การศึกษาคุณสมบัติของปูนตำสูตรโบราณเพชรบุรีผสมผงซิลิกา

A Study of the Properties of Traditional Phetchaburi Stucco Containing Silica Powder

สุรชัย ทรัพย์เพิ่ม[1*]

[1*]คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

38 หมู่ 8 ตำบลนาวุ้ง อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบุรี 76000 โทร. 083-6073978 E-mail: surachai.supperm@gmail.com

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของปูนตำสูตรโบราณเพชรบุรีผสมผงซิลิกา โดยการนำผงซิลิกา บดละเอียดขนาด 4 และ 37 ไมครอน ในสัดส่วนร้อยละ 2.5 5.0 7.5 และ 10.0 ของน้ำหนักปูนขาว เพิ่มในเนื้อปูนตำ เพื่อเปรียบเทียบกับสูตรโบราณที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน จำนวน 8 สูตร พบว่าการใช้ผง ซิลิกาบดละเอียดขนาด 37 ไมครอน เพิ่มในปริมาณร้อยละ 10 ของน้ำหนักปูนขาวแห้งให้ผลด้านการหดตัวของเนื้อปูนลดลงมากที่สุด แต่ด้านกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงให้ค่าสูงสุด อีกทั้งการใช้ผงซิลิกาบดละเอียดขนาด 37 ไมครอน ให้ผลทดสอบดีกว่าขนาด 4 ไมครอน ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อปูนปั้นแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มผงซิลิกาบดละเอียดในเนื้อปูนตำทำให้ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ลดลงตามสัดส่วนการเพิ่ม การลดลงของปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในเนื้อปูนส่วนหนึ่ง เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานในเนื้อปูนที่ต้องการใช้แคลเซียมออกไซด์และน้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยา

คำสำคัญ : ปูนปั้น, ช่างปูนปั้นเพชรบุรี, ปูนโบราณ

Abstract

This paper presents the results of research into the properties of traditional Phetchaburi stucco to which silica powder has been added. The silica powder was either 4 or 37 microns and was added at percentages of 2.5, 5.0, 7.5 and 10.0 by weight of lime, thus producing 8 varieties of stucco to be compared. The results show that modified stucco with 10% 37-micron silica powder decreased in size the most, but its compressive and tensile strength increased the most, too. The results also show that adding 37-micron silica yielded better results than did adding 4-micron silica. As regards chemical composition, as the amount of silica powder added increased, the amount of calcium oxide fell proportionately. The reduction in calcium oxide was a result of a pozzolanic reaction, which used calcium oxide and water as the reagent.

Keywords : Stucco, Phetchaburi craftsman, Ancient stucco

1. บทนำ

เพชรบุรีเป็นจังหวัดที่มีความโดดเด่นด้านงานศิลปะปูนปั้นมาแต่โบราณ ดังปรากฏหลักฐานตามแหล่งโบราณสถานต่าง ๆ เช่น แหล่งโบราณสถานทุ่งเศรษฐี อ.ชะอำ แหล่งผลิตรูปเคารพโบราณหนองปรง อ.เขาย้อย หรือแหล่งโบราณคดีเขากระจิว อ.ท่ายาง ล้วนแล้วแต่ถูกสร้างขึ้นก่อนสมัยประวัติศาสตร์ หรือในช่วงสมัยกรุงศรีอยุธยายังปรากฏหลักฐานงานศิลปะปูนปั้นที่วัดเขาบันไดอิฐ วัดสระบัว วัดมหาธาตุวรวิหาร เป็นต้น ช่างปูนปั้นเพชรบุรีในปัจจุบันยังคงสืบสานการปั้นปูนตามแบบฉบับโบราณ (พิจิตร นิ่มงาม, 2550) และจากกระแสนิยมวัฒนธรรมใหม่ ๆ ในปัจจุบันทำให้อาชีพงานปูนปั้นไม่ค่อยได้รับความนิยมมากนัก ฝีมือช่าง คุณภาพชิ้นงานหยุดการพัฒนา ซึ่งมีสาเหตุหลาย ๆ ประการ เช่น การถ่ายทอดความรู้กระทำได้ยากในระบบการศึกษาปัจจุบัน เนื่องจากต้องใช้เวลาฝึกฝนยาวนาน ผู้เรียนต้องมีความมานะอดทนสูง ส่งผลให้มีจำนวนช่างปูนปั้นลดลง (จารุวรรณ ขำเพชร และคณะ, 2549)

