

สมบัติของคอนกรีตมวลเบาผสมผงยางรถยนต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน*

Properties of lightweight concrete containing crumb rubber and cement replacing with fly ash from coal power plant

ธรรพร บุศย์น้ำเพชร (Tharaporn Budnumpecth)**

นิพนธ์ ตันไพบุลย์กุล (Nipon Tanpaiboonkul)***

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ และการใช้ผงยางรถยนต์แทนที่ทรายสำหรับผลิตคอนกรีตมวลเบา โดยทำการศึกษาที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ : ทราย: ปูนขาว: อลูมิเนียม เท่ากับ 30: 50: 20: 0.1 โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 0 ถึงร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และใช้ผงยางรถยนต์แทนที่ทรายร้อยละ 0 ถึง ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักตามลำดับ ศึกษาอัตราส่วนน้ำต่อตัวประสาน ตั้งแต่ 0.50 ถึง 0.80 เพื่อทดสอบค่ากำลังอัด ค่าความหนาแน่น และค่าการดูดซึมน้ำ ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนปูนซีเมนต์: เถ้าลอย: ทราย: ผงยางรถยนต์: ปูนขาว: ผงอะลูมิเนียมที่เหมาะสมที่สุด คือ 20: 10: 40: 10: 20: 0.1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 บ่มเป็นระยะเวลา 28 วัน มีค่ากำลังอัดสูงสุด เท่ากับ 132.05 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1,536 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 210 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 57-2533 คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักประเภท ทั้ง 3 ประเภท

คำสำคัญ : คอนกรีตมวลเบา / ผงยางรถยนต์ / เถ้าลอย

* เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัย หลักสูตรเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

** อาจารย์ประจำ หลักสูตรเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
(Lecturer, Department of Environment Technology, Faculty of Environment and Resource Studies,
Mahsarakham University)

*** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำ หลักสูตรเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
(Assistant Professor, Department of Environment Technology, Faculty of Environment and Resource
Studies, Mahsarakham University) Corresponding author, E-mail: nipontan2000@yahoo.com

Abstract

This study aimed to investigate the optimal ratios of fly ash and crumb rubber on lightweight concrete production. Initially, weight ratio of cement: sand: lime: aluminum powder was fixed at 30: 50: 20: 0.1, respectively. Then, both Fly ash and crumb rubber were varied from 0-20% wt. and 0-40% wt., respectively, for replacing cement and sand in the cement mixture. Additionally, water/cement ratios (w/c) were also varied from 0.50-0.80 in order to investigate compressive strength, density, and water absorption of the concretes at curing time of 7, 14, and 28 days.

The results showed that the optimum ratio of cement: sand: fly ash: crumb rubber: lime: aluminum powder was 20: 10: 40: 10: 20: 0.1 (w/w) and w/c ratio of 0.55, respectively. For 28 days curing time, the compressive strength, density and water absorption were 132.05 kg/cm^2 , $1,536 \text{ kg/m}^3$ and 210 kg/m^3 , respectively. These properties were on the requirement of TIS 57-1990 standard of hallow load-bearing concrete masonry unit.

Keywords: Lightweight Concrete/Crumb Rubber/Flyash

บทนำ

คอนกรีตมวลเบา (Lightweight Concrete) เป็นผลิตภัณฑ์คอนกรีตที่มีน้ำหนักเบาวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว หินยิปซัม น้ำ สารกระจายฟองอากาศและส่วนผสมพิเศษอื่นๆในอัตราส่วนที่เป็นสูตรเฉพาะตัว ปัจจุบันมีการใช้คอนกรีตมวลเบาในอุตสาหกรรมก่อสร้างกันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะงานก่อสร้างอาคาร บ้านพักอาศัย เนื่องจากคอนกรีตมวลเบามีคุณสมบัติแตกต่างจากคอนกรีตธรรมดา เช่น น้ำหนักต่อก้อนเบา มีความพรุน ด้านทานความร้อน จึงทำให้มีสมบัติน้ำหนักเบา เป็นฉนวนกันความร้อนและกันเสียงด้วย (นิตยรติ ดอเลาะ, 2552) นอกจากนี้การออกแบบการก่อสร้างอาคารโดยใช้คอนกรีตมวลเบาแบบ 2 ชั้นนั้นช่วยให้ใช้พลังงานในการปรับอากาศน้อยกว่า 13.26 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงเวลากลางวัน และน้อยกว่า 9.6 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงเวลากลางคืนด้วย (พันธุ์ดา พุฒิไพโรจน์, 2553) ดังนั้นคอนกรีตมวลเบาจึงสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น ลดขนาดโครงสร้าง ลดอุณหภูมิภายในอาคารหรือใช้ก่อผนังเป็นห้องเก็บเสียง เป็นต้น ในปัจจุบันพบว่ามีหลายงานวิจัยที่มีการนำวัสดุอื่นมาทดแทนวัตถุดิบที่ใช้ผลิตคอนกรีตหรือคอนกรีตมวลเบาบางส่วน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณของเสียเหลือทิ้งหรือเป็นการใช้ทรัพยากรที่มีได้อย่างคุ้มค่า เช่น การใช้ดินตะกอนกระเบื้องหลังคาเซรามิค (สหเทพ ทองคล้าย และกิตติพงษ์ กิมะพงศ์, 2554) การใช้เส้นใยไมโครไฟเบอร์ (บวร อิศรางกูร ณ อยุธยา, ปรีดา จันทวงษ์ และโยธิน อึ้งกุล, 2554), การใช้เส้นใยผักตบชวาบดละเอียดแทนที่ทรายในส่วนผสม (บวร อิศรางกูร ณ อยุธยา, ปรีดา จันทวงษ์ และโยธิน อึ้งกุล, 2555), การใช้กากของเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันปาล์ม เช่น กะลาปาล์ม แก้วจากการใช้กากปาล์มเป็นเชื้อเพลิงเป็นส่วนผสมในงานคอนกรีต (Muhammad A., Payam S., and Mohd Z. J., 2016) การใช้กากของเสียที่เกิดจากกระบวนการ

การกรองน้ำตาลในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลทรายจากอ้อย (Natt M., Gritsada S., 2016) และการใช้เถ้าก้นเตาจากเชื้อเพลิงถ่านหินในโรงไฟฟ้า เป็นต้น (Binyu Z., Chi S., 2015)

