

การพัฒนากำลังและความคงทนต่อซัลเฟตของคอนกรีตใต้มวลรวม เศษขวดแก้วใตผสมเถ้าขาน้อย

จกกฤษณ์ สุนทรานุรักษ์ และ ดนุพล ตันนโยภาส*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาพัฒนาการของกำลังอัดและความคงทนของคอนกรีตที่ใช้เศษขวดแก้วเป็นมวลรวมหยาบผสมเถ้าขาน้อยที่มีน้ำหนักสูญหายหลังเผาสูงต่อสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เถ้าขาน้อยแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในอัตราส่วนผสมแปรผัน 15, 20 และ 25% โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.4 คงที่ตลอด เตรียมตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 100×100×100 มิลลิเมตร ภายใต้บรรยากาศ 26 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 80% บ่มแบบความชื้นเป็นเวลา 7 และ 28 วัน ทดสอบสมบัติของคอนกรีต ได้แก่ การดูดซึมน้ำ ความหนาแน่นรวม ความแข็งแรงแบบชอร์ ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ กำลังอัด และการหดตัวแบบแห้งเชิงปริมาตร ทดสอบความคงทนต่อสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างไม่บ่มในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อิ่มตัวเป็นเวลา 8 สัปดาห์ ตรวจแปรประกอบในคอนกรีตที่เด่นที่สุดด้วยการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าขาน้อยแทนที่ 15% บ่มที่ 28 วัน มีกำลังอัดสูงสุด 43 เมกะพาสคัล และสามารถยับยั้งการกัดกร่อนของแมกนีเซียมซัลเฟต ยังแสดงว่ามวลรวมหยาบเศษขวดแก้วใสไม่แสดงผลกระทบอย่างสิ้นเชิงต่อสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของคอนกรีต

คำสำคัญ : มวลรวมเศษขวดแก้วใส, เถ้าขาน้อย, กำลังอัด, แมกนีเซียมซัลเฟต, คอนกรีตสีเขียว

Strength Development and Sulfate Durability of Waste Clear Bottle Glass Aggregate Concrete Containing Sugarcane Bagasse Ash

Jukkrit Suntharanurak and Danupon Tonnayopas *

Abstract

This research investigated compressive strength development and magnesium sulfate durability of concrete using waste clear glass clue (WCGC) as coarse aggregate blending sugarcane bagasse ash (SBA) with high value of loss on ignition. SBA was replaced partially of Portland cement, Type I in proportion of 15, 20 and 25wt.%. Water to binder ratio of 0.4 was constant throughout the study and cubic specimens were prepared in size of $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ under atmosphere of 26°C with 80% relative humidity. The specimens were uncured and cured in water for 7 and 28 days. Physico-mechanical properties of concrete were determined on water absorption, bulk density, Shore hardness, electrical resistivity, compressive strength and volumetric drying shrinkage. Magnesium sulfate durability of uncured specimens was performed in saturated magnesium sulfate solution for 8 weeks. X-ray diffraction and microstructure with Scanning Electron Microscope were analysed on the selected high strength specimen. The 28-day compressive strength of 15%SBA displayed the highest value of 43 MPa and can be suppressed magnesium sulfate attack in deleterious concrete. It was also revealed that coarse aggregate contained WCGC presented a negligible effect on the physical-mechanical properties of concrete.

Keywords : Clear bottle glass aggregate, Sugarcane bagasse ash, Compressive strength, Magnesium sulfate, Green concrete

Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, 90112.

* Corresponding author, E-mail: danupon.t@psu.ac.th Received 15 October 2013, Accepted 12 March 2014

1. บทนำ

สภาวการณ์ในปัจจุบัน โลกมีความต้องการใช้มวลรวมคอนกรีตเพื่อสิ่งปลูกสร้างต่างๆ เป็นจำนวนมากขึ้น ส่งผลให้การใช้นิรภัยก่อสร้างเพื่อนำมาเป็นส่วนผสมในคอนกรีตในปริมาณที่สูงขึ้นตามไปด้วย จากสภาวการณ์ดังกล่าวจึงได้มีการนำเศษวัสดุที่เหลือใช้ เช่น มวลรวมคอนกรีตกลับมาใช้ใหม่ แก้วหลังใช้อุปโภคบริโภค ขากรถยนต์ พลาสติก คอนกรีตย่อยและผลพลอยได้จากกระดาษ และอุตสาหกรรมชนิดต่างๆ มาประยุกต์ใช้แทนมวลรวมในส่วนผสมของคอนกรีตเพื่อการก่อสร้าง

ประเทศไทยมีการปลูกอ้อยเป็นจำนวนมากเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล และอุตสาหกรรมพลังงานทดแทน โดยผลผลิตอ้อยเข้าหีบน้ำตาลทรายในปี พ.ศ. 2555-2556 ปริมาณ 103.95 ล้านตัน [1] เหลือเป็นชานอ้อย 25-29% [2] หรือประมาณ 25.98-30.14 ล้านตัน และผลพ่วงจากระบบการผลิตดังกล่าวทำให้เกิดเถ้าชานอ้อย 1.43% [3] หรือคิดเป็นประมาณ 0.37-0.43 ล้านตัน แม้ปัจจุบันมีงานวิจัยนำเถ้าชานอ้อยไปใช้ประโยชน์แต่ยังอยู่ในปริมาณน้อย เช่น ปรับปรุงคุณภาพดิน [4] ผสมผลิตภัณฑ์เบี่ยงดินเผา [5] แทนบางส่วนปูนซีเมนต์ [6] เป็นต้น

