

ปัจจัยที่มีผลต่อการรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม

Factors Affecting Compressive Strength of Geopolymer Concrete from Bagasse Ash Mixed with Aluminum Dust

พิพรรณ อินปลัด และ สหलग หอมวุฒิมังค์*
Pipat Inpalad and Sahalaph Homwuttivong*

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
Division of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University

*Corresponding author; E-mail address: sahalaph.h@msu.ac.th

(Received: May 7, 2020, Revised: October 2, 2020, Accepted: October 7, 2020)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายที่จะใช้ประโยชน์จากเถ้าชานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานน้ำตาลมาเป็นวัสดุตั้งต้นผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต เถ้าชานอ้อยจาก 2 แหล่ง ถูกนำมาปรับปรุงความละเอียดด้วยการบด เนื่องจากเถ้าชานอ้อยมีองค์ประกอบของอลูมินาที่ค่อนข้างต่ำ จึงนำเศษอะลูมิเนียมที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมก่อสร้างมาเติมอลูมินาในจีโอโพลิเมอร์ โดยแทนที่เถ้าชานอ้อยด้วยเศษอะลูมิเนียม ร้อยละ 0-1.0 โดยน้ำหนัก แปรผันอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/BA) อยู่ในช่วง 0.50-0.65 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิในการบ่มตัวอย่าง 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส ผลการวิจัยพบว่าแหล่งของเถ้าชานอ้อยนั้นมีผลอย่างมากต่อการรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต การแทนที่เถ้าชานอ้อยด้วยเศษอะลูมิเนียมที่ร้อยละ 0.40 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูงสุด อัตราส่วน AL/BA ที่มีค่าต่ำมีแนวโน้มทำให้กำลังรับแรงอัดสูงแต่ค่าการยุบตัวของคอนกรีตต่ำลง และการบ่มที่อุณหภูมิสูงทำให้กำลังรับแรงอัดสูงในช่วงอายุต้น อย่างไรก็ตามเมื่ออายุคอนกรีตมากขึ้น จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในระดับอุณหภูมิต่างๆ มีค่ากำลังรับแรงอัดในระดับใกล้เคียงกัน กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากงานวิจัยนี้มีกำลังสูงถึง 300 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

คำสำคัญ: เถ้าชานอ้อย, สารละลายอัลคาไลน์, จีโอโพลิเมอร์, กำลังรับแรงอัด

Abstract

The aim of this research is utilization the bagasse ash, a waste material from sugar factories, as a precursor to producing geopolymer concrete. According to the bagasse ash has a lot of silica elements but has little alumina therefore use aluminum dust as waste material to add alumina in the geopolymer with bagasse ash as raw materials. This research uses bagasse ash from 2 sources, replacing bagasse ash with aluminum dusts 0-1.0% by weight. Ratios of alkaline solution to source material (AL/BA) 0.50-0.65 by weight. Curing temperatures of sample were 60, 80 and 100 °C. From the research, the source of bagasse ash greatly affected the compressive strength of geopolymer concrete. The replacement of bagasse ash with suitable aluminum dusts was 0.40% by weight made the highest compressive strength. The low AL/BA ratios tended to give higher compressive strength but decreased the slump. The high temperature curing effected on the high compressive strength of concrete at early age. However, at any curing temperatures, the compressive strength were similar as the later age of concrete samples. The compressive strength of geopolymer concrete from this research reached to 300 ksc.

Keywords: bagasse ash, alkaline solution, geopolymer, compressive strength

1. บทนำ

งานก่อสร้างทั่วโลกนิยมใช้คอนกรีตเป็นส่วนประกอบหลัก คอนกรีตโดยทั่วไปมีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นหนึ่งในองค์ประกอบหลัก การผลิตปูนซีเมนต์นั้นใช้พลังงานจำนวนมาก เริ่มตั้งแต่กระบวนการการระเบิดวัสดุต้นแหล่ง การย่อย การลำเลียง การเผา จนถึงการผลิตให้ละเอียด มีรายงานระบุว่า การผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน จะก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาประมาณ 1 ตันเช่นกัน (Rattanasak & Chindaprasirt, 2008) ปัจจุบันเหล่านักวิจัยจึงมีแนวคิดที่จะคิดค้นวัสดุมาทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์และการผลิตคอนกรีตโดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์ เช่น ปอซโซลานคอนกรีต (Pozzolanic concrete) จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (Geopolymer concrete) เป็นต้น สำหรับจีโอโพลิเมอร์ประกอบด้วยวัสดุปอซโซลานซึ่งเป็นวัสดุที่มีซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก ทำหน้าที่คล้ายปูนซีเมนต์ วัสดุปอซโซลานจะทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลน์ที่มีสถานะความเป็นด่างสูง โดยอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินา ส่วนสารประกอบซิลิกेटเติมเพื่อช่วยเพิ่มปริมาณซิลิกาให้พร้อมทำปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน ได้สารเชื่อมประสาน (Wongpa, 2009) เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์กับน้ำ จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตปล่อยก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์น้อยกว่าคอนกรีตทั่วไปประมาณร้อยละ 9 (Turner & Collins, 2013) ในแง่ของการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การพัฒนาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเพื่อทดแทนคอนกรีตทั่วไปนั้นจำเป็นต้องใช้วัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จำพวกวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น เถ้าลอย (Fly ash) เถ้าชานอ้อย (Bagasse ash) และเถ้าแกลบ (Rice husk ash) เป็นต้น การนำวัสดุเหล่านี้มาใช้ประโยชน์จะช่วยลดปัญหาข้างต้นได้และยังเป็นวัสดุทางเลือกที่กำลังนิยมในปัจจุบัน

