดย Chuosavasdi T., et al. [8] นำไปวิเคราะห์กับตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ต่างชนิดกันและจากแหล่งผู้ผลิตต่างกัน เพื่อเป็นข้อมูลในการศึกษาและพัฒนาต่อไป

2. ขั้นตอนการดำเนินงาน

การศึกษาหาส่วนผสมของคอนกรีตที่แข็งตัวมีขั้นตอนการดำเนินงานดังแสดงในภาพที่ 1 โดยตัวอย่างจะถูกเตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ ทำให้ทราบสัดส่วนผสมจริงสำหรับตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ได้ และตัวอย่างที่เตรียมขึ้นจะ

ถูกนำไปทดสอบและวิเคราะห์ตามการวิธีการของ Chuosavasdi T., et al. [8]



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

2.1 วัสดุและสัดส่วนผสม

วัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 3 ประเภท ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 จำนวน 3 แหล่งผลิต คือ AC1, BC1 และ DC1, ประเภทที่ 3 คือ AC3 และประเภทที่ 5 คือ AC5 องค์กรประกอบทางเคมีและค่าความถ่วงจำเพาะดังแสดงในตารางที่ 1 มวลรวมที่ใช้มีขนาดคล้อยอยู่ในช่วงตามมาตรฐาน ASTM C33 [9] ทราาย (Pit sand) และหิน (Limestone rock) มีค่าความถ่วงจำเพาะที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) เท่ากับ 2.51 และ 2.62 ตามลำดับ มีค่าการดูดซึมน้ำ เท่ากับร้อยละ 1.2 และ 0.5 ตามลำดับ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) คือ 0.40, 0.50 และ 0.60 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบที่อายุ 14 วัน และ 28 วัน สัดส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของปูนซีเมนต์

องค์ประกอบทางเคมี	AC1	BC1	DC1	AC3	AC5
SiO ₂ (%)	19.51	20.90	20.08	20.73	21.87
Al ₂ O ₃ (%)	4.97	4.58	5.17	4.49	3.87
Fe ₂ O ₃ (%)	3.78	3.49	3.58	3.32	4.34
CaO (%)	65.38	64.53	64.17	64.89	64.56
MgO (%)	1.08	1.38	1.22	1.25	1.11
SO ₃ (%)	2.16	2.92	2.47	2.76	2.08
Na ₂ O (%)	0.10	0.01	0.01	0.24	0.01
K ₂ O (%)	0.44	0.47	0.27	0.32	0.24
TiO ₂ (%)	0.26	0.21	0.27	-	-
P ₂ O ₃ (%)	0.07	0.07	0.06	-	-
LOI (%)	2.27	1.20	2.61	1.23	1.59
คุณสมบัติทางกายภาพ					
ความถ่วงจำเพาะ	3.16	3.15	3.14	3.14	3.14

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

Sample	Portland Cement type	w/c	Cemen (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	s/a	Sand (kg/m ³)	Rock (kg/m ³)
AC1W40	Type1	0.40	436	174	0.44	749	995
BC1W50	Type1	0.50	382	191	0.44	749	995
DC1W50			381	191	0.44	749	995
AC1W50			382	191	0.44	749	995
AC3W50	Type3	0.50	381	191	0.44	749	995
AC5W50	Type5		381	191	0.44	749	995
AC1W60	Type1	0.60	340	204	0.44	749	995

2.2 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

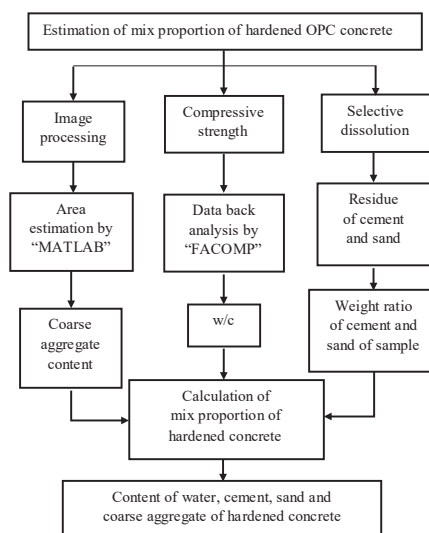
ใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก (Cylinder)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ทำการบ่มน้ำที่อุณหภูมิห้องจนครบระยะ

