

ความทนทานของซีเมนต์เถ้าลอยผสมฝุ่นหินปูน

Durability of Fly Ash Cement Containing Limestone Powder

บุรฉัตร ฉัตรวีระ^[1] และ ณรงค์ศักดิ์ มากกุล^[2]

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ปทุมธานี 12121

โทร: 0-2564-3001-9 ต่อ 3105 โทรสาร: 0-2564-3010

E-mail: ^[1]cburacha@engr.tu.ac.th and ^[2]shinomomo7@hotmail.com

บทคัดย่อ:

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความทนทานของมอร์ตาร์เถ้าลอยผสมฝุ่นหินปูน โดยใช้ฝุ่นหินปูนจากกระบวนการย่อยหินปูน 2 ชนิดคือ โดโลมิติกและโดโลไมท์ คุณสมบัติที่ทำการศึกษาคือ การหดตัวแบบแห้งและแบบออโตจีเนียส ความทนทานต่อซัลเฟต ความทนทานต่อการครัดฟูริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน โดยทำการควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอย และฝุ่นหินปูน) ที่ 0.485 และการแทนที่ของเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนักที่ร้อยละ 0, 40 และ 60 สำหรับกรณีของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนประกอบจะทำการแทนที่เถ้าลอยด้วยฝุ่นหินปูนที่ร้อยละ 40, 60 และ 100 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากการทดสอบ พบว่าการหดตัวแบบแห้งและแบบออโตจีเนียส การขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดของมอร์ตาร์เถ้าลอยผสมฝุ่นหินปูนจะมีค่าน้อยกว่ากับมอร์ตาร์ปกติ ในขณะที่ความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันของมอร์ตาร์เถ้าลอยผสมฝุ่นหินปูนจะมีค่าเพิ่มขึ้น

ABSTRACT:

This research was aimed to study the durability of fly ash mortar containing limestone powder. Two types of limestone powder from rock crushing process (Dolomitic and Dolomite) were used. Drying and autogenous shrinkages, expansion in sulfate solution, sulfuric acid attack at 5 percent by weight of acid concentration and carbonation reaction were studied. Water to binder (Portland cement, fly ash and lime stone powder) ratio was fixed at 0.485 and the percentage replacements of fly ash by weight in Portland cement were 0, 40 and 60. In case of mortar containing fly ash, percentage replacements of limestone powder in fly ash by weight were 40, 60 and 100 respectively. The test results showed that drying and autogeneous shrinkages, expansion due to sulfate and weight loss due to acid attack of fly ash mortar containing limestone powder were smaller than those of the normal mortar. Whereas the depth of carbonation of the cement-

fly ash-limestone powder mortars was higher than that of the normal mortar.

1. บทนำ

จากความก้าวหน้าของศาสตร์ทางด้านวัสดุคอนกรีตทำให้ในปัจจุบันสามารถนำวัสดุเหลือทิ้งที่ไร้คุณค่าหลายชนิดมาใช้ เช่น เถ้าลอยจากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานความร้อนที่ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง เถ้าแกลบขาวจากอุตสาหกรรมการผลิตอูมอย เป็นต้น กลับมาใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น โดยจะเห็นได้จากเมื่อนำวัสดุดังกล่าวไปใช้งานสามารถทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในสถานะสดและแข็งตัวดีขึ้น ดังเช่น เถ้าลอยที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ [1, 2, 3] และยังลดการหดตัวภายในของคอนกรีต [4, 5] หรือแม้กระทั่งเถ้าแกลบขาวที่สามารถนำมาใช้ผสมคอนกรีตได้ [6, 7] แล้วทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นเช่น อุณหภูมิของคอนกรีตลดลง [8] แต่กระนั้นสิ่งที่ทราบกันโดยทั่วไปคือ วัสดุแต่ละชนิดล้วนมีข้อดีข้อด้อยแตกต่างกันขึ้นอยู่กับผู้ใช้ที่จะสามารถนำศักยภาพที่มีอยู่นั้นมาใช้ให้เหมาะสมกับงาน ดังนั้นงานวิจัยสมัยใหม่จึงพยายามที่จะศึกษาค้นคว้าในแนวทางนี้เพิ่มขึ้น โดยเป็นการนำข้อดีของแต่ละวัสดุมารวมกันและหาสภาพหรือรูปแบบการใช้งานที่เหมาะสมยกตัวอย่างเช่น ในรูปแบบของสัดส่วนผสมที่จะใช้งาน เป็นต้น ดังนั้นการวิจัยนี้ได้นำแนวคิดดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับการนำทั้งเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนมาทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อที่จะใช้เป็นแนวทางที่จะนำไปสู่การพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ต่อไป โดยมุ่งศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นในแง่ของความทนทานของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมฝุ่นหินปูน

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลกระทบของเถ้าลอยและผงหินปูนที่มีต่อความทนทานของมอร์ตาร์

3. การทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.1 ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

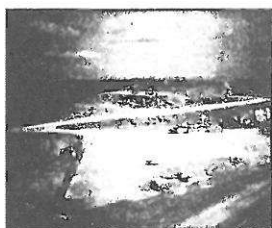
RECEIVED 9 April, 2003

ACCEPTED 15 August, 2003

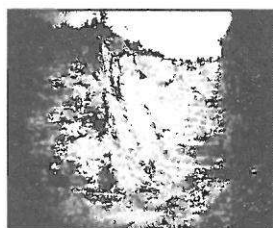
3.1.2 ถ้าวาลอย ใช้ถ้าวาลอยจากโรงผลิตไฟฟ้า จังหวัดลำปาง

3.1.3 ฝุ่นหินปูน ใช้ฝุ่นหินปูน 2 แหล่งคือ เหมืองหินปูนชนิดโคโลมิติก จังหวัดสระบุรี และฝุ่นหินปูนจากเหมืองหินปูนชนิดโคโลไมท์ จังหวัดกาญจนบุรี ดังรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ [9]

