

สมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค การนำความร้อนและการหดตัวแห้ง ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าขานอ้อย

วันโชค เครือหงษ์* และ อภิวิชญ์ พูลสง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค การนำความร้อนและการหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าขานอ้อย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าขานอ้อยร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 ทำการทดสอบระยะเวลาการก่อตัว การดูดซึมน้ำ หน่วยน้ำหนัก กำลังอัด การวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคทางความร้อน ความพรุน การทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การหดตัวแห้งและการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าขานอ้อยร้อยละ 20 ให้กำลังอัดสูงสุด ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าขานอ้อยร้อยละ 10-30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานที่อายุ 28 วันสูงกว่าค่าที่ทางมอก. 2601-2556 กำหนด ปริมาณการแทนที่ของเถ้าขานอ้อยที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าขานอ้อยมีค่าลดลงและการดูดซึมน้ำมีค่าสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสควบคุม การลดลงของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ส่งผลให้ปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) แคลเซียมอลูมินาซิลิเกตไฮดรต (C_2ASH_8) และแคลเซียมอลูมินาไฮดรต (C_4AH_{13}) มีปริมาณเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังอัด ความพรุนและปริมาณโพรงคาปิลารีขนาดใหญ่ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าขานอ้อยมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นของเถ้าขานอ้อย การใช้เถ้าขานอ้อยช่วยการลดการหดตัวแห้งและการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

คำสำคัญ : คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส, เถ้าขานอ้อย, สมบัติทางกล, โครงสร้างจุลภาค, การนำความร้อน

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์, วิทยาเขตอุเทนถวาย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

* ผู้ติดต่อ, อีเมล: wunchock_k@hotmail.com รับเมื่อ 5 ตุลาคม 2559 ตอบรับเมื่อ 19 เมษายน 2560

Mechanical Properties, Microstructure, Thermal Conductivity and Drying Shrinkage of Cellular Lightweight Concrete Containing Bagasse Ash

Wunchock Kroehong* and Apivich Poolsong

Abstract

This paper aimed to study the mechanical properties, microstructure, thermal conductivity and drying shrinkage of cellular lightweight concrete containing bagasse ash. Portland cement type I was replaced by bagasse ash at 10% 20% and 30% by weight of binder. A water to binder ratio of 0.60 was used. The setting time, water absorption, unit weight, compressive strength, thermogravimetric analysis, porosity, scanning electron microscopy, drying shrinkage and thermal conductivity of cellular lightweight concrete were investigated. The results showed that the cellular lightweight concrete containing 20% of bagasse ash had the highest compressive strength. The compressive strength of cellular lightweight concretes containing bagasse ash 10-30% by weight of binder at 28 days were higher than that of lightweight concrete block specified by the Thai Industrial Standard 2601-2013. The increasing replacements of bagasse ash reduce unit weight of cellular lightweight concretes and water absorption was higher than that of control cellular lightweight concretes. The reduction of Ca(OH)_2 content produced increased C-S-H, $\text{C}_2\text{A-S-H}_8$, and $\text{C}_4\text{A-H}_{13}$, which resulted in an increase the compressive strength. The porosity and large capillary pore of cellular lightweight concretes increased with the increased of bagasse ash content. The use of bagasse ash reduces drying shrinkage and thermal conductivity of cellular lightweight concretes.

Keywords: Cellular lightweight concrete, Bagasse ash, Mechanical properties, Microstructure, Thermal conductivity

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Uthenthawai Campus,

Rajamangala University of Technology Tawan-ok

* Corresponding author, E-mail: wunchock_k@hotmail.com Received 19 October 2016, Accepted 19 April 2017

1. บทนำ

คอนกรีตมวลเบาคือคอนกรีตที่หน่วยน้ำหนักต่ำกว่า 1,840 กก/ม³ [1] สำหรับในประเทศไทย มาตรฐาน มอก. 2601-2556 หน่วยน้ำหนักต้องต่ำกว่า 1,600 กก/ม³ [2] ปัจจุบันถูกใช้แพร่หลายในการก่อสร้าง เพราะทำให้โครงสร้างมีน้ำหนักเบา การนำความร้อนต่ำและทนไฟ [3] คอนกรีตมวลเบาแบ่งออกเป็น 3 ประเภทตามวิธีการผลิต คือประเภทแรก คอนกรีตที่ใช้มวลรวมน้ำหนักเบา มีความถ่วงจำเพาะต่ำ ประเภทที่สอง คอนกรีตที่ไม่ใช้มวลรวมละเอียด และประเภทที่สาม คอนกรีตที่ทำให้เกิดช่องว่างในเพสต์ หรือมอร์ตาร์ โดยที่คอนกรีตประเภทนี้นิยมใช้เป็นผนังก่ออิฐ ซึ่งมักเรียกว่าคอนกรีตอัดอากาศหรือเซลลูล่าคอนกรีต ในประเทศไทยมีการใช้คอนกรีตมวลเบาอย่างแพร่หลายจึงได้กำหนดมาตรฐานเป็น 2 ระบบ มาตรฐานแรก คือมาตรฐาน มอก. 1505-2541 คอนกรีตมวลเบาแบบฟองอากาศอบไอน้ำ [4] การผลิตในระบบนี้กระบวนการผลิตชิ้นส่วนจะต้องอบไอน้ำซึ่งทำให้มีการลงทุนค่อนข้างสูงผู้ประกอบการเป็นบริษัทขนาดใหญ่ มาตรฐานที่สอง คือ มาตรฐาน มอก. 2601-2556 คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ [2] หรือบ้างก็เรียกว่า คอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า โดยคอนกรีตมวลเบาสามารถแบ่งตามความหนาแน่นแห้ง เช่น ความหนาแน่นแห้งระหว่าง 900-1,200 กก/ม³ กำหนดกำลังอัดและการดูดซึมน้ำต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 2.5 เมกะปาสคาล และร้อยละ 25 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการผลิตในระบบนี้ผู้ประกอบการขนาดเล็กสามารถลงทุนได้เนื่องจากการลงทุนในระบบการผลิตไม่สูงมาก

คอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า (Cellular lightweight concrete) เป็นคอนกรีตที่มีส่วนผสมของโฟมเหลวผสม