เวลากำหนด ส่วนแรกเป็นการนำก้อนตัวอย่างจำนวน 3 ก้อนต่ออายุ มาทดสอบกำลังรับแรงอัด และนำก้อนตัวอย่างภายหลังทดสอบกำลังอัดมาเตรียมเพื่อใช้ในทดสอบด้วยวิธีการเลือกทำลาย (Selective dissolution technique) ต่อไป และอีกส่วนใช้ก้อนตัวอย่างจำนวน 2 ก้อนต่ออายุ นำมาใช้ในการทดสอบหาปริมาณหินด้วยวิธีการทางภาพถ่าย และทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C642 [10]

3. กระบวนการทดสอบและวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

Chuosavasdi T., et al. [8,11] ได้เสนอวิธีการหาส่วนสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ซึ่งสามารถหาปริมาณ ปูนซีเมนต์ ปริมาณน้ำ ทราาย และหิน โดยแบ่งกระบวนการวิเคราะห์เป็น 3 ส่วน ดังแสดงในภาพที่ 2



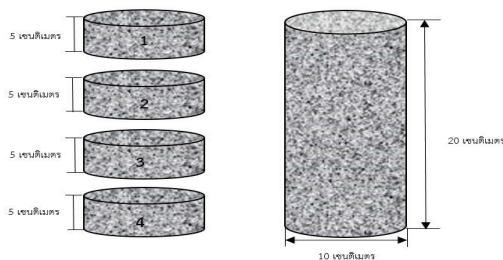
ภาพที่ 2 กระบวนการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว [8]



ส่วนที่ 1 (Image processing) การหาปริมาณหินด้วยวิธีการทางภาพถ่าย ส่วนที่ 2 (Compressive strength) การหาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ด้วยการวิเคราะห์ย้อนกลับจากผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตโดยอาศัยโปรแกรม FACOMP [12] ส่วนที่ 3 (Selective dissolution) การหาสัดส่วนของปูนซีเมนต์และทรายด้วยการคำนวณและวิเคราะห์จากผลการทดสอบด้วยวิธีการเลือกทำลาย ผลวิเคราะห์จากทั้ง 3 ส่วน จะถูกนำมาคำนวณด้วยสมการที่สร้างขึ้นโดยอาศัยหลักสมดุลของมวลสารเพื่อหาสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วต่อปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร

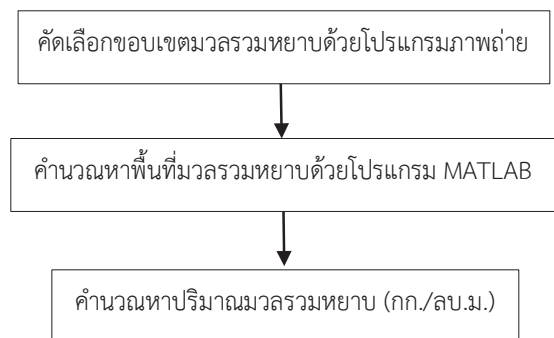
3.1 การหาปริมาณหินด้วยวิธีการทางภาพถ่าย

ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความสูง 20 เซนติเมตร จำนวน 2 ก้อน ถูกนำมาตัดเป็น 4 ส่วน ให้มีขนาดความหนาประมาณ 5 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3 เมื่อทำการตัดตัวอย่างคอนกรีตเรียบร้อยแล้ว จึงทำการถ่ายภาพแต่ละหน้าตัดของตัวอย่างโดยไม่นำภาพผิวหน้าด้านบนสุดและล่างสุดมาใช้พิจารณา จะได้ทั้งหมด 6 รูป ต่อ 1 ก้อนตัวอย่าง