หินปูนประเภทโคโลมิติก (Dolomitic) และโคโลไมท์ (Dolomite) จัดอยู่ในประเภทหินคาร์บอเนต (Carbonate Rock) โดยหินคาร์บอเนตที่มีองค์ประกอบของแร่โคโลไมท์อยู่ในปริมาณร้อยละ 10 ถึง 50 จะจัดเป็นหินปูนประเภทโคโลมิติก ในขณะที่ถ้ามีปริมาณของแร่โคโลไมท์มากกว่าร้อยละ 50 จะจัดเป็นหินปูนประเภทโคโลไมท์ โดยหินปูนทั้ง 2 ประเภทมีคุณสมบัติทางกายภาพดังตารางที่ 1 [9]



รูปที่ 1 เหมืองหินปูนประเภทโคโลมิติกจังหวัดสระบุรี



รูปที่ 2 เหมืองหินปูนประเภทโคโลไมท์จังหวัดกาญจนบุรี

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของหินปูนประเภทโคโลมิติก (Dolomitic) และโคโลไมท์ (Dolomite)

คุณสมบัติทางกายภาพ	ประเภทของหินปูน	
	โคโลมิติก	โคโลไมท์
รูปผลึก	Hexagonal/Rhombohedral	Hexagonal/Rhombohedral
ความแข็ง	3.0 – 3.5 (Mohr's Scale)	3.0 – 3.5 (Mohr's Scale)
ความถ่วงจำเพาะ	2.65 – 2.75	2.82
สี	สีขาว สีเทาหรือสีชมพู	สีขาวหรือสีชมพู
แร่ธาตุที่เจือปน	Fe, Mn, Co, Zn, Mg	Fe, Mn, Co, Zn, Pb

3.2 วิธีการทดสอบ

3.2.1 การหัดตัวแบบแห้ง

การทดสอบการหัดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 596 [10] ทดสอบ โดยการหล่อตัวอย่างขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร จนกระทั่งเวลาหล่อตัวสุดท้าย แล้วจึงถอดแบบออกและวัดความยาวเริ่มต้นของแท่งตัวอย่าง จากนั้นจึงนำตัวอย่างไปทำการบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน ระหว่างนั้นให้วัดค่าการยืดตัวของตัวอย่างด้วยเครื่อง Digital Strain Gauge อย่างสม่ำเสมอ เมื่อครบกำหนด 28 วัน จึงนำตัวอย่างขึ้นจากน้ำ เปลี่ยนมาเป็นการบ่มในตู้ที่ควบคุมอุณหภูมิ ที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 60 ± 5 ทำการเก็บวัดข้อมูลเป็นประจำจนกระทั่งค่าการหัดตัวมีแนวโน้มคงที่และคำนวณหาหน่วยการ

ยืดหดตัวจากความยาวที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับความยาวเริ่มต้นของแท่งตัวอย่าง

3.2.2 การหัดตัวแบบอโดจีเนียส

โดยทำการเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์เช่นเดียวกับการทดสอบการหัดตัวแบบแห้งและมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.485 หลังจากถอดแบบที่เวลาการก่อตัวสุดท้ายแล้วจึงทำการหุ้มแท่งตัวอย่างด้วยพลาสติกใสเพื่อป้องกันการแลกเปลี่ยนความชื้นระหว่างตัวอย่างกับสิ่งแวดล้อม วัดความยาวเริ่มต้นของแท่งตัวอย่าง แล้วนำไปเก็บไว้ในห้องบ่มที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 60 ± 5 ทำการวัดความยาวของแท่งตัวอย่างเป็นประจำ ในที่นี้จะทำการทดสอบเบื้องต้นเป็นระยะเวลา 21 วัน และคำนวณหาหน่วยการยืดหดตัวจากความยาวที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับความยาวเริ่มต้นของแท่งตัวอย่าง

3.2.3 การทดสอบความทนทานต่อซัลเฟต

การทดสอบความทนทานต่อซัลเฟตในรูปของการขยายตัวของตัวอย่าง โดยใช้มาตรฐาน ASTM C 1012 [10] เป็นแนวทางเบื้องต้น โดยเริ่มจากการหล่อแท่งตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร และเมื่อทำการถอดแบบแล้วจึงวัดความยาวเริ่มต้นของตัวอย่าง จากนั้นจึงนำตัวอย่างไปทำการบ่มในน้ำปูนใสเป็นเวลา 28 วัน แล้วจึงนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ที่มีความเข้มข้นรวมเท่ากับ 100 กรัมต่อลิตร (สารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้น 50 กรัมต่อลิตร ผสมกับสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้น 50 กรัมต่อลิตร) ทำการวัดความยาวโดยใช้เครื่อง Digital Length Comparator วัดเป็นประจำทุกสัปดาห์ นำค่าที่ได้มาคำนวณหาหน่วยการยืดหดจากความยาวที่เปลี่ยนไปเทียบกับความยาวเริ่มต้น

3.2.4 การเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั่น

วิธีการทดสอบปฏิกิริยาคาร์บอนชั่น ทำโดยนำตัวอย่างมอร์ตาร์รูปทรงกระบอกขนาด 75x150 มิลลิเมตร ที่ผ่านการบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน แล้วจึงนำไปไว้บริเวณที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยในที่นี้จะนำไปไว้ในห้องเรียน เมื่อครบกำหนดที่อายุ 28, 56, 91 และ 365 วัน ตามลำดับ แล้วนำแท่งตัวอย่างมาทำการผ่าซีก จากนั้นทำการฉีดฟีนอล์ฟทาไลน์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักในเอทานอลที่บริเวณหน้าตัดภายในสังเกตสีที่เปลี่ยนไปของหน้าตัดดังกล่าว บริเวณใดที่มีการทำปฏิกิริยาคาร์บอนชั่นจะทำให้สีของฟีนอล์ฟทาไลน์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ส่วนบริเวณที่ไม่เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั่นจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงอมชมพู จากนั้นทำการวัดระยะจากผิวหน้าของแท่งตัวอย่างจนถึงบริเวณที่เป็นสีม่วงอมชมพูและกำหนดเป็นค่าความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอนชั่น

3.2.5 ความทนทานต่อการกัดกร่อน

การทดสอบเริ่มจากการนำตัวอย่างมอร์ตาร์รูปทรงกระบอกขนาด 10x20 เซนติเมตร ที่บ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน โดยหลังจากซึ่งหาน้ำหนักเริ่มต้นแล้วมาทำการบ่มในสารละลายกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ซึ่งมีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และหาน้ำหนักที่สูญเสียไปเนื่องจากกรดตามระยะเวลาที่กำหนด