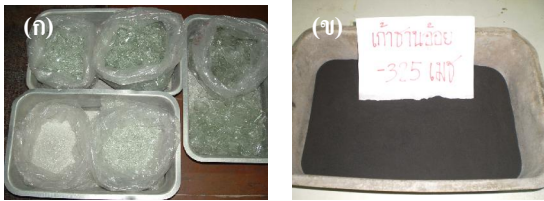
นอกจากนี้ประเทศไทยมีขยะขวดแก้วใสทั้งที่บรรจุสิ่งของทั่วไปและสารเคมีอันตรายทั้งปริมาณปีละ 40,000 ตัน [7] ซึ่งนำกลับมาใช้ได้ไม่ทั้งหมดในกระบวนการผลิตแก้วใส และนับวันก็มีปริมาณขยะเศษแก้วที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งได้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคตทั่วโลกจึงได้มีการรณรงค์นำเศษแก้วใสที่เหลือกลับมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ อาทิเช่น ใช้เป็นตัวกรอง (filtration media) [8] ใช้เป็นวัสดุขัดสี (abrasive) [9] ใช้เป็นตัวลดอุณหภูมิในเซรามิก (fluxing agent)

[10] ใช้เป็นตัวเติมในคอนกรีตขางมะตอย (filler) [11] และใช้ทำคอนกรีตบล็อก [12] มอร์ต้าร์ [13-14] และคอนกรีต [15-16] แต่การใช้งานคอนกรีตจะเกิดการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟต [17] และปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา [18-19] กรณีซัลเฟตจึงมีการเติมสารยับยั้งที่นิยมใช้กันคือ วัสดุพอลิโซลันจากของเสียในอุตสาหกรรม เช่น เถ้าลอย [20] ซิลิกาฟูม [21] ดินขาวเผา [22] เถ้าขังข้าว [23] อันเป็นการนำของเสียกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากที่สุด และยังช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมอีกด้วย งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาความเหมาะสมของเศษขวดแก้วใสกลับมาใช้เป็นมวลรวมหยาบในคอนกรีตผสมเถ้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ เพื่อพัฒนาเป็นคอนกรีตทนต่อสภาพซัลเฟต อันจะเป็นแนวทางผลิตคอนกรีตสีเขียวที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและประหยัดพลังงาน [24]

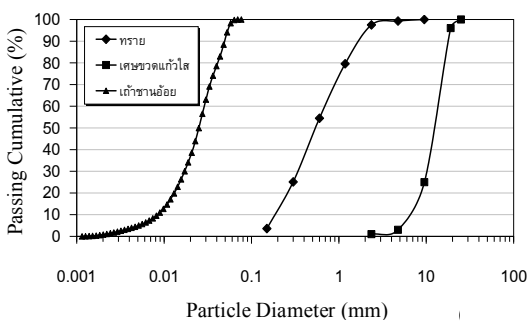
2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย ขวดแก้วใสบรรจุ น้ำโซดาขนาดเล็ก (CBG) มาล้างทำความสะอาด ตากแห้งแล้วไปบดลดขนาดด้วยเครื่องย่อยปากงับ (jaw crusher) ให้ได้ขนาด 19.00 9.52 4.75 2.36 มม. ทำเป็นมวลรวมหยาบ (รูปที่ 1 ก) มีโมดูลัสความละเอียด (FM) 2.75 (รูปที่ 2) เถ้าชานอ้อย (BA) มาอบแห้งที่อุณหภูมิ $100 \pm 5^{\circ}\text{C}$. เป็นเวลา 1 วัน แล้วนำไปคัดขนาดและบดให้เล็กกว่า 45 ไมครอน ด้วยหม้อบดบนลูกกลิ้ง (jar mill) เป็นเวลา 6 ชม. (รูปที่ 1 ข) มีขนาดเฉลี่ย 26.78 ไมครอน ค่าความถ่วงจำเพาะ 2.48 ทรายน้ำจืดนำมาคัดขนาด 4.75 2.36 1.18 มิลลิเมตร 600 300 150 ไมครอน มี FM = 2.41 และน้ำประปาสะอาด



รูปที่ 1 วัสดุดิบ (ก) มวลรวมเศษขวดแก้วคเป็นมวลรวมหยาบขนาดต่างกัน และ (ข) เถ้าชานอ้อยคัดขนาด



รูปที่ 2 ขนาดคัดของวัสดุดิบที่ใช้ในคอนกรีต

2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อย

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (ตารางที่ 1) ของเถ้าชานอ้อย (BA) และเศษแก้ว (CBG) พบว่ามีปริมาณของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ รวมกันได้ประมาณร้อยละ 69.84 และ 66.31 ตามลำดับ แม้ว่าเถ้าชานอ้อยมีค่ารวมอยู่ในเกณฑ์สารปอซโซลาน ประเภท C (ASTM C 618) แต่น้ำหนักที่สูญหายหลังเผา (LOI) ของเถ้าชานอ้อยมีค่าสูงเกินเกณฑ์ (21.10%) เช่นเดียวกับเถ้าใช้ในงานคาวี [25] ซึ่งมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีต เนื่องจากมีการบ่มใหม่ไม่หมด [26] และอุณหภูมิเผาไม่สูงพอให้เป็นเถ้าสมบูรณ์ [27] เถ้าชานอ้อยที่ใช้มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) และปริมาตรโพรง 46.612 ตารางเมตร/กรัม และ 0.00344 มิลลิลิตร/กรัม ตามลำดับ และค่า pH ประมาณ 9

ตารางที่ 1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติกายภาพที่สำคัญของวัสดุผสมที่ศึกษา

Chemical composition and physical property	Blinder (%)		
	OPC	BA	CBG
ซิลิกอน ไดออกไซด์ (SiO ₂)	20.50	62.76	64.27
อะลูมินาออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	6.17	3.89	1.48
เหล็กออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	3.26	3.19	0.56
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	64.10	7.00	16.53
โซเดียมออกไซด์ (NaO)	-	-	14.36
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.90	1.47	1.82
โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	0.57	-	0.22
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	2.69	0.68	0.23
น้ำหนักสูญหายหลังเผา (LOI)	1.81	21.10	0.53
ความถ่วงจำเพาะ	3.19	2.48	-