นวัตกรรมรถยนต์นั้นเป็นสิ่งที่ทำให้ผู้บริโภคพึงพอใจ เพราะช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายได้ดี เช่น ช่วยประหยัดน้ำมันและการซ่อมบำรุงมีความคุ้มค่าทางการเงินในระยะยาวได้(กิตติวัฒน์ ธงพันธ์ และคณะ, 2557) แต่เมื่ออุปกรณ์มีการชำรุดเสียหายจะต้องมีการซ่อมแซมหรือมีการเปลี่ยนใหม่ เช่น ยางรถยนต์ เป็นต้น ยางที่เสื่อมสภาพจากการใช้งานแล้วถือเป็นของเสียชนิดหนึ่งที่ยากต่อการกำจัดทิ้ง การนำยางไปเผาก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม มลพิษทางอากาศ เช่น สารพิษไดออกซิน (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2553) และการกำจัดขยะต้องทำตามกฎหมาย จากองค์ประกอบของยางรถยนต์เมื่อเสื่อมสภาพแล้วต้องมีการจัดการที่ดีด้วยเพราะทำให้การย่อยสลายหลังจากหมดอายุการใช้งานแล้วนั้นเป็นเรื่องยาก ดังนั้นวิธีการกำจัดที่นำมาใช้ได้แก่ การฝังกลบ การเผาที่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศเกิด ยางผง (Crumb rubber) จัดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากนำเศษยาง ยางล้อเก่า ครีบบาง ยางตกเกรดหรือยางอื่นๆ ที่เป็นของเหลือใช้ผ่านกระบวนการ การผลิตโดยใช้เครื่องบดชนิดต่างๆ เพื่อให้ยางมีขนาดเล็กลงและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายรูปแบบในอุตสาหกรรม เช่น การทำแผ่นยางและบล็อกยางปูพื้น พรมปูพื้น ยางบังโคลน ท่อยาง การนำไปผสมกับยางมะตอยเพื่อปูพื้นถนน(สถาบันพลาสติก, 2557) นอกจากนี้สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นยางรีไซเคิล และเป็นวัสดุผสมในการราดผิวถนนหรือนำมาเป็นส่วนผสมในคอนกรีตได้ (Xiang S., and Baoshan H., 2014), (Imran M. K. and other., 2016) ดังนั้นหากมีวิธีการที่สามารถนำยางเก่าหรือยางเสื่อมสภาพเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์จะช่วยทำให้ลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมได้

เถ้าลอยเป็นของเสียอีกชนิดหนึ่งที่เกิดจากกระบวนการผลิตไฟฟ้าของโรงงานไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตไฟฟ้า มีงานวิจัยหลายงานที่ศึกษาคุณสมบัติของเถ้าลอยทั้งกายภาพและเคมี พบว่าเถ้าลอยมีคุณสมบัติสามารถเป็นวัสดุปอซโซลานได้ (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2514) ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบของซิลิกาและอะลูมินาเป็นส่วนใหญ่ โดยวัสดุปอซโซลานมีความแตกต่างจากซีเมนต์ กล่าวคือวัสดุปอซโซลานสามารถก่อตัวแข็งได้ถ้ามีการเติมปูนขาวลงไปในส่วนผสมร่วมกับน้ำทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (Calcium Aluminate Hydrate, CAH) แต่จะเกิดปฏิกิริยาช้ากว่าการเกิดผลิตภัณฑ์ของซีเมนต์ ดังนั้นการใช้วัสดุปอซโซลานเป็นส่วนผสมร่วมกับซีเมนต์จะช่วยให้ค่ากำลังอัดปลาย (Ultimate strength) สูงขึ้น อีกทั้งช่วยลดช่องว่างภายในก้อนตัวอย่างอีกด้วย (ปิติศานต์ กร้ามาตร, 2553) ตัวอย่างการใช้เถ้าลอยในงานซีเมนต์ คอนกรีตเช่น การใช้เถ้าก้นเตาและเถ้าลอยเป็นส่วนผสมในงานคอนกรีต (Mahdi R. and other, 2016), (Wang Z.S., 2011) นอกจากการใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมในงานซีเมนต์และคอนกรีตแล้วยังมีการนำเถ้าลอยไปใช้ในงานจีโอพอลิเมอร์ด้วยอีกด้วย (สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์, ธนากร ภูจินชา, และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2556), (Xiao Y.Z. and other., 2016), (Navid R. and other., 2014)

ดังนั้นเพื่อเป็นการใช้ประโยชน์จากของเสียอุตสาหกรรม ลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาการนำเถ้าลอยมาใช้เป็นส่วนผสม เพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์และใช้ผงยางรถยนต์ เพื่อลดการใช้ปริมาณมวลรวมละเอียด และศึกษาสมบัติของก้อนตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา ได้แก่ กำลังอัด (Compressive strength) ความหนาแน่น (Density) และการดูดซึมน้ำ (Water absorption) โดยมีปัจจัยที่ศึกษา คือ ปริมาณ

เถาลอยและผงยางรถยนต์ที่เหมาะสมปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน (W/C) ก่อนนำไปเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก มอก 57-2533 ต่อไป

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการศึกษา

การเตรียมวัสดุและทดสอบคุณสมบัติ

เถาลอยนำมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 ขนาดเล็กกว่า 1.68 มิลลิเมตร เพื่อแยกเถาลอยที่จับตัวเป็นก้อนขนาดใหญ่ออก ผงยางรถยนต์นำมาจากบริษัทรีไซเคิลยางเก่า อำเภอนครไชยศรี จังหวัดนครปฐม นำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 8 ขนาดเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร เพื่อคัดขนาดให้มีความใกล้เคียงกับทรายที่ใช้ผสมก่อนนำไปหาค่าความหนาแน่นของทั้งทรายและผงยางรถยนต์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ทรายกลั่นหยาบนำมาร่อนคัดขนาดที่ใหญ่ออกเช่นเดียวกันปูนขาวตราเขาใหญ่

การศึกษาอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถาลอย การแทนที่ทรายด้วยผงยางรถยนต์ และปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตมวลเบาที่เหมาะสม

ตารางที่ 1 คือตารางแสดงส่วนผสมในการศึกษาการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถาลอยร้อยละ 5, 10, 15, และ 20 โดยน้ำหนัก การแทนที่ทรายด้วยผงยางรถยนต์ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 และการใช้อัตราส่วนน้ำต่อตัวประสาน (W/C) หรือปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ซึ่งรวมเถาลอยที่นำมาแทนที่ซีเมนต์ 0.50, 0.55, 0.60, 0.65, 0.70, 0.75 และ 0.80 โดยเบื้องต้นควบคุมปริมาณน้ำในการทดลองที่ 0.75 และผงอลูมิเนียมที่ ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก การผสมวัสดุใช้วิธีมาตรฐาน ASTM C 305-14 แล้วเทลงแบบบล็อกที่เตรียมไว้ เมื่อได้ส่วนผสมแล้ว จึงเทลงแบบหล่อมาตรฐาน 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตร พอส่วนผสมเริ่มแข็งตัว ให้ถอดบล็อกตัวอย่างแล้วนำไปบ่มโดยการห่อโดยการห่อหุ้มพลาสติก โดยในแต่ละปัจจัยที่เลือกใช้ค่ากำลังอัดที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน อัตราส่วนละ 5 ซ้ำ เป็นข้อมูลในการเลือกปัจจัยที่เหมาะสมต่อไป