เข้ากับทรายปูนซีเมนต์และน้ำ [5-6] มีนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาสมบัติของโฟมคอนกรีตเช่น Nambiar and Ramamurthy [7] ศึกษาปริมาณโฟมของคอนกรีตมวลเบาและพบว่าหน่วยน้ำหนักมีค่าลดลงด้วยการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโฟม นอกจากนี้คอนกรีตผสมโฟมร้อยละ 0.40-0.50 โดยปริมาตรมีหน่วยน้ำหนักประมาณ 840-1,132 กก/ม³ หลังจากนั้น Chatveera et al. [8] ศึกษาสมบัติทางกลของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าผสมหินฝุ่นแอนดีไซต์มีค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness modulus, FM) เท่ากับ 2.0 2.5 และ 3.0 และพบว่าคอนกรีตมวลเบาที่ผสมหินฝุ่นแอนดีไซต์ซึ่งมีโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.0 มีการพัฒนากำลังอัดสูงที่สุด นอกจากนี้ Jitchaiyaphum et al. [9] ศึกษาคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าผสมเถ้าลอยและซีโอไลท์ธรรมชาติ โดยแทนที่เถ้าลอยและซีโอไลท์ธรรมชาติในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าผสมเถ้าลอยและซีโอไลท์ธรรมชาติร้อยละ 10-30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานมีค่ากำลังอัดประมาณ 2.42-3.45 และ 2.05-4.27 เมกะปาสคาลตามลำดับ นอกจากนี้การแทนที่เถ้าลอยและซีโอไลท์ธรรมชาติส่งผลให้ปริมาณโพรงคาพิลลารีขนาดใหญ่ (Large capillary pore) เพิ่มขึ้นตามการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น

การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา Narattha et al. [10] ศึกษาคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานและพบว่าค่าการนำความร้อนต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาควบคุม นอกจากนี้ Jones and McCarthy [11] ศึกษาผลของหน่วยน้ำหนักต่อการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาพบว่า การนำความร้อน

ร้อนของคอนกรีตมวลเบา มีค่าเท่ากับ 0.23 และ 0.42 วัตต์ต่อเมตร-เคลวินสำหรับหน่วยน้ำหนัก 1,000 และ 1,200 กก/ม³ ตามลำดับ หลังจากนั้น Wang et al. [12] ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของโพรง และการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาและพบว่า เมื่อความพรุนของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้นจะทำให้การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา มีค่าลดลง

ประเทศไทยมีผลผลิตอ้อยในปี 2547 ประมาณ 65 ล้านตันต่อปีและเพิ่มขึ้นประมาณ 100.10 ล้านตันต่อปีในปี 2556 และปริมาณการผลิตเป็นอันดับสี่ของโลก [13] ปัจจุบันกากอ้อยถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากการเผากากอ้อยทำให้เหลือเถ้าชานอ้อยประมาณร้อยละ 2 ของกากอ้อยหรือประมาณ 400,000 ตันต่อปีและมีแนวโน้มการผลิตน้ำตาลและเอทานอลเพิ่มขึ้นทุกปี การใช้ประโยชน์จากเถ้าชานอ้อยยังค่อนข้างน้อย [14] นักวิจัยได้พยายามศึกษาการใช้ประโยชน์จากเถ้าชานอ้อยพบว่าเถ้าชานอ้อย มีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ ซิลิกาไดออกไซด์ (SiO₂) และอลูมินาไดออกไซด์ (Al₂O₃) อยู่ในรูปไม่บริสุทธิ์และสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในคอนกรีต [15-17] และจากการศึกษาของ Chusilp et al. [18] ศึกษาการกักน้ำ การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตและความร้อนจากการทำปฏิกิริยาของคอนกรีตโดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถูกแทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานพบว่าคอนกรีตผสมด้วยเถ้าชานอ้อยร้อยละ 10-30 ที่อายุการบ่ม 28 วันมีกำลังอัดสูงกว่าและมีการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม

การศึกษาศสมบัติทางกายภาพ ทางกล และการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาที่มีการศึกษามากแล้ว [19-21] แต่ยังไม่มีการศึกษาศสมบัติทางกายภาพ ทางกล โครงสร้างจุลภาค การหดตัวแห้งและการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าชานอ้อย ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการใช้เถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุปอซโซลานในคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส ศึกษาการก่อตัว หน่วยน้ำหนัก การดูดซึมน้ำ ความพรุน กำลังอัด การทดสอบคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสโดยใช้เทคนิคทางความร้อน การหดตัวแห้งและการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสเพื่อเป็นข้อมูลสนับสนุนให้มีการนำเถ้าชานอ้อยจากโรงไฟฟ้ามาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสไปใช้งานจริงซึ่งจะช่วยลดการใช้พลังงานในการผลิตปูนซีเมนต์รวมถึงลดปัญหาเกี่ยวกับวัสดุเหลือทิ้ง

2. วัสดุและวิธีการศึกษา

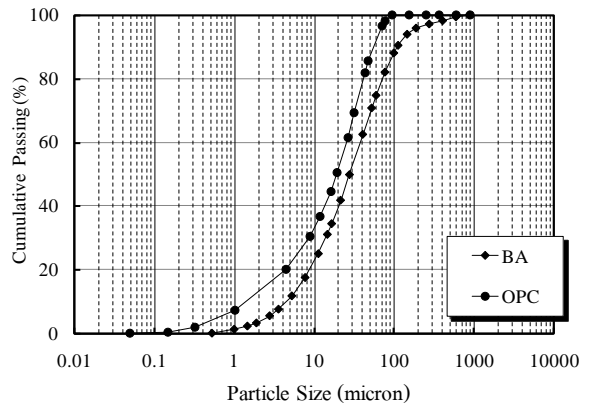
2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าชานอ้อย ทราย น้ำ และสารเพิ่มพองชนิดสังเคราะห์ประจุลบ เถ้าชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลในจังหวัดสระบุรีนำเถ้าชานอ้อยมาบดละเอียด สมบัติทางกายภาพและทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าเถ้าชานอ้อยองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาไดออกไซด์ (SiO₂) ผลรวมของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ มีค่าร้อยละ 76.39 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23 และอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าชานอ้อยเท่ากับ 26.3 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 และปริมาณอนุภาคข้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ประมาณร้อยละ 15 ซึ่งต่ำกว่าร้อยละ 34 สามารถจัดเป็นชั้น

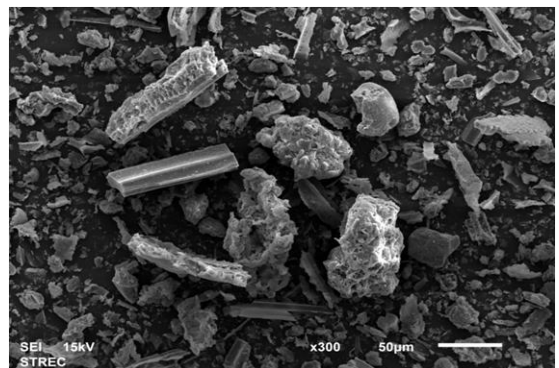
คุณภาพ N ตามมาตรฐาน ASTM C618 [22] ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Chusilp et al. [18] ที่พบว่า เถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุพอซโซลานชั้นคุณภาพ N เมื่อพิจารณารูปที่ 2 ที่แสดงภาพขยายเถ้าชานอ้อยด้วยเครื่อง SEM พบว่ามีลักษณะเป็นเหลี่ยมเป็นมุม ส่วนรูปที่ 3 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเถ้าชานอ้อย พบว่าองค์ประกอบหลักคือ ควอตซ์ (α -quartz) และองค์ประกอบรองคริสโตบาไลต์ (Cristobalite) คล้ายกับการศึกษาของ Bahurudeen et al. [23] ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณความไม่บริสุทธิ์โดยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ด้วยวิธีเรียทเวลด (Rietveld method) พบว่าปริมาณความไม่บริสุทธิ์ของเถ้าชานอ้อยมีค่าเท่ากับร้อยละ 82.55 ส่วนทรายที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 1.80