4. สัดส่วนที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์

สัดส่วนของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (Pulverized Fuel Ash, PFA) และฝุ่นหินปูนที่ใช้แสดงในตารางที่ 2 โดยกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.485 และอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อวัสดุผงเท่ากับ 2.75 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2 สัดส่วนของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบ

สัญลักษณ์	ชนิดของฝุ่นหินปูน	ร้อยละการแทนที่ของเถ้าลอยต่อวัสดุผง	ร้อยละการแทนที่ของฝุ่นหินปูนต่อวัสดุผง
MC100 ^[1]	-	0	0
MC60	-	40	0
MC40	-	60	0
MC60-DL40 ^[2]	DL	24	16
MC60-DL60	DL	16	24
MC60-DL100	DL	0	40
MC60-D40	D	24	16
MC60-D60	D	16	24
MC60-D100	D	0	40
MC40-DL40	DL	36	24
MC40-DL60	DL	24	36
MC40-DL100	DL	0	60
MC40-D40	D	36	24
MC40-D60	D	24	36
MC40-D100	D	0	60

หมายเหตุ: ^[1] MCX คือ มอร์ตาร์ที่มีส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ X และมีปริมาณเถ้าลอย (PFA) ร้อยละ 100-X โดยน้ำหนัก

^[2] MCX-(D, DL)Y คือ มอร์ตาร์ที่มีส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ X และมีปริมาณเถ้าลอยรวมกับฝุ่นหินปูน (DL คือฝุ่นหินปูนชนิดโคลิไมติกและ D คือฝุ่นหินปูนชนิดโคลิไมท์) ร้อยละ 100-X โดยน้ำหนัก และในอัตราส่วนร้อยละ 100-X จะมีฝุ่นหินปูนชนิดโคลิไมติกหรือโคลิไมท์ในปริมาณร้อยละ Y โดยน้ำหนัก

5. ผลการทดสอบ

5.1. องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และฝุ่นหินปูน

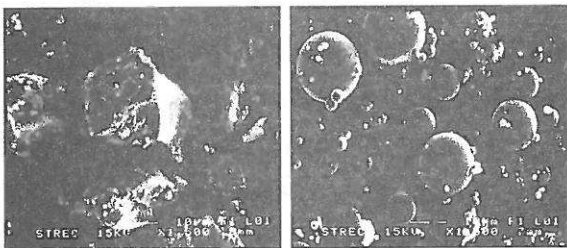
ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และฝุ่นหินปูนทั้ง 2 ชนิด แสดงในตารางที่ 3 พบว่าฝุ่นหินปูนชนิดโคลิไมติก (DL) มีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) แต่ไม่ปรากฏในฝุ่นหินปูนชนิดโคลิไมท์ (D) ในขณะที่แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ในฝุ่นหินปูนชนิดโคลิไมท์จะมีปริมาณมากกว่าชนิดโคลิไมติกซึ่งอาจจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรในระยะยาว แต่จากการทดสอบหาค่าการคงตัว (Soundness) ในรูปของการขยายตัวด้วยการบ่มไฮดรอลิก พบว่าการขยายตัวของฝุ่นหินปูนชนิดโคลิไมท์มีค่ามากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เล็กน้อยแสดงให้เห็นว่าแมกนีเซียมออกไซด์ในฝุ่นหินปูนมีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อย นอกจากนี้ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ของฝุ่นหินปูนทั้งสองชนิดมีค่าสูงกว่าเถ้าลอย

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และฝุ่นหินปูน [9]

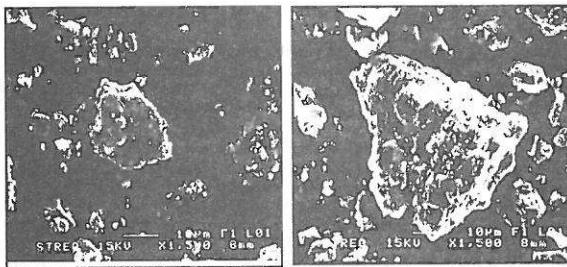
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์	วัสดุผง		
		เถ้าลอย	DL	D
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	21.85	44.96	16.05	0.00
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	5.39	23.01	1.36	0.14
ไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3)	2.10	9.76	0.60	0.16
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	65.91	9.32	43.19	37.21
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.16	2.26	1.09	19.42
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.31	2.16	0.26	0.01
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	2.81	1.19	0.00	0.00
Free Lime (CaO)	0.81	0.14	0.00	0.00
คุณสมบัติทางกายภาพ				
พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธีเบรอน (ตารางเซนติเมตรต่อกรัม)	3234	1732	3990	1775
ความถ่วงจำเพาะ	3.14	2.17	2.70	2.84
ความชื้นเหลวปกติ (ร้อยละ)	25.5	24.0	29.5	24.5
ระยะเวลาก่อนตัวเริ่มต้น (นาที)	86	97	135	93
ระยะเวลาก่อนตัวสุดท้าย (นาที)	190	200	230	190
ดัชนีกำลังที่ 28 วัน (ร้อยละ)	100	75.1	84.5	80.1
ค่าการคงตัว (ในรูปของการ ขยายตัวด้วยการบ่มไฮดรอลิก- เคลท์) (ร้อยละ)	0.00	-0.01	0.01	0.03

หมายเหตุ: คุณสมบัติทางกายภาพได้แก่ ความชื้นเหลวปกติ ระยะเวลาก่อนตัวเริ่มต้นและสุดท้าย ดัชนีกำลังที่ 28 วัน และค่าการคงตัว ได้จากการแทนที่เถ้าลอยหรือฝุ่นหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพ พบว่าฝุ่นหินปูนชนิดโคลิไมติกจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าโดโลไมท์และเถ้าลอยจะมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งจะทำให้ความชื้นเหลวปกติเพิ่มขึ้น เนื่องจากลักษณะของอนุภาคที่คล้ายกันดังภาพถ่ายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ฝุ่นหินปูนชนิดโคลิไมติกและโดโลไมท์ในรูปที่ 3 จะเห็นว่าความละเอียดที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นในการทำให้เฟสมีความชื้นเหลวปกติ แต่จะเห็นว่าระยะเวลาก่อนตัวเริ่มต้นและสุดท้ายของซีเมนต์ผสมฝุ่นหินปูนชนิดโคลิไมติกมีค่ามากกว่าทั้งซีเมนต์ผสมฝุ่นหินปูนชนิดโดโลไมท์และปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของความชื้นเหลวปกติของฝุ่นหินปูนชนิดโคลิไมติกที่มีค่ามากกว่า