ปูนปั้นเป็นกรรมวิธีสร้างสรรค์งานศิลปะที่ใช้ปูนเป็นวัตถุดิบซึ่งผลิตจากเปลือกหอยหรือหินปูนเผาไฟจนได้ผงสีขาว เม็ดละเอียดผสมทราย น้ำอ้อยหรือสิ่งอื่น ๆ เช่น ยางจากต้นไม้ น้ำมันตั้งอิ้ว น้ำตาลโตนดคลุกเคล้าโดยการตำให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้วนำไปปั้นเป็นรูปต่าง ๆ เมื่อแห้งแล้วมีความแข็งแกร่งทนแดดทนฝนได้ดี (กรมศิลปากร, 2549) และด้วยวิธีการผสมวัสดุต่าง ๆ ให้เข้ากันโดยการตำหรือโขลก ช่างปูนปั้นเพชรบุรีจึงเรียกปูนชนิดนี้ในขณะที่อยู่ในลักษณะกึ่งเปียกว่า ปูนตำ เมื่อนำไปปั้นเป็นรูปต่าง ๆ เนื้อปูนจะแห้งและแข็งตัวได้เมื่อสัมผัสกับอากาศจึงเรียกปูนที่อยู่ในสภาวะแห้งและแข็งตัวนี้ว่า ปูนปั้น งานวิจัยของ สุรชัย ทรัพย์เพิ่ม และคณะ (2558) พบว่า สัดส่วนวัสดุผสมปูนตำเฉลี่ยของช่างปูนปั้นเพชรบุรีมีสัดส่วน ปูนขาว : ทราย : เส้นใยกระดาษ : น้ำกาวประสาน คือ 42.89 : 21.89 : 5.21 : 30.01 โดยน้ำหนัก และยังพบอีกว่าน้ำที่ใช้เป็นส่วนผสมในเนื้อปูนตำที่มีมากถึงร้อยละ 30 เป็นสาเหตุหนึ่งของการแตกร้าวในเนื้อปูนปั้น การแข็งตัวของชิ้นงานปูนปั้นเกิดจากปูนตำซึ่งมีปูนขาวและน้ำเป็นองค์ประกอบหลักทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่าปฏิกิริยาคาร์บอ-เนชัน (สำเริง รักซ้อน และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2551) เมื่อน้ำถูกใช้ในการทำปฏิกิริยาและบางส่วนระเหยออกไปเนื้อปูนจึงมีรูโพรงมาก มีคุณสมบัติด้านการรับกำลังต่ำ ชิ้นงานปูนปั้นสึกกร่อนได้ง่ายเมื่อถูกน้ำฝน จากการศึกษาคุณสมบัติของปูนตำ ในงานวิจัยของ ประกาศ ทองประไพ และคณะ (2550) ด้วยการปรับปรุงสัดส่วนผสมปูนตำใหม่เพื่อให้ได้คุณสมบัติด้านการรับกำลังที่ดีขึ้นโดยการปรับสัดส่วนของเส้นใยกระดาษ น้ำกาวประสาน โดยการเพิ่ม-ลด ร้อยละ 25, 50 และใช้เส้นใยกระดาษ ร่วมกับน้ำกาวประสาน เพิ่ม-ลด ร้อยละ 25, 50 จำนวนทั้งสิ้น 12 สัดส่วน แล้วนำมาเปรียบเทียบกับสูตรปูนตำโบราณของช่างปูนปั้นเพชรบุรี พบว่าการปรับสัดส่วนผสมทำให้มีระยะการก่อตัวที่ช้ามากขึ้น มีอัตราการดูดซึมน้ำสูงขึ้น การต้านทานแรงอัดและแรงดึงค่อนข้างต่ำ และเมื่อพิจารณาโดยรวมทั้งด้านกำลังและความสามารถด้านการทำงานแล้ว พบว่าสัดส่วนผสมปูนปั้นโบราณของช่างปูนปั้นเพชรบุรีมีคุณสมบัติด้านการรับกำลังที่ดีกว่า เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานมากกว่าสัดส่วนผสมที่ได้ทำการปรับปรุงขึ้นใหม่ การปรับปรุงมอร์ต้าปูนขาว (lime mortar) สำหรับการซ่อมแซมงานปูนโบราณเพื่อให้ได้คุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นด้วยการใช้สารเพิ่มเติมในปูนขาวพบได้ในงานวิจัยของ Vejmelkova et al. (2012) ด้วยการใช้ดินดาน (Clay shale) เผาไฟและนำมาบดละเอียดผสมทดแทนปูนขาวในอัตราส่วนร้อยละ 20 ผลการทดสอบพบว่าหากมีขนาดความละเอียดมาก

จะให้ผลการรับกำลังดีกว่าขนาดความละเอียดที่หยาบกว่า ทั้งนี้คุณสมบัติด้านกำลังที่ดีขึ้นจากการใช้ผงดินดานเผาบดละเอียดเนื่องจากผงดินดานเผามีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) ในปริมาณที่สูง ส่งผลให้ผงดินดานเผาสามารถเกิดปฏิกิริยาในสภาวะสารละลายด่างกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ดี ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในด้านการยึดประสานที่ดี และเรียกวัสดุนี้ว่าวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) (Sanchez et al., 2005; Chindaprasirt et al., 2007) การนำวัสดุปอซโซลานที่มีปริมาณของซิลิกาออกไซด์สูงจากกากของเสียในภาคอุตสาหกรรม เช่น เถ้าลอย เถ้าแกลบ มาผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านการยึดประสานพบได้ทั่วไปในงานปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต ซีเมนต์มอร์ต้าและวัสดุจีโอโพลิเมอร์ (ศตวรรษ หฤหรรษพงศ์ และคณะ, 2554, ธนากร ภูเงินขำ และคณะ, 2555 และสกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์ และคณะ, 2556)

จากรายงานการวิจัยในประเทศพบว่ามีการศึกษาคุณสมบัติของปูนตำสำหรับงานปูนปั้นมีน้อยมากและยังไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของปูนตำให้มีความสามารถด้านกำลัง ประสิทธิภาพการทำงาน ที่ดีกว่าสูตรปูนตำโบราณ สำหรับงานวิจัยในต่างประเทศพบว่าการใช้วัสดุปอซโซลานสามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังและการยึดเกาะของมอร์ต้า ปูนขาวได้ดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นที่จะศึกษาและการพัฒนาคุณสมบัติของปูนตำสูตรโบราณเพชรบุรี สำหรับงานปูนปั้นด้วยการใช้ผงซิลิกาบดละเอียดผสมในปูนตำเพื่อให้ปูนตำมีคุณสมบัติที่ดีด้านต่าง ๆ เช่น ด้านการต้านทานการหดตัว ด้านการรับกำลังที่สูงขึ้น และด้านความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน

ภาพที่ 1 ลักษณะงานปูนปั้นของช่างปูนปั้นเพชรบุรี บริเวณวัดข่อย อ.เมือง จ.เพชรบุรี

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาผลของผงซิลิกาบดละเอียดที่มีต่อองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างจุลภาค และคุณสมบัติเชิงกลของปูนตำสูตรโบราณเพชรบุรี