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุยึดประสาน

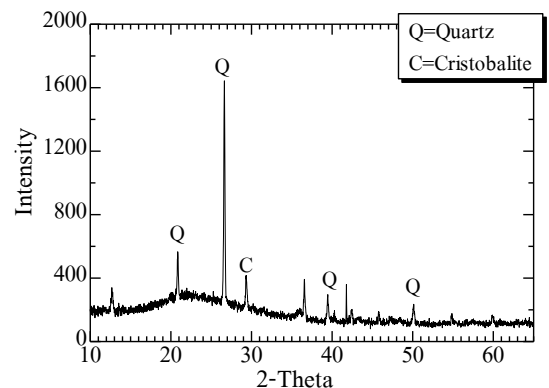
สมบัติทางกายภาพและทางเคมี	OPC	BA
Specific gravity	3.15	2.23
Median particle size (μm)	15.7	26.3
SiO ₂	20.45	65.10
Al ₂ O ₃	4.97	8.14
Fe ₂ O ₃	3.54	3.15
CaO	64.5	6.50
MgO	1.56	2.13
Na ₂ O	0.12	0.65
K ₂ O	0.58	2.42
LOI	1.35	11.45
(SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃)		76.39



รูปที่ 1 การกระจายอนุภาคของวัสดุ



รูปที่ 2 ภาพขยายเถ้าชานอ้อยด้วยเครื่อง SEM



รูปที่ 3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเถ้าชานอ้อย

2.2 อัตราส่วนผสม

นำเข้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน ใช้อัตราส่วนวัสดุยึดประสานต่อทรายเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานคงที่เท่ากับ 0.60 นำสารเพิ่มฟองเจือจางกับน้ำในอัตราส่วนสารเพิ่มฟองต่อน้ำเท่ากับ 1 : 40 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปผ่านเครื่องสร้างฟองที่ต่อเข้ากับเครื่องอัดอากาศและฉีดเป็นโฟมเหลวใส่ลงไปในเครื่องผสม โฟมเหลวมีความหนาแน่นเฉลี่ย 45 กก/ม³ อัตราส่วนผสมออกแบบตามมาตรฐาน ASTM C796 [24] ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

Mix code	อัตราส่วนผสม (กก/ม ³)					
	OPC	Bagasse Ash (kg)	Sand (kg)	Foaming agent (kg)	Water (kg)	W/B
0.6CT	366.0	0	366	0.772	219.6	0.6
0.6BA10	329.4	36.6	366	0.759	219.6	0.6
0.6BA20	298.8	73.2	366	0.747	219.6	0.6
0.6BA30	256.2	109.8	366	0.736	219.6	0.6

2.3 วิธีการทดสอบ

2.3.1 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว

การทดสอบการก่อตัวต้น (Initial setting time) และการก่อตัวปลาย (Final setting time) เป็นการประยุกต์การทดสอบการก่อตัวของเพสต์ ตามมาตรฐาน ASTM C191 [25] เพื่อหาการก่อตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส โดยการก่อตัวต้นคือระยะเวลาที่การจมของเข็มมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. เป็นระยะ

25 มม. ในเวลา 30 วินาที และการก่อตัวปลายคือระยะเวลาที่คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสก่อตัวจนกระทั่งเข็มมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. ไม่สามารถจมลงได้ด้วยน้ำหนักของเข็มมาตรฐาน

2.3.2 การทดสอบหน่วยน้ำหนักและการดูดซึมน้ำ

หล่อตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 100 x100x100 มม. การทดสอบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสตามมาตรฐาน ASTM C138 [26] และการทดสอบการดูดซึมน้ำทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C642 [27] โดยนำตัวอย่างที่บ่มในน้ำอายุการบ่ม 28 วันแช่ตัวอย่างไว้ในสภาพอ้อมตัวผิวแห้งแล้วนำมาชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำตัวอย่างอบแห้งที่อุณหภูมิ 100±5 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วมาชั่งน้ำหนัก

2.3.3 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส โดยหล่อตัวอย่างขนาด 100×100×100 มม. ตามมาตรฐาน BS 1881-116 [28] ทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 7 28 และ 90 วัน

2.3.4 การทดสอบโดยใช้เทคนิคทางความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

การวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคทางความร้อน โดยใช้เครื่องมือ Thermogravimetric analysis (TGA) เป็นเครื่องมือที่วิเคราะห์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิ นำตัวอย่างที่อยู่บริเวณตรงกลางชิ้นเล็กๆ ขนาด 10-15 มม. แช่ตัวอย่างในอะซิโตนเป็นเวลา 3 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างมาอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 60 °C เพื่อหยุดปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่นเดียวกับงานของ Rong et al. [29] แล้วบดตัวอย่างให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 หลังจากนั้นนำตัวอย่าง

ทดสอบมาวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 1,000 °C ด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 10 °C ต่อนาที ขั้นตอนการทดสอบอ้างอิงตามการศึกษากอง Chaipanich and Nochaiya [30]

2.3.5 การทดสอบขนาดโพรงของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

การวิเคราะห์โครงสร้างโพรงของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสด้วยเครื่องมือ Mercury Intrusion Porosimeter (MIP) โดยนำตัวอย่างที่หุ่ยปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นเต็มที่ที่มีขนาดประมาณ 3-5 มม. ใส่ในแท่งใส่ตัวอย่าง (Penetrometer) แล้วติดตั้งในช่องความดันต่ำ เดินเครื่องเพื่อให้ระบบเป็นสุญญากาศ หลังจากนั้นเพิ่มความดันจนถึง 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และนำแท่งใส่ตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักและติดตั้งที่ช่องความดันสูงเพื่ออัดความดันจนกระทั่งถึงความดันสูงสุดที่ 33,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