(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ข) เถ้าลอย



(ค) ฝุ่นหินปูนชนิดโคลิไมติก (ง) ฝุ่นหินปูนชนิดโดโลไมท์
รูปที่ 3 ภาพถ่ายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ฝุ่นหินปูนชนิดโคลิไมติกและโดโลไมท์ที่กำลังขยาย 1500 เท่า

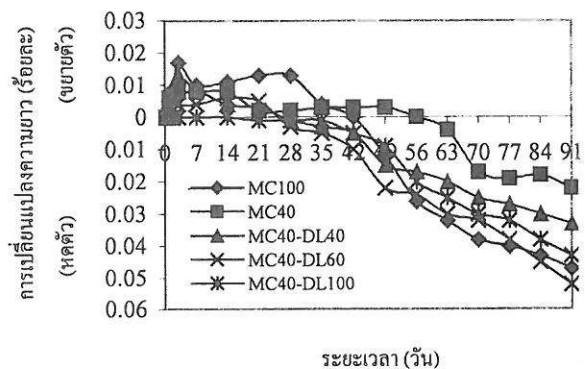
5.2 คุณสมบัติทางด้านการทนทานของซีเมนต์มอร์ตาร์

5.2.1 การหดตัวแบบแห้ง

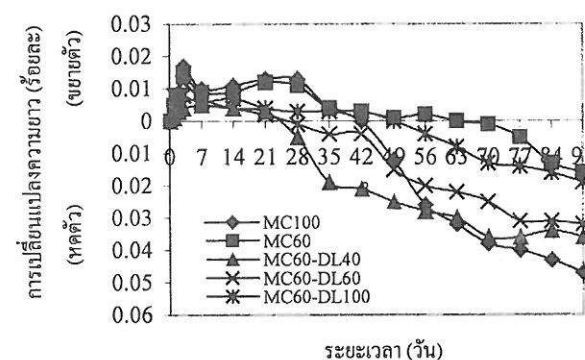
ผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนชนิดโคลิไมติกแสดงในรูปที่ 4 และ 5 พบว่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ปกติและมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยจะมีค่าสูงและต่ำที่สุดตามลำดับ ทั้งนี้เพราะในระยะยาวเถ้าลอยจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (C-S-H) เพิ่มขึ้นผลดังกล่าวทำให้เนื้อมอร์ตาร์มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นซึ่งหมายถึงการลดทั้งจำนวนและขนาดของโพรงคาปิลลารีผลก็คือความชื้นที่มีในเนื้อมอร์ตาร์สูญเสียให้กับภายนอกลดลง การหดตัวแบบแห้งจึงลดลง ในขณะที่เมื่อทำการแทนที่ฝุ่นหินปูนชนิดโคลิไมติกในเถ้าลอยจะทำให้การหดตัวแบบแห้งน้อยกว่ามอร์ตาร์ปกติ

เนื่องจากผลของความละเอียดของฝุ่นหินปูนที่มีค่ามากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบกับลักษณะพื้นผิวที่มีความขรุขระมากกว่าทำให้สามารถดูดซับน้ำไว้ที่ผิวของอนุภาคได้มากขึ้น โดยพบว่าในส่วนผสมมอร์ตาร์ได้มีกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.485 ทำให้มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของฝุ่นหินปูนจะดูดซับน้ำได้มากกว่ามอร์ตาร์ปกติทำให้น้ำอิสระ (Free Water) ที่เหลืออยู่มีค่าลดลง เนื้อมอร์ตาร์จึงมีช่องว่างลดลง ประกอบกับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยซึ่งเป็นสารปอซโซลาน เมื่อเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกซึ่งจะต้องใช้น้ำเป็นสารตั้งต้นเหมือนกับปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงทำให้เหลือน้ำอิสระลดลงตามไปด้วย การหดตัวแบบแห้งจึงลดลง

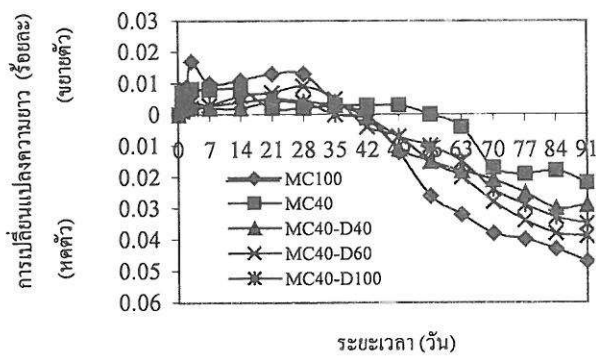
สำหรับการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนชนิดโคลิไมท์จะมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับมอร์ตาร์ฝุ่นหินปูนชนิดโคลิไมติกดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7



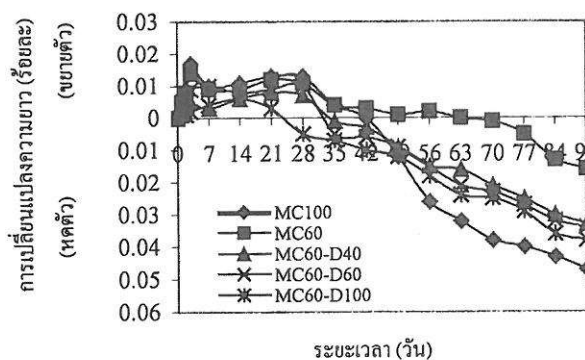
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 60 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยน้ำหนักและฝุ่นหินปูนชนิดโคลิไมติกกับระยะเวลา



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 40 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยน้ำหนักและฝุ่นหินปูนชนิดโคลิไมติกกับระยะเวลา



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างการหาคัดแบบแห้งของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 60 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยน้ำหนักและฝุ่นหินปูนชนิดโคโลไมท์กับระยะเวลา