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมที่มีการแทนที่ด้วยเถาลอย ผงยางรถยนต์และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

ปัจจัย	ซีเมนต์	เถาลอย	ทราย	ผงยางรถยนต์	ปูนขาว	ผงอลูมิเนียม	W/C
เถาลอย (ร้อยละ)	ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ	%	
0	30.0	0.0	50	0	20	0.1	0.75
5	28.5	1.5	50	0	20	0.1	0.75
10	27.0	3.0	50	0	20	0.1	0.75
15	25.5	4.5	50	0	20	0.1	0.75
20	24.0	6.0	50	0	20	0.1	0.75
ผงยางรถยนต์ (ร้อยละ)	ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ	%	W/C
0	27.0	3.0	50	0	20	0.1	0.75
10	27.0	3.0	45	5	20	0.1	0.75
20	27.0	3.0	40	10	20	0.1	0.75

30	27.0	3.0	35	15	20	0.1	0.75
40	27.0	3.0	30	20	20	0.1	0.75
น้ำต่อวัสดุประสาน	ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ	%	W/C
0.50	27.0	3.0	45	5	20	0.1	0.50
0.55	27.0	3.0	45	5	20	0.1	0.55
0.60	27.0	3.0	45	5	20	0.1	0.60
0.65	27.0	3.0	45	5	20	0.1	0.65
0.70	27.0	3.0	45	5	20	0.1	0.70
0.75	27.0	3.0	45	5	20	0.1	0.75
0.80	27.0	3.0	45	5	20	0.1	0.80

* น้ำต่อวัสดุประสาน(W/C) หมายถึงปริมาณน้ำที่ใช้ต่อปริมาณซีเมนต์ซึ่งรวมถึงปริมาณเถ้าลอยที่นำมาแทนที่ด้วย

การทดสอบสมบัติคอนกรีตมวลเบา

การทดสอบค่ากำลังอัดเริ่มจากนำตัวอย่างของคอนกรีตมวลเบาของแต่ละอัตราส่วนที่บ่มได้ตามระยะเวลาที่กำหนด ขนาด 5×5×5 ลูกบาศก์เซนติเมตร อัตราส่วนละ 5 ก้อน ไปทดสอบค่ากำลังอัดโดยใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine) ขนาด 300 กิโลนิวตัน Model KD-30 ระบบไฮดรอลิก บริษัท K.THAITHAMRONG ENGINEERING Limited Partnership. วางก้อนตัวอย่างให้ตรงจุดกึ่งกลางแป้นทดสอบ และเลื่อนแป้นให้ติดกับผิวตัวอย่าง ให้น้ำหนักกดด้วยอัตราคงที่ 0.14-0.34 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตรต่อวินาที (มอก 409-2525) บันทึกค่าแรงอัดสูงสุดที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบก่อนนำไปคำนวณค่ากำลังอัดจากสมการ

$$\text{กำลังอัด (Fc)} = P/A \quad (1)$$

เมื่อ Fc คือ กำลังอัด (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)

P คือ น้ำหนักกดสูงสุดต่อก้อนตัวอย่าง (กิโลกรัม)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่าง (ตารางเซนติเมตร)

การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ ทดสอบโดยการเปรียบเทียบน้ำหนักของก้อนตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาก่อนและหลังการแช่ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน มอก. 109-2517 และคำนวณร้อยละการดูดซึมน้ำจากความสัมพันธ์

$$\text{การดูดซึมน้ำ (A-B)} = \frac{A-B}{A} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักก้อนตัวอย่างเมื่อเปียก (กิโลกรัม)

B คือ น้ำหนักก้อนเมื่อแห้ง (กิโลกรัม)

C คือ น้ำหนักของก้อนเมื่อเปียก (กิโลกรัม)

การทดสอบความหนาแน่น เป็นการวัดมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรความหนาแน่นเฉลี่ย (Average Density) หาได้จากผลหารระหว่างมวลรวมกับปริมาตรรวม ดังสมการ

$$\text{ความหนาแน่น}(\rho) = M/V \quad (3)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของวัตถุ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

M คือ มวลรวมของวัตถุ (กิโลกรัม)

V คือ ปริมาตรรวมของวัตถุ (ลูกบาศก์เมตร)

ผลการศึกษา

คุณสมบัติเบื้องต้นของทรายและผงยางรถยนต์

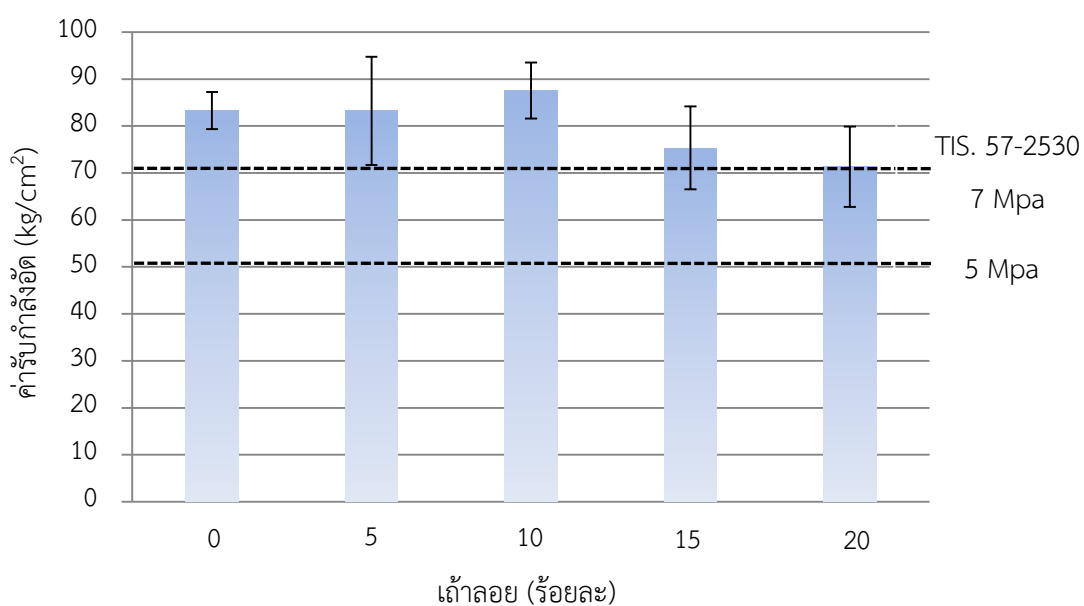
คุณสมบัติเบื้องต้นของทรายและผงยางรถยนต์พบว่ามีความหนาแน่นเท่ากับ 1,523 และ 370 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ซึ่งค่าความหนาแน่นของยางรถยนต์มีค่าน้อยกว่าถึง 4 เท่าโดยประมาณ โดยองค์ประกอบของยางรถยนต์ที่สำคัญได้แก่ ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ ซึ่งมีองค์ประกอบเป็นสารไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนแบล็ก และอื่นๆ (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2553) ทำให้ยางมีน้ำหนักเบากว่าทราย ส่วนเกล็ดลอยมีลักษณะละเอียดคล้ายแป้งมีสีน้ำตาลและมีความฉ่ำเฉพาะเท่ากับ 2.3

อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเกล็ดลอยต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา

จากการศึกษาอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเกล็ดลอยร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.75 บ่มเป็นระยะเวลา 7 วัน ก่อนทดสอบค่ากำลังอัด ได้ผลแสดงใน รูปที่ 1 จากรูปสังเกตได้ว่าเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเกล็ดลอยในปริมาณที่มากขึ้นจะส่งผลทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตบล็อกมวลเบามีแนวโน้มลดน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเกล็ดลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจึงเกิดน้อย ในขณะที่ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดระหว่างองค์ประกอบซิลิกาและอลูมินาที่มีอยู่ในเกล็ดลอยกับปูนขาวและน้ำที่ให้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate) เช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชัน ต้องใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาซ้ากว่า ทำให้ค่ากำลังอัดของก้อนตัวอย่างเมื่อมีการแทนที่ด้วยเกล็ดลอยมีค่าลดลงที่อายุบ่มเดียวกันในช่วงแรก อย่างไรก็ตามถ้าอายุบ่มมากขึ้น การพัฒนากำลังอัดจะมีค่ามากขึ้นตามลำดับ เนื่องจากเกิดผลิตภัณฑ์ที่มาจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เพิ่มขึ้น (ปิติศานต์ กร้ามาตร, 2553), (ชลล พิงธรรมจิตต์, 2549) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่ผสมเกล็ดลอยจะมีการพัฒนากำลังในช่วงอายุต้นที่ช้าแต่ภายหลังจาก 28 วันไปแล้วจะมีกำลังสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเกล็ดลอย เพราะปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดเร็วกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้เนื้อเพสต์ที่ไม่ผสมสารปอซโซลานไม่แน่นเท่าปูนซีเมนต์ล้วนแต่หลังจาก 28 วันขึ้นไปปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นมากขึ้นทำให้เพสต์มีเนื้อแน่นขึ้นปริมาณโพรงของเพสต์จึงลดลง(ปริญญญา จินดาประเสริฐ และวันชัย สะตะ, 2557) เช่นเดียวกับการศึกษาของ บุรฉัตร ฉัตรวิระ และ วินัย หอมศรีประเสริฐ (2554) ได้ศึกษาระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์และพบว่าระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ที่แทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลาน (เกล็ดลอย) ในปริมาณร้อยละที่มากขึ้น ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นเพราะองค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในปูนซีเมนต์ลดลงส่งผลทำ

ให้ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate) หรือเอไลต์ลดลงซึ่งปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกตมีผลโดยตรงต่อกำลังอัดในระยะเริ่มแรกถึง 7 วัน

จากการทดลองเมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 จะให้ค่ากำลังอัดสูงสุดที่ 87.00 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังอัดทุกอัตราส่วนกับค่ามาตรฐานคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักประเภท ก ข และ ค (มอก. 57-2533) พบว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 57-2533 ประเภท ค. ที่กำหนดไว้ไม่ต่ำกว่า 5 MPa ส่วนประเภท ก และ ข มีอัตราส่วนแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 20 ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดค่ากำลังอัดไว้ต้องไม่ต่ำกว่า 7 MPa หรือ 71.38 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ผู้วิจัยจึงเลือกอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ร้อยละ 10 ในการทดลองขั้นต่อไป



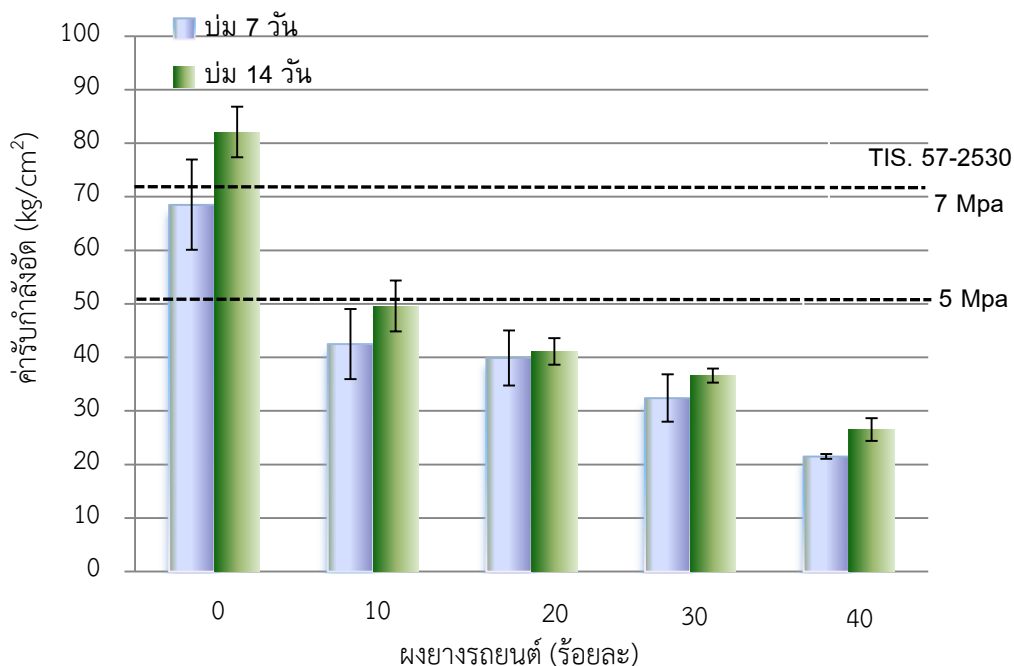
รูปที่ 1 ค่ารับกำลังอัดของก้อนตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยปริมาณแตกต่างกัน