2.3.6 การหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

การทดสอบการหดตัวแห้ง (Drying shrinkage) ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส โดยการหล่อคอนกรีตมวลเบาด้วยแบบหล่อขนาด 75×75×285 มม. การหาค่าการหดตัวแห้งเฉลี่ยของแท่งตัวอย่าง ภายหลังจากถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาแช่ในน้ำเป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างวัดความยาวเทียบกับแท่งมาตรฐานเป็นความยาวเริ่มต้นในการทดสอบ จากนั้นนำตัวอย่างบ่มไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 23±2 °C ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ±2 ทำการวัดความยาวเฉลี่ยของแท่งตัวอย่างจำนวน 4 แท่งตัวอย่างที่เวลา 3 7 14 28 และ 60 วัน

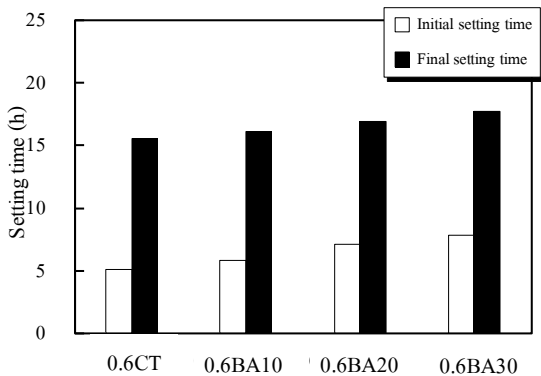
2.3.7 ค่าการนำความร้อน (k) ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

การทดสอบคุณสมบัติการนำความร้อน โดยการทดสอบหาค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity, k) ตามมาตรฐาน ASTM C518 [31] โดยทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสเป็นแผ่นขนาด 200x200x50 มม. โดยทดสอบแต่ละอัตราส่วนผสมจำนวน 3 ตัวอย่าง ตัวอย่างทดสอบต้องทำการอบแห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อลดผลของความชื้นก่อนการทดสอบ [32]

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 ระยะเวลาการก่อตัว

ผลการทดสอบการก่อตัวต้นและการก่อตัวปลายของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าชานอ้อยแสดงในรูปที่ 4 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าชานอ้อยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่เถ้าชานอ้อยในปริมาณที่เพิ่มขึ้น การก่อตัวเริ่มต้นของ 0.6CT 0.6BA10 0.6BA20 และ 0.6BA30 มีค่าเท่ากับ 5:05 6:12 7:05 และ 7:48 ชั่วโมง:นาฬิกา ตามลำดับ และผลการก่อตัวปลายมีค่าเพิ่มขึ้นในทิศทางเดียวกันกับการก่อตัวต้น 15:30 16:05 16:55 และ 17:40 ชั่วโมง : นาฬิกา ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวปลายของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าชานอ้อยเนื่องจากการแทนที่วัสดุปอซโซลานเพิ่มขึ้นทำให้มีปริมาณปูนซีเมนต์ต่ำส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น [9]



รูปที่ 4 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าชานอ้อย

3.2 หน่วยน้ำหนักและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

หน่วยน้ำหนักและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสแสดงในตารางที่ 3 พบว่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส 0.6CT 0.6BA10 0.6BA20 และ 0.6BA30 มีค่าเท่ากับ 964 958 944 และ 938 กก/ม³ ตามลำดับ การใช้เถ้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้หน่วยน้ำหนักมีค่าลดลงเพราะว่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าชานอ้อยต่ำกว่าปูนซีเมนต์เมื่อเปรียบเทียบความถ่วงจำเพาะของเถ้าชานอ้อยและปูนซีเมนต์เท่ากับ 2.23 และ 3.14 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 หน่วยน้ำหนักและการดูดซึมน้ำ

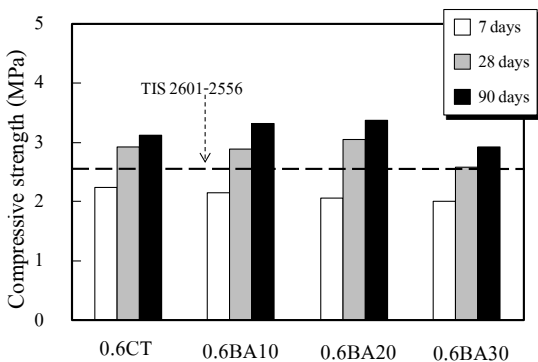
Mix code	Unit weight (kg/m ³)	Water absorption (%)
0.6CT	964	21.7
0.6BA10	958	22.6
0.6BA20	944	23.5
0.6BA30	938	25.8

การดูดซึมน้ำของคอนกรีต 0.6CT มีค่าเท่ากับร้อยละ 21.7 ขณะที่การดูดซึมน้ำของคอนกรีต 0.6BA10 0.6BA20 และ 0.6BA30 มีค่าเท่ากับ 22.6 23.5 และ 25.8 ตามลำดับ การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสมีค่าเพิ่มขึ้นตามการแทนที่เพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าชานอ้อย เนื่องจากการแทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยในปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณความพรุนมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับศึกษาของ Nambiar and Ramamurthy [7] นอกจากนี้จากการศึกษาของ Jitchaiyaphum et al. [9] พบว่าการแทนที่วัสดุโพซโซลานในคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณโพรงคาปิลารีขนาดใหญ่ (Large capillary pore) ซึ่งเป็นปัจจัยต่อผลการดูดซึมน้ำ อย่างไรก็ตามการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าชานอ้อยร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสานมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน มอก. 2601-2556 สำหรับคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่นแห้งระหว่าง 901-1,000 กก/ม³ ที่กำหนดการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาต้องต่ำกว่าร้อยละ 25

3.3 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

รูปที่ 5 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสพบว่าที่อายุการบ่ม 7 วันกำลังอัดของคอนกรีต 0.6CT 0.6BA10 0.6BA20 และ 0.6BA30 มีค่าเท่ากับ 2.23 2.15 2.06 และ 2.00 เมกะปาสกาล ตามลำดับแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าชานอ้อยที่อายุต้นมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสควบคุมและเมื่ออายุการบ่มเพิ่มเป็น 28 วัน กำลังอัดของคอนกรีต 0.6CT 0.6BA10 0.6BA20 และ 0.6BA30 มีค่า

เท่ากับ 2.92 2.88 3.05 และ 2.58 เมกะปาสกาล ตามลำดับ เห็นได้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าชานอ้อยร้อยละ 20 มีค่าสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสควบคุมเพราะว่าเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์และอลูมินาไตรออกไซด์ซึ่งอยู่ในเถ้าชานอ้อยทำให้ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจึงทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น [33] เมื่ออายุการบ่มเพิ่มเป็น 90 วัน กำลังอัดของคอนกรีต 0.6CT 0.6BA10 0.6BA20 และ 0.6BA30 มีค่าเท่ากับ 3.12 3.32 3.37 และ 2.93 เมกะปาสกาล กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าชานอ้อยร้อยละ 20 ยังคงให้กำลังอัดสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Jitchaiyaphum et al. [9] ที่พบว่าเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าชานอ้อยร้อยละ 20 ทำให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม

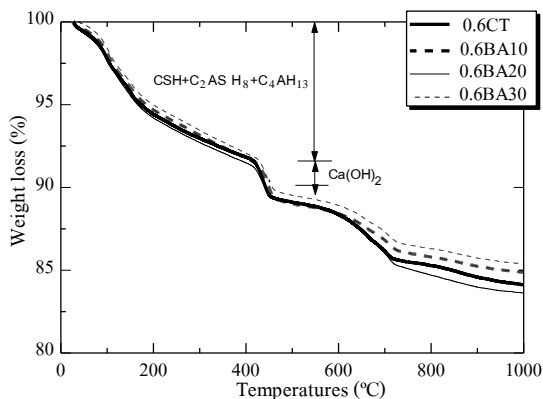


รูปที่ 5 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าชานอ้อย

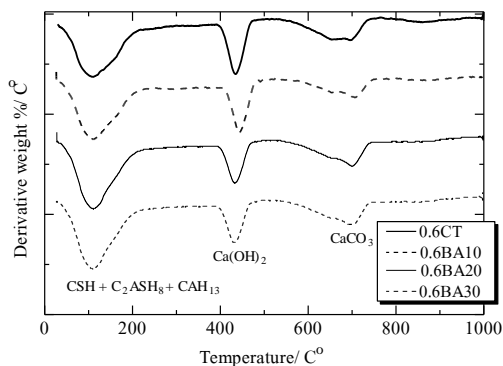
มาตรฐาน มอก. 2601-2556 คอนกรีตมวลเบาแบบเต็มฟองอากาศ [2] ได้กำหนดกำลังอัดต้องไม่น้อยกว่า 2.50 เมกะปาสกาลสำหรับคอนกรีตมวลเบาชนิด C4 ที่มีความหนาแน่นแห้งระหว่าง 901-1,000 กก/ม³ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าร้อยละการแทนที่เถ้าชานอ้อยที่สามารถใช้ในส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสเพื่อให้ได้กำลังอัดสูงกว่าค่าที่มาตรฐาน มอก. 2601-2556 กำหนดไว้คือไม่เกินร้อยละ 20

3.4 การวิเคราะห์โดยเทคนิคทางความร้อน

รูปที่ 6 แสดงร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าชานอ้อยด้วยเทคนิค TGA และรูปที่ 7 แสดงอัตราการสูญเสียน้ำหนักที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าชานอ้อยด้วยเทคนิค DTG ที่อายุบ่ม 28 วัน พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนอยู่ด้วยกัน 3 ช่วง โดยช่วงแรกเป็นการสลายตัวเนื่องจากแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) แคลเซียม-อลูมินาซิลิเกตไฮเดรต (C₂ASH₈) และแคลเซียมอลูมินไฮเดรต (C₄AH₁₃) ที่อุณหภูมิ 105 – 450 °C [34] ช่วงที่สอง เป็นการสลายตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ที่อุณหภูมิ 450 – 580 °C [35] และช่วงที่สามเป็นการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) ที่อุณหภูมิ 580 – 1,000 °C [35] สอดคล้องกับการศึกษาของ Chaipanich and Nochaiya [30] จากการสังเกตรูปที่ 7 พบว่าจุดยอดของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่ำลงเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของซิลิกอนไดออกไซด์ที่อยู่ในเถ้าชานอ้อยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของคอนกรีตผสมด้วยเถ้าชานอ้อยลดลงและลดลงตามการแทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 6 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าขานอ้อยที่อายุการบ่ม 28 วัน



รูปที่ 7 อัตราการสูญเสียน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าขานอ้อยที่อายุการบ่ม 28 วัน

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4 ซึ่งแสดงปริมาณร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าขานอ้อยพบว่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิ 105-450 °C ของคอนกรีต 0.6CT 0.6BA10 0.6BA20 และ 0.6BA30 เท่ากับ 8.08 8.33 8.41 และ 8.48 ตามลำดับและร้อยละการสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิ 450 - 580 °C เป็นการสลายตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่ง

มีค่าเท่ากับ 2.85 2.65 2.54 และ 2.48 ตามลำดับ เห็นได้ว่าปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าลดลงและปริมาณการสลายตัวของ $CSH+C_2ASH_8+C_4AH_{13}$ มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าขานอ้อยมีค่าเพิ่มขึ้น [36]

ตารางที่ 4 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าขานอ้อยที่อายุการบ่ม 28 วัน

Mix code	105-450 °C	450-580 °C
	$CSH+C_2ASH_8+C_4AH_{13}$	$Ca(OH)_2$
0.6CT	8.08	2.85
0.6BA10	8.33	2.65
0.6BA20	8.41	2.54
0.6BA30	8.48	2.48

3.5 การกระจายตัวของโพรง

ความพรุนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสแบ่งออกเป็นสี่ประเภทคือ โพรงเจล (Gel pore) ที่มีขนาดโพรงเล็กกว่า 10 นาโนเมตร โพรงคาปิลารีขนาดกลาง (Medium capillary pore) มีขนาดโพรงอยู่ระหว่าง 10 – 50 นาโนเมตร โพรงคาปิลารีขนาดใหญ่ (Large capillary pore) มีขนาดโพรงอยู่ระหว่าง 50 นาโนเมตร – 10 ไมครอน และโพรงอากาศ (Air void) คือโพรงที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน จากตารางที่ 5 พบว่าปริมาณโพรงทั้งหมดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส 0.6CT 0.6BA10 0.6BA20 และ 0.6BA30 มีค่าเท่ากับร้อยละ 51.09 54.56 59.42 และ 63.21 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของโพรงคอนกรีตพบว่าการกระจายตัวของโพรงในคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสส่วนใหญ่ในงานวิจัยนี้เป็นโพรงคาปิลารีขนาดใหญ่ (Large

capillary pore) และมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าขานอ้อยที่เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Jitchaiyaphum et al. [9] ที่พบว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมวัสดุพอลิโพรพิลีนมีการกระจายตัวของขนาดโพรงส่วนใหญ่เป็นโพรงคาปิลลารีขนาดใหญ่