2.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างคอนกรีตควบคุมใช้ปูนซีเมนต์ 500 กก./ม³ และแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าชานอ้อยคัดขนาด 3 อัตราส่วน คือ 15% 20% และ 25% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นช่วงส่วนผสมให้ศักยภาพปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีตสูงสุด [6,25] ปูนซีเมนต์และเถ้าผสมกันในกระบอบพลาสติกคลุกให้เข้ากันทั่ว ด้วยการวางบนเครื่องบดแบบลูกกลิ้งเป็นเวลา 1 ชม. ใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อทรายต่อมวลรวมหยาบเศษแก้วเท่ากับ 1:1.93:2 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.4 ตัวอย่างหล่อเข้าแน่น ในเบ้าทรงลูกบาศก์ขนาด 100×100×100 มม. บ่มในน้ำประปาสะอาดที่อุณหภูมิห้อง (27 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 7 และ 28 วัน และไม่บ่ม 1 ชุด

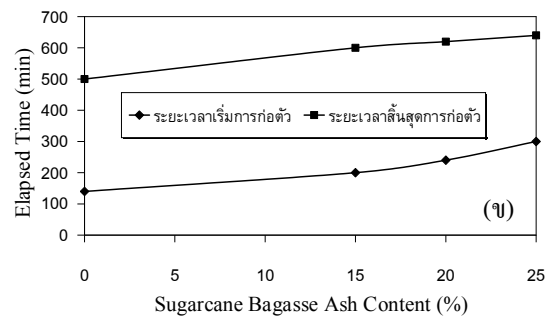
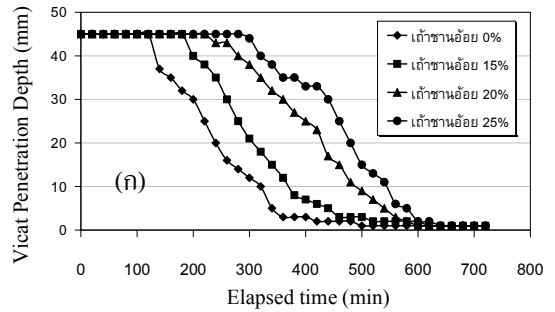
2.4 วิธีการทดสอบ

ทดสอบการก่อตัวของเพสต์ด้วยวิธีไวแคต ตามวิธี ASTM C191 [28] ตัวอย่างคอนกรีตที่ครบเกณฑ์นำมาตรวจสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ [29] การหดตัวแบบแห้งเชิงปริมาตรด้วยการวัดมิติทั้งสามด้านที่ตำแหน่งเดิมด้วยเวอร์เนียส ทดสอบความต้านทานไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดความต้านทานไฟฟ้ารุ่น CA 6525 ความแข็งแบบชอร์ด้วยเครื่องมือ Micro Hardness Tester จากค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 ตัวอย่างที่อัตราส่วนเดียวกันมาเฉลี่ยอีกครั้งเป็นค่าตัวแทนของคอนกรีตสูตรเดียว ความคงทนต่อสารแมกนีเซียมซัลเฟตที่อิ่มตัวได้คัดแปลงจาก ASTM C1012 [30] ใช้ทรงลูกบาศก์ ชั่งน้ำหนักและวัดทั้งสามมิติ ส่วนการทดสอบกำลังอัดด้วยตัวอย่างทรงลูกบาศก์ตามมาตรฐาน BS ต่างไปจาก ASTM C39 [31] ที่ใช้ทรงกระบอก

3. ผลการศึกษา

3.1 เวลาก่อตัวของเพสต์

เวลาเริ่มก่อตัวของเพสต์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยแปรผันตามปริมาณเถ้าชานอ้อย และในแต่ละทุกอัตราส่วนที่หล่อเริ่มก่อตัวก่อนเสมอ (รูปที่ 3 ก) ช่วงเวลาก่อตัวของเพสต์เดิมเถ้าชานอ้อยบดแปรผกผันกับปริมาณเถ้าชานอ้อยที่เติมลงไป เช่นเดียวกับ Ganesan et al. [32] ทำให้ความสามารถไหลลดลงน้อยลงไป (รูปที่ 3 ข) ซึ่งพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงขึ้นนี้จะช่วยส่งผลให้โอกาสหรือความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอชโซลานสูงขึ้นตามไปด้วย กอปรกับอนุภาคเถ้าเป็นอสัณฐานและมีพื้นที่รูพรุนมากจึงยิ่งช่วยในการเกิดปฏิกิริยาแทรกซึมเข้าสู่เนื้อภายใน [6] น้ำปูนใต้อย่างรวดเร็วขึ้นและอย่างทั่วถึง แต่ LOI ที่มาก กลับส่งผลเสียคือ ไม่ช่วยให้เกิดปฏิกิริยา

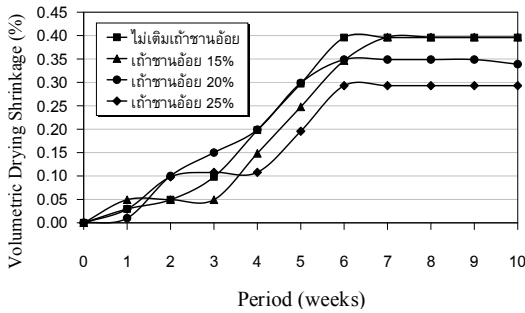


รูปที่ 3 เพสต์ (ก) พฤติกรรมการก่อตัว และ (ข) เวลาก่อตัว

ปอชโซลาน และยังคงควางหรือต้านทานต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้น [26-27]