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการหาคัดแบบแห้งของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 40 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยน้ำหนักและฝุ่นหินปูนชนิดโคโลไมท์กับระยะเวลา

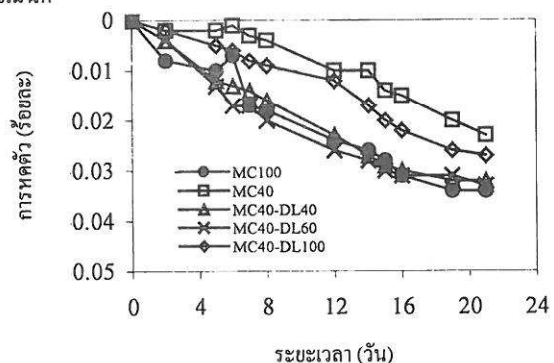
5.3.2 การหาคัดแบบอบโดจึเนียส

จากรูปที่ 8 - 11 พบว่าการหาคัดแบบอบโดจึเนียสของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยจะมีค่าน้อยกว่ามอร์ตาร์ปกติ อันเนื่องมาจากสาเหตุ 2 ประการกล่าวคือ เถ้าลอยมีลักษณะอนุภาคที่กลมกว่าอนุภาคปูนซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 3 ทำให้ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากัน (w/b เท่ากับ 0.485) มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยจะมีปริมาณน้ำอิสระ (Free Water) มากกว่ามอร์ตาร์ปกติ เมื่อปฏิกิริยาเกิดเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณน้ำที่เหลือหลังจากถูกใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชันของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยจึงมีมากกว่ามอร์ตาร์ปกติ ประกอบกับเถ้าลอยมีซิลเฟอรไตรออกไซด์ (SiO_2) ซึ่งจะก่อให้เกิดการขยายตัวเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำซึ่งเป็นการต้านการหดตัวที่เกิดขึ้นจากการหดตัวแบบอบโดจึเนียส [11]

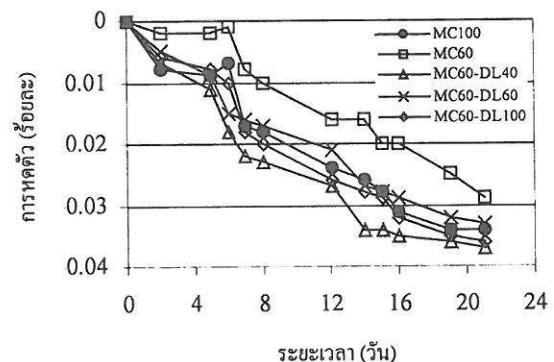
เมื่อพิจารณาในส่วนผสมของมอร์ตาร์ผสมฝุ่นหินปูนชนิดโคโลมิติกและเถ้าลอย จะเห็นว่าที่อัตราส่วนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 60 มอร์ตาร์ผสมฝุ่นหินปูนที่ร้อยละ 40 (MC40-DL40) และ 60 (MC40-DL60) จะมีแนวโน้มของการหดตัวแบบอบโดจึเนียสใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ปกติ แต่จะเห็นว่าในมอร์ตาร์ผสมฝุ่นหินปูน (MC40-DL100) จะมีค่าน้อยกว่ามอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอย การแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ต-

แลนด์ร้อยละ 40 และมีฝุ่นหินปูนแทนที่ในเถ้าลอยที่ร้อยละ 40 (MC60-DL40) และ 100 (MC60-DL100) จะมีการหดตัวแบบอบโดจึเนียสมากกว่ามอร์ตาร์ปกติ ในขณะที่มอร์ตาร์ผสมฝุ่นหินปูนที่ร้อยละ 60 (MC60-DL60) จะมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ปกติ ทั้งนี้เพราะเมื่อในส่วนผสมของมอร์ตาร์มีทั้งเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนจะต้องพิจารณาปัจจัยที่สำคัญที่มีผลกระทบต่อผลการหดตัว โดยจากผลการทดสอบจะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนของฝุ่นหินปูนในส่วนผสมจะทำให้มอร์ตาร์มีแนวโน้มที่จะเพิ่มการหดตัวแบบอบโดจึเนียส แต่เนื่องจากผลของการลดลงของปริมาณปูนซีเมนต์และปริมาณเถ้าลอยทำให้การหดตัวเปลี่ยนแปลงไป

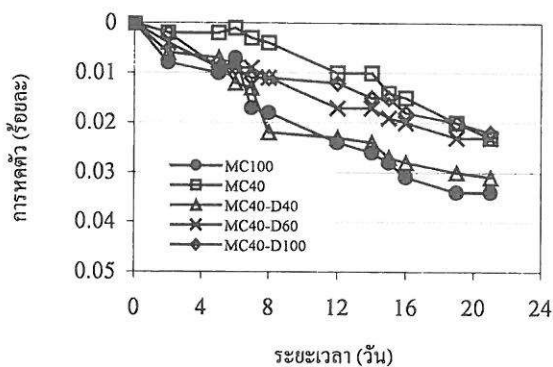
สำหรับการหาคัดแบบอบโดจึเนียสของมอร์ตาร์ผสมฝุ่นหินปูนชนิดโคโลไมท์จะมีแนวโน้มที่ต่างไปจากฝุ่นหินปูนชนิดโคโลมิติก โดยเมื่อมีการแทนที่เถ้าลอยที่ร้อยละ 60 จะมีเพียงมอร์ตาร์ผสมฝุ่นหินปูนที่ร้อยละ 40 (MC40-D40) ที่ใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ปกติ ในขณะที่มอร์ตาร์ผสมฝุ่นหินปูนที่ร้อยละ 60 (MC40-D60) และ 100 (MC40-D100) จะมีค่าต่ำกว่า ดังเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ในขณะที่มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 40 ค่าการหดตัวของมอร์ตาร์ผสมฝุ่นหินปูนจะมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ปกติ อันเนื่องมาจากการลดลงของปริมาณปูนซีเมนต์



