

อิทธิพลของอัตราส่วนน้ำยาก่อฟอง การอบไอน้ำแรงดันต่ำ และ ยิปซัมสังเคราะห์ต่อสมบัติของคอนกรีตพูนใส แก้วขวดสีน้ำตาล

Influence of Foam Agent Ratios, Low Pressure Steam Curing and Synthetic Gypsum on Properties of Foamed Concrete Containing Brown Bottle Glass

นิพล คงพุ่ม ดนุพล ตันนโยภาส

สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาถึงสมบัติทางกายภาพและทางกลของคอนกรีตพูนผสมแก้วขวดสีน้ำตาลบด โดยใช้สารก่อฟองชนิดโปรตีนสามอัตราส่วนด้วยกันคือ 0.40 0.50 และ 0.60 โดยน้ำหนักน้ำ ผสมยิปซัมสังเคราะห์แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ทั้งอบและไม่อบไอน้ำแรงดันต่ำเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ก่อนบ่มในบรรยากาศห้องเป็นเวลา 3 7 และ 28 วัน ทดสอบความหนาแน่น กำลังอัด นอกจากนี้วิเคราะห์วัฏภาคแร่และโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และถ่ายภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตามลำดับ ผลทดสอบพบว่าปริมาณสารก่อฟอง การอบไอน้ำก่อนบ่ม และปริมาณยิปซัมสังเคราะห์มีผลทำให้พัฒนาการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นและกำลังอัด ตัวอย่างผสมสารก่อฟองชนิดโปรตีน 0.60 ผ่านการอบไอน้ำและบ่มในห้อง 28 วัน ให้กำลังอัดสูงสุด 91 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และความหนาแน่น 1,260 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนตัวอย่างผสมยิปซัมสังเคราะห์สองอัตราส่วนอยู่ในเกณฑ์กำหนดบางชั้นของ มอก. 2601-2556 วิเคราะห์วิทยาแร่และโครงสร้างจุลภาคแสดงถึงโพรงอากาศไม่ต่อกัน ผลักยิปซัมคืนรูปและเอ็ดทรินไกต์รูปคล้ายเข็ม

คำสำคัญ : แก้วขวดสีน้ำตาล ยิปซัมสังเคราะห์ คอนกรีตพูน สารก่อฟองชนิดโปรตีน อบไอน้ำแรงดันต่ำ

Abstract

This paper is a study on physico-mechanical properties of foamed concrete (FC) containing ground brown bottle glass dosage protein foaming agent (PFA) in three proportions of 0.40, 0.50 and 0.60wt% of water. And also, synthetic gypsum (SG) was replaced partially ordinary Portland cement, type 1 with and without low pressure steam (LPS) condition for 8

hours then cured under ambient condition for 3, 7 and 28 days. Bulk density and compressive strength was determined. Furthermore, mineral phase and microstructure were analyzed. Testing results revealed PFA contents, curing after LPS and SG contents effect of changing development on bulk density and compressive strength. The BBG-FC specimen dosed PFA of 0.60 through LPS and cured under ambient 28 days provided highest compressive strength of 91 ksc and bulk density of $1,259 \text{ kg/m}^3$. The BBG-FC blended two SG ratios specimens were met some class of TIS2601-2556 specification. Microstructure and mineralogy analysis revealed that the interconnected air-void pores, reformed gypsum crystals and needle-like ettringites.

Keywords : Brown bottle glass, Synthetic gypsum, Foamed concrete, Protein foaming agent, Low pressure steam

1. บทนำ

อิฐมวลเบาเป็นนวัตกรรมใหม่สำหรับวัสดุก่อสร้างที่ได้รับความนิยมอย่างสูงและเป็นทางเลือกใหม่ในงานก่อสร้าง เนื่องจากอิฐมวลเบา มีสมบัติพิเศษที่แตกต่างจากอิฐชนิดอื่นๆ ปัจจุบันอิฐมวลเบา มีส่วนผสมจากธรรมชาติ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ทราย ปูนขาว ยิปซัม น้ำ และสารก่อฟองอากาศ (foaming agent) เป็นต้น ซึ่งมีส่วนผสมพิเศษในอัตราที่เป็นสูตรเฉพาะตามขนาดของอิฐมวลเบา ตั้งแต่ความหนา 7.5 10 12.5 15 และ 20 เซนติเมตร กว้าง 20 เซนติเมตร และยาว 60 เซนติเมตร ราคาอิฐมวลเบาตารางเมตรละ 200 - 430 บาท ซึ่งราคาอิฐมวลเบาก่อ 2 ชั้น และอิฐมวลเบาใกล้เคียงกัน [1] การที่อิฐมวลเบาได้พัฒนาเพื่อตอบสนองในเรื่องการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม โดยนำวัสดุจากธรรมชาติและวัสดุเหลือใช้มาใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งแนวโน้มการใช้อิฐมวลเบาในด้านการก่อสร้างในประเทศไทยจะแพร่หลายมากขึ้น