อัตราส่วนการใช้ผงยางรถยนต์แทนทรายสำหรับการผลิตบล็อกมวลเบา

ผลการศึกษาการใช้ผงยางรถยนต์ในการแทนที่ทรายสำหรับผลิตคอนกรีตมวลเบา ซึ่งจะใช้ผงยางรถยนต์ในการแทนที่ทรายร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก และมีการใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 อายุบ่ม 7 และ 14 วันแสดงในรูปที่ 2 เมื่อมีการแทนที่ทรายด้วยผงยางรถยนต์ในปริมาณที่สูงขึ้น จะส่งผลทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดน้อยลงตามปริมาณของผงยางรถยนต์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากผงยางรถยนต์มีความยืดหยุ่นมากกว่าทรายจึงทำให้ค่ากำลังอัดต่ำลงและลักษณะเฉพาะของอนุภาคของผงยางรถยนต์มีลักษณะเหนียวและยืดหยุ่นเมื่อนำไปแทนที่ทรายทำให้ค่ากำลังแรงอัดลดลงตามปริมาณของผงยางรถยนต์ที่เพิ่มขึ้น (สมยศ วิวัฒน์พัฒน์พงศ์, 2548) และจากการศึกษาการใช้ผงยางรถยนต์เก่าในคอนกรีตบล็อกปูผิวทางแบบอ่อนของ S. Piti และ C. Chalernpol (2005) และ เฉลิมพล ไชยแก้ว, ปิติ สุนทรสุขกุล และสุพรชัย อุทัยนฤมล (2546) พบว่าเมื่อผสมอัตราส่วนที่มีผงยางรถยนต์ผสมมากขึ้น ทำให้ก้อนตัวอย่างมีค่ากำลังอัดน้อยลง

โดยสามารถใช้ผงยางรถยนต์ได้ร้อยละ 10 ถึง 20 โดยน้ำหนัก ในก้อนตัวอย่างคอนกรีตมีค่ากำลังอัดระหว่าง 5-23 MPa ที่อายุบ่ม 28 วัน แต่ขณะเดียวกันคอนกรีตที่ได้ก็มีความยืดหยุ่นสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา ซึ่งเป็นข้อดีของคอนกรีตที่ผสมผงยางรถยนต์ เนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ S. Piti และ W. Somyot (2552) พบว่าการใช้ผงยางรถยนต์ละเอียดเป็นส่วนผสมในคอนกรีตมวลเบาทำให้อ่อนตัวอย่างมีอนุภาคยางเข้าไปแทรกตามช่องว่างได้ดีขึ้นส่งผลให้มีความเป็นฉนวนกันความร้อนและกันเสียงได้ดีขึ้นด้วย

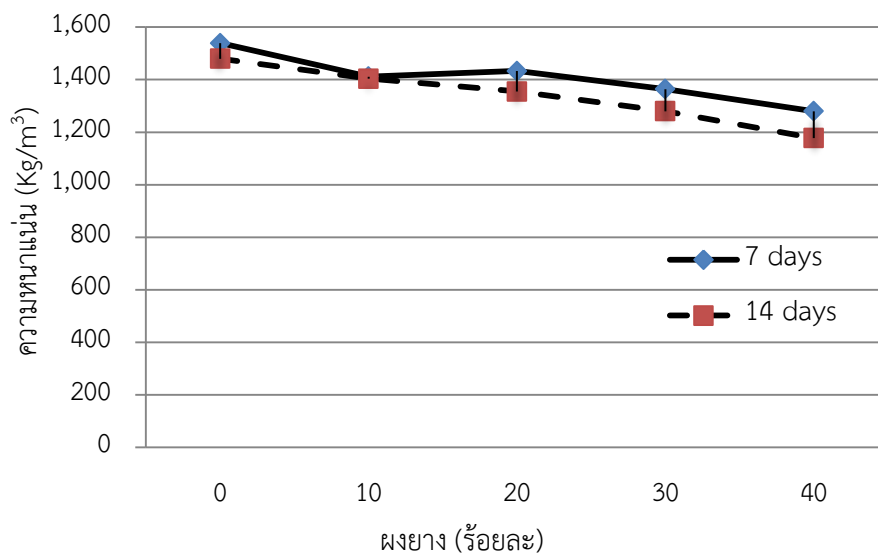
จากรูปที่ 2 พบว่าชุดการทดลองที่มีการแทนที่ทรายด้วยผงยางรถยนต์ที่ร้อยละ 10 จะมีค่ากำลังแรงอัดสูงที่สุดเมื่อเทียบกับชุดการทดลองอื่นๆที่มีการแทนที่ทรายด้วยผงยางรถยนต์ โดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 49.6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน และเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักประเภท ก ข และ ค พบว่า ทุกชุดการทดลองที่มีการแทนที่ทรายด้วยผงยางรถยนต์ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ค่ากำลังอัด ต้องไม่ต่ำกว่า 7 MPa หรือ 71 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แต่มีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก ประเภท ค ที่ได้กำหนดค่ากำลังอัดไว้ต้องไม่ต่ำกว่า 5 Mpa หรือ 51.38 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในอัตราส่วนการแทนที่ทรายด้วยผงยางรถยนต์ที่ร้อยละ 10



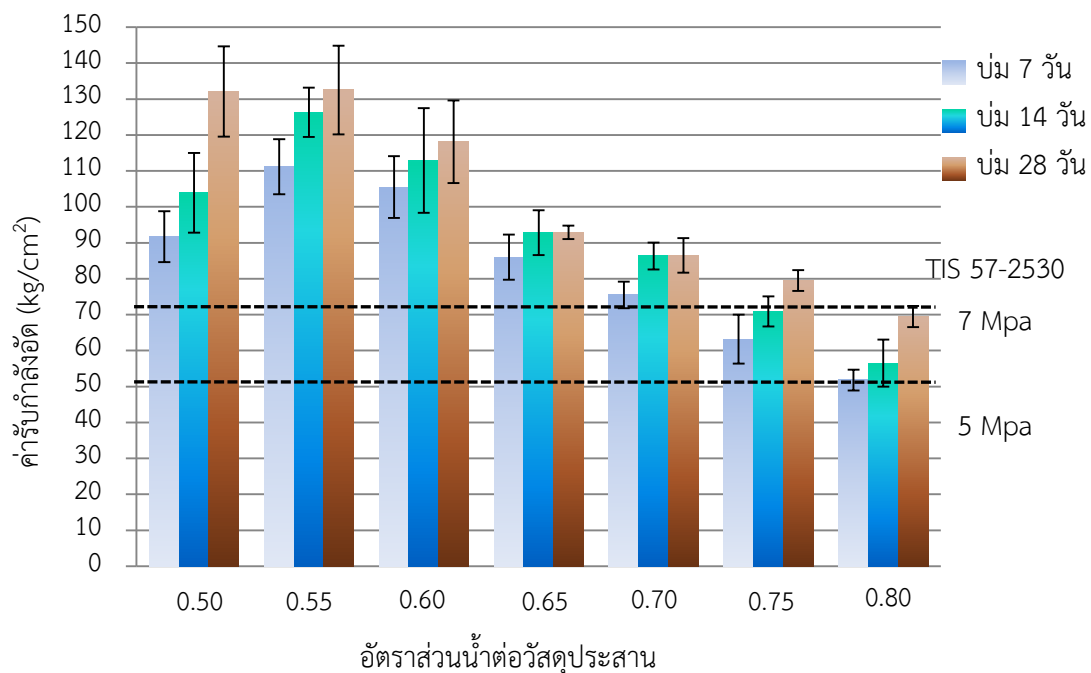
รูปที่ 2 ค่ารับกำลังอัดของก้อนตัวอย่างที่มีการแทนที่ทรายด้วยผงยางรถยนต์ปริมาณแตกต่างกัน