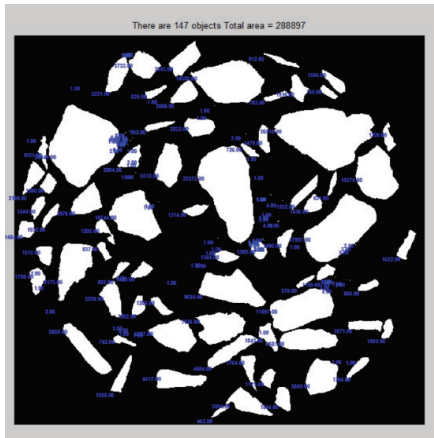
ภาพที่ 3 การตัดก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก สำหรับทดสอบด้วยวิธีการทางภาพถ่าย

ภาพถ่ายหน้าตัดตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จะถูกนำมาคัดเลือกขอบเขตหินด้วยโปรแกรมทางภาพถ่าย พร้อมทั้งปรับภาพความละเอียดและความสว่างของภาพให้ชัดทั่วทั้งภาพ และผิวหน้าตัวอย่างมีความสว่างเสมอกัน แล้วจึงนำเข้าสู่กระบวนการทดสอบและคำนวณหาปริมาณหินด้วยอัลกอริทึมเทคนิคการประมวลผลภาพถ่ายที่พัฒนาขึ้นไว้แล้ว โดยขั้นตอนการทดสอบหาปริมาณหิน ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ขั้นตอนการทดสอบหาปริมาณหิน [13]

การคำนวณหาปริมาณหินจะคำนวณจากสัดส่วนโดยพื้นที่ของหินต่อพื้นที่หน้าตัดคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบด้วยกระบวนการทางภาพถ่าย ดังแสดงในภาพที่ 5 แล้วจึงทำการแปลงเป็นสัดส่วนโดยปริมาตรของหิน และนำปริมาตรของหินมาคูณด้วยความถ่วงจำเพาะของหินได้เป็นปริมาณหินออกมา ผลคำนวณที่ได้แสดงในรูปค่าปริมาณน้ำหนัก กิโลกรัมต่อปริมาตรคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในสมการที่ (1) [8,13]



ภาพที่ 5 ภาพตัวอย่างที่ผ่านการคัดเลือกขอบเขตของมวลรวมหยาบและวิเคราะห์หาพื้นที่หิน

$$W_G = (A_G/A_C) \times SG_C \times 1000 \quad (1)$$

โดย W_G คือ น้ำหนักหิน (kg/m^3)

A_G คือ พื้นที่หินบนหน้าตัด (cm^2)

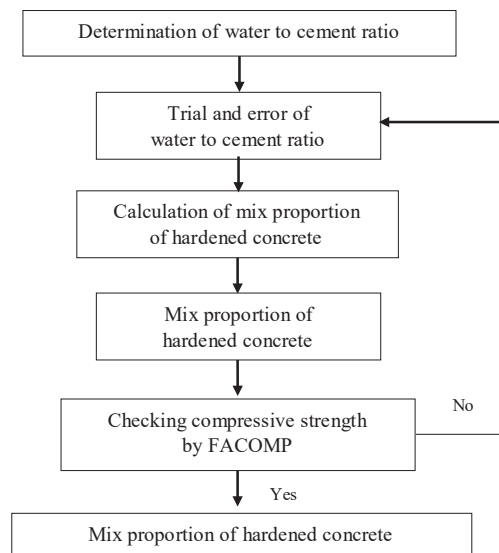
A_C คือ พื้นที่หน้าตัดตัวอย่างคอนกรีต (cm^2)

SG_C คือ ความถ่วงจำเพาะของหิน

3.2 การหาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

ก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก จำนวน 3 ก้อน ถูกนำมาทดสอบกำลังอัด และผลการทดสอบกำลังอัดที่ได้ถูกนำไปใช้เพื่อวิเคราะห์หาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ด้วยวิธีการคำนวณวิเคราะห์ย้อนกลับ โดยอาศัยโปรแกรม “FACOMP” ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดย สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นจากแบบจำลองของงานวิจัยต่าง ๆ ที่น่าเชื่อถือ [14-15] โปรแกรมสามารถใช้ทำนายคุณสมบัติของคอนกรีต เช่น ค่ากำลังอัด อัตราการเกิดปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ ค่าการยุบตัว เป็นต้น