ในแต่ละวันขวดแก้วที่ใช้แล้วไม่ต่ำกว่า 1 ล้านใบถูกทิ้งให้เป็นขยะ [2] ปัจจุบันประเทศไทยมีเศษแก้วทิ้งเป็นขยะอยู่ประมาณปีละ 40,000 ตัน [3] ซึ่งไม่ได้นำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตแก้ว และนับวันจะมีปริมาณขยะเศษแก้วเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคต ทำให้มีการรณรงค์การนำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ อย่างไรก็ตามก็ยังมี การนำเศษแก้วไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ น้อย จึงมีความคิดว่านำเศษแก้วขวดสีน้ำตาล ที่บรรจุภัณฑ์เครื่องดื่มมีแอลกอฮอล์มาใช้

ประโยชน์ในงานผลิตคอนกรีตมวลเบา เป็นการศึกษาเพื่อหาเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการทำคอนกรีตมวลเบาจากเศษแก้ว เพื่อใช้เป็นฉนวนกันความร้อนสำหรับอาคารบ้านเรือน นอกจากนี้ยิปซัมสังเคราะห์ ซึ่งเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานความร้อน มาใช้เป็นวัสดุทดแทนยิปซัมในส่วนผสมที่ใช้กันแพร่หลายอยู่ปัจจุบัน [4] จากที่กล่าวมาจึงเป็นที่มาที่จะผลิตคอนกรีตฟรูนใส่แก้วขวดสีน้ำตาลและผสมยิปซัมสังเคราะห์แทนปูนซีเมนต์บางส่วน ให้มีคุณภาพอย่างน้อยเทียบเท่ากับผลิตภัณฑ์เกณฑ์ มอก. 2601-2556 ของประเทศไทย [5] มีการใช้ขวดแก้วสีน้ำตาลแทนทรายผสมในคอนกรีต ด้วยอัตราส่วนต่างๆ ทดสอบกำลังอัดกับตัวอย่างทรงลูกบาศก์และทรงกระบอก ที่บ่ม 3-28 วัน เปรียบเทียบกับมวลรวมธรรมชาติ พบว่ามีการขยายตัวจากปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา ด้วยผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electronic microscope, SEM) และตรวจลักษณะของผิวรูพรุนของคอนกรีตมวลเบา พบว่ามวลรวมหยาบและละเอียดที่เป็นเศษแก้วฟรูน มีค่าความหนาแน่น 1.85 และ 0.95 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ และมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 6.5 และ 3.7 ตามลำดับ [6] ผลทดลองคอนกรีตมวลเบาสดที่ความหนาแน่น $1,300 \pm 50$ กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร โดยแปรผันขนาดทราย 2.36-0.6 มม. บ่มทั้งแบบชื้นและในบรรยากาศห้อง พบว่าทรายขนาด 0.60 มิลลิเมตร บ่ม 14

วัน มีกำลังอัดสูงสุด 4.52 เมกะพาสคัล [7] ทราขละขนาดมีผลต่อกำลังและความเหนียว

2. วิธีการวิจัย

2.1 วัตถุดิบและอุปกรณ์

น้ำยาก่อฟองชนิดโปรตีน (protein foaming agent, PFA) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (OPC, type 1) (รูปที่ 1 ก) แก้วขวดสีน้ำตาลบดละเอียด (รูปที่ 1 ข) ยิปซัมสังเคราะห์นำไปบดและคัดขนาดเล็กลงกว่า 45 ไมครอน (รูปที่ 1 ค) เครื่องกวนและเครื่องผลิตโฟม (foam feeder) กำหนดความดันแรงลม 5 บาร์



รูปที่ 1 วัตถุดิบที่ใช้ ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ข) แก้วสีน้ำตาลบด และ ค) ยิปซัมสังเคราะห์