รูปที่ 3 แสดงค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างที่อายุบ่ม 7 และ 14 วัน พบว่าเมื่อมีการใช้ผงยางรถยนต์ในการแทนที่ทรายเพิ่มมากขึ้น ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบามีค่าลดลง ทั้งนี้จากผลการศึกษาสมบัติเบื้องต้นพบว่าค่าความหนาแน่นของผงยางรถยนต์มีค่าน้อยกว่าทรายถึง 4.11 เท่า ผงยางรถยนต์มีส่วนช่วยให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลงซึ่งเป็นผลจากขนาดของยางที่มีลักษณะเป็นอนุภาคขนาดเล็กและเบากว่าทราย (เฉลิมพล ไชยแก้ว, ปิติ สุคนธสุขกุล และสุพรชัย อุทัยนฤมล, 2546) ก้อนตัวอย่างที่มีผงยางรถยนต์แทนที่

ทรายร้อยละ 10 อายุบ่ม 7 และ 14 วัน มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1,412 และ 1404 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าก้อนตัวอย่างที่ไม่แทนที่ด้วยผงยางรถยนต์ ร้อยละ 8.25 และ 5.13 ตามลำดับ ค่าความหนาแน่นนี้ไม่ได้ถูกกำหนดไว้ในมาตรฐาน มอก 57-2533 ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากค่ากำลังอัดจึงเลือกการใช้ผงยางรถยนต์แทนที่ทรายร้อยละ 10 ไปใช้ในการทดสอบขึ้นต่อไป



รูปที่ 3 ค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างที่มีการแทนที่ทรายด้วยผงยางรถยนต์ปริมาณแตกต่างกัน



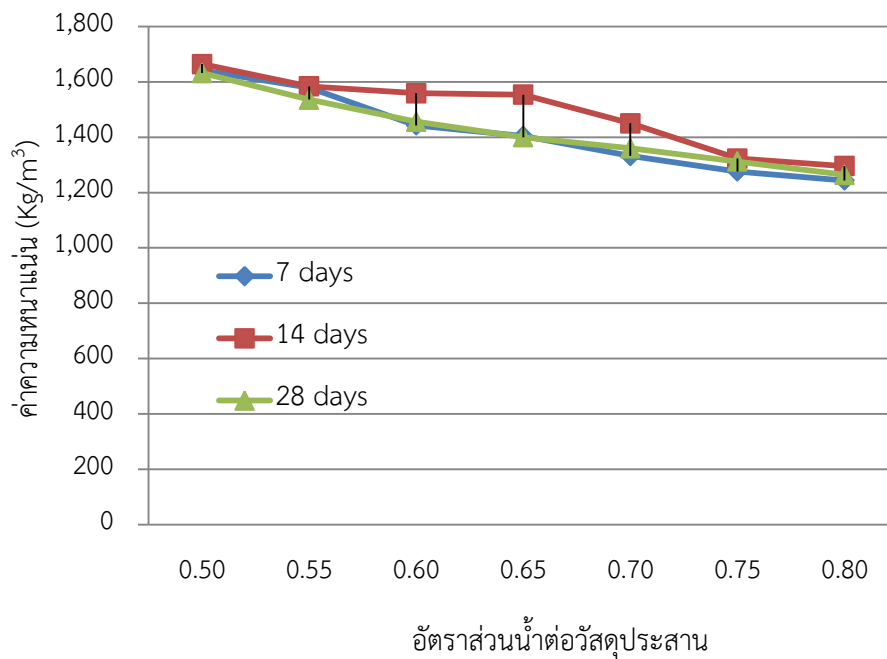
รูปที่ 4 ค่ารับกำลังอัดของก้อนตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแตกต่างกัน

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน(W/C) สำหรับการผลิตคอนกรีตมวลเบา