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุ

1) ใช้ปูนตำสูตรโบราณของช่างปูนปั้นเพชรบุรี (ช่างสำเรียง พรพระ, สัมภาษณ์, 12 มีนาคม 2557) มีสัดส่วนผสมโดยน้ำหนัก ปูนขาว : ทราย : เส้นใยกระดาษ : น้ำกาวประสาน คือ 47.26 : 28.80 : 0.77 : 23.17 ผสมปูนตำด้วยการตำโดยใช้ครกกระเดื่องเป็นเวลา 90 นาที

2) ผงซิลิกาบดละเอียด ขนาด 4 และ 37 ไมครอน (μm) มีเนื้อละเอียดสีขาว

3.2 การเตรียมตัวอย่าง

1) การเตรียมปูนตำ

การเตรียมวัตถุดิบเป็นกระบวนการที่สำคัญที่ช่างปั้นแต่ละคนมักจะเก็บไว้เป็นความลับของตนเองจะรู้เฉพาะในกลุ่มเครือญาติเท่านั้น โดยภาพรวมทั่ว ๆ ไปแล้ว ประกอบด้วย

1.1) ปูนขาวที่ใช้ได้จากการเผาหินปูนด้วยความร้อนสูง นำมาร่อนผ่านตะแกรงละเอียดขนาดตา 2 มิลลิเมตร

1.2) ทราย เป็นทรายแม่น้ำร่อนผ่านตะแกรงขนาดตา 2 มิลลิเมตร

1.3) เส้นใยกระดาษ ได้จากกระดาษกล่องลูกฟูกสำหรับห่อสิ่งของทั่วไปหรือกระดาษสา มีลักษณะเส้นใยโตและยาว นำมาแช่น้ำจนเปื่อยยุ่ย

1.4) กาวประสาน ได้จากการต้มกากน้ำตาลที่เหลือจากกระบวนการผลิตน้ำตาลจากอ้อยผสมกับผงกาวหนังสัตว์ในอัตราส่วน กากน้ำตาล : ผงกาวหนังสัตว์ คือ 0.55 : 0.45 โดยน้ำหนัก ต้มรวมกันนาน 30 นาที

1.5) น้ำกาวประสาน เป็นอัตราส่วนผสมระหว่างกาวประสานต่อน้ำคือ 0.3 : 0.7 โดยน้ำหนัก

กระบวนการตำปูนเริ่มจากนำเส้นใยกระดาษผสมกับทรายประมาณร้อยละ 20 ใส่ครกกระเดื่องตำจนเส้นใยกระดาษแหลกละเอียด จากนั้นนำปูนขาวผสมกับทรายที่เหลือและผงซิลิกาตามสัดส่วนคลุกเคล้าให้เข้ากัน เติมลงในครกโขลกตำให้เข้ากันประมาณ 15 นาที จึงใส่น้ำกาวประสานผสมร่วมลงไปโขลกตำต่อไป จนกระทั่งส่วนผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน เหนียวจับกันเป็นก้อนไม่แตกร่วน ในขณะตำจะค่อย ๆ เติมน้ำลงไปทีละเล็กน้อย ต้องคอยสังเกตดูเนื้อปูนไม่ให้เหลว วิธีการตรวจสอบว่าปูนตำมีความเหนียวพอที่จะนำไปใช้งานได้หรือไม่นั้น ให้ทดลองปั้นปูนเป็นก้อนกลม ๆ แล้วใช้มือบี้ให้แบน ถ้าไม่มีรอยแตกแสดงว่าเนื้อปูนเข้ากันดี จากนั้นเก็บใส่ถุงพลาสติกปิดปากให้สนิท

ภาพที่ 2 การตำปูนของช่างปูนปั้นเพชรบุรี

2) สัดส่วนผสมปูนตำ

สัดส่วนผสมปูนตำที่ทดสอบเป็นสูตรปูนตำโบราณโบราณของช่างปูนปั้นเพชรบุรีที่ยังผลิตใช้งานอยู่ในปัจจุบัน นำมาเติมผงซิลิกาบดละเอียดร้อยละ 2.5 5.0 7.5 และ 10.0

ของน้ำหนัก ปูนขาวที่ใช้ผสมโดยเทียบกับสูตรโบราณ รวมทั้งหมดจำนวน 9 สูตร รายละเอียดแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมผงซิลิกาบดละเอียดในปูนตำของตัวอย่างการวิจัย

สูตรที่	สัญลักษณ์	ปูนขาว (กรัม)	ผงซิลิกา ขนาด 37 µm (กรัม)	ผงซิลิกา ขนาด 4 µm (กรัม)	ผงซิลิกาต่อปูนขาว (ร้อยละ)
1	Stucco	4,315	-	-	สูตรโบราณ
2	+2.5S37	4,315	107.9	-	2.5
3	+5.0S37	4,315	215.7	-	5.0
4	+7.5S37	4,315	323.6	-	7.5
5	+10.0S37	4,315	431.5	-	10.0
6	+2.5S4	4,315	-	107.9	2.5
7	+5.0S4	4,315	-	215.7	5.0
8	+7.5S4	4,315	-	323.6	7.5
9	+10.0S4	4,315	-	431.5	10.0

สัดส่วนผสมปูนตำโบราณที่ใช้ในการวิจัย : ปูนขาว = 4,315 กรัม, ทราย = 2,630 กรัม, เส้นใยกระดาษ = 71 กรัม, กาวประสาน = 0.635 ลิตร, น้ำ = 1.48 ลิตร

3) การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

หลังจากได้เนื้อปูนตำแล้วทำการหล่อลงในแบบหล่อต่าง ๆ ดังนี้

3.1) หล่อรูปทรงแท่งสี่เหลี่ยมขนาด 25 x 25 x 285 มิลลิเมตร (กว้าง x ยาว x ลึก) สำหรับทดสอบหาค่าการหดตัวตามแนวแกน

3.2) หล่อรูปทรงสี่เหลี่ยมจตุรัสขนาด 50 x 50 x 50 มิลลิเมตร สำหรับทดสอบแรงอัด และใช้สำหรับการหาค่าการหดตัวเชิงปริมาตรโดยใช้การแทนที่ปริมาตรในปรอท

3.3) หล่อรูปทรงบริเคท (Briquette) สำหรับทดสอบแรงดึง

หลังจากหล่อครบอายุ 2 วัน แกะแบบออกแล้วทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้อง ทำการทดสอบที่อายุ 3 7 14 28 และ 90 วัน

3.3 การทดสอบคุณสมบัติ

1) การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence, XRF) ของปูนขาว ผงซิลิกา ที่เป็นสารตั้งต้น และปูนปั้นที่มีส่วนผสมของซิลิกาที่อายุการบ่ม 90 วัน

2) การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของปูนขาวผงซิลิกาและปูนปั้นที่มีส่วนผสมของซิลิกาที่อายุการบ่ม 90 วัน เลือกชิ้นส่วนบริเวณผิวนอกของก้อนลูกบาศก์ 50 x 50 x 50 มิลลิเมตร ที่เหลือจากการทดสอบความต้านทานแรงอัด โดยเลือกใช้ก้อนเล็ก ๆ ขนาดประมาณ 2-5 มิลลิเมตร นำมาบดให้ละเอียด

3) การทดสอบเชิงกล ตามมาตรฐาน ASTM ดังนี้

3.1) การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวโดยใช้เข็มไวแคต (ASTM C191)

3.2) การทดสอบหาปริมาณความชื้น

ขั้นตอนในการทดสอบ

ก. นำตัวอย่างปูนตำประมาณ 100 กรัม ชั่งน้ำหนัก (w_1) แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ข. หลังจากอบแห้งตัวอย่างปูนตำแล้วนำมาชั่งน้ำหนัก (w_2) นำค่าที่ได้คำนวณหาร้อยละของปริมาณความชื้นตามสมการที่ (1)

$$\text{ร้อยละของปริมาณความชื้น} = \frac{(w_1 - w_2)x100}{w_2} \quad (1)$$

3.3) การทดสอบหาค่าการหดตัวตามแนวแกน และเชิงปริมาตร (ASTM C1012)

3.4) การทดสอบกำลังรับแรงอัด และแรงดึง (ASTM C109, ASTM C190)

4. ผลการวิจัย

4.1 คุณสมบัติของวัสดุทางเคมี

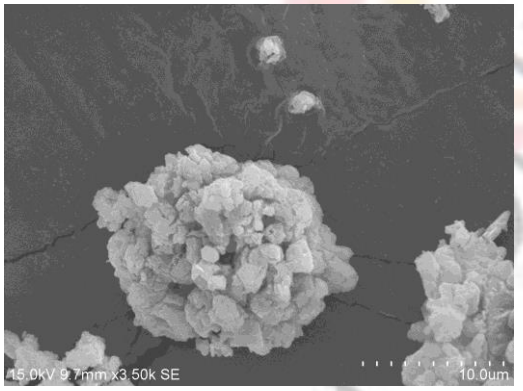
เมื่อนำผงปูนขาว ที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 200 ผงซิลิกาและเนื้อปูนปั้นบดละเอียดไปทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ พบว่าองค์ประกอบหลักทางแร่ที่อยู่ในรูปของผลึกของปูนขาวคือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) มีการเกาะตัวกันหลวม ๆ ผิวค่อนข้างขรุขระ และสำหรับของผงซิลิกา คือ ควอตซ์ (SiO_2) มีผิวเรียบเกาะตัวกันแน่นมองเห็นเป็นผลึกที่ชัดเจน แสดงในตารางที่ 2 และภาพที่ 3 เมื่อนำมาผลิตเป็นปูนตำโดยใช้สัดส่วนผสมตามสูตรโบราณของช่างปูนปั้นเพชรบุรี และผสมผงซิลิกาดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า การเติมผงซิลิกาบดละเอียดในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์เมื่อผสมกับน้ำแล้วจะสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับผงซิลิกาได้ สารประกอบใหม่ที่เกิดจากการรวมตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับซิลิกามีคุณสมบัติด้านการยึดเกาะการประสานระหว่างกัน จึงส่งผลให้เนื้อปูนปั้นมีคุณสมบัติเชิงกลสูงขึ้น ทั้งนี้ขนาดและปริมาณของผงซิลิกามีอิทธิพลต่อการพัฒนากำลังด้านต่าง ๆ ของเนื้อปูน แต่อย่างไรก็ตามผงซิลิกาที่ใช้ในการวิจัยนี้ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของผลึกทำให้การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานมีน้อยกว่าวัสดุอย่างอื่น เช่น เถ้าลอย หรือซิลิกาฟูม