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของคอนกรีตฟรอนที่ศึกษา

Mix Code	w/PFA ratio (wt.)	Containing (kg/m ³)	
		OPC	SG
A-0.40	1:0.40	500	0
S-0.40	1:0.40	500	0
A-0.5a	1:0.50	500	0
S-0.50	1:0.50	500	0
A-0.60	1:0.60	500	0
S-0.60	1:0.60	500	0
0.60SG20	1:0.60	400	100
0.60SG40	1:0.60	300	200

หมายเหตุ w/PFA = สารก่อฟองชนิดโปรตีนต่อน้ำผสม; SG20 = ปริมาณยิปซัมสังเคราะห์ร้อยละ 20 ของ OPC

2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

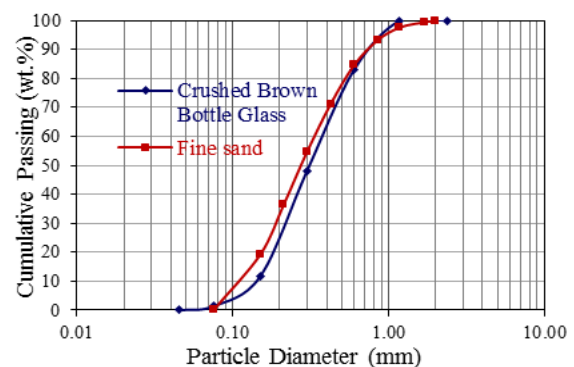
ออกแบบส่วนผสมหล่อตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 10×10×10 เซนติเมตร ใช้มวลรวมแก้วขวดสีน้ำตาลบดแทนทรายทั้งหมด 600 กก./ม.³ น้ำประปา 200 กก./ม.³ และเตรียมน้ำยาก่อฟองชนิดโปรตีน 40 กก./ม.³ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.48 (OPC+SG) คงที่ตลอดการศึกษา แปรผันสารก่อฟอง (0.40 0.50 และ

0.60) และปริมาณของยิปซัมสังเคราะห์แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก รวมตัวอย่างทดสอบ 8 ส่วนผสมๆ ชุดละ 9 ตัวอย่าง ดังในตารางที่ 1 แล้วจึงนำไปอบและไม้อบไอน้ำแรงดันต่ำก่อนบ่มในบรรยากาศห้อง (ambient curing) เป็นเวลา 3 7 และ 28 วัน ครบกำหนดไปทดสอบความหนาแน่น กำลังอัด วิเคราะห์ห้วงภาคแร่และโครงสร้างจุลภาคด้วยด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) และ SEM ตามลำดับ

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

3.1 การกละขนาด

ผลการวิเคราะห์ขนาดของแก้วบดมีการกระจายตัวอยู่ในช่วง 75 ไมครอนเมตร ถึง 0.60 มิลลิเมตร ทราขละใช้ศึกษาอยู่ในช่วง 75 ไมครอนเมตร ถึง 2 มิลลิเมตร [10] ดังในรูปที่ 2 ส่วนค่าความหนาแน่นจริง (true density) ของแก้วบดประมาณ 2.54 ก./ซม.³ และค่าโมดูลัสความละเอียด (modulus of fineness, F.M.) ของแก้วบดและทรายมีค่า 2.56 และ 2.44 ตามลำดับ ใกล้เคียงกัน จึงไม่ค่อยส่งผลกับความต้องการน้ำเมื่อแทนที่ในส่วนผสม



รูปที่ 2 เปรียบเทียบการกระจายขนาดของทรายละเอียดใช้กันทั่วไปและแก้วบดทดลองครั้งนี้

3.2 องค์ประกอบทางเคมี

ผลการวิเคราะห์ยิปซัมสังเคราะห์ที่ใช้เป็นแร่ผสมเพิ่มแก่ตัวอย่างคอนกรีตฟรอน (ตารางที่ 2) พบว่ามีปริมาณสารประกอบกำมะถัน (ร้อยละ 47.15) และแคลเซียม (ร้อยละ 28.49) มาก น้ำหนักสูญหายหลังเผา (ร้อยละ 21.28) ก็มากเช่นกัน ไม่จัดเป็นวัสดุประสานปอซโซลาน [8] แต่ประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างได้ [9]