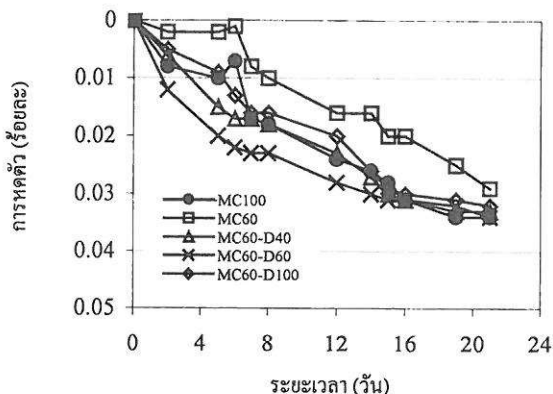
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างการหาคัดแบบอบโดจึเนียสของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 60 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยน้ำหนักและฝุ่นหินปูนชนิดโคโลมิติกกับระยะเวลา



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างการหาคัดแบบอบโดจึเนียสของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 40 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยน้ำหนัก และฝุ่นหินปูนชนิดโคโลมิติกกับระยะเวลา



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโดจีเนียสของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 60 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยน้ำหนัก และฝุ่นหินปูนชนิดโคโลไมท์กับระยะเวลา

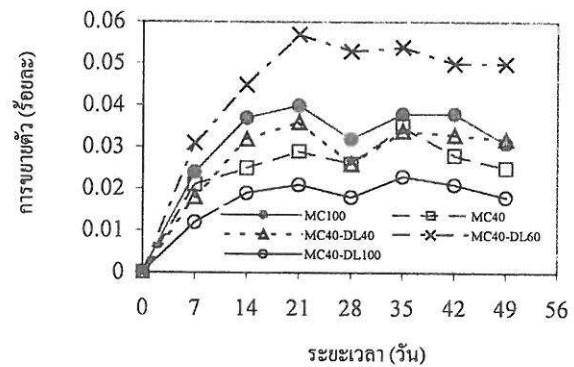


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโดจีเนียสของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 40 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยน้ำหนัก และฝุ่นหินปูนชนิดโคโลไมท์กับระยะเวลา

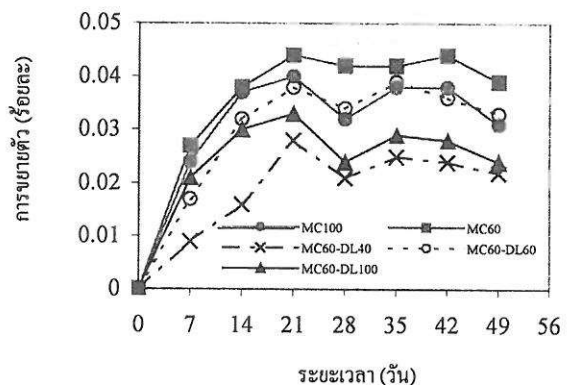
5.3.3 ความทนทานต่อซัลเฟต

ความสัมพันธ์ของการขยายตัวช่วงต้นในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) จนกระทั่งมอร์ตาร์มีอายุ 49 วัน ในรูปที่ 12 - 15 พบว่าในเบื้องต้นมอร์ตาร์ซึ่งมีการแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 40 จะมีการขยายตัวมากกว่ามอร์ตาร์ปกติ ในขณะที่มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 60 จะมีการขยายตัวน้อยกว่ามอร์ตาร์ปกติ

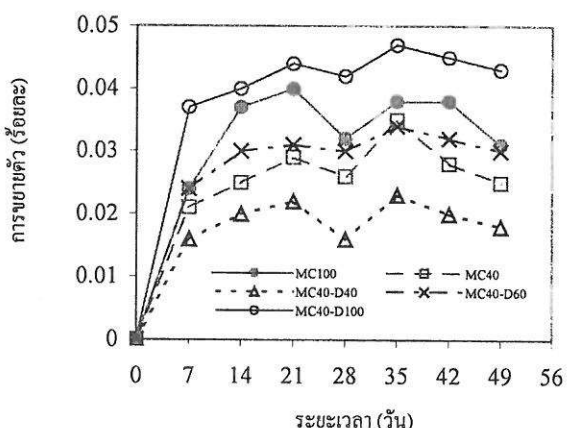
สำหรับมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนอื่นจะมีค่าน้อยกว่ามอร์ตาร์ปกติ เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยสารปอซโซลานทำให้ปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) และเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์ (C_4AF) ลดลง นอกจากนั้นยังทำให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่จะทำปฏิกิริยากับซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ลดลงตามไปด้วย การขยายตัวจึงมีค่าลดลง [12, 13]



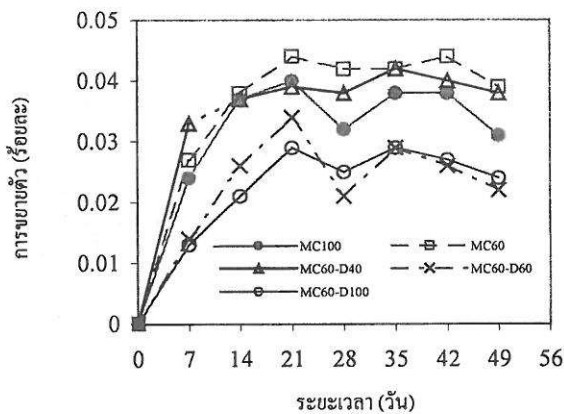
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 60 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยน้ำหนักและฝุ่นหินปูนชนิดโคโลไมท์กับเวลาในการแช่สารละลายซัลเฟต



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 40 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยน้ำหนักและฝุ่นหินปูนชนิดโคโลไมท์กับเวลาในการแช่สารละลายซัลเฟต



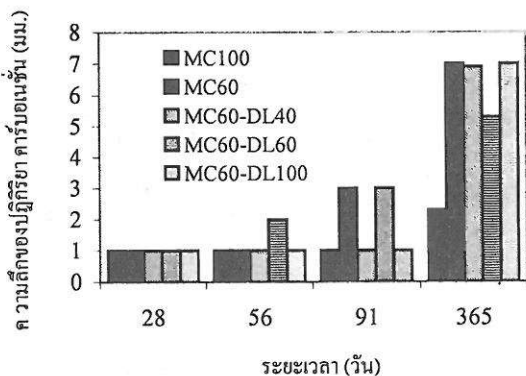
รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 60 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยน้ำหนักและฝุ่นหินปูนชนิดโคโลไมท์กับเวลาในการแช่สารละลายซัลเฟต