หนึ่งในวัสดุเหลือทิ้งที่น่าสนใจที่จะนำมาเป็นวัสดุตั้งต้นจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตคือ เถ้าชานอ้อย โดยเถ้าชานอ้อยนั้นเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมน้ำตาลและไฟฟ้า ในปี พ.ศ.2560 ประเทศไทย มีปริมาณเถ้าชานอ้อยที่ใช้ในกระบวนการผลิตประมาณ 105 ล้านตันต่อปี (Office of the Cane and Sugar Board, Ministry of Industry Thailand, 2016) หลังจากกระบวนการผลิตน้ำตาลเกิดกากอ้อยนำไปเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานความร้อนและแปรรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าเมื่อผ่านกระบวนการเผา จะเหลือเถ้าชานอ้อยร้อยละ 0.62 ของน้ำหนักอ้อย (Fairbairn et al., 2010) หรือประมาณ 651,000 ตันต่อปี และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เถ้าชานอ้อยที่เหลือนี้บางส่วนเกษตรกรนำไปคั่วคุณภาพของดิน แต่ปริมาณยังน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้น และส่วนใหญ่จะถูกนำไปกำจัดโดยการถม จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีพบว่าเถ้าชานอ้อยมีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซ

ลาน องค์ประกอบหลักทางเคมี คือ ซิลิกาและอลูมินา อยู่ในรูปออสฐาน (Witoteerasan et al., 2014) นำมาเป็นวัสดุตั้งต้นการผลิตวัสดุประสานที่เรียกว่าจีโอโพลิเมอร์ได้ เถ้าชานอ้อยจากแหล่งแตกต่างกันมีองค์ประกอบธาตุที่แตกต่างกัน (Villar-Cocifta et al., 2008; Chusilp et al., 2009; Ganesan & Rajagopal, 2007)

งานวิจัยนี้มุ่งหมายที่จะผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตโดยใช้เถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุตั้งต้น โดยนำมาบดละเอียดจะทำให้มีความเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีขึ้น (Singh et al., 2000; Cordeiro et al., 2008; Somna & Jaturapitakkul, 2011) แต่เถ้าชานอ้อยนั้นมีส่วนประกอบของซิลิกาสูงแต่มีอลูมินาน้อย อาจไม่เพียงพอต่อความสมบูรณ์ของเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน ที่จะเกิดเป็นโครงสร้าง 3 มิติ ของอลูมินตและซิลิกेटกลายเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างแข็งแรง มีสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดสูง (Chindaprasirt et al., 2008; Rukzon & Ngenprom, 2010; Zhou et al., 2016) จึงใช้เศษอะลูมิเนียมที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการก่อสร้างประตูและหน้าต่างอะลูมิเนียมเพื่อเติมอลูมินาในจีโอโพลิเมอร์ โดยอะลูมิเนียมสามารถละลายได้ในสถานะที่เป็นด่างเข้มข้น จึงใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นส่วนประกอบในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มาเป็นสารละลายอะลูมิเนียมเพื่อให้ได้อลูมินาในจีโอโพลิเมอร์ ทั้งนี้ยังศึกษาปัจจัยอื่นที่อาจส่งผลต่อจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ได้แก่ แหล่งที่มาของเถ้าชานอ้อย ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ และอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่ม โดยมุ่งเน้นการพัฒนา กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

2. เครื่องมือและวิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการผลิตตัวอย่างทดสอบ

2.1.1 วัสดุตั้งต้น

เถ้าชานอ้อยจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล 2 แหล่ง ได้แก่ เถ้าชานอ้อยจากจังหวัดกาฬสินธุ์ (แหล่ง A) และเถ้าชานอ้อยจากจังหวัดมหาสารคาม (แหล่ง B) แสดงดังรูปที่ 1(ก) และ 1(ข) ตามลำดับ เถ้าชานอ้อยทั้ง 2 แหล่ง นำมาปรับปรุงโดยการบดเพื่อลดขนาด โดยบดให้มีความละเอียดค่าตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เถ้าชานอ้อยบดวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ภาพถ่ายขยายกำลังสูง แสดงให้เห็นขนาดและลักษณะรูปร่างที่มีเหลี่ยมมุมของเถ้าชานอ้อยจากแหล่ง A และ B แสดงในรูปที่ 2(ก) และ 2(ข) ตามลำดับ ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติเบื้องต้นของเถ้าชานอ้อยจากแหล่ง A และ B แสดงดังตารางที่ 1

เศษอะลูมิเนียมจากงานก่อสร้างและตกแต่งอาคาร นำมา ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 20 แสดงดังรูปที่ 1(ค)

2.1.2 วัสดุผสม

มวลรวมละเอียดใช้ทรายที่มีโมดูลัสความละเอียด 2.6-2.7 และมวลรวมหยาบใช้หินปูนย่อยขนาด 3/8 นิ้ว

2.1.3 สารละลายอัลคาไลน์

สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ชนิดเกล็ด มีความบริสุทธิ์ ร้อยละ 99 เตรียมให้มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ โดยการละลาย ด้วยน้ำกลั่น โดยเตรียมก่อนการนำมาผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) องค์ประกอบทางเคมี Na_2O ร้อยละ 15.32 SiO_2 ร้อยละ 32.87 และ H_2O ร้อยละ 51.81 โดยน้ำหนัก



(ก)