กระบวนการวิเคราะห์หาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ดังแสดงในภาพที่ 6 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์จะถูกสมมติขึ้นและประกอบกับผลการวิเคราะห์จากอีก 2 ส่วนนำมาคำนวณหาสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว และนำค่าสัดส่วนผสมที่ได้จากการคำนวณไปทำนายผลกำลังอัดด้วยโปรแกรม FACOMP โดยทำการลองผิดลองถูกจนกระทั่งค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่สมมติจะคำนวณได้สัดส่วนผสมที่น่าไปทำนายหาค่ากำลังอัดได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบก้อนตัวอย่างมากที่สุด



ภาพที่ 6 กระบวนการวิเคราะห์หาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ [8]

3.3 การหาสัดส่วนปูนซีเมนต์และทราย

ก้อนตัวอย่างคอนกรีตภายหลังการทดสอบกำลังอัดแล้วจะถูกนำมาบดให้มีขนาดเล็กลงเป็นชิ้นเล็ก ๆ พร้อมทั้งนำส่วนที่มีหินออกทั้งหมด นำตัวอย่าง



ส่วนที่คัดเลือกไว้ ซึ่งก็คือเนื้อคอนกรีตเฉพาะส่วนที่เป็นมอร์ตาร์ แซ่สารอะซิโตนเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง และนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เพื่อนำความชื้นในตัวอย่างออกและหยุดการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน หลังจากนั้น นำตัวอย่างไปบดละเอียดให้มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอนเมตร (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200) และตัวอย่างที่ได้นี้จะถูกนำไปทดสอบด้วยวิธีการเลือกทำลาย ตามวิธีการที่มีเสนอไว้โดย Ohsawa S., et al. [16] และวิเคราะห์การหาสัดส่วนของปูนซีเมนต์และทรายด้วยสมการที่สร้างขึ้นโดยอาศัยหลักสมดุลของมวลสาร [8,11] ดังแสดงในสมการที่ (2),(3)

$$r_t = r_c W_{CS} + r_s W_{SS} \quad (2)$$

$$1 = W_{CS} + W_{SS} + W_{NS}; W_{NS} = 0.23(\alpha_c W_{CS}) \quad (3)$$

โดย r_t คือ ตะกอนที่เหลือของตัวอย่าง (%)

r_c คือ ตะกอนที่เหลือของปูนซีเมนต์ (%)

r_s คือ ตะกอนที่เหลือของทราย (%)

W_{CS} คือ สัดส่วนน้ำหนักของปูนซีเมนต์

W_{SS} คือ สัดส่วนน้ำหนักของทราย

W_{NS} คือ สัดส่วนน้ำหนักของน้ำที่ระเหยไม่ได้

α_c คือ อัตราการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์

ซึ่งในการคำนวณจะมีการพิจารณาอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ร่วมด้วย ค่าที่ใช้สำหรับการคำนวณในการศึกษานี้จึงพิจารณาจากแบบจำลองของงานวิจัยอื่นที่ได้เคยมีการเสนอไว้ [12,17]

4. ผลการทดลองและอภิปรายผล



4.1 ผลการทดสอบหาปริมาณหินด้วยวิธีการทางภาพถ่าย

ผลการทดสอบหาปริมาณหินในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ดังแสดงในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง -5.12% ถึง +5.12% และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 5.12%

ตารางที่ 3 ปริมาณหินที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางภาพถ่าย

ตัวอย่าง	ปริมาณหิน (kg/m ³)		ความคลาดเคลื่อน	
	ออกแบบ	วิเคราะห์	kg/m ³	%
AC1W40	995	993	-2	-0.20
BC1W50	995	997	+2	+0.20
DC1W50	995	981	-14	-1.41
AC1W50	995	944	-51	-5.12
AC3W50	995	1005	+10	+1.00
AC5W50	995	953	-42	-4.22
AC1W60	995	1046	+51	+5.12