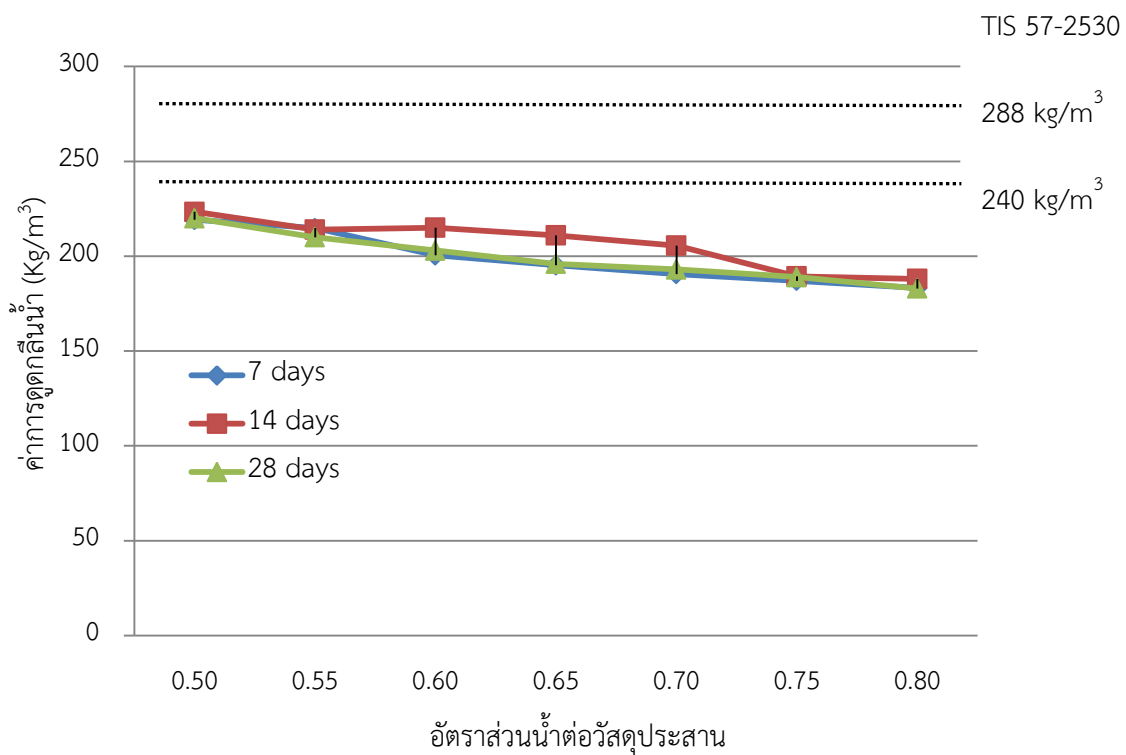
ผลการศึกษาค่ากำลังอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา ที่อายุบ่ม 7 14 และ 28 วัน โดยใช้ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 10 และปริมาณผงยางรถยนต์ร้อยละ 10 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานหรือปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ซึ่งรวมถึงปริมาณเถ้าลอยที่นำมาแทนที่ซีเมนต์ (W/C) 0.50, 0.55, 0.60, 0.65, 0.70, 0.75 และ 0.80 โดยน้ำหนัก นำมาขึ้นรูปตัวอย่าง แสดงในรูปที่ 4 จากการศึกษาพบว่าก้อนตัวอย่างที่มีการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 มีค่ารับกำลังอัดสูงที่สุดที่ 111.2, 126.3 และ 132.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับสูงกว่าการใช้ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานปริมาณอื่นและผ่านเกณฑ์มาตรฐานชั้นคุณภาพทั้ง ก ข และ ค การใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้นส่งผลให้ค่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ปริมาณน้ำมากเกินไปทำให้ตัวอย่างที่ผสมเหลวเกินไปเกิดการเยิ้มของน้ำ (Excessive Bleeding) ซึ่งมีสาเหตุจากส่วนที่เป็นของแข็งค่อยๆทรุดตัวผ่านน้ำทำให้ผิวของตัวอย่างเปื่อยขึ้นและเยิ้มออกมาได้ นอกจากนี้ น้ำส่วนเกินจากการทำปฏิกิริยาจะแทรกตัวในโครงสร้างคอนกรีตส่งผลทำให้เกิดการแยกตัว (Segregation) ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์กับวัสดุผสมลดลงส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลงด้วย (บุรฉัตร ฉัตรวีระ, ม.ป.ป)

รูปที่ 5 แสดงค่าความหนาแน่นของตัวอย่าง พบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ก้อนตัวอย่างมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ย เท่ากับ 1,579 1,536 และ 1,584 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ เมื่อมีการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เหตุผลเช่นเดียวกับค่ากำลังอัดเนื่องจากปริมาณน้ำที่มากขึ้นทำให้โมเลกุลของน้ำส่วนเกินแทรกอยู่ตามโครงสร้างของคอนกรีตเมื่อบ่มเป็นระยะเวลานานขึ้นทำให้ก้อนตัวอย่างมีความหนาแน่นลดลง (บุรฉัตร ฉัตรวีระ, ม.ป.ป)

รูปที่ 6 แสดงค่าการดูดซึมน้ำของก้อนตัวอย่าง เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 และใช้ผงยางรถยนต์แทนที่ทรายร้อยละ 10 สำหรับการทำคอนกรีตมวลเบาโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5, 0.55, 0.60, 0.65, 0.70, 0.75 และ 0.80 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่าเมื่อมีการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงขึ้นค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตค่อนข้างสูงโดยมีค่าไม่เกินค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ของเกณฑ์มาตรฐาน มอก 57-2533 ที่กำหนดไว้ไม่เกิน 288 และ 240 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักประเภท ก และ ข ตามลำดับ ที่ทุกอายุบ่ม และมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน(W/C) ซึ่งสามารถนำไปใช้งานไม่รับน้ำหนักได้ จากการศึกษาของ เฉลิมพล ไชยแก้ว, ปิติ สุคนธ์สุขกุล และสุพรชัย อุทัยนฤมล (2546) พบว่า ความต้องการน้ำของคอนกรีตผสมผงยางรถยนต์เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนผงยาง เนื่องจากผงยางรถยนต์มีอนุภาคเล็กมีรูปร่างที่แตกต่างกับวัสดุผสมและมีพื้นที่ผิวสูง ดังนั้นเพื่อให้ได้ความชื้นเหลวหรือความสามารถในการเทได้ใกล้เคียงกับชุดควบคุมจึงต้องใช้ปริมาณน้ำมากกว่า จากผลการศึกษาก้อนตัวอย่างที่มีการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วง 183-223 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 5 ค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแตกต่างกัน



รูปที่ 6 ค่าการดูดซึมน้ำของก้อนตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแตกต่างกัน

สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาการใช้เถ้าลอยเพื่อใช้ในการแทนที่ซีเมนต์และการนำเศษยางรถยนต์เพื่อใช้ในการแทนที่ทราย สำหรับผลิตคอนกรีตมวลเบาสามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อนำไปทำคอนกรีตมวลเบาคือการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ใช้ผงยางรถยนต์แทนที่ทรายร้อยละ 10 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 บ่มตัวอย่างอายุ 7, 14 และ 28 วันมีค่ากำลังอัด 111.2, 126.3 และ 132.5 กก./ซม² ความหนาแน่น 1,579, 1,584 และ 1,536 กก./ม³ และการดูดกลืนน้ำ 214.8, 214.0 และ 210 กก./ม³ ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก 57-2533 ทั้ง 3 ประเภท ที่กำหนดไว้สำหรับค่ากำลังอัดและการดูดซึมน้ำตั้งแต่อายุบ่มที่ 7 วันแรก

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคามที่สนับสนุนทุนการวิจัยและขอขอบคุณบุคคลที่เกี่ยวข้องที่ให้ความร่วมมือในการวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

ภาษาไทย

กิติวัฒน์ ธิพัฒน์ และคณะ. (2557). “การตระหนักรู้ถึงนวัตกรรมรถยนต์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมของผู้บริโภค

จังหวัดนครปฐม.” วารสารวิชาการ Veridian E-Journal Silpakorn University,

มนุษยศาสตร์สังคมศาสตร์ 7, 1 (มกราคม-เมษายน): 91-99.