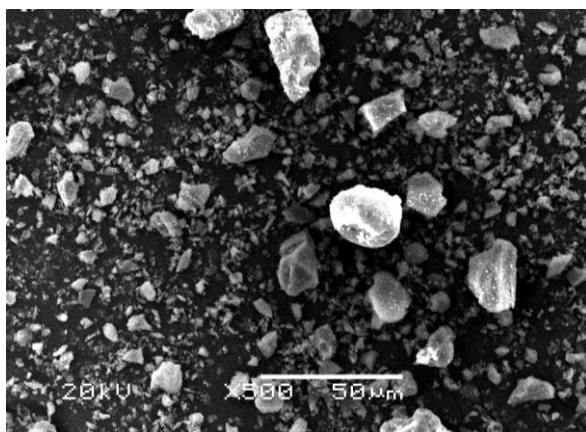


(ข)

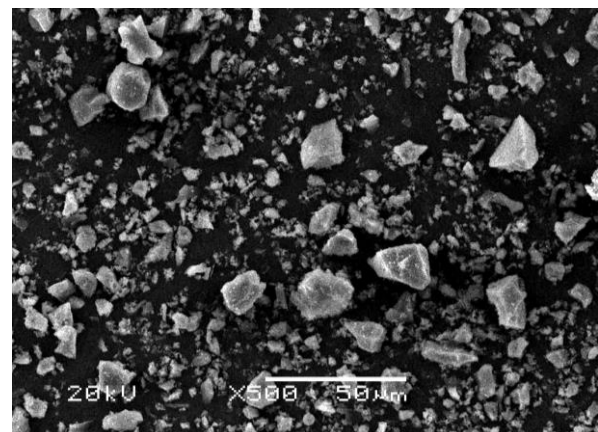


(ค)

รูปที่ 1 (ก) ถ้ำขานอ้อยแห้ง A (ข) ถ้ำขานอ้อยแห้ง B และ (ค) เศษอลูมิเนียมร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง ของถ้ำขานอ้อยบด (ก) แหล่ง A และ (ข) แหล่ง B

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติเบื้องต้นของถ้ำขานอ้อย แหล่ง A และ B

BA Source	Chemical composition						Specific gravity,		Absorption of BA after grinding	Loss on Ignition (%)
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	K_2O	SO_3	Before grinding	After grinding		
A	77.57	4.15	4.66	3.72	3.08	0.80	1.92	2.35	8.7	12.7
B	59.56	4.30	4.06	15.41	7.10	0.09	1.79	2.18	14.3	18.3

2.2 ส่วนผสมและการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

ถ้ำขานอ้อยจาก 2 แหล่ง นำมาเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิต ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต มีส่วนผสมต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร โดยประมาณ คือ ถ้ำขานอ้อย 408 กิโลกรัม มวลรวมละเอียด

551 กิโลกรัม มวลรวมหยาบ 1,224 กิโลกรัม (อัตราส่วน ถ้ำขานอ้อย : มวลรวมละเอียด : มวลรวมหยาบ เท่ากับ 1.00 : 1.35 : 3.00 โดยน้ำหนัก)

การผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเริ่มต้นจากการนำอะลูมิเนียมมาทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Leaching) แล้วนำไปผสมกับเถ้าขานอ้อยที่เตรียมไว้ในเครื่องผสมคอนกรีต จากนั้นเติมทราย สารละลายโซเดียมซิลิเกต และหิน ผสมต่อเนื่องให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำไปหล่อในแบบทรงกระบอกขนาด 10x20 เซนติเมตร ปิดด้วยพลาสติกฟิล์มวางไว้ในห้องปฏิบัติการก่อนเข้าบ่ม 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มตามอุณหภูมิที่กำหนดในตู้อบเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อนำออกจากตู้อบแล้ว นำมาบ่มในอุณหภูมิห้องจนครบอายุการทดสอบ ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเปรียบเทียบกับซีเมนต์คอนกรีตแสดงดังรูปที่ 3



(ซ้าย)จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (ขวา)ซีเมนต์คอนกรีต
รูปที่ 3 ก่อนตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

2.3 การศึกษาปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด

ตารางที่ 2 แสดงปัจจัยและตัวแปรคาดว่าจะส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การศึกษผลจากการใช้เถ้าขานอ้อยที่แตกต่างกัน 2 แหล่ง และศึกษผลของการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยเศษอะลูมิเนียมร้อยละ 0 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 โดยน้ำหนัก ตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 1-6 พิจารณาเปรียบเทียบผลของการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยเศษอะลูมิเนียมที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดจากเถ้าขานอ้อยแหล่ง A ส่วนผสมลำดับที่ 7-12 พิจารณาเปรียบเทียบผลของการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยเศษอะลูมิเนียมที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดจากเถ้าขานอ้อยแหล่ง B ทั้งนี้ส่วนผสมที่ 1-12 ยังพิจารณาเปรียบเทียบผลของการใช้เถ้าขานอ้อยที่แตกต่างกันจาก 2 แหล่ง ที่มีส่วนผสมอื่น ๆ เท่ากัน เช่นตัวอย่างทดสอบที่ 1 เทียบกับ 7 เป็นต้น จากการทดลองส่วนแรกนี้พบว่าส่วนผสมลำดับที่ 3 ที่ใช้เถ้าขานอ้อยจากแหล่ง A มีกำลังรับแรงอัดสูงสุด จึงใช้ส่วนผสมลำดับที่ 3 นี้เป็นส่วนผสมหลักเพื่อเปรียบเทียบปัจจัยศึกษาอื่นๆ

ตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 3 13 14 และ 15 เปรียบเทียบผลของปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ที่มีต่อกำลังรับแรงอัด โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/BA) เท่ากับ 0.50 0.55 0.60 และ 0.65 โดยน้ำหนัก สารละลายอัลคาไลน์ที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ เท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 3 16 และ 17 เปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มโดยบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส

2.4 การทดสอบ

2.4.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของกรีต

คอนกรีตเป็นวัสดุที่สามารถรับแรงอัดได้ดี และยังเป็นสมบัติที่บ่งชี้ถึงคุณภาพของคอนกรีต ทั้งในด้านความแข็งแรง ความทนทาน และคุณสมบัติด้านอื่นๆ กำลังรับแรงอัดที่แสดงเป็นกำลังอัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบแบบทำลายแท่งตัวอย่างมาตรฐานซึ่งมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ แบบหล่อทรงกระบอก (Cylinders) และแบบหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ (Cube) ตัวอย่างคอนกรีตจะต้องอยู่ในสภาพอิมมัวผิวแห้ง ปิดผิวส่วนด้านบนตัวอย่างให้เรียบ และวางตัวอย่างบนแท่นเครื่องทดสอบให้อยู่ตรงกลางเครื่องทดสอบแรงอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) กดตัวอย่างด้วยอัตราเร็ว 0.15-0.35 เมกะปาสคาลต่อวินาที (ASTM C-39/C39M) จนกระทั่งตัวอย่างแตกเสียหาย ทำการบันทึกค่าแรงกดและคำนวณหากำลังอัดของตัวอย่างโดยใช้ค่าแรงกดหารด้วยหน้าตัดการรับแรงของตัวอย่าง ลักษณะการวิบัติของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตทรงกระบอกหลังการทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบแรงอเนกประสงค์ ตัวอย่างแตกแบบผสม (Combination shear and splitting failure) ซึ่งเกิดจากการแตกออกเป็นรูปกรวยคู่ (Shear failure) กับการแตกแบบแยกออก (Splitting failure) แสดงดังรูปที่ 4

2.4.2 การทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต

การทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต เพื่อตรวจสอบความสามารถได้ของคอนกรีต (Workability) ค่าการยุบตัวไม่ได้เป็นค่าที่วัดความสามารถได้ของคอนกรีตโดยตรง แต่เป็นการวัดความชื้นเหลวของคอนกรีต (Consistency) หรือลักษณะการไหลตัวของคอนกรีต (Flow characteristic) ชุดทดสอบความชื้นเหลวของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 143 วิธีทดสอบการยุบตัวของคอนกรีตตาม มทข.(ท) 103 : มาตรฐานการทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต การทดสอบทำโดยตักคอนกรีตใส่ลงในโคนที่มีลักษณะเป็นกรวยยอดตัดให้ได้

3 ชั้น โดยให้แต่ละชั้นมีปริมาตรเท่ากัน และกระทุ้งด้วยเหล็กที่ละชั้นแล้วจึงยกโคนขึ้นอย่างช้าๆ คอนกรีตจะยุบตัวลงด้วยน้ำหนักของตัวเอง ความสูงที่ยุบตัวของคอนกรีตที่วัดได้ถือว่าเป็นค่ายุบตัวของคอนกรีต ซึ่งเกณฑ์การตัดสินและความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้เป็นไปตาม มทข. 101-2533 : มาตรฐานงานคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก

ตารางที่ 2 สรุปรายละเอียดการทดลอง

No.	BA Source	Replace bagasse ash with aluminum dust (%)	AL/BA	Curing temperature (°C)
1	A	0.00	0.60	60
2	A	0.20	0.60	60
3	A	0.40	0.60	60
4	A	0.60	0.60	60
5	A	0.80	0.60	60
6	A	1.00	0.60	60
7	B	0.00	0.60	60
8	B	0.20	0.60	60
9	B	0.40	0.60	60
10	B	0.60	0.60	60
11	B	0.80	0.60	60
12	B	1.00	0.60	60
13	A	0.4	0.50	60
14	A	0.4	0.55	60
15	A	0.4	0.65	60
16	A	0.4	0.60	80
17	A	0.4	0.60	100

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 แหล่งของเถ้าขานอ้อย

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 3 7 และ 28 วัน จากการใช้เถ้าขานอ้อย 2 แหล่ง แสดงดังตารางที่ 3 และรูปที่ 5 เมื่อพิจารณาจากทั้ง 2 แหล่งที่มาของเถ้าขานอ้อย พบว่าในอัตราส่วนผสมเดียวกันจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยแหล่ง A มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยแหล่ง B ค่อนข้างมาก จากการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพเบื้องต้นแสดงดังตารางที่ 1 ผลทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยทั้ง 2 แหล่ง ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence,

XRF) พบว่าองค์ประกอบของธาตุซิลิกา (SiO_2) ของเถ้าขานอ้อยแหล่ง A มากกว่าแหล่ง B โดยมีธาตุซิลิกา ร้อยละ 77.55 และ 59.56 ตามลำดับ ปริมาณของซิลิกามีผลต่อปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน โดยสารละลายอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับวัสดุที่มีองค์ประกอบซิลิกาและอลูมินาเป็นหลัก เกิดโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสาน (Wongpa, 2009) ปริมาณของซิลิกาของแหล่ง A ที่มากกว่าแหล่ง B จึงส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยแหล่ง A มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่า จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยแหล่ง B



รูปที่ 4 ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบแรงกดแรงดึง

จากผลทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ พบว่าเถ้าขานอ้อยหลังผ่านการบดของแหล่ง A มีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าแหล่ง B คือ 2.35 และ 2.18 ตามลำดับ เมื่อทำการทดสอบค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา โดยนำเถ้าขานอ้อยมาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที พบว่าเถ้าขานอ้อยแหล่ง A มีค่าการสูญเสียมวลจากการเผาร้อยละ 12.7 ซึ่งน้อยกว่าเถ้าขานอ้อยจากแหล่ง B ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ

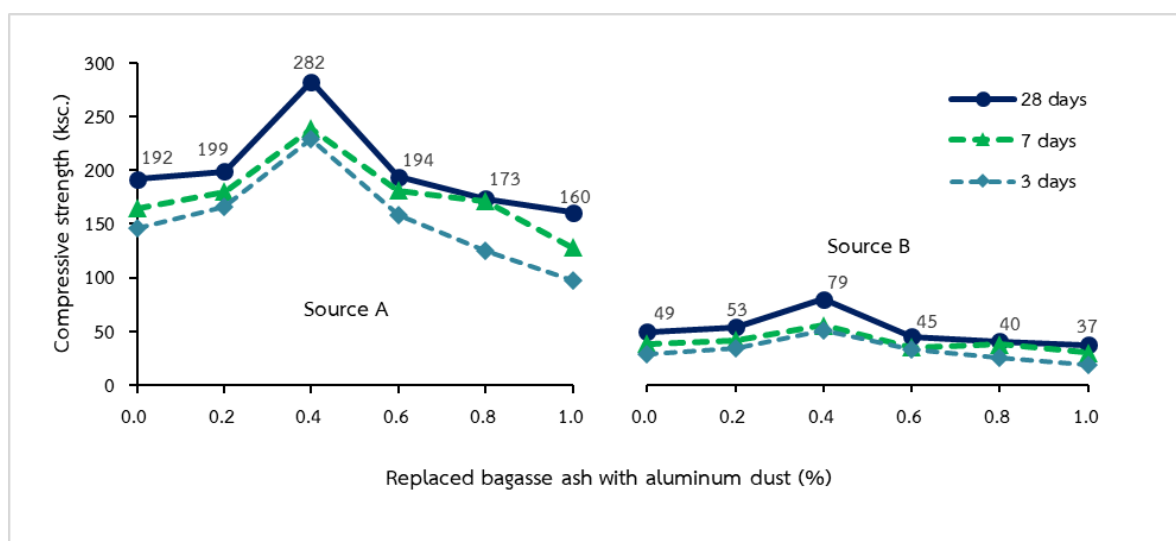
18.3 ทั้งนี้การที่เถ้าขานอ้อยแหล่ง B ที่มีค่าการสูญเสียมวลจากการเผาค่อนข้างสูงนั้นหมายถึง การมีปริมาณของคาร์บอนหรือกากขานอ้อยที่เผาไหม้ไม่หมดสูงกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเถ้าขานอ้อย การเหลือของคาร์บอนหรือกากขานอ้อยก็จะส่งผลต่อการดูดน้ำและปริมาณน้ำที่เหลือจริงในส่วนผสม (Sujavanich, 2003) ค่าการดูดน้ำของเถ้าขานอ้อยแหล่ง A และ B มีค่าร้อยละ 8.7 และ 14.3 ตามลำดับ เถ้าขาน

อ้อยที่มีค่าการดูดซึมน้ำสูงส่งผลต่อเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (Sujavanich, 2003) ทำให้โครงสร้างจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าขานอ้อยแหล่ง B ไม่แข็งแรงเท่าแหล่ง A และเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน จากทุกส่วนผสม พบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าขานอ้อยแหล่ง A มีกำลังรับแรงอัดมากกว่าแหล่ง B มากกว่า 3.5 เท่า

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อย 2 แหล่ง และผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยเศษอะลูมิเนียม

No.	Source of bagasse ash	Replace bagasse ash with aluminum dust (%)	Slump (cm.)	Average compressive strength/Normalized		
				ksc./ (%)		
				3 days	7 days	28 days
1	A	0.0	5.5-8.5	146/(100)	164/(100)	192/(100)
2		0.2	5.0-7.5	166/(114)	180/(109)	199/(104)
3		0.4	4.5-7.5	229/(157)	238/(145)	282/(147)
4		0.6	4.5-7.0	158/(109)	181/(110)	194/(101)
5		0.8	4.0-5.5	124/(85)	171/(104)	173/(90)
6		1.0	2.5-3.5	98/(67)	128/(78)	160/(84)
7	B	0.0	5.5-9.0	28/(100)	38/(100)	49/(100)
8		0.2	5.0-8.5	34/(122)	41/(109)	53/(109)
9		0.4	5.0-7.5	50/(178)	55/(145)	79/(162)
10		0.6	4.5-7.5	32/(116)	35/(92)	45/(91)
11		0.8	4.5-6.0	25/(91)	37/(98)	40/(81)
12		1.0	3.0-4.0	19/(67)	29/(78)	37/(75)

*Maximum compressive strength at 28 days of age is 282 ksc.



รูปที่ 5 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากผลของแหล่งที่มาเถ้าขานอ้อย และผลของการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยเศษอะลูมิเนียม

3.2 การแทนที่ด้วยเศษอะลูมิเนียม

ผลของการแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยเศษอะลูมิเนียมพิจารณาจากตารางที่ 3 และรูปที่ 5 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 3 7 และ 28 วัน โดยเปลี่ยนแปลงการแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยเศษอะลูมิเนียม ร้อยละ 0-1 โดยน้ำหนัก จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแสดงให้เห็นว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าขาน้อยทั้ง 2 แหล่ง สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามอายุ มีแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยเศษอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 และ 0.4 โดยน้ำหนัก และกำลังรับแรงอัดต่ำลงเมื่อการแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยเศษอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นที่ร้อยละ 0.60 0.80 และ 1.00 และจากการทดลองพบว่าเมื่อการแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยเศษอะลูมิเนียมมากขึ้นจะทำให้ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีความสามารถในการทำงานได้ลดลง (ส่วนผสมคอนกรีตมีความเหนียวมากขึ้น) ดังนั้นการแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยเศษอะลูมิเนียมที่ร้อยละ 0.40 มีความเพียงพอ ทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าสูงที่สุด โดยจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแหล่ง A แทนที่เถ้าขาน้อยด้วยเศษอะลูมิเนียมที่ร้อยละ 0.40 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่อายุ 3 7 และ 28 วัน เท่ากับ 229 238 และ 282 กิโลกรัมต่อตารางที่เซนติเมตรตามลำดับ มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าขาน้อยที่ไม่เติมอะลูมิเนียมกว่าร้อยละ 145-157