3.2 การหดตัวแบบแห้งเชิงปริมาตร

ภายใต้สภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 80% พบว่าการหดตัวแบบแห้งเชิงปริมาตรของทั้งคอนกรีตควบคุมและที่เติมเถ้าชานอ้อยแทนที่ 15% 20% และ 25% ลดลง 0.40% 0.35% และ 0.30% ตามลำดับ และเริ่มชะลอและทรงตัวในสัปดาห์ที่ 6 (รูปที่ 4) ผลทดสอบครั้งนี้สนับสนุนฐานว่าคอนกรีตผสมเถ้าชานอ้อยช่วยยับยั้งการหดตัวแบบแห้งได้ดีกว่าคอนกรีตปกติ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาปอชโซลานในเนื้อคอนกรีตทำให้ช่องว่างลดลง [32] และยืนยันจากผลงานวิจัยของ Limbachiya [33] พบว่าคอนกรีตผสม



รูปที่ 4 การหดตัวแบบแห้งเชิงปริมาตรของคอนกรีต

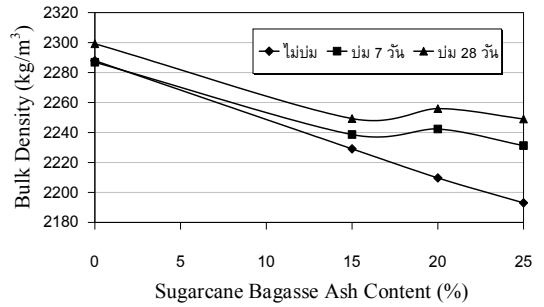
แก้หดตัวใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ

3.3 ความหนาแน่นรวม

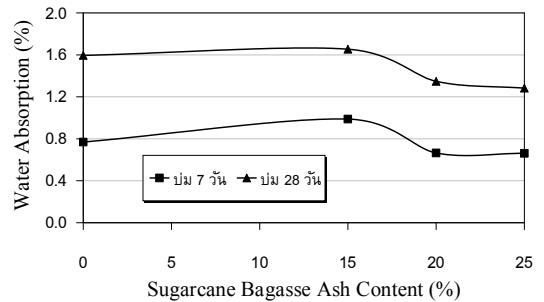
ความหนาแน่นรวมเฉลี่ยของคอนกรีตควบคุมมีความหนาแน่นมากที่สุดประมาณ 2,300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อายุ 28 วัน ส่วนความหนาแน่นน้อยที่สุดคือ 2,193 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ของคอนกรีตเติมเถ้าขานอ้อย 25% ไม่บ่ม ซึ่งแนวโน้มของคอนกรีตมวลรวมเศษขวดแก้วมีค่าความหนาแน่นลดลงตามปริมาณที่เติมเถ้าขานอ้อย เนื่องจากเถ้าขานอ้อยมีค่าความหนาแน่นต่ำเมื่อเติมลงไปแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน จึงทำให้ความหนาแน่นลดลงตามปริมาณเถ้าขานอ้อยที่ใส่ลงไป (รูปที่ 5) นอกจากนี้อิทธิพลของอายุบ่มช่วยให้ความหนาแน่นสูงขึ้น อันเนื่องมาจากเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานขึ้นในเนื้อปูนผสม (20%)

3.4 การดูดซึมน้ำ

พบว่า การดูดซึมน้ำของคอนกรีตทดสอบที่อายุการบ่ม 28 วัน เถ้าขานอ้อยแทนที่ 15% มีค่าการดูดซึมน้ำสูงสุด คือ 1.65% และที่อายุบ่ม 7 วัน ปริมาณเถ้าขานอ้อยแทนที่ 25% มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุดคือ 0.66% โดยแนวโน้มของคอนกรีตใส่เศษขวดแก้วเป็นมวลรวมหยาบ มีการดูดซึมน้ำลดลงตามปริมาณเถ้าขานอ้อย



รูปที่ 5 ความหนาแน่นรวมของคอนกรีตมวลรวมเศษขวดแก้วใส

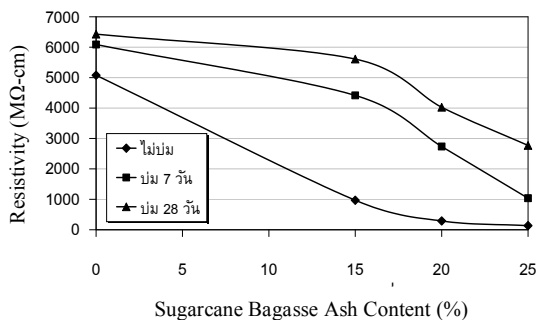


รูปที่ 6 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลรวมจากเศษขวดแก้วใส

(รูปที่ 6) เนื่องจากเถ้าขานอ้อยได้ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับไตรแคลเซียมซัลไฟเกต (C₃S) และไดแคลเซียมซัลไฟเกต (C₂S) ก่อให้เกิดสารแคลเซียมซัลไฟเกตไฮเดรต (CSH) จากปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นทึบ จึงลดการดูดซึมน้ำในคอนกรีต แต่การบ่มนาน ทำให้น้ำซึมเข้าไปในรูพรุนเปิดได้มาก จึงดูดซึมน้ำสูง นอกจากนี้ Limbachiya [33] ว่าคอนกรีตมวลรวมแก้วทดแทนทรายธรรมชาติมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากผิวเศษขวดแก้วเรียบ ทำให้บริเวณรอยต่อระหว่างเศษขวดแก้วกับเนื้อปูนแบบสนิทกัน จึงได้ลดช่องว่างลง