เฉลิมพล ไชยแก้ว, ปิติ สุคนธ์สุขกุล และสุพรชัย อุทัยนฤมล. (2546). การศึกษาการใช้ผงกากยางรถยนต์เก่า

ในคอนกรีตบล็อกปูผิวทางแบบอ่อน. เข้าถึงเมื่อ 5 มิถุนายน 2559. เข้าถึงได้จาก

http://kmcenter.rid.go.th/kcresearch/article_out/article_003%20OUT_T.pdf

ชลล พึ่งธรรมจิตต์. (2549). “ผลกระทบของการแทนที่เถ้าลอยในซีเมนต์ที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีต

มวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

นิตยรัตน์ ดอเลาะ. (2552). “วัสดุมวลเบาที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้าง.” Princess Naradhiwas

University Journal 1, 3 (กันยายน-ธันวาคม): 48-62.

บวร อิศรางกูร ณ อยุธยา, ปรีดา จันทวงษ์ และโยธิน อึ้งกุล. (2554). “การศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต

มวลเบาอบไอน้ำผสมเส้นใยไมโครไฟเบอร์.” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 21, 2

(พฤษภาคม-สิงหาคม): 266-271.

บวร อิศรางกูร ณ อยุธยา, ปรีดา จันทวงษ์ และโยธิน อึ้งกุล. (2555). “การศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต

มวลเบาอบไอน้ำผสมเส้นใยของผักตบชวา.” วิศวกรรมลาดกระบัง 29, 1 (มีนาคม): 44-48.

บุรฉัตร ฉัตรวีระ. (ม.ป.ป.). คอนกรีตเทคโนโลยี. ปทุมธานี. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

- บุรฉัตร ฉัตรวีร์ และ วินัย หอมศรีประเสริฐ. (2554). “พฤติกรรมของซีเมนต์เพสต์ผสมวัสดุปอซโซลานในการประยุกต์ใช้กับพลังงานไมโครเวฟ.” วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี 34, 3 (กรกฎาคม-กันยายน): 299-315.
- ปิติศานต์ กร้ามาตร. (2553). “คุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน.” รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีธัญบุรี.
- ปริญญญา จินดาประเสริฐ และวันชัย สะตะ. (2557). วัสดุผสมปูนซีเมนต์และจีโอโพลิเมอร์. ขอนแก่น: ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- พันธุ์ดา พุฒิไพโรจน์. (2553). “การศึกษาเปรียบเทียบการใช้พลังงานในการปรับอากาศระหว่างผนังคอนกรีตมวลเบาชั้นเดียวและสองชั้น.” วารสาร Veridian EJournal, Silpakorn University 3, 1 (กรกฎาคม): 36-47.
- สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์, ธนากร ภูเงินชา และปริญญญา จินดาประเสริฐ. (2556). “การศึกษาสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.” วารสารวิชาการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง 6, 1 (มกราคม): 60-69.
- สถาบันพลาสติก. (2557). ยางผง. เข้าถึงเมื่อ 1 เมษายน 2559. เข้าถึงได้จาก <http://rubber.oie.go.th/ELibrary.aspx?cid=75>
- สมยศ วิวัฒน์พัฒนพงศ์. (2548). “คอนกรีตมวลเบापานกลางผสมเมล็ดยาง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- สหเทพ ทองคล้าย และกิตติพงษ์ กิมะพงศ์. (2554). “คอนกรีตมวลเบาจากกากดินตะกอนกระเบื้องหลังคาเซรามิก.” ใน การประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 8 นครปฐม.
- สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. (2553). ยางรถยนต์: ส่วนประกอบและอันตรายจากสารเคมี. เข้าถึงเมื่อ 1 เมษายน 2559. เข้าถึงได้จาก <http://www.nstda.or.th/sci-kids-menu/1636-tyre>
- อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์. (2014). “ศักยภาพของเถ้าในการเป็นสารปอซโซลาน.” วารสารคอนกรีต, no. 23 (ธันวาคม): 1-9.

ภาษาต่างประเทศ

- Binyu Zhang and Chi Sun Poon. (2015). “Use of Furnace Bottom Ash for producing lightweight aggregate concrete with thermal insulation properties.” **Journal of Cleaner Production**, no. 99 (July): 94-100.
- Imran M. Khan, Shahid Kabir, Majed A. Alhussain and Feras F. Almansoor (2016). “Asphalt Design using Recycled Plastic and Crumb-rubber Waste for Sustainable Pavement Construction.” **Procedia Engineering** 145: 1557–1564.

- Mahdi Rafieizonooz, Jahangir Mirza, Mohd Razman Salim, Mohd Warid Hussin and Elnaz Khankhaje. (2016). "Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement for sand and cement." **Construction and Building Materials** 116 (July): 15–24.
- Muhammad Aslam, Payam Shafigh and Mohd Zamin Jumaat. (2016). "Oil-palm by-products as lightweight aggregate in concrete mixture: a review." **Journal of Cleaner Production** 126 (July): 56-73
- Natt Makul and Gritsada Sua-iam. (2016). "Characteristics and utilization of sugarcane filter cake waste in the production of lightweight foamed concrete". **Journal of Cleaner Production** 126 (July): 118-133
- Navid Ranjbar, Mehdi Mehrali, Arash Behnia, U. Johnson Alengaram and Mohd Zamin Jumaat. (2014). "Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar." **Materials and Design** 59 (July) : 532–539.
- Piti Sukontasukkul and Chalermphol Chaikaew. (2005). "Concrete Pedestrian Block Containing Crumb Rubber from Recycled Tires." **Thammasat J. Sc.Tech.**10,2(April-June): 1-8.
- Piti Sukontasukkul and Somyot Wiwatpattanapong. (2009). "Lightweight Concrete Mixed with Superfine Crumb Rubber Powder Part 1: Insulation Properties." **The Journal of KMUTNB**. 19, 3 (September-December): 297-305.
- Wang Zhen-shuanga. (2011). "Influence of fly ash on the mechanical properties of frame Concrete." **Sustainable Cities and Society** 1,3 (October): 164–169.
- Xiang Shu and Baoshan Huang. (2014). "Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview." **Construction and Building Materials** 67 (September): 217–224.
- Xiao Yu Zhuang , Liang Chen, Sridhar Komarneni , Chun Hui Zhou, Dong Shen Tong, Hui Min Yang, Wei Hua Yu and Hao Wang. (2016). "Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications." **Journal of Cleaner Production** 125 (July): 253-267.