หมายเหตุ : (-) หมายถึง ผลการวิเคราะห์มีค่าต่ำกว่าค่าที่ออกแบบ

(+) หมายถึง ผลการวิเคราะห์มีค่าสูงกว่าค่าที่ออกแบบ

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดแตกต่างกันคือ AC1W50, AC3W50, AC5W50 และผลการทดสอบของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ต่างแหล่งผลิตกันคือ AC1W50, BC1W50, DC1W50 ผลการทดสอบในแต่ละกลุ่ม

ไม่มีค่าความคลาดเคลื่อนที่แตกต่างกันให้เห็นชัดเจน อย่างมีนัยสำคัญทั้ง 2 กลุ่ม อาจเนื่องด้วยการวิเคราะห์ ด้วยวิธีการทางภาพถ่ายเป็นการวิเคราะห์ทางกายภาพ โดยคำนวณจากพื้นที่ของหินซึ่งยังคงมีปริมาตรเท่าเดิมแม้จะเปลี่ยนประเภทปูนซีเมนต์ และจากงานศึกษา [13] พบว่า อายุไม่มีผลกระทบต่อการหาปริมาณหินด้วยวิธีการทางภาพถ่าย ในการทดสอบนี้จึงทำการทดสอบตัวอย่างที่อายุ 28 วันเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตาม [13] ได้มีการเสนอผลการศึกษา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่มีความเหลวมากกว่า ทำให้หินเกิดการจมตัวลงสู่ด้านล่างได้ง่าย ฉะนั้น ในกรณีที่ประเภทหรือชนิดของปูนซีเมนต์ส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดด้านความชื้นเหลวอย่างมีนัยสำคัญก็อาจจะไม่ผลกระทบต่อวิเคราะห์หาปริมาณหินด้วยวิธีการทางภาพถ่าย

4.2 ผลการทดสอบหาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

ผลการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต ดังแสดงในตารางที่ 4 จะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ย้อนกลับด้วยโปรแกรม FACOMP ตามกระบวนการในภาพที่ 6 ได้ผลการวิเคราะห์หาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบกำลังอัด

ตัวอย่าง	กำลังอัด (MPa)	
	14 วัน	28 วัน
AC1W40	37.5	43.2
BC1W50	29.0	32.0
DC1W50	27.8	30.7

AC1W50	26.4	30.5
AC3W50	28.6	33.4
AC5W50	25.4	29.6
AC1W60	19.7	25.3

ผลการทดสอบหาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ดังแสดงในตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ค่าความคลาดเคลื่อนของตัวอย่างอายุ 14 วันอยู่ในช่วง -4.0% ถึง +5.0% และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 5.0% ค่าความคลาดเคลื่อนของตัวอย่างอายุ 28 วันอยู่ในช่วง -5.0% ถึง +2.5% และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 5.0%

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

ตัวอย่าง	ออกแบบ	อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์			
		14 วัน		28 วัน	
		Trial	Error (%)	Trial	Error (%)
AC1W40	0.40	0.42	+5.0	0.41	+2.5
BC1W50	0.50	0.48	-4.0	0.49	-2.0
DC1W50	0.50	0.50	0.0	0.50	0
AC1W50	0.50	0.51	+2.0	0.50	0
AC3W50	0.50	0.49	-2.0	0.48	-4.0
AC5W50	0.50	0.51	+2.0	0.51	+2.0
AC1W60	0.60	0.60	0.0	0.57	-5.0

หมายเหตุ : (-) หมายถึง ผลการวิเคราะห์มีค่าต่ำกว่าค่าที่ออกแบบ
(+) หมายถึง ผลการวิเคราะห์มีค่าสูงกว่าค่าที่ออกแบบ

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดแตกต่างกันคือ AC1W50, AC3W50, AC5W50 และผลการทดสอบของคอนกรีต