ตารางที่ 2 องค์ประกอบหลักทางเคมีของปูนขาว ผงซิลิกา และปูนปั้น

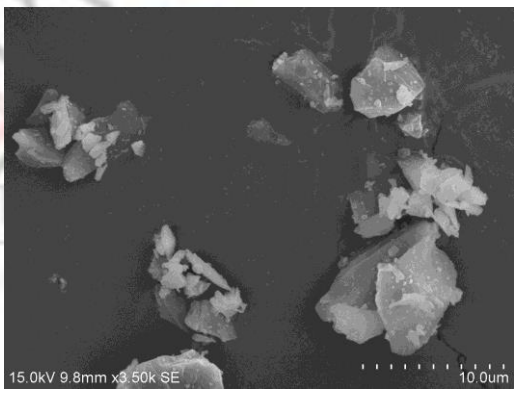
องค์ประกอบทางเคมี	ปูนขาว (ร้อยละ)	ผงซิลิกา (ร้อยละ)	ปูนปั้น (ร้อยละ)		
			สูตรที่ 1	สูตรที่ 3	สูตรที่ 5
Calcium oxide (CaO)	93.5	0.01	84.98	78.18	77.09
Magnesium oxide (MgO)	4.01	-	4.77	8.41	3.94
Sulfur trioxide (SO_3)	0.19	-	0.24	0.09	0.12
Sodium oxide (Na_2O)	0.04	-	0.10	0.16	0.09
Silicon dioxide (SiO_2)	1.54	99.86	7.46	10.86	16.68
Iron oxide (Fe_2O_3)	0.27	0.02	0.65	0.65	0.54
Aluminium oxide (Al_2O_3)	0.30	0.06	1.29	1.14	1.10

4.2 โครงสร้างจุลภาค

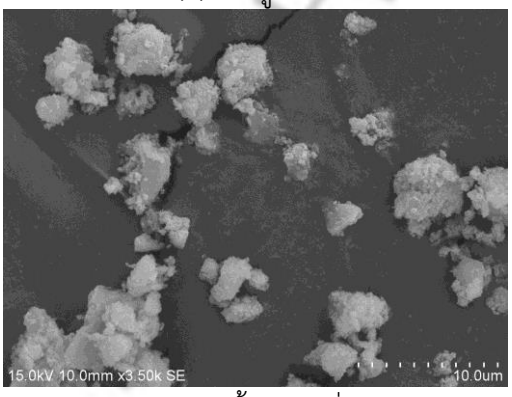
จากภาพถ่ายกำลังขยายสูงของตัวอย่างปูนขาว ผงซิลิกาและเนื้อปูนปั้นที่อายุการบ่ม 90 วัน แสดงในภาพที่ 3 จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเกิดขึ้นได้ถ้าหากอนุภาคของซิลิกามีขนาดเล็กพอ และในภาพที่ 3 (4) แสดงให้เห็นถึงผิวของอนุภาคซิลิกามีความหยาบ ขรุขระมากขึ้น บ่งบอกถึงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ผงซิลิกาช่วยทำให้ขนาดคละของเนื้อปูนปั้นดีขึ้น มีความแน่นมากขึ้น



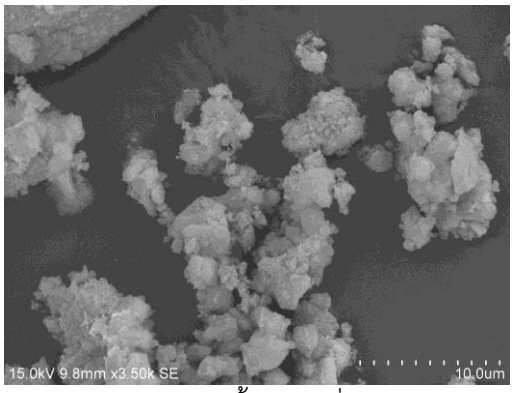
(1) ผงปูนขาว



(2) ผงซิลิกา



(3) ปูนปั้น สูตรที่ 1



(4) ปูนปั้น สูตรที่ 5

ภาพที่ 3 โครงสร้างจุลภาคของปูนขาว ผงซิลิกาและเนื้อปูนปั้น

ผลึกของซิลิกาขนาดเล็กจะสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี และในขนาดที่โตกว่าผิวด้านนอกของแท่งผลึกมีความสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้เช่นกัน เกิดเป็นสารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CHS) ผิวของอนุภาคซิลิกาในเนื้อปูนปั้นมีความขรุขระมากกว่าผิวของอนุภาคซิลิกาเดิมซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบด้านกำลังเชิงกล

4.3 คุณสมบัติเชิงกล

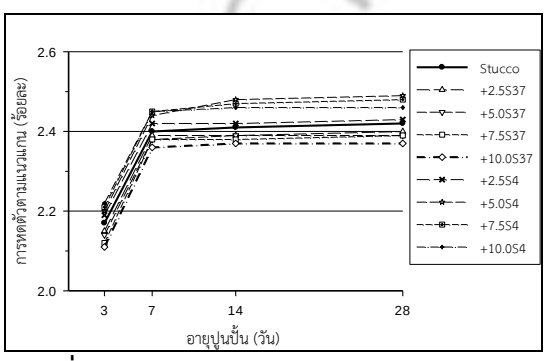
1) ผลทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของปูนตำโดยใช้เข็มไวแคต และปริมาณความชื้นของปูนตำโดยควบคุมอุณหภูมิในห้องทดลองที่ 25 องศาเซลเซียส แสดงผลทดสอบในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ระยะเวลาก่อตัวและปริมาณความชื้นของปูนตำ

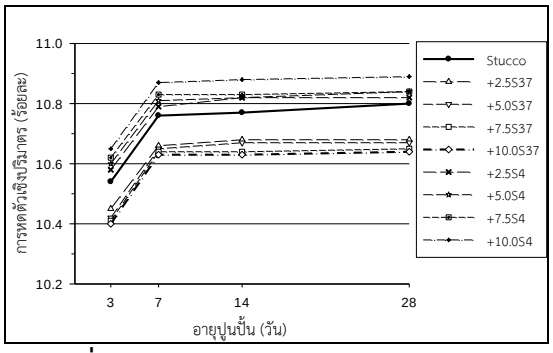
สูตรที่	ระยะเวลาก่อตัว (นาที)		ปริมาณความชื้น
	เริ่มต้น	สุดท้าย	(ร้อยละ)
1	365	612	30.14
2	360	595	32.55
3	375	590	32.00
4	380	600	33.16
5	380	615	33.50
6	390	580	30.40
7	400	622	30.84
8	382	595	31.50
9	385	605	32.10