3.5 ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

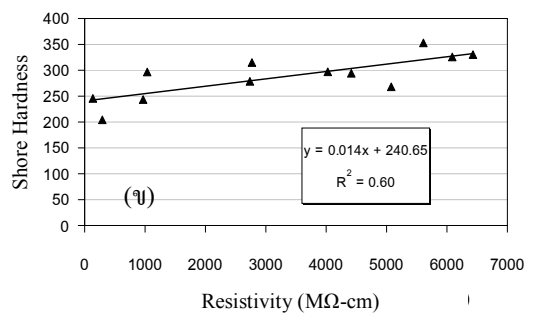
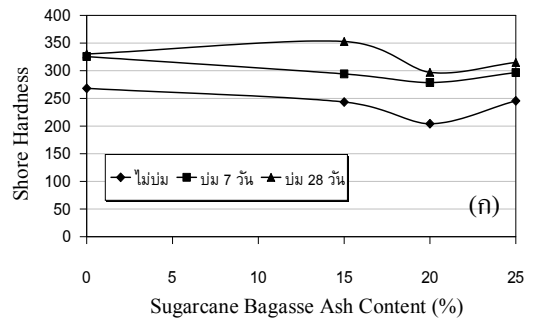
คอนกรีตปกติ อายุบ่ม 28 วัน มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูงสุดเท่ากับ 643.04 เมกะโอห์ม-เซนติเมตร และค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะน้อยที่สุดเท่ากับ 136.31 เมกะโอห์ม-เซนติเมตร ที่ปริมาณเถ้าชานอ้อยแทนที่ 25% ที่ไม่บ่ม (รูปที่ 7) แนวโน้มค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลงตามปริมาณเถ้าชานอ้อยเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณธาตุหลักในเถ้าเพิ่มขึ้นตามปริมาณแทนที่ จึงส่งผลให้การนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อายุบ่มนานขึ้นความต้านทานไฟฟ้าก็ยิ่งเพิ่มขึ้นไป ด้วย เนื่องจากรูพรองอากาศเปิดในผิวเนื้อคอนกรีตมากขึ้น



รูปที่ 7 ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของคอนกรีตมวลรวมเศษขวดแก้วใส

3.6 ความแข็งแรงแบบชอร์

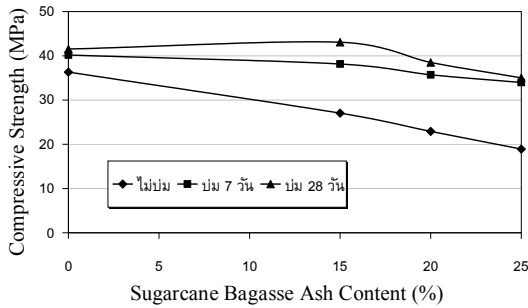
ค่าความแข็งแรงแบบชอร์เฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ 200-350 เมื่อปริมาณเถ้าชานอ้อยเพิ่มขึ้นก็ทำให้ค่าความแข็งแรงมีค่าลดลงและตามระยะเวลาบ่มด้วย ซึ่งที่อัตราส่วนผสมเถ้าชานอ้อย 15% มีค่าความแข็งแรงแบบชอร์สูงสุด (รูปที่ 8 ก) ค่านี้สอดคล้องกับความหนาแน่นและความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (รูปที่ 8 ข) ทั้งนี้เห็นว่าค่านี้ขึ้นกับสมบัติทางกายภาพของเนื้อคอนกรีตโดยตรง



รูปที่ 8 (ก) ความแข็งแรงแบบชอร์ของคอนกรีตมวลรวมเศษขวดแก้วใส และ (ข) สหสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะกับความแข็งแรงแบบชอร์

3.7 กำลั้งอัด

ค่ากำลั้งอัดของคอนกรีตที่ทดลองมีค่าสูงสุด 43.06 เมกะพาสคัล เดิมเถ้าชานอ้อยแทนที่ 15% บ่ม 28 วัน และมีค่ากำลั้งอัดพัฒนาเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม 103.66% แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าชานอ้อยขึ้นไป ค่ากำลั้งอัดลดลงเรื่อยๆ ตามลำดับ และค่ากำลั้งอัดน้อยที่สุดคือ 18.92 เมกะพาสคัล ที่ผสมเถ้าชานอ้อย 25% ไม่บ่ม (รูปที่ 9) ซึ่งการที่เถ้าชานอ้อยปริมาณมากเกินกว่าปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานขึ้นได้ และกำลั้งอัดของคอนกรีตเศษแก้วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม กำลั้งอัดจากการทดลองนี้สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ

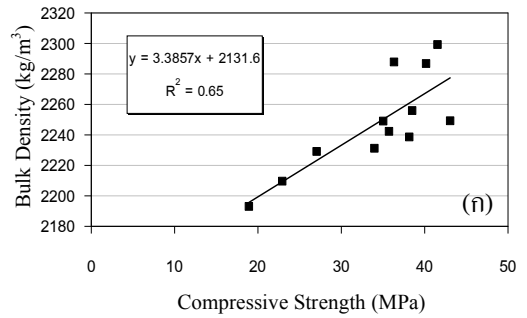


รูปที่ 9 กำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมเศษขูดแก้วใส

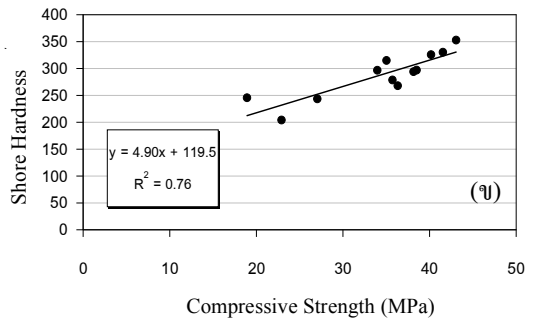
คาวิ [25] ในขณะที่ de Castro and de Brito [34] พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตลดลงตามอัตราการแทนที่ด้วยมวลรวมเศษแก้วสูงขึ้น แต่ Taha and Nounu [35] ศึกษาคอนกรีตใส่เศษแก้วหลายสีกลับไม่พบกำลังอัดแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามคอนกรีตทุกสูตรบ่ม 7 และ 28 วันศึกษาครั้งนี้อยู่ในเกณฑ์ ASTM C618 คือดัชนีกำลังอัดไม่ต่ำกว่า 75% ของคอนกรีตปกติ (ตารางที่ 2) แต่หากพิจารณาเป็นคอนกรีตกำลังสูงก็ได้ส่วนผสมไม่เต็มกับเดิมเข้าชานอ้อย 15% เท่านั้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Ganesan et al. [33] พบว่าสมบัติกำลังอัดมีสหสัมพันธ์อย่างง่าย ในเชิงแปรผันตามกับค่าความหนาแน่นรวม (รูปที่ 10 ก) และกับค่าความแข็งแบบชอร์ (รูปที่ 10 ข)

ตารางที่ 2 การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเศษขูดแก้วใส

BA proportions (%)	Compressive strength		Strength activity index (%)	
	7 วัน	28 วัน	7 วัน	28 วัน
0	40.17	41.54	100	100
15	38.15	43.06	94.97	103.66
20	35.72	38.51	88.92	92.71
25	33.97	35.03	84.57	84.33

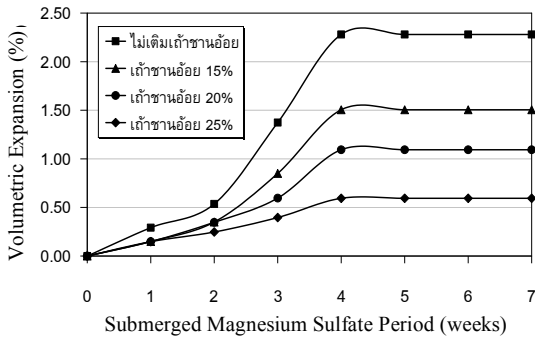


รูปที่ 10 สหสัมพันธ์อย่างง่ายของกำลังอัดกับ (ก) ความหนาแน่นรวม และ (ข) ความแข็งแบบชอร์



3.8 ความคงทนต่อแมงกนีเซียมซัลเฟต

ปริมาตรและน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตใสในสารละลายแมงกนีเซียมซัลเฟตที่อิ่มตัว พบว่าสามารถยับยั้งการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต อันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยากับสารละลายแมงกนีเซียมซัลเฟตให้ช้าลง เข้าชานอ้อยแทนที่เพิ่มมากขึ้นปริมาตรการขยายตัวแตกกลางยังลดลงตามลำดับ เป็นการบ่งถึงว่าเข้าชานอ้อยสามารถเป็นตัวยับยั้งปฏิกิริยาซัลเฟตได้ (รูปที่ 11) สันนิษฐานว่าเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นให้ CSH ทำให้เนื้อคอนกรีตประสานกันแน่นขึ้น และความเป็นด่างมากขึ้น ซึ่งผลจากการทดลองนี้สอดคล้องกับผลงานวิจัยคอนกรีตมวลรวมเศษแก้วของ de Castro

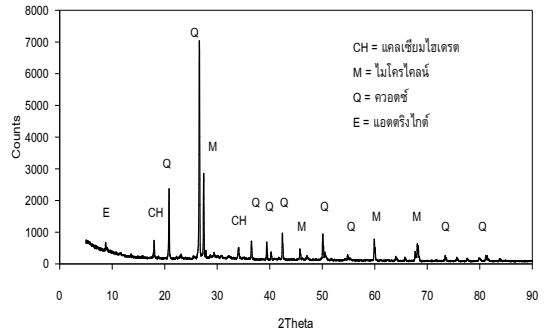


รูปที่ 11 ความคงทนต่อแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตมวลรวมเศษขวดแก้วใสผสมเถ้าขานอ้อย

and de Brito [34] และ Taha and Nounu [35] ต่างก็กล่าวว่าการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กและดินขาวเผาสามารถยับยั้งเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาได้ นอกจากนี้ Topcu and Bilir [19] ได้ใช้เถ้าลอยและลิเทียมคาร์บอเนต (Li_2CO_3) ก็ได้ผลในทำนองเดียวกัน เถ้าขานอ้อยเติมในคอนกรีตมวลรวมหินทั่วไปด้านทานการกัดกร่อนของคลอไรด์ได้ผลค่อนข้างดี [36] ซึ่งพบว่าเถ้าขานอ้อยในงานวิจัยนี้ยังผสมในคอนกรีตหินฮอร์นเฟลด์ช่วยด้านทานสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตได้ดีเช่นกัน [6] ดังนั้นเถ้าขานอ้อยจึงสามารถเติมได้สูงสุดถึง 25% โดยน้ำหนัก อันช่วยยับยั้งสารละลายซัลเฟต

3.9 แร่ประกอบคอนกรีต

ผลวิเคราะห์ชนิดแร่เกิดขึ้นในคอนกรีตมวลรวมเศษขวดแก้วที่ผสมเถ้าขานอ้อย 15% บ่มที่ 28 วัน ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ดังในรูปที่ 12 และปริมาณแร่ที่พบดังกล่าวได้จากคำนวณพื้นที่ใต้กราฟลายพิมพ์นั้นพบว่าปริมาณแร่ประกอบคอนกรีต ได้แก่ ควอตซ์ (Q) 51.28% แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 14.42%