ที่ใช้ปูนซีเมนต์ต่างแหล่งผลิตกันคือ AC1W50, BC1W50, DC1W50 ผลการทดสอบในแต่ละกลุ่มไม่มีค่าความคลาดเคลื่อนที่แตกต่างกันให้เห็นชัดเจนอย่างมีนัยสำคัญทั้ง 2 กลุ่ม อาจเนื่องด้วยในกระบวนการวิเคราะห์ที่ใช้ข้อมูลพื้นฐานของวัสดุที่สอดคล้องกับวัสดุของตัวอย่างจริง จึงทำให้ผลลัพธ์ที่ได้สัมพันธ์กับคุณสมบัติของคอนกรีตที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์

4.3 ผลการทดสอบด้วยวิธีการเลือกทำละลาย

ผลการทดสอบการเลือกทำละลายของวัสดุและตัวอย่างคอนกรีต ดังแสดงในตารางที่ 6 และ 7 จะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์การหาสัดส่วนของปูนซีเมนต์และทรายด้วยสมการที่สร้างขึ้นโดยอาศัยหลักสมดุลของมวลสาร

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบด้วยวิธีการเลือกทำละลายของปูนซีเมนต์และทราย

ตัวอย่าง	ตะกอนที่เหลือ (%)
ปูนซีเมนต์ AC1	4.665
ปูนซีเมนต์ BC1	1.333
ปูนซีเมนต์ DC1	6.249
ปูนซีเมนต์ AC3	1.250
ปูนซีเมนต์ AC5	6.665
ทราย	96.488

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบด้วยวิธีการเลือกทำละลายตัวอย่างคอนกรีต

ตัวอย่าง	ตะกอนที่เหลือ (%)	
	14 วัน	28 วัน
AC1W40	56.990	56.313
BC1W50	58.649	58.494
DC1W50	63.650	62.726
AC1W50	59.978	58.976
AC3W50	59.479	59.476
AC5W50	63.487	62.975
AC1W60	63.732	61.980

4.4 ผลการคำนวณสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

ผลการวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว สามารถหาสัดส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วได้ดังแสดงในตารางที่ 8 และค่าความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์เมื่อเทียบกับสัดส่วนผสมจริงที่ออกแบบไว้แสดงดังตารางที่ 9

ผลการทดสอบหาสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ดังแสดงในตารางที่ 8 แสดงให้เห็นว่าผลของทุกส่วนผสมทั้งของอายุ 14 วัน และ 28 วัน ได้ค่าส่วนผสมจากการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับส่วนผสมจริง โดยพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนดังแสดงในตารางที่ 9 พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของปริมาณน้ำ ปูนซีเมนต์ ทราย และหิน คือ 6.8%, 7.1%, 6.5% และ 5.1% ตามลำดับ



ตารางที่ 8 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว
จากการวิเคราะห์

ตัวอย่าง	อายุ	w/c	ปูนซีเมนต์ (kg/m ³)	น้ำ (kg/m ³)	ทราย (kg/m ³)	หิน (kg/m ³)
AC1W40	ออกแบบ	0.40	436	174	749	995
	14	0.42	443	184	719	993
	28	0.41	450	184	714	993
BC1W50	ออกแบบ	0.50	382	191	749	995
	14	0.48	396	190	739	997
	28	0.49	394	192	735	997
DC1W50	ออกแบบ	0.50	381	191	749	995
	14	0.50	365	181	799	981
	28	0.50	371	186	782	981
AC1W50	ออกแบบ	0.50	382	191	749	995
	14	0.51	400	202	756	944
	28	0.50	409	204	743	944
AC3W50	ออกแบบ	0.50	381	191	749	995
	14	0.49	385	187	746	1005
	28	0.48	385	185	751	1005
AC5W50	ออกแบบ	0.50	381	191	749	995
	14	0.51	370	190	798	953
	28	0.51	375	191	793	953
AC1W60	ออกแบบ	0.60	340	204	749	995
	14	0.60	324	196	733	1046
	28	0.57	343	196	719	1046