จากตารางที่ 3 พบว่า ปูนตำสูตรโบราณเมื่อใช้ผงซิลิกาผสมเพิ่มเติมทำให้มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและมีระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ซึ่งใช้ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นที่ 45 นาที ขณะที่ปูนตำใช้เวลาในการก่อตัวเริ่มต้นที่ 360 นาที ทั้งนี้การก่อตัวของปูนตำอาศัยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ และจะเริ่มแข็งตัวจากผิวด้านนอกเข้าหาเนื้อปูนด้านใน และปูนตำที่มีส่วนผสมของผงซิลิกามีปริมาณความชื้นเฉลี่ยประมาณร้อยละ 32

2) ผลทดสอบหาค่าการหดตัวตามแนวแกนและเชิงปริมาตรของปูนตำ



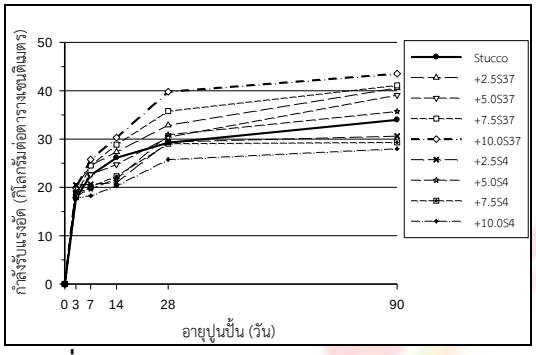
ภาพที่ 4 การหดตัวตามแนวแกนของปูนตำ



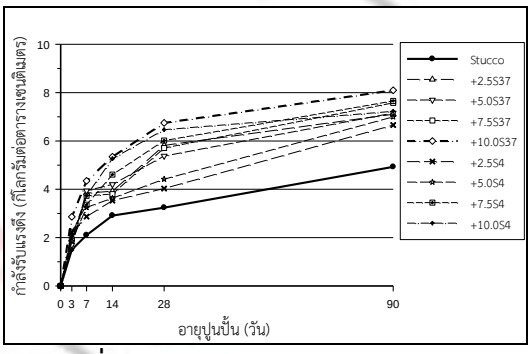
ภาพที่ 5 การหดตัวเชิงปริมาตรของปูนตำ

การหดตัวของปูนตำจะเกิดขึ้นมากในช่วง 7 วันแรก หลังจากปูนตำเริ่มสูญเสียน้ำและเนื้อปูนได้สัมผัสกับอากาศ การหดตัวของปูนตำในเชิงปริมาตรจะมีค่าสูงกว่าการหดตัวตามแนวเส้น และหลังจาก 7 วันไปแล้วการหดตัวมีค่าลดลงจนเกือบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออายุได้ 28 วัน ผลการพิจารณาจากกราฟในภาพที่ 4 และภาพที่ 5 พบว่า การใช้ผงซิลิกาบดละเอียดขนาด 37 ไมครอน ผสมในปูนตำ ช่วยลดการหดตัวได้ดีกว่าขนาด 4 ไมครอน ซึ่งมีขนาดที่เล็กกว่า โดยเฉพาะการใส่ผงซิลิกาเพิ่มในปริมาณร้อยละ 10 ของน้ำหนักปูนขาวให้ผลทดสอบดีที่สุด