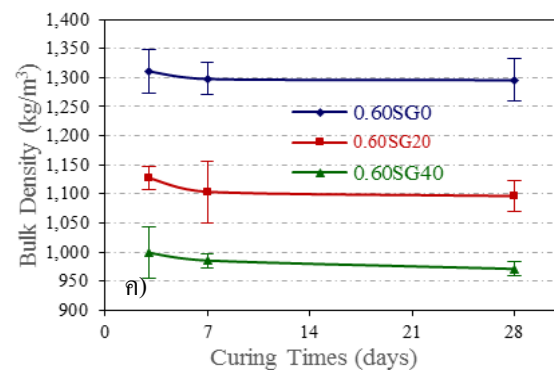
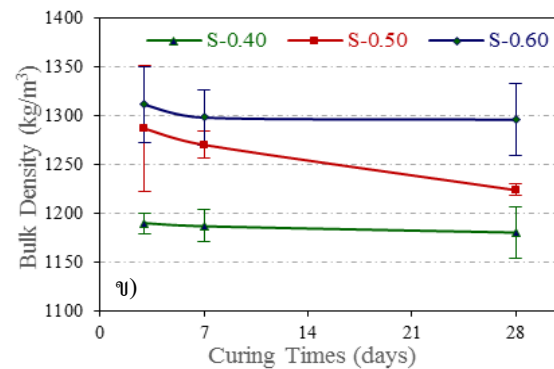
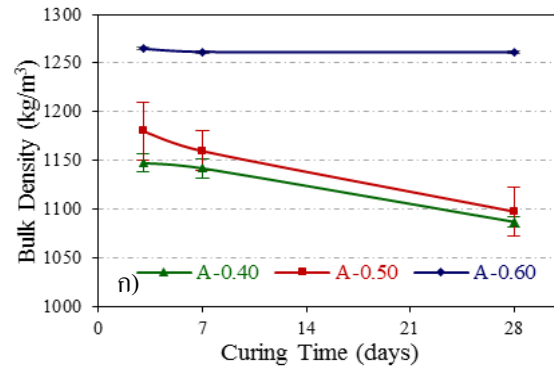
ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของยิปซัมสังเคราะห์ที่ใช้

Chemical composition	Amount (%)
Magnesium oxide (MgO)	0.69
Aluminium oxide (Al ₂ O ₃)	0.63
Silicon dioxide (SiO ₂)	1.46
Sulfur trioxide (SO ₃)	47.15
Potassium oxide (K ₂ O)	0.08
Calcium oxide (CaO)	28.49
Iron(III) oxide (Fe ₂ O ₃)	0.29
Loss on Ignition (LOI)	21.28
Specific gravity	2.37

3.3 ความหนาแน่น

คอนกรีตพูนที่บ่มในบรรยากาศห้องมี PFA 0.40 บ่ม 28 วัน ความหนาแน่นเฉลี่ย 1,087 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขณะที่ตัวอย่างผ่านการอบไอน้ำบ่มที่ 28 วัน มีความหนาแน่นเฉลี่ย 1,180 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (รูปที่ 3 ก) คอนกรีตพูนเต็มสารก่อฟอง 0.50 บ่มอากาศที่ 28 วัน ความหนาแน่นเฉลี่ย 1,097 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในขณะที่อบไอน้ำแล้วบ่ม 28 วัน ได้ความหนาแน่นเฉลี่ย 1,224 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (รูปที่ 3 ข) และคอนกรีตพูน PFA 0.60 บ่มในบรรยากาศ 28 วัน ความหนาแน่นเฉลี่ย 1,261 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร บ่มหลังอบไอน้ำที่ 28 วัน ความหนาแน่นเฉลี่ย 1,295 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (รูปที่ 3 ข) เห็นได้ว่าการอบไอน้ำแรงดันต่ำและปริมาณสารก่อฟองทำให้พัฒนาการความหนาแน่นสูงขึ้นประมาณร้อยละ 3-10

การทดลองได้ขยายผลตัวอย่าง PFA 0.60 ที่อบไอน้ำก่อนบ่ม เมื่อเติม SG ร้อยละ 20 และ 40 ค่าความหนาแน่นของตัวอย่าง SG20 และ SG40 เฉลี่ยลดลงเหลือ 1,096 และ 971 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ (รูปที่ 3 ค) ดังนั้นการเติมแร่ผสมเพิ่มยิปซัมสังเคราะห์ทำให้ลดความหนาแน่นลง นอกจากนี้ยังพบว่าตัวอย่างทั้งหมดบ่มในบรรยากาศห้องทั้งอบและไม้อบไอน้ำนั้น ค่าความหนาแน่นมีการแปรผกผันกับอายุบ่ม นอกจากนี้ตัวอย่าง PFA 0.60 ทั้งอบและไม้อบไอน้ำก่อนบ่มที่ 28 วัน มีค่าสูงกว่าเกือบสองเท่าของตัวอย่างคอนกรีตพูนใส่ทรายของงานวิจัย Suksawat and Bunkongthong [10]