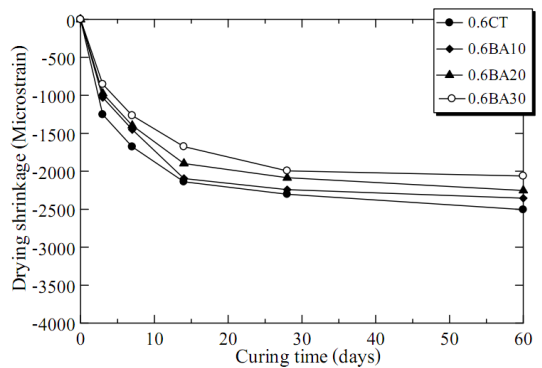
ตารางที่ 5 การกระจายตัวของโพรง

Mix code	Porosity at 28 days (%)				
	Total pore	Gel pore	Medium capillary pore	Large capillary pore	Extra large pore
0.6CT	51.09	1.75	2.85	40.85	5.64
0.6BA10	54.56	2.00	2.65	45.74	4.17
0.6BA20	59.42	2.73	3.20	50.10	3.39
0.6BA30	63.21	3.43	4.48	51.24	4.06

3.6 การหดตัวแห้ง

การหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสแสดงในรูปที่ 8 พบว่าการหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่อายุต้นจนถึงอายุ 14 วัน มีอัตราการหดตัวเกิดขึ้นสูง หลังจากอายุ 14 วัน เป็นต้นไปการเปลี่ยนแปลงของอัตราการหดตัวแห้งมีค่าน้อยมากซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Makul and Sua-iam [37] ที่พบว่า การหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาหลังจากอายุ 14 วันการเปลี่ยนแปลงมีค่าน้อยมาก ค่าการหดตัวแห้งของคอนกรีต 0.6CT 0.6BA10 0.6BA20 และ 0.6BA30 ที่อายุ 60 วันมีค่าเท่ากับ 2506 2356 2253 และ 2063 ไมโครสเตรน ตามลำดับ เห็นได้ว่าการหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าขานอ้อยมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสควบคุม นอกจากนี้การหดตัว

แห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าขานอ้อยที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Chindaprasirt and Rattanasak [38] ที่พบว่า การหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุพอลิโพรพิลีนมีค่าการหดตัวแห้งต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาควบคุมและมีค่าการหดตัวแห้งลดลงตามการแทนที่ของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น โดยปกติการหดตัวแห้งของคอนกรีตทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 200 - 800 ไมโครสเตรน ขณะที่มอร์ตาร์มีค่าการหดตัวแห้งประมาณ 800 - 2000 ไมโครสเตรน [38] ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการใช้เถ้าขานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสส่งผลให้การหดตัวแห้งลดลงและลดลงตามการแทนที่ของเถ้าขานอ้อยที่เพิ่มขึ้น

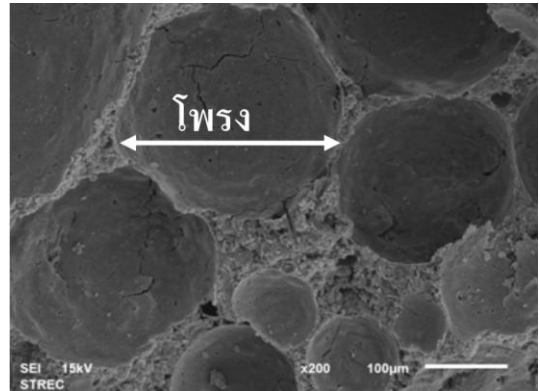


รูปที่ 8 การหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

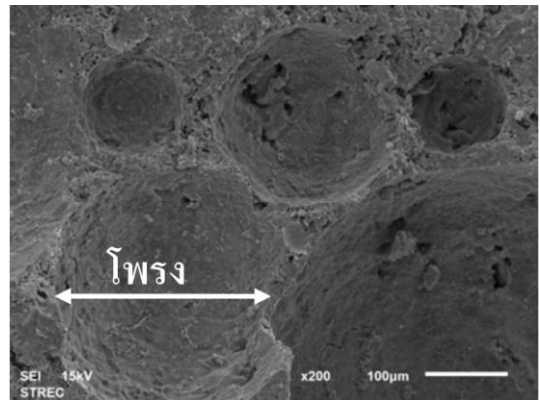
3.7 ภาพขยาย Fractured Surface

รูปที่ 9 แสดงภาพ SEM ของ Fractured surface ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส พบว่าโพรงในคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสเป็นโพรงอากาศมีรูปร่างทรงกลมมีขนาดประมาณ 50 ไมโครเมตร ไปถึง 200 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นโพรงปิด โดยระหว่างโพรงอากาศจะเป็นเนื้อเพสต์ซึ่งประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กที่มีความต่อเนื่องซึ่งส่วน

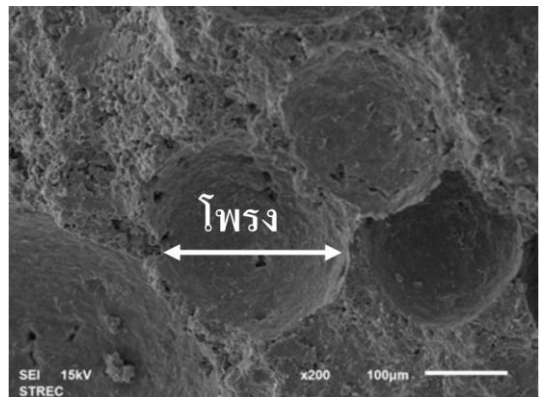
ใหญ่เป็นโพรงคาปิลารีขนาดใหญ่ (Large capillary pore) มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตรและมีผลต่อการซึมผ่าน เมื่อพิจารณารูปที่ 9(ข) -9(ง) ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าขานอ้อยร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ พบว่าโครงสร้างโพรงของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสมีลักษณะคล้ายกับคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสควบคุมในรูปที่ 9(ก) แต่การกระจายตัวโพรงอากาศดีกว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสควบคุม เนื่องจากการใช้เถ้าขานอ้อยในคอนกรีตมวลเบาทำให้อนุภาคเถ้าขานอ้อยเกิดการแทรกระหว่างโพรงอากาศส่งผลให้เกิดการกระจายของโฟมและเมื่อคอนกรีตแข็งตัวโพรงกระจายอย่างสม่ำเสมอป้องกันการเชื่อมต่อและการซึบซึนซึ่งกันและกัน [7] อีกประเด็นหนึ่งเถ้าขานอ้อยมีอนุภาคขนาดใหญ่และมีความพรุนสูงกว่าปูนซีเมนต์ ดังนั้นการใช้เถ้าขานอ้อยเป็นวัสดุประสานทำให้เนื้อเพสต์มีความพรุนสูงตามไปด้วย เมื่อพิจารณาภาพถ่าย SEM พบว่าการกระจายตัวของโพรงไม่ชัดเจนแต่มีความพรุนเพิ่มขึ้นและลักษณะของโพรงอากาศไม่กลมเหมือนกับคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสรูปที่ 9(ก)