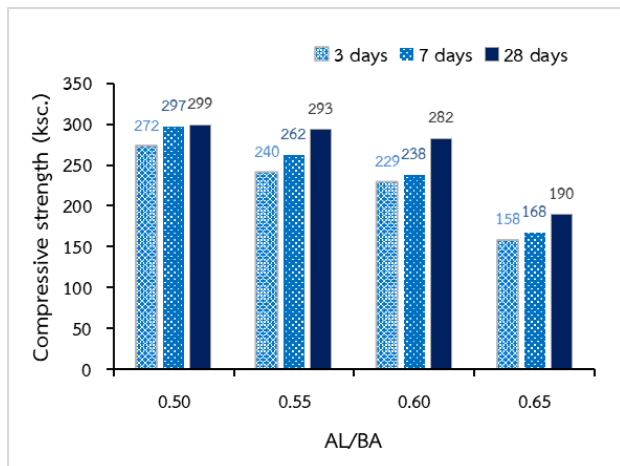
3.3 อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/BA)

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 3 7 และ 28 วัน โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน

สารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/BA) เท่ากับ 0.50 0.55 0.60 และ 0.65 แสดงดังตารางที่ 4 และรูปที่ 6 กำลังรับแรงอัดทุกส่วนผสมเพิ่มขึ้นตามอายุคอนกรีต กำลังรับแรงอัดมีค่าแปรผกผันกับค่าอัตราส่วน AL/BA โดยกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าสูงสุดเมื่อ AL/BA เท่ากับ 0.50 และมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อ AL/BA เพิ่มขึ้นเป็น 0.55 0.60 และ 0.65 ตามลำดับ เช่นเดียวกับปริมาณน้ำในส่วนผสมซีเมนต์คอนกรีตทั่วไป (W/C) คือกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อลดปริมาณน้ำในส่วนผสม (CPAC Concrete Academy, 2013) แต่ต้องไม่ลดลงเกินความต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ หากจีโอโพลิเมอร์ลดปริมาณสารละลายอัลคาไลน์มากเกินไปความต้องการก็จะทำให้ปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้โครงสร้างจีโอโพลิเมอร์ไม่แข็งแรง มีกำลังรับแรงอัดต่ำ จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าขาน้อยผสมเศษอะลูมิเนียมมีกำลังรับแรงอัดสูงเมื่ออัตราส่วนสารอัลคาไลน์มีค่าต่ำนั้นอาจเป็นผลดีในแง่การประหยัดต้นทุนในการผลิต แต่ก็ยังพบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน AL/BA ต่ำ จะมีความสามารถในการทำงานได้ต่ำเช่นกัน โดยจากการทดสอบตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน AL/BL เท่ากับ 0.50 มีค่าการยุบตัว (Slump) เพียง 0-0.5 เซนติเมตร ตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วน AL/BL เท่ากับ 0.55 ค่าการยุบตัวประมาณ 0.5-2.0 ซม. ดังนั้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจึงควรมีกระบวนการช่วยในการทำให้แน่น และตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วน AL/BA เท่ากับ 0.60 และ 0.65 มีค่าการยุบตัวประมาณ 4.0-7.5 ซม. และ 7.5-12.0 ซม.ตามลำดับ เกณฑ์มาตรฐานงานคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก มทข.101-53 กำหนดค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่เหมาะสม 5.0-15.0 ซม. ขึ้นอยู่กับลักษณะของชิ้นส่วนคอนกรีต

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น

No.	AL/BA	Slump (cm.)	Average compressive strength/Normalized		
			ksc./ (%)		
			3 days	7 days	28 days
13	0.50	0-0.5	272/(119)	297/(124)	299/(106)
14	0.55	0.5-2.0	240/(105)	262/(110)	293/(104)
3	0.60	4.0-7.5	229/(100)	238/(100)	282/(100)
15	0.65	7.5-12.0	158/(69)	168/(70)	190/(67)



รูปที่ 6 ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน สารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/BA) ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