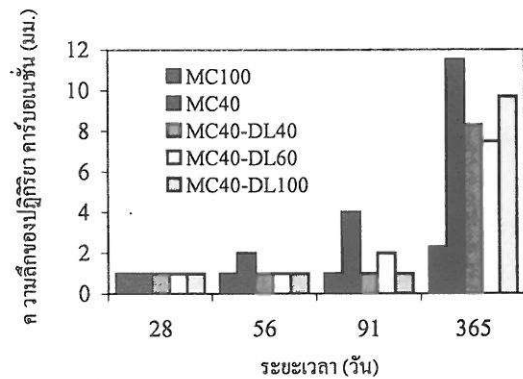
รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 40 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยน้ำหนัก และฝุ่นหินปูนชนิดโคโลไมท์กับเวลาในการแช่สารละลายซัลเฟต

5.3.4 การเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น

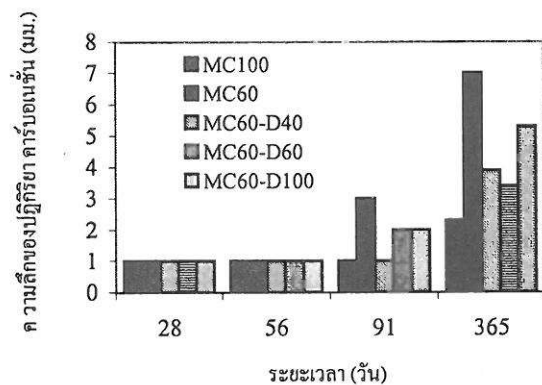
ผลการทดสอบความลึกของการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนทั้งสองชนิดแสดงในรูปที่ 16 - 19 พบว่าในช่วง 28 วันแรก การเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นของมอร์ตาร์ปกติและมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนจะมีค่าเท่ากัน ในขณะที่ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นของมอร์ตาร์ที่อายุ 56, 91 และ 365 วัน จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยจะมีเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นมากกว่ามอร์ตาร์ปกติ ในขณะที่มอร์ตาร์ผสมฝุ่นหินปูนชนิดโคโลไมท์และโคโลไมท์แทนที่ในเถ้าลอยที่ร้อยละ 40 และ 100 จะทำให้การเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ในขณะที่การแทนที่ร้อยละ 60 จะมีค่าลดลง เนื่องจากการแทนที่ฝุ่นหินปูนซึ่งมีอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้ฝุ่นหินปูนสามารถแทรกเข้าไปอยู่ในบริเวณช่องว่างหรือโพรงทำให้เนื้อมอร์ตาร์มีความพรุนลดลง ผลคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แทรกซึมเข้าสู่ภายในได้น้อยลงทำให้ความลึกของปฏิกิริยาลดลง



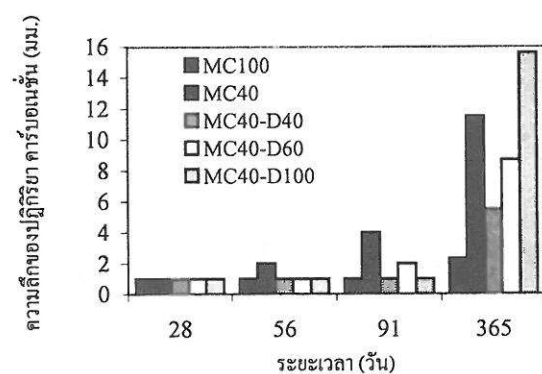
รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 40 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยน้ำหนัก และฝุ่นหินปูนชนิดโคโลไมท์กับระยะเวลา



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 60 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยน้ำหนัก และฝุ่นหินปูนชนิดโคโลไมท์กับระยะเวลา



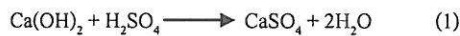
รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 40 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยน้ำหนัก และฝุ่นหินปูนชนิดโคโลไมท์กับระยะเวลา



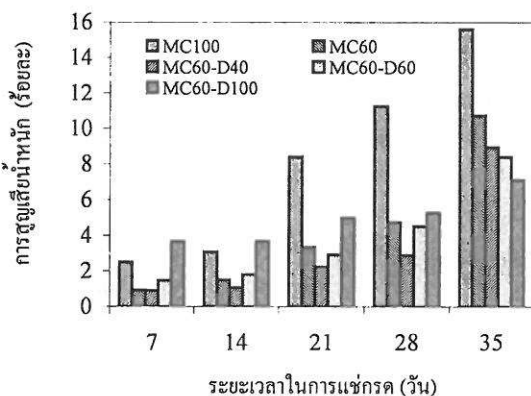
รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 60 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยน้ำหนัก และฝุ่นหินปูนชนิดโคโลไมท์กับระยะเวลา

5.3.5 ความทนทานต่อการกัดซัลฟูริก

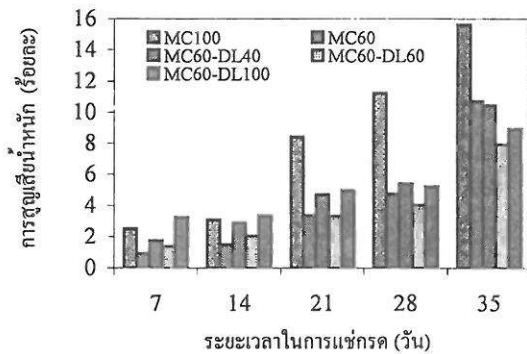
จากความสัมพันธ์ของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักกับระยะเวลาในการแช่แสดงในรูปที่ 20 - 23 พบว่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดของมอร์ตาร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการแช่กรดที่เพิ่มขึ้น โดยมีกลไกการทำลายประกอบด้วยการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดซัลฟูริกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์แสดงในสมการที่ 1 ได้ผลิตภัณฑ์เป็นยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ตกตะกอนที่ผิวของมอร์ตาร์ โดยยิปซัมที่เกิดขึ้นจากซัลเฟตไอออนและแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะมีความสามารถในการละลายต่ำมาก (0.22 กรัมในน้ำ 100 กรัมที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส) [14] และทำลายสารประกอบแคลเซียมทุกชนิดในมอร์ตาร์