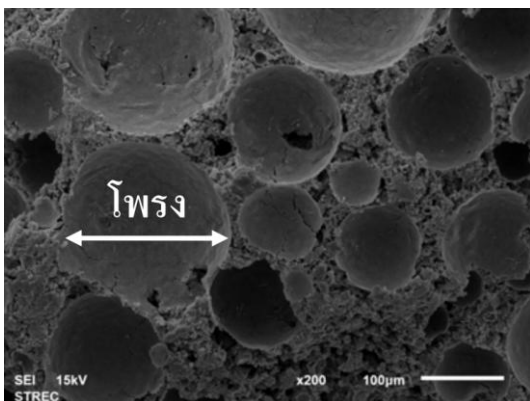
ข) 0.6BA10



ค) 0.6BA20



ง) 0.6BA30



ก) 0.6CT

รูปที่ 9 ภาพ SEM ของ Fractured Surface ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่อายุการบ่ม 28 วัน

3.8 การนำความร้อน

การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสแสดงในรูปที่ 10 พบว่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสควบคุม 0.6CT มีค่าเท่ากับ 0.273 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ขณะที่การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าขานอ้อย 0.6BA10 0.6BA20 และ 0.6BA30 มีค่าเท่ากับ 0.225 0.218 และ 0.202 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน หรือลดลงร้อยละ 17.6 20.1 และ 26.0 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสควบคุม การลดลงของการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าขานอ้อยเนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยส่งผลให้ความพรุนและปริมาณโพรงคาปิลารีขนาดใหญ่ (Large capillary pore) มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการกระจายตัวของโพรงและผลการศึกษาของ Kim et al. [39] ที่พบว่าการนำความร้อนจะมีค่าลดลงเมื่อความพรุนมีค่าเพิ่มขึ้น อีกประเด็นหนึ่งการลดลงของหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาส่งผลให้การนำความร้อนมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน [10]

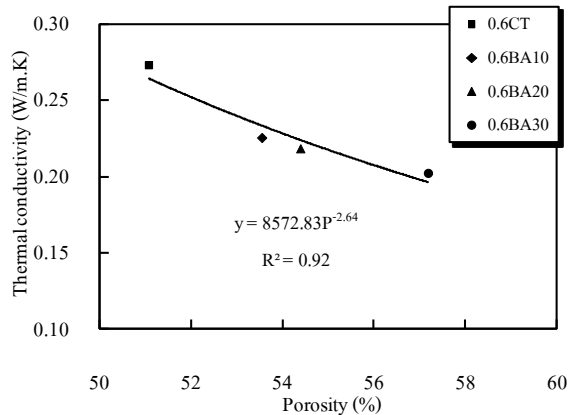
เมื่อพิจารณารูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและการนำความร้อนมีลักษณะไม่เชิงเส้นโดยมีค่าความพรุน ร้อยละ 51.09 - 57.20 และการนำความร้อนมีค่าระหว่าง 0.202-0.273 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ซึ่งคล้ายกับการศึกษาของ Wang et al. [40] ที่พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและความพรุนมีค่าลดลงในลักษณะไม่เชิงเส้นโดยค่าการนำความร้อนมีค่าระหว่าง 0.080 – 0.247 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน และความพรุนร้อยละ 51.28 –

71.71 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความพรุนและการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าขานอ้อยสามารถแสดงในสมการที่ 1 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าขานอ้อยทำให้ความพรุนมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการนำความร้อนมีค่าลดลง

$$\text{เมื่อ } K = 8572.83P^{-2.64} \quad (1)$$

K คือการนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน)

P คือความพรุนคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส (ร้อยละ)



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

4. สรุปผล

1. การใช้เถ้าขานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักส่งผลให้คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสมีกำลังอัดสูงสุด นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เถ้าขานอ้อยในส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสไม่

เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะทำให้อ่อนกรีตมวลเบาเซลลูโลสมีค่ากำลังอัดสูงกว่าและการดูดซึมน้ำต่ำกว่าค่าที่ทาง มอก. 2601-2556 กำหนดไว้

2. การใช้เถ้าขานอ้อยผสมในคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสทำให้ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง ในทางกลับกัน ปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) แคลเซียมอลูมินาซิลิเกตไฮดรต (C_2ASH_8) และแคลเซียมอลูมินไฮดรต (C_4AH_13) มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ใช้เถ้าขานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

3. คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าขานอ้อยมีค่าการหดตัวแห้งต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสควบคุมและการหดตัวแห้งมีค่าลดลงด้วยการแทนที่เถ้าขานอ้อยในปริมาณที่เพิ่มขึ้น

4. การใช้เถ้าขานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสทำให้การดูดซึมน้ำและความพรุนมีค่าเพิ่มขึ้นและเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเถ้าขานอ้อยที่เพิ่มขึ้น ความพรุนที่เพิ่มขึ้นส่งผลการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสลดลงด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออกเลขที่สัญญาทุนที่ 916/2558 คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ วิทยาเขตอุเทนถวาย สาขาวิศวกรรมโยธา ที่อนุเคราะห์วัสดุและเครื่องมือในการดำเนินการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] K.S. Rebeiz and A.P. Craft, "Plastic Waste Management in Construction: Technological and Institutional issues", Resources, Conservation and Recycling 15, 1995, pp. 245-257.
- [2] TIS. 2601-2556, "Cellular Lightweight Concrete Blocks Using Preformed Foam", Thai Industrial Standard Institute, Ministry of Industry, Thailand 2013, pp. 1-9. (in Thai)
- [3] P. Thongsanitgarn, W. Wongkeo, A. Chaipanich and C.S. Poon, "Heat of Hydration of Portland High-calcium Fly Ash Cement Incorporating Limestone Powder: Effect of Limestone Particle Size", Construction and Building Materials 66, 2014, pp. 410-417.
- [4] TIS. 1505-2541, "Autoclaved Aerated Lightweight Concrete Elements", Thai Industrial Standard Institute Ministry of Industry, Thailand, 1998, pp. 1-17. (in Thai)
- [5] H. Esmaily and H. Nuranian, "Non-Autoclaved High Strength Cellular Concrete From Alkali Activated Slag", Construction and Building Materials 26, 2012, pp. 200-206.
- [6] T. Thaveevouthiti, N. Sangtian and W. Puatatsananon, "Air Content of Cellular Lightweight Concrete", Ladkrabang Engineering Journal 32, 2015, pp.67-72. (in Thai)
- [7] E.K.K. Nambiar and K. Ramamurthy, "Sorption Characteristics of Foam Concrete", Cement and Concrete Research 37, 2007, pp. 1341-1347.