3) ผลทดสอบกำลังรับแรงอัด และแรงดึง



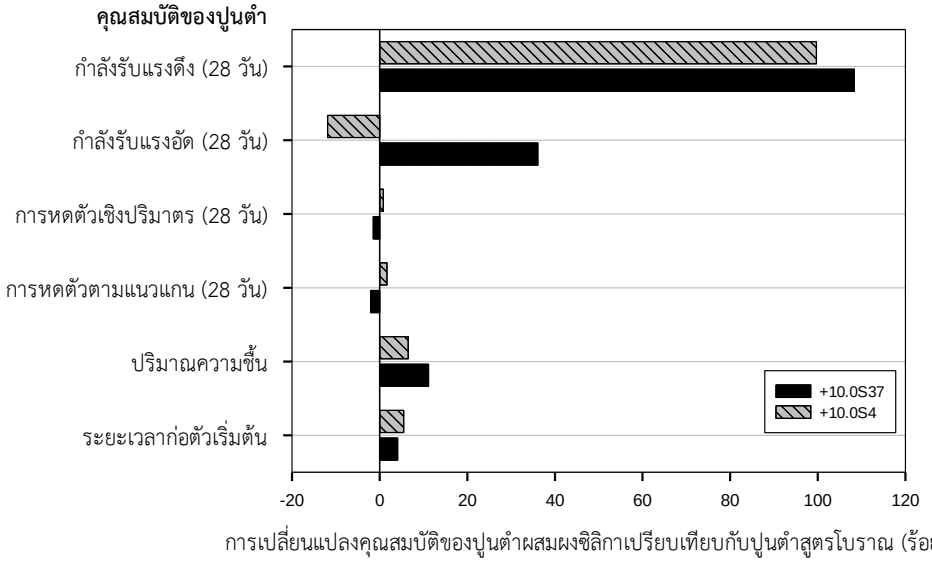
ภาพที่ 6 กำลังรับแรงอัดของปูนตำ



ภาพที่ 7 กำลังรับแรงดึงของปูนตำ

การพัฒนากำลังต้านทานแรงอัดของปูนตำมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับคอนกรีต กล่าวคือ กำลังต้านทานแรงอัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 7 วันแรก จากนั้นกำลังอัดจะพัฒนาต่อไปเรื่อย ๆ อย่างช้า ๆ เมื่ออายุปูนตำผ่านพ้นจาก 28 วัน กำลังอัดเกือบจะไม่เพิ่มขึ้นอีก ทั้งนี้จากลักษณะของปูนตำที่อาศัยน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยาเพื่อการแข็งตัวของเนื้อปูน (Cultrone et al., 2005) เมื่อปูนตำมีอายุมากขึ้นน้ำในเนื้อปูนค่อย ๆ ระเหยออกสู่ภายนอก เนื้อปูนแห้งมากขึ้นจึงไม่มีน้ำเพียงพอที่สามารถช่วยให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ในปูนขาวได้ต่อไป กำลังอัดของเนื้อปูนจึงค่อย ๆ หยุดการพัฒนา ซึ่งมีพฤติกรรมในลักษณะเดียวกันกับกำลังรับแรงดึงของเนื้อปูน จากภาพที่ 6 และภาพที่ 7 การใช้ผงซิลิกาขนาด 37 ไมครอน ให้ผลทดสอบด้านกำลังดีกว่าการใช้ผงซิลิกาขนาด 4 ไมครอน กล่าวคือ จากการถ่ายภาพกำลังขยายสูงของผงซิลิกาบดละเอียด พบว่า ผงซิลิกาส่วนใหญ่อยู่ในรูปของผลึกทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นได้น้อย จึงไม่ปรากฏผลด้านกำลังที่เด่นชัด อย่างไรก็ตามขนาดเม็ดของผงซิลิกาที่ใช้ในการวิจัยมีขนาดโตกว่าขนาดของเม็ดปูนขาว ผงซิลิกาเหล่านี้จึงสามารถสอดแทรก เติมเต็มช่องว่างระหว่างเม็ดทรายและปูนขาวได้ดี ทำให้เนื้อปูนมีความแน่นเพิ่มขึ้นประกอบกับผงซิลิกาขนาดเล็กบางส่วนทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ จึงส่งผลให้มีกำลังต้านทานที่ดีขึ้น สำหรับปูนตำของช่างปูนปั้นเพชรบุรีที่ใช้ผงซิลิกาขนาด 37 ไมครอน ผสมเพิ่มในปูนตำปริมาณร้อยละ 10 ของน้ำหนักปูนขาว ให้กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงสูงสุดที่อายุการบ่ม 28 วัน เท่ากับ 40 และ 6.8 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ หรือเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสูตรปูนตำโบราณด้านกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง ร้อยละ 36 และ 108 ตามลำดับ และมีกำลังเพิ่มขึ้นทุกช่วงอายุการทดสอบ ภาพที่ 8 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ

ของปูนตำด้านต่าง ๆ เมื่อใช้ผงซิลิกาบดละเอียดผสมเพิ่มในปริมาณร้อยละ 10 ของปูนขาว โดยเปรียบเทียบกับคุณสมบัติปูนตำสูตรโบราณ พบว่าการใช้ผงซิลิกาบดละเอียดขนาด 37 ไมครอน ให้ผลด้านคุณสมบัติเชิงบวกดีกว่าการใช้ผงซิลิกาบดละเอียดขนาด 4 ไมครอน ในการวิจัยครั้งนี้ นอกจากสามารถนำผงซิลิกา มาใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของเนื้อปูนตำได้แล้ว ยังพบอีกว่าขนาดเม็ดของผงซิลิกามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของปูนตำ กล่าวคือ การเลือกใช้ขนาดผงซิลิกาที่มีขนาดพอเหมาะจะช่วยทั้งในด้านการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและการเติมเต็มช่องว่างในเนื้อปูน ปริมาณโพรงอากาศภายในที่ลดลงจะทำให้เนื้อปูนรับกำลังเชิงกลได้ดีขึ้น



ภาพที่ 8 แสดงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของปูนตำที่ผสมผงซิลิกาบดละเอียดในปริมาณร้อยละ 10 ของปูนขาว

5. สรุปผลการวิจัย

5.1 ระยะเวลาการก่อตัว

ผงซิลิกาบดละเอียดที่นำมาใช้เป็นส่วนผสมเพิ่มในปูนตำ พบว่า ทั้งปริมาณและขนาดผงซิลิกาไม่ส่งผลให้ปูนตำมีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวช่วงสุดท้าย เพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

5.2 ปริมาณความชื้น

ผงซิลิกาบดละเอียดที่นำมาใช้เป็นส่วนผสมเพิ่มในปูนตำ พบว่า ทำให้ปูนตำต้องการน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อยทั้งนี้เนื่องจากมีพื้นที่ซับน้ำในเนื้อปูนเพิ่มขึ้นจากผิวของผงซิลิกา

5.3 การหดตัวตามแนวแกนและเชิงปริมาตร

ปูนตำที่ผสมผงซิลิกาบดละเอียดขนาด 37 ไมครอน ช่วยลดการหดตัวได้ดีกว่าสูตรปูนตำโบราณและดีกว่าการผสมผงซิลิกาบดละเอียดขนาด 4 ไมครอน แต่ปูนตำที่ผสมผงซิลิกาขนาด 4 ไมครอน พบการหดตัวเพิ่มอีกเล็กน้อยจึงไม่ควรนำมาใช้ผสมปูนตำโดยตรง

5.4 กำลังรับแรงอัดและแรงดึง

ปูนตำที่ผสมผงซิลิกาบดละเอียดขนาด 37 ไมครอน พบว่าสามารถช่วยเพิ่มความแข็งแกร่งได้ และเพิ่มขึ้นทุกช่วงการเพิ่มปริมาณทั้งด้านกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึง สำหรับปูนตำที่ผสมผงซิลิกาขนาด 4 ไมครอน พบว่ากำลังรับแรงอัดลดลงเล็กน้อย แต่ยังสามารถรับกำลังรับแรงดึงได้ดี