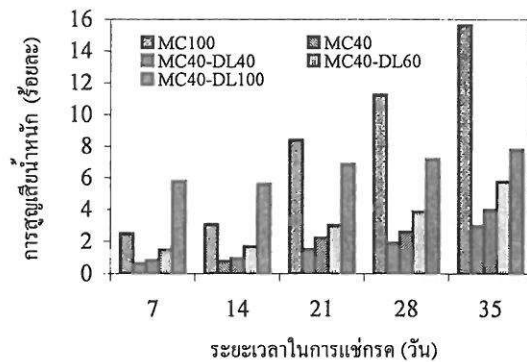
สำหรับมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยจะมีการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่ามอร์ตาร์ปกติ เนื่องจากการลดลงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ส่งผลให้ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ลดลงตามไปด้วย ในขณะที่มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนร้อยละ 40 และฝุ่นหินปูนชนิดโคโลมิติกและโคโลไมท์จะมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดเพิ่มขึ้น สาเหตุนี้มาจากความเป็นด่างที่เพิ่มขึ้นจากฝุ่นหินปูน ในขณะที่มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 60 และฝุ่นหินปูนจะมีค่าลดลงเมื่อทำการเพิ่มการแทนที่ฝุ่นหินปูนจากร้อยละ 40 เป็น 60 และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มการแทนที่ฝุ่นหินปูนแทนที่จากร้อยละ 60 เป็น 100 เนื่องจากความเป็นด่างเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจากฝุ่นหินปูน



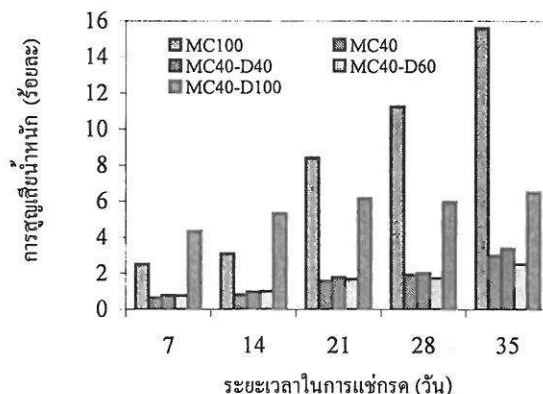
รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 40 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยน้ำหนัก และฝุ่นหินปูนชนิดโคโลไมท์กับระยะเวลา



รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 40 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยน้ำหนัก และฝุ่นหินปูนชนิดโคโลมิติกกับระยะเวลา



รูปที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 60 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยน้ำหนัก และฝุ่นหินปูนชนิดโคโลมิติกกับระยะเวลา



รูปที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 60 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยน้ำหนัก และฝุ่นหินปูนชนิดโคโลไมท์กับระยะเวลา

6. สรุป

6.1 การหาคัดแบบแห้งและแบบอโตจีเนียส การขยายตัวเนื่องจากซัลเฟต และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดของมอร์ตาร์เถ้าลอยผสมฝุ่นหินปูนจะมีค่าน้อยกว่ากับมอร์ตาร์ปกติ

6.2 ความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นของมอร์ตาร์เถ้าลอยผสมฝุ่นหินปูนจะมีค่าเพิ่มขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณ คุณวีระพงษ์ ติวานันทกร และคุณศุทธิวิทย์ ทองแดง ที่ช่วยเหลืองานในห้องปฏิบัติการ คุณปิติ เสรเมธากุลและบริษัท ทีพีไอ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์หัตถ์ดุดิบและการทดสอบ รวมทั้ง บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) และองค์การความร่วมมือระหว่างประเทศญี่ปุ่น (JICA) ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัยงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

8. บรรณานุกรม

- [1] พิชัย นิमितยงสกุล และ มาโกโตะ อาซึโน, คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ, เอกสารประกอบการสัมมนาทางวิชาการ เรื่องศักยภาพการนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์ สำนักวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- [2] Lane, R. E., and Best, J. F., Properties and Use of Fly Ash in Portland Cement Concrete, Concrete International: Design & Construction, Vol. 4, No. 7 pp. 81-92, July 1982.
- [3] Malhotra, V. M., Fly Ash in Concrete, Mineral Science Laboratories, CANMET, Natural Resources Canada, Ottawa, Ontario, Canada 2nd Edition, 1994.
- [4] Tangtermsirikul, S. et al., Class C Fly Ash as a Shrinkage Reducer for Cement Paste, Proceeding of the 5th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Milwaukee, Wisconsin, USA, June 1995, Vol.1, pp. 385-402.
- [5] Tangtermsirikul, S. and Chatveera, B., Volume Stability of Cement Paste and Mortar using Lignite Fly Ash, Proceedings of the 3rd Asia-Pacific Conference on Structural Engineering Construction, Johor Bahru, Malaysia, June 1996.
- [6] Mehta, P.K., Properties of Blended Cements made from RHA, ACI Materials Journal, Vol. 74, No. 9, September 1977.
- [7] อนุวรรตน์ โสวาทินทร์, 2542, การพัฒนาคอนกรีตความร้อนต่ำโดยใช้เถ้าแกลบ, วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยรังสิต.
- [8] นุรฉัตร ฉัตรวีระ และพิชัย นิमितยงสกุล, ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ เถ้าลอยและสารลดน้ำ, วารสารเทคโนโลยีสุรนารี, 2537.

- [9] ปิติ เสรเมธากุล, 2544, การใช้ประโยชน์จากผงหินปูนร่วมกับวัสดุปอชโซลาน, วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [10] American Society for Testing and Material, Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.02, United State of America, 1994.
- [11] Tangtermsirikul, S. et al., Effect of Chemical Composition and Particle Size of Fly Ash on Autogenous Shrinkage of Paste, International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete, Hiroshima, Japan, June 1998.
- [12] Neville, A.M., Properties of Concrete, 4th Edition, Pitman Book Limited, London, England, 1995.
- [13] คณะอนุกรรมการคอนกรีตวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, ความคงทนของคอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 1, สิงหาคม 2543.
- [14] Pavlik., Corrosion of Hardened Cement Paste by Acetic and Nitric Acids Part I: Calculation of Corrosion Depth, Cem Conc Res, Vol. 24 pp. 551 – 562, 1994.