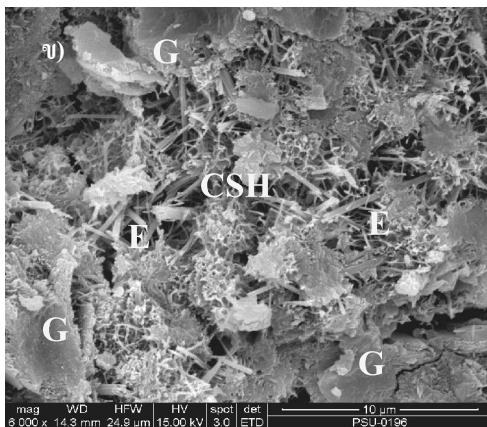


รูปที่ 12 ลายพิมพ์ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของคอนกรีตมวลรวมเศษขวดแก้วใสผสมเถ้า 15% บ่ม 28 วัน

ไมโครไคลน์ (Microcline-M) 16.51% เอททริงไต์ (Ettringite-E) 15.36% และแร่ชนิดอื่นระบุไม่ได้อีก 2.43% ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ยังเหลือตกค้างอยู่นั้นไม่ได้เข้าไปทำปฏิกิริยากับเถ้าขานอ้อยหรืออาจใช้น้อยให้เกิดวุ้นแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) ขึ้น

3.10 โครงสร้างจุลภาค

จากภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโครงสร้างภายในคอนกรีตผสมเถ้าขานอ้อยแทนที่ 15% อายุการบ่มที่ 28 วัน โดยเน้นภาพบริเวณตะเข็บระหว่าง (interfacial transition zone) มวลรวมเศษแก้ว (G) กับเนื้อวัสดุประสานของคอนกรีต พบก้อนเข็มล้อมรอบคล้ายหอยเม่นของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (calcium silicate hydrate -CSH) รูปทรงคล้ายเข็มของเอททริงไต์ (E) และรูโพรง (V) เกิดขึ้นดังในรูปที่ 13 ซึ่งช่วยสนับสนุนว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าขานอ้อย 15% ได้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานขึ้น จนมีผลให้พัฒนาสมบัติทางกายภาพและกำลังอัดเปลี่ยนแปลงไปในแง่ดีขึ้น



รูปที่ 12 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโครงสร้างภายในคอนกรีตมวลรวมเศษขวดแก้วกำลังขยาย ก) 5,000 เท่า ข) 6,000 เท่า และ ค) 6000 เท่า

4. สรุปผล

เจ้าหน้าที่จากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลที่นำมาใช้ในการทดลองในครั้งนี้มีผลรวมขององค์ประกอบทางเคมี $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 = 69.84\%$ แต่มีค่า LOI = 21.01% จึงไม่สามารถเทียบเคียงได้กับเกณฑ์ของสารปอซโซลานชนิด C ตาม ASTM C618 ได้ ตรวจสอบระยะเวลาการก่อตัวพบว่าชะลอการก่อตัวเล็กน้อย [28]

สมบัติทางกายภาพของคอนกรีตมวลรวมเศษขวดแก้วผสมเถ้าขี้เถ้าได้แก่ ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ การหดตัวแบบแห้งเชิงปริมาตร ความแข็งแรงแบบชอร์ ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ และความคงทนต่อสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อิ่มตัว พบว่าให้ค่าในแง่บวก ส่วนกำลังอัดคอนกรีต พบว่าเมื่อปริมาณเถ้าขี้เถ้าแทนที่ 15% อายุบ่ม 28 วัน ค่ากำลังอัดสูงสุดนอกนั้นได้ค่าต่ำกว่าแต่ไม่เกิน 75% ของค่าคอนกรีตควบคุม (ตารางที่ 2) ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคที่พบว่ามีแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ขึ้นในเนื้อคอนกรีต (รูปที่ 12)

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยได้รับการสนับสนุนจากหน่วยวิจัยเทคนิคและวัสดุก่อสร้างนวัตกรรม ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Office of Agricultural Economics, “Agricultural Statistic of Thailand 2012-13”, Retrieved www2.oae.go.th/mis/Forecast/02_journal/-forecast3-2555.pdf, Nov 24, 2013. (in Thai)

- [2] National Energy Policy Office, “Promotion of Using Energy from Biogas of Thailand”, Journal of National Energy Policy Office (NEPO Journal) 55 (1), 2002, <http://www.eppo.go.th/vrs/VRS55-06-biomass.html>, Retrieved Nov 24, 2013. (in Thai)
- [3] Energy for Environment Foundation, “Renewable Energy-Biogas”, Retrieved <http://www.efe.or.th/efe-book.php>, Nov. 24, 2013. (in Thai)
- [4] D. Intharasena, “Sugar Cane Bagasse Ash Use as Material in Stabilized Soil”, Journal of Material Exchange Center (JMEC), T-107. (in Thai)
- [5] D. Tonnayopas, “Green Building Bricks Made with Clays and Sugar Cane Bagasse Ash”, The 11th Conference on Mining, Materials and Petroleum Engineering and the 7th International Conference on Earth Resources Technology, Nov. 11-13, Chiang Mai, Thailand, pp. 7-14.
- [6] D. Tonnayopas, P. Tongkamkaew and C. Aedpan, “Aggregate Properties of Hornfels in Concrete Blended with Sugar Cane Bagasse Ash”, The 22nd Thaksin University Annual Conference, the 60th Anniversary of His Majesty the King’s Accession to the Throne International Convention Center, Hat-Yai, 2012. (in Thai)
- [7] W.T. Seangchan, “Development of Lightweight Brick from Waste Glass”, Department of Science Service Journal 57 (179), pp. 46-52. (in Thai)
- [8] Glass Filtration Media, GlassAdvantage 230 15th St NW West Fargo, ND 58078, <http://www.glassadvantageinc.com>, Retrieved Dec 7, 2013.
- [9] Glass Abrasive Powder, Recycled, from READE, READE Co., Ltd., <http://www.reade.com/home/about-read/10449>, Retrieved Dec 7, 2013.
- [10] A. Tucci, L. Esposito, E. Rastelli, C. Palmonari and E. Rambald, “Use of Soda-Lime Scrap-Glass as a Fluxing Agent in a Porcelain Stoneware Tile Mix”, Journal of the European Ceramic Society 24 (1), 2004, pp. 83-92.
- [11] A.H. Jony, M.F. Al-Rubaie and I.Y. Jahad, “The Effect of Using Glass Powder Filler on Hot Asphalt Concrete Mixtures Properties”, Eng. & Tech. Journal 29 (1), 2011, pp. 44-57.
- [12] C.S. Lam, C.-S. Poon and D. Chan, “Enhancing the Performance of Pre-Cast Concrete Blocks by Incorporating Waste Glass –ASR Consideration”, Cement & Concrete Composites 29 (8), 2007, pp. 616–625.
- [13] V. Corinaldesi, G. Gnappi, G. Moriconi and A. Montenero, “Reuse of Ground Waste Glass as Aggregate for Mortars”, Waste Management 25 (2), 2005, pp. 197–201.
- [14] O. Ozkan and I. Yuksel, “Studies on Mortars Containing Waste Bottle Glass and Industrial by-Products”, Construction and Building Materials 22 (6), 2008, pp. 1288–1298.