3.4 อุณหภูมิบ่ม

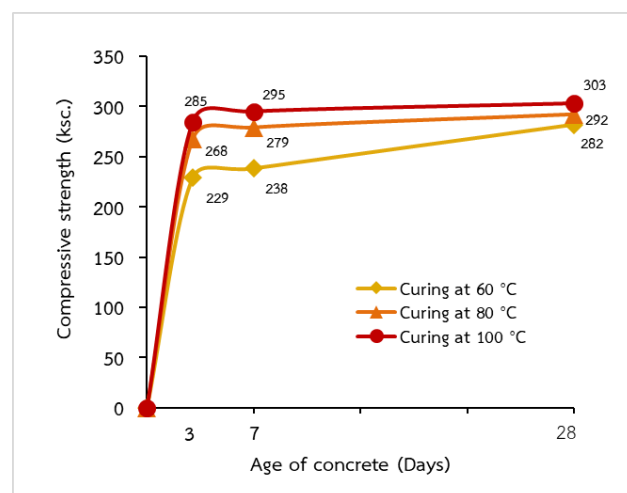
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 3 7 และ 28 วัน ที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการบ่ม 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 5 และรูปที่ 7 พบว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ทุกส่วนผสมมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นตามอายุคอนกรีตและแปรผันตรงกับอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่ม หากพิจารณาในช่วงอายุต้น (อายุคอนกรีต 3 วัน) การบ่มจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อุณหภูมิสูงสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้ดีกว่าการบ่มที่อุณหภูมิต่ำ (Dobrowolski, 2011) แต่เมื่ออายุคอนกรีตเพิ่มขึ้นการพัฒนา กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่บ่มด้วยอุณหภูมิต่ำกว่าจะเริ่มพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ใกล้เคียงกับการบ่มที่อุณหภูมิสูงมากยิ่งขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน อุณหภูมิบ่มระหว่าง 60 และ 100 องศาเซลเซียส พบว่ากำลังรับแรงอัดจากการบ่มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ใกล้เคียงกับการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยมีค่าประมาณร้อยละ 107 ของกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัดในแต่ละอุณหภูมิบ่มอย่างละเอียด ในรูปที่ 7 จากแผนภูมิเส้นแสดงแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดและอายุคอนกรีต เส้นแนวโน้มการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 7 และ 28 วัน จากการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 100 และ 80 องศาเซลเซียส มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดสูงตั้งแต่ในช่วงอายุต้น แต่ไม่ค่อยพัฒนาในช่วงอายุปลาย ส่วนจากการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส การพัฒนากำลังรับแรงอัดไม่สูงมากนักในช่วงอายุต้น แต่จะพัฒนามากขึ้นในช่วงอายุปลาย ความชันของเส้นกราฟช่วง อายุ 7-28 วัน มีความชันมากกว่าการบ่มที่อุณหภูมิบ่มที่สูงกว่า เป็นผลดีต่อการนำไปพัฒนาเพื่อให้สามารถผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่สามารถ

แข็งตัวและให้กำลังรับแรงอัดได้โดยไม่ต้องใช้ความร้อนสูงในการบ่ม หากมีการนำไปศึกษาและพัฒนาต่อโดยการลดอุณหภูมิในการบ่มตัวอย่างลง ควรมีการพิจารณากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุมากกว่า 28 วัน

อุณหภูมิบ่มสูงสามารถเร่งปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วงอายุต้นมากกว่าการบ่มที่อุณหภูมิต่ำ แต่อุณหภูมิบ่มที่สูงนี้ทำให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน (Thermal cracking) ในเนื้อคอนกรีต โดยคอนกรีตขยายตัวและเพิ่มปริมาตรที่บริเวณผิวที่สัมผัสกับความร้อนขณะทำการบ่ม การเหี่ยวรั้งของชิ้นส่วนคอนกรีตทำให้เกิดความเค้นเนื่องจากแรงอัด และหลังการบ่มด้วยความร้อน อัตราการเกิดความร้อนลดลงถึงจุดที่อัตราการสูญเสียความร้อนสูงกว่าอัตราการเกิดความร้อน นำไปสู่การหดตัวของคอนกรีตโดยที่การหดตัวจะทำให้เกิดความเค้นจากแรงดึงและทำให้เกิดการแตกร้าว (Dter, 2014) ส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอุณหภูมิสูงไม่พัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วงอายุปลาย

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบ่ม

No.	Curing temperature (°C)	Average compressive strength/Normalized ksc./ (%)		
		3 days	7 days	28 days
3	60	229/(100)	238/(100)	282/(100)
16	80	268/(117)	279/(117)	292/(104)
17	100	285/(124)	295/(124)	303/(107)



รูปที่ 7 ผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบ่มต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

4. สรุปผลและอภิปรายผล

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของ จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยผสม เศษอะลูมิเนียม โดยใช้เถ้าขานอ้อยจาก 2 แหล่ง แทนที่เถ้าขาน อ้อยด้วยเศษอะลูมิเนียมร้อยละ 0-1 โดยน้ำหนัก ใช้สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 10 โมลาร์ อัตราส่วนสารเร่งปฏิกิริยาต่อวัสดุตั้งต้น (LA/BA) เท่ากับ 0.50-0.65 อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$) เท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก และทำการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 60-100 องศาเซลเซียส ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 7 และ 28 วัน พบว่า ปัจจัยต่างๆ ทั้งแหล่งที่มาของเถ้าขานอ้อย การแทนที่เถ้าขาน อ้อยด้วยเศษอะลูมิเนียม อัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ ต่อวัสดุตั้งต้น และอุณหภูมิในการบ่ม ส่งผลโดยตรงกับ การเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้สมบัติ การรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเปลี่ยนแปลง

แหล่งที่มาและองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยมี ความสำคัญอย่างมากต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ คอนกรีต เถ้าขานอ้อยที่มีการดูดซึมน้ำและการสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากการเผาต่ำส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าเถ้าขานอ้อย ที่มีการดูดซึมน้ำและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาสูง

การแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยเศษอะลูมิเนียมที่เหมาะสม เท่ากับร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนัก ทำให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมี กำลังรับแรงอัดสูงสุด

อัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/BA) ส่งผลต่อทั้งกำลังรับแรงอัดและความสามารถในการทำงานได้ ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดย AL/BA ต่ำ กำลังรับแรงอัดของ จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าสูงแต่ความสามารถในการทำงานได้ ต่ำ ตรงกันข้ามหาก AL/BA สูง กำลังรับแรงอัดของ จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าต่ำแต่ความสามารถในการทำงานได้ เพิ่มขึ้น