- [8] B. Chatveera, R. Naimee and N. Makul, "Mechanical Properties of Lightweight Concrete Containing Andesite-Dusty Rock", *KMUTT Research and Development Journal* 34, pp. 201, 395-414. (in Thai)
- [9] K. Jitchaiyaphum, T. Sinsiri, C. Jaturapitakkul and P. Chindaprasirt, "Cellular Lightweight Concrete Containing High-Calcium Fly Ash and Natural Zeolite", *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* 20, 2013, pp. 462-471.
- [10] C. Narattha, P. Thongsanitgarn and A. Chaipanich, "Thermogravimetry Analysis, Compressive Strength and Thermal Conductivity Tests of Non-autoclaved Aerated Portland Cement Fly Ash Silica Fume Concrete", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 122, 2015, pp. 11-20.
- [11] M.R. Jones and A. McCarthy, "Heat of Hydration in Foamed Concrete: Effect of Mix Constituents and Plastic Density", *Cement and Concrete Research* 36, 2006, pp. 1032-1041.
- [12] K.S. Wang, I.J. Chiou, C.H. Chen and D. Wang, "Lightweight Properties and Pore Structure of Foamed Material Made From Sewage Sludge Ash", *Construction and Building Materials* 19, 2005, pp. 627-633.
- [13] FAO 2012, Food and Agricultural Commodities Production : <http://www.fao.org/faostat/en/> 2012.
- [14] J. Suntharanurak and D. Tonnayopas, "Strength Development and Sulfate Durability of Waste Clear Bottle Glass Aggregate Concrete Containing Sugarcane Bagasse Ash", *The Journal of Industrial Technology* 10, 2014, pp. 63-75. (in Thai)
- [15] N. Chusilp, C. Jaturapitakkul and K. Kiattikomol, "Effects of LOI of Ground Bagasse Ash on The Compressive Strength and Sulfate Resistance of Mortars", *Construction and Building Materials* 23, 2009, pp. 3523-3531.
- [16] K. Ganesan, K. Rajagopal and K. Thangavel, "Evaluation of Bagasse Ash as Supplementary Cementitious Material", *Cement and Concrete Composites* 29, 2007, pp. 515-524.
- [17] E.M.R. Fairbairn, B.B. Americano, G.C. Cordeiro, T.P. Paula, R.D.T. Filho and M.M. Silvano, "Cement Replacement by Sugar Cane Bagasse Ash: CO₂ Emissions Reduction and Potential for Carbon Credits", *Journal of Environmental Management* 91, 2010, pp. 1864-1871.
- [18] N. Chusilp, C. Jaturapitakkul and K. Kiattikomol, "Utilization of Bagasse Ash as a Pozzolanic Material in Concrete", *Construction and Building Materials* 23, 2009, pp. 3352-3358.

- [19] B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave and L.A. Meyer, "Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: University Press, 2007.
- [20] O.E. Gjorv and K. Sakai, "Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21st Century", 2000.
- [21] B.V.V. Reddy and K.S. Jagadish, "Embodied Energy of Common and Alternative Building Materials and Technologies", *Energy and Buildings* 35, 2003, pp. 129-137.
- [22] ASTM C618, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete", *Annual Book of ASTM Standards* 04.02, 2012, pp. 310–313.
- [23] A. Bahurudeen, A.V. Marckson, A. Kishore and M. Santhanam, "Development of Sugarcane Bagasse Ash Based Portland Pozzolana Cement and Evaluation of Compatibility with Superplasticizers", *Construction and Building Materials* 68, 2014, pp. 465-475.
- [24] ASTM C796, "Standard Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam", *Annual Book of ASTM Standards* 04.02, 2012.
- [25] ASTM C191, "Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle", *Annual Book of ASTM Standards* 04.01, 2013, pp. 181-183.
- [26] ASTM C138, Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete", *Annual Book of ASTM Standards* 04.02, 2009, pp. 83-86.
- [27] ASTM C642, "Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete", *Annual Book ASTM Standards* 04.02, 2006, pp. 1-3.
- [28] BS. 1881, Part120, "Method of Determination of the Compressive Strength of Concrete Cores", British Standard Institute, London, 1983.
- [29] Z.D. Rong, W. Sun, H.J. Xiao and W. Wang, "Effect of Silica Fume and Fly Ash on Hydration and microstructure evolution of cement based composites at low water–binder ratios", *Construction and Building Materials* 51, 2014, pp. 446-450.
- [30] A. Chaipanich and T. Nochaiya, "Thermal analysis and microstructure of Portland cement-fly ash-silica fume pastes", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 99, 2010, pp. 487-493.
- [31] ASTM C518, "Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus", *Annual book ASTM standards* 04, 2010, pp. 152-166.

- [32] Y. Zaetang, A. Wongsas, V. Sata and P. Chindapasirt, "Use of coal ash as geopolymer binder and coarse aggregate in pervious concrete", *Construction and Building Materials* 96, 2015, pp. 289-295.
- [33] R. Somna and C. Jaturapitakkul, "Use of Ground Bagasse Ash to Improve Compressive Strength, Water Permeability, and Chloride Resistance of Recycled Aggregate Concrete", *KMUTT Research and Development Journal* 34, 2011, pp.369-381. (in Thai)
- [34] J. Bai, A. Chaipanich, J.M. Kinuthia, M.O. Farrell, B.B. Sabir, S. Wild and M.H. Lewis, "Compressive Strength and Hydration of Waste Paper Sludge Ash-Ground Granulated Blast Furnace Slag Blended Pastes", *Cement and Concrete Research* 33, 2003, pp. 1189-1202.
- [35] B. El-Jazairi and J.M. Illston, "A Simultaneous Semi-isothermal Method of Thermogravimetry and Derivative Thermogravimetry, and its Application to Cement Pastes", *Cement and Concrete Research* 7, 1977, pp. 247-257.
- [36] P. Chindapasirt, T. Sinsiri, W. Kroehong and C. Jaturapitakkul, "Role of Filler Effect and Pozzolanic Reaction of Biomass Ashes on Hydrated Phase and Pore Size Distribution of Blended Cement Paste", *Journal of Materials in Civil Engineering* 26, 2014, pp. 04014057-10
- [37] N. Makul and G. Sua-iam, "Characteristics and Utilization of Sugarcane Filter Cake Waste in the Production of Lightweight Foamed Concrete", *Journal of Cleaner Production* 126, 2016, pp. 118-133.
- [38] P. Chindapasirt and U. Rattanasak, "Shrinkage Behavior of Structural Foam Lightweight Concrete Containing Glycol Compounds and Fly Ash", *Materials & Design* 32, 2011, pp. 723-727.
- [39] H.K. Kim, J.H. Jeon and H.K. Lee, "Workability, and Mechanical, Acoustic and Thermal Properties of Lightweight Aggregate Concrete with a High Volume of Entrained Air", *Construction and Building Materials* 29, 2012, pp. 193-200.
- [40] K.S. Wang, C.J. Tseng, I.J. Chiou and M.H. Shih, "The Thermal Conductivity Mechanism of Sewage Sludge Ash Lightweight Materials", *Cement and Concrete Research* 35, 2005, pp. 803-809.