- [15] S.B. Park, B.-C. Lee and K.-J. Hwan, “Studies on Mechanical Properties of Concrete Containing Waste Glass Aggregate”, *Cement and Concrete Research* 34 (12), 2004, pp. 2181–2189.
- [16] A. Shayan and A. Xu, “Value-Added Utilisation of Waste Glass in Concrete”, *Cement and Concrete Research* 34 (1), 2004, pp. 81-89.
- [17] K.H. Tan and H. Du, “Use of Waste Glass as Sand in Mortar: Part I – Fresh, Mechanical and Durability Properties”, *Cement and Concrete Composites* 35 (1), 2013, pp. 109-117.
- [18] C. Shi and K. Zheng, “A Review on the Use of Waste Glasses in the Production of Cement and Concrete”, *Resources, Conservation and Recycling* 52 (2), 2007, pp. 234–247.
- [19] I.B. Topcu and T. Bilir, “Alkali–Silica Reactions of Mortars Produced by Using Waste Glass as Fine Aggregate and Admixtures such as Fly Ash and Li_2CO_3 ”, *Waste Management* 28 (5), 2008, pp. 878–884.
- [20] K. Yildirim and M. Sümer, “Effects of Sodium Chloride and Magnesium Sulfate Concentration on the Durability of Cement Mortar with and Without Fly Ash”, *Composites Part B: Engineering* 52, 2013, pp. 56-61.
- [21] A.M. Diab, A.E.M. Awad, H.E. Elyamany and A. E.M.A. Elmoaty, “Guidelines in Compressive Strength Assessment of Concrete Modified with Silica Fume due to Magnesium Sulfate Attack”, *Construction and Building Materials* 36, 2012, pp. 311-318.
- [22] N.M. Al-Akhras, “Durability of Metakaolin Concrete to Sulfate Attack”, *Cement and Concrete Research* 36 (9), 2006, pp. 1727-1734.
- [23] H. Biricik, F. Aköz, F. Türker and I. Berktaş, “Resistance to Magnesium Sulfate and Sodium Sulfate Attack of Mortars Containing Wheat Straw Ash”, *Cement and Concrete Research* 30 (8), 2000, pp. 1189-1197.
- [24] C. Meyer, “The Greening of the Concrete Industry”, *Cement and Concrete Composites* 31 (8), 2009, pp. 601–605.
- [25] K. Montakarntiwong, “Effect of Loss on Ignition on Compressive Strength and Heat of Concrete Containing Bagasse Ash”, M Thesis, KMUTT, 2003. (in Thai)
- [26] V.S. Batra, S. Urbonaitė and G. Svensson, “Characterization of unburned carbon in bagasse fly ash”, *Fuel* 87 (13–14), 2008, pp. 2972-2976.
- [27] G.C. Cordeiro, R.D. Toledo Filho and E.M.R. Fairbairn, “Effect of Calcination Temperature on the Pozzolanic Activity of Sugar Cane Bagasse Ash”, *Construction and Building Materials* 23 (10), 2009, pp. 3301-3303.
- [28] ASTM C191, “Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle”, 2009.

- [29] ASTM C1403, “Standard Test Method for Rate of Water Absorption of Masonry Mortars”, 2012.
- [30] ASTM C1012/C1012M-13, “Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution”, 2013.
- [31] ASTM C39/C39M-12a, “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”, 2012.
- [32] K. Ganesan, K. Rajagopal and K. Thangavel, “Evaluation of Bagasse Ash as Supplementary Cementitious Material”, *Cement and Concrete Composites* 29 (6), 2007, pp. 515–524.
- [33] M.C. Limbachiya, “Bulk Engineering and Durability Properties of Washed Glass Sand Concrete”, *Construction and Building Materials* 23 (2), 2009, pp. 1078-1083.
- [34] S. de Castro and J. de Brito, “Evaluation of the Durability of Concrete Made with Crushed Glass Aggregates”, *Journal of Cleaner Production* 41, 2013, pp. 7-14.
- [35] B. Taha and G. Nounu, “Properties of Concrete Contains Mixed Colour Waste Recycled Glass as Sand and Cement Replacement”, *Construction and Building Materials* 22 (5), 2008, pp. 713-720.
- [36] R.E. Núñez-Jaquez, J.E. Buelna-Rodríguez, C.P. Barrios-Durstewitz, C. Gaona-Tiburcio and F. Almeraya-Calderón, “Corrosion of Modified Concrete with Sugar Cane Bagasse Ash”, *International Journal of Corrosion*, 2012.