การบ่มที่อุณหภูมิสูงมีผลต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ ดีเฉพาะในช่วงอายุต้น แตกต่างจากการบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่าที่ สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้นตามอายุของคอนกรีต ซึ่งที่อายุคอนกรีต 28 วัน การบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีกำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกับการบ่มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ หน่วยวิจัยวิศวกรรมโครงสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ได้สนับสนุน อุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้ คุณมีศักดิ์ธนา พัวพิทยธร บุคลากรในห้องวิจัย และบุคลากร ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และได้ร่วม ทำการศึกษา เก็บรวบรวมข้อมูลทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จ ลุล่วงด้วยดี

6. ข้อเสนอแนะ

ศึกษาและพัฒนาความสามารถที่ได้ควบคู่ไปกับ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตให้เป็นไปตามมาตรฐานงาน คอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก

ศึกษาการลดอุณหภูมิในการบ่มจีโอโพลิเมอร์หรือพัฒนาให้ จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ ในสภาพแวดล้อมปกติ

7. เอกสารอ้างอิง

- Chindaprasit, P., Chareerat, T., & Khunawanakit, W. (2008). Geopolymer from Mae Moh fly Ash. *Engineering and Applied Science Research (EASR)*, 32(5), 715-724.
- Chusilp, N., Jaturapitakkul, C., & Kiattikomol, K. (2009). Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars. *Construct Build Mater* 23, 3523-3531.
- Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., Tavares, L. M., & Fairbairn, E. M. R. (2008). Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. *Cement and Concrete Composites*, 30(5), 410-418.
- CPAC Concrete Academy. (2013). *Concrete Technology. Chapter 18: Concrete Mixing Design*. <https://www.cpacacademy.com>
- Dobrowolski, T. (2011). The dynamics of the kink in curved large area josephson junction. *Discrete and Continuous Dynamical Systems - Series S*, 4 (5), 1095-1105. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.045>
- Dter, T. (2014). *Concrete durability*. Taylor & Francis Group.

Fairbairn, E. M. R., Americano, B. B., Cordeiro, G. C., Paula, T. P., Toledo Filho, R. D., & Silvoso, M. M. (2010). Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO₂ emissions reduction and potential for carbon credits. *Journal of Environmental Management*, 91(9), 1864–1871. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.04.008>

Ganesan, A., & Rajagopal, K. (2007). Evaluation of bagasse as corrosion resisting admixture for carbon steel in concrete. *Anti-Corros Methods Mater* 54, 230-236.

Office of the Cane and Sugar Board, Ministry of Industry Thailand. (2016). *Report of sugar cane and sugar production*. <http://www.ocsb.go.th>

Rattanasak, P. & Chindaprasit, P. (2008). Study of geopolymers from fly ash. *Journal of Industrial Technology*, 8(2), 1–8.

Rukzon, S., & Ngenprom, N. (2010). The development of rice husk ash and bagasse ash based geopolymeric materials. Rajamangala University of Technology Phra Nakhon Intellectual Repository.

Singh, N. B., Singh, V. D., & Sarita, R. (2000). Hydration of Bagasse Ash-blended Portland Cement. *Cement and Concrete Research*, 30, 1485-1488.

Somna, R., & Jaturapitakkul, C. (2011). Use of Ground Bagasse Ash to Improve Compressive Strength, Water Permeability, and Chloride Resistance of Recycled Aggregate Concrete. *KMUTT Research and Development Journal*, 34(4), 369–381.

Sujavanich, S. (2003). Effect of bagasse ash on binder characteristics. *Kasetsart Engineering Journal (Thailand)*, 48, 18-22.

Turner, L. K., & Collins, F. G. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*, 43, 125–130. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023>

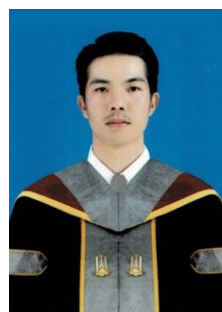
Villar-Cocifta, E., Frias, M., & Valencia, E. (2008). Sugar cane wastes as pozzolanic materials: application of mathematic model. *Aci Materials Journal*, 105, 258-264.

Witoteerasan, W., Homwuttiwong, S., & Wongpa, J. (2014). Geopolymer Mortar Production from Waste Materials. *Engineering Journal Chiang Mai University*, 21(1), 1-9.

Wongpa, J. (2009). Development of ash from industrial plants to replace Portland cement. *Research community*, 85, 75–76.

Zhou, W., Yan, C., Duan, P., Liu, Y., Zhang, Z., Qiu, X., & Li, D. (2016). A comparative study of high- and low- Al_2O_3 fly ash based-geopolymers: The role of mix proportion factors and curing temperature. *Materials and Design*, 95, 63–74. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.084>

8. ประวัติผู้แต่ง



พิพรรณ อินปลัด สำเร็จการศึกษาวศ.บ. วิศวกรรมโยธา (2558) มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปัจจุบันอยู่ระหว่างศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม สนใจและทำงานวิจัยทางด้านวัสดุก่อสร้าง วัสดุพอลิเมอร์ จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต เป็นต้น



รศ.ดร.สहालग หอมวุฒิวงศ์ สำเร็จการศึกษาระดับ วศ.บ. วิศวกรรมเกษตร (2536) และระดับ วศ.ม. วิศวกรรมโครงสร้าง (2542) จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น จากนั้นในปี 2550 ได้สำเร็จการศึกษาระดับ ปร.ด. วิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม สนใจและทำงานวิจัยทางด้านวัสดุก่อสร้าง วัสดุพอลิเมอร์ จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต วัสดุถ่วงน้ำหนัก เป็นต้น