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดแตกต่างกันคือ AC1W50, AC3W50, AC5W50 และผลการทดสอบของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ต่างแหล่งผลิตกันคือ AC1W50, BC1W50, DC1W50 ผลการทดสอบในแต่ละกลุ่มไม่มีค่าความคลาดเคลื่อนที่แตกต่างกันให้เห็นชัดเจนอย่างมีนัยสำคัญทั้ง 2 กลุ่ม

ตารางที่ 9 ความคลาดเคลื่อนของสัดส่วนผสมของ
คอนกรีตที่แข็งตัวแล้วจากการวิเคราะห์

ตัวอย่าง	อายุ	ความคลาดเคลื่อน (%)				
		w/c	ปูนซีเมนต์	น้ำ	ทราย	หิน
AC1W40	14	+5.0	+1.6	+5.8	-4.0	-0.2
	28	+2.5	+3.2	+5.8	-4.7	-0.2
BC1W50	14	-4.0	+3.7	-0.5	-1.3	+0.2
	28	-2.0	+3.1	+0.5	-1.9	+0.2
DC1W50	14	0	-4.2	-5.2	+6.7	-1.4
	28	0	-2.6	-2.6	+4.4	-1.4
AC1W50	14	+2.0	+4.7	+5.8	+0.9	-5.1
	28	0	+7.1	+6.8	-0.8	-5.1
AC3W50	14	-2.0	+1.1	-2.1	-0.4	+1.0
	28	-4.0	+1.0	-3.1	+0.3	+1.0
AC5W50	14	+2.0	-2.9	-0.5	+6.5	-4.2
	28	+2.0	-1.6	0	+5.9	-4.2
AC1W60	14	0	-4.7	-3.9	-2.1	+5.1
	28	-5.0	+0.9	-3.9	-4.0	+5.1

หมายเหตุ : (-) หมายถึง ผลการวิเคราะห์ที่มีค่าต่ำกว่าค่าที่ออกแบบ

(+) หมายถึง ผลการวิเคราะห์ที่มีค่าสูงกว่าค่าที่ออกแบบ

5. สรุปผล

จากผลการทดสอบหาสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วข้างต้น สามารถสรุปได้ ดังนี้

1. ผลการทดสอบหาปริมาณหินด้วยวิธีการทางภาพถ่ายของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ต่างชนิดกันคือ AC1W50, AC3W50, AC5W50 และผลการทดสอบของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ต่างแหล่งผลิตกันคือ AC1W50, BC1W50, DC1W50



ผลการทดสอบในแต่ละกลุ่มไม่มีค่าความคลาดเคลื่อนที่แตกต่างกันให้เห็นชัดเจนอย่างมีนัยสำคัญทั้ง 2 กลุ่ม

2. ผลการทดสอบหาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิดแตกต่างกันคือ AC1W50, AC3W50, AC5W50 และผลการทดสอบของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ต่างแหล่งผลิตกันคือ AC1W50, BC1W50, DC1W50 ผลการทดสอบในแต่ละกลุ่มไม่มีค่าความคลาดเคลื่อนที่แตกต่างกันให้เห็นชัดเจนอย่างมีนัยสำคัญทั้ง 2 กลุ่ม

3. ผลการทดสอบหาส่วนผสมของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ต่างชนิดกันคือ AC1W50, AC3W50, AC5W50 และผลการทดสอบของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ต่างแหล่งผลิตกันคือ AC1W50, BC1W50, DC1W50 ผลการทดสอบในแต่ละกลุ่มไม่มีค่าความคลาดเคลื่อนที่แตกต่างกันให้เห็นชัดเจนอย่างมีนัยสำคัญทั้ง 2 กลุ่ม ผลลัพธ์ที่ได้ยังคงสามารถหาสัดส่วนผสมได้ใกล้เคียงกับส่วนผสมจริง โดยค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดจากชุดตัวอย่างในการศึกษานี้มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของปริมาณน้ำ ปูนซีเมนต์ ททราย และหิน คือ 6.8%, 7.1%, 6.5% และ 5.1% ตามลำดับ