ข้อสรุปจากผลการวิจัย พบว่าผงซิลิกามีสารประกอบหลักเป็นซิลิกาไดออกไซด์มากกว่าร้อยละ 95 อยู่ในรูปผลึกของควอตซ์นำมาบดละเอียด เมื่อผสมเพิ่มในปูนตำส่งผลให้ปูนตำมีคุณสมบัติเชิงกลดีขึ้น ช่วยลดช่องว่างและโพรงในเนื้อปูนตำ อีกทั้งเม็ดผงซิลิกาที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ยังสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในเนื้อปูนได้ ความแข็งแกร่งเชื่อมแน่นของเนื้อปูนที่ผสมเพิ่มด้วยผงซิลิกาเกิดขึ้นจาก 2 ปฏิกิริยาทางเคมี คือ ปฏิกิริยาคาร์บอเนตและปอซโซลาน สำหรับการวิจัยนี้การเพิ่มผงซิลิกาขนาด 37 ไมครอน ในปริมาณร้อยละ 10 ของน้ำหนักปูนขาว สามารถให้ผลด้านกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงดีกว่าสูตรปูนตำโบราณ

การนำผลการวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้กับอาชีพช่างปูนปั้นโดยเฉพาะช่างปูนปั้นเพชรบุรีที่ยังคงยึดแบบแผนการผลิตเนื้อปูน การปั้นปูนแบบโบราณอยู่และมักจะประสบกับปัญหาคุณภาพของชิ้นงานปูนปั้นอยู่เสมอ เช่น การแตกร้าว การสึกกร่อนง่าย เป็นต้น การแก้ปัญหาเหล่านี้สิ่งแรกที่ต้องให้ความสำคัญคือ การผลิตเนื้อปูน การใช้ผงซิลิกาบดละเอียดเป็นส่วนผสมเพิ่มในเนื้อปูนนับเป็นอีกช่องทางหนึ่งในการพัฒนาคุณภาพของชิ้นงานปูนปั้นได้ดี

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงแก่ สำนักบริหารโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา สำหรับทุนอุดหนุนในงานวิจัยนี้ และคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี สำหรับเครื่องมือและอุปกรณ์ห้องปฏิบัติการในการวิจัย ไว้ ณ โอกาสนี้

7. เอกสารอ้างอิง

กรมศิลปากร. (2549). **ช่างสิบหมู่**. กรุงเทพฯ: อมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง.

จารุวรรณ ขำเพชร และคณะ. (2549). **งานปูนปั้น.** กรุงเทพฯ: ศูนย์นวัตกรรมการเรียนรู้ตลอดชีวิต มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

ธนากร ภูเงินขำ, วันชัย สะตะ, ธีรวัฒน์ สินศิริ และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2555). การศึกษาคุณสมบัติของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์ที่มีการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, **การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 8**, หน้า 186-192.

ประกาศ ทองประไพ, อมเรศ บกสุวรรณ และประชุม คำพุฒ. (2550). การพัฒนาคุณสมบัติของปูนปั้นจังหวัดเพชรบุรี. **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 5**, วันที่ 10-11 พฤษภาคม 2550.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2555). **ปูนซีเมนต์ ปอซโซลานและคอนกรีต.** กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.

พิจิตร นิ่มงาม. (2550). **การปั้นปูนตำ**, กรุงเทพฯ: กรมศิลปากร.

ศตวรรษ หฤหรรษพงศ์, ทวิช พลูเงิน และสมชาย ชูชีพสกุล. (2554). กำลังอัดและโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์มอร์ต้าร์ผสมนาโนซิลิกา. **วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ. ปีที่ 34, ฉบับที่ 3**, หน้า 231-244.

สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์, ธนากร ภูเงินขำ และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2556). การศึกษาสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์. **วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง. ปีที่ 6, ฉบับที่ 1,** หน้า 60-69.

สุรชัย ทรัพย์เพิ่ม และสมสุข แขมคำ. (2558). ประติมากรรมปูนปั้นกับพัฒนาการ : อดีต – ปัจจบัน ผ่านสกุลช่างเพชรบุรี, **การประชุมวิชาการ HERP CONGRESS III**, วันที่ 9–11 มีนาคม 2558 มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช.

สำเริง รักซ้อน และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2551). กำลังอัดและการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ที่มีส่วนผสมในระบบวัสดุประสานสามชนิด. **วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ. ปีที่ 31, ฉบับที่ 4**, หน้า 859-869.

American Society for Testing and Materials. (2015). **Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 04.01, Philadelphia.

Chindaprasirt, P., Chareerat, T. and Sirivivatnanon, V. (2007). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer, **Cement and Concrete Composites**, vol. 29(3), pp. 224-229.

Cultrone, G., Sebastian, E., and Ortega H.M. (2005). Forced and natural carbonation of lime-based mortars with and without additives: mineralogical and textural changes, **Cement and Concrete Reserch**, vol. 35, pp. 2278–89.

Sanchez, M.S., Luque, L., Canaveras, J.C., Soler, V., Garcia G.J., and Aparicio, A. (2005). Lime pozzolan mortars in Roman catacombs: composition, Structures and Restoration, **Cement and Concrete Reserch**, vol. 35, pp. 1555–65.

Vejmelkova, E., Keppert, M., Rovnanikova, P., Kersner, Z., and Cerny, R. (2012). Application of burnt clay shale as pozzolan addition to lime mortar, **Cement and Concrete Composites**, vol. 34, pp. 486-492.