บทความนี้เป็นการศึกษาแนวทางความเป็นไปได้ในเบื้องต้นถึงการนำวิธีการหาสัดส่วนผสมในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วนำไปวิเคราะห์กับตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ที่ต่างชนิดและต่างแหล่งผู้ผลิต เพื่อเป็นข้อมูลในการศึกษาและพัฒนาต่อไป โดยอาจต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมทั้งปัจจัยที่ได้ศึกษาไว้เบื้องต้นนี้และผลกระทบด้านอื่นเพิ่มเติม เช่น การ

ใช้วัสดุประสานประเภทอื่น ๆ การใช้สารผสมเพิ่มเป็นต้น เพื่อพัฒนาให้ครอบคลุมกับวัสดุที่ใช้ในงานคอนกรีตในปัจจุบันมากขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือของผู้ร่วมวิจัยและผู้ช่วยวิจัย นางสาว จันทิมา สุเมธ และนายอนุรักษ โยธาทักดี และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่เอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับทำงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] BS1881: Part24 (1998). Methods for Analysis of Hardened Concrete. British Standards Institution.
- [2] Jung M.S., Shin M.C., and Ann K.Y. (2012). Fingerprinting of a concrete mix proportion using the acid neutralisation capacity of concrete matrices. Construction and Building Materials, 26(1) : 65-71.
- [3] ASTM C1084-02 (2002) Standard Test Method for Portland-Cement Content of Hardened Hydraulic-Cement Concrete. American Society for Testing and Materials.
- [4] Linares L., Lopez-Atalaya M., and Chinchon S. (2009). Cement content determination through selective stain in hardened concrete. Cement and Concrete Research, 39(11) : 1105-1109.

- [5] Sahu S., Badger S., and Thaulow N. (2004). Determination of water-cement ratio of hardened concrete by scanning electron microscopy. *Cement and Concrete Research*, 26(8) : 987-992.
- [6] Philippidis T.P., and Aggelis D.G. (2003). An acousto-ultrasonic approach for the determination of water-to-cement ratio in concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(4) : 525-538.
- [7] Clemena G.G. (1972). Determination of the cement content of hardened concrete by selective solution. Virginia Highway Research Council, USA.
- [8] Chuosavasdi T., Saengsoy W., Stitmannathum B., Sumranwanich T., and Tangtermsirikul S. (2014). Determination of mix proportion of hardened OPC concrete. The 19th National Convention on Civil Engineering (NCCE19), Khon Kaen, THAILAND, pp. 670-675.
- [9] ASTM C33 / C33M - 16e1(2002) "Standard Specification for Concrete Aggregates"
- [10] ASTM C642-06 (2006). Standard test Method for density, absorption, and voids in hardened concrete. American Society for Testing and Materials.
- [11] Chuosavasdi T., Stitmannathum B., Sumranwanich T., Saengsoy W., and Tangtermsirikul S. (2016). Degree of Hydration and Mass Balance of Mix Proportion of Hardened OPC Concrete. *Engineering Journal*, 20(2) : 211-219.
- [12] FACOMP, "The computer software was developed at SIIT, Thailand".
- [13] Chuosavasdi T. (2024). An Analysis of Coarse Aggregate Content of Hardened Concrete using Image Processing. *Journal of Engineering RMUTT*. 22(1)
- [14] Hung L.V. and Tangtermsirikul S. (2007). A Strength Model for No-Slump Concrete with Fly Ash. *Magazine of Concrete Research*, 59(3) : 211-221.
- [15] Tangtermsirikul S., Kaewkhluab T., and Jitvutikrai P. (2004). A compressive strength model for roller-compacted concrete with fly ash. *Magazine of Concrete Research*, 56(1) : 35-44.
- [16] Ohsawa S., Asaga K., Goto S., and Daimon M. (1985). 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) : 357-366.
- [17] Lam L., Wong Y.L., and Poon C.S. (2000). Degree of hydration and gel/space ratio of high-volume fly ash/cement systems. *Cement and Concrete Research*, 30(5) : 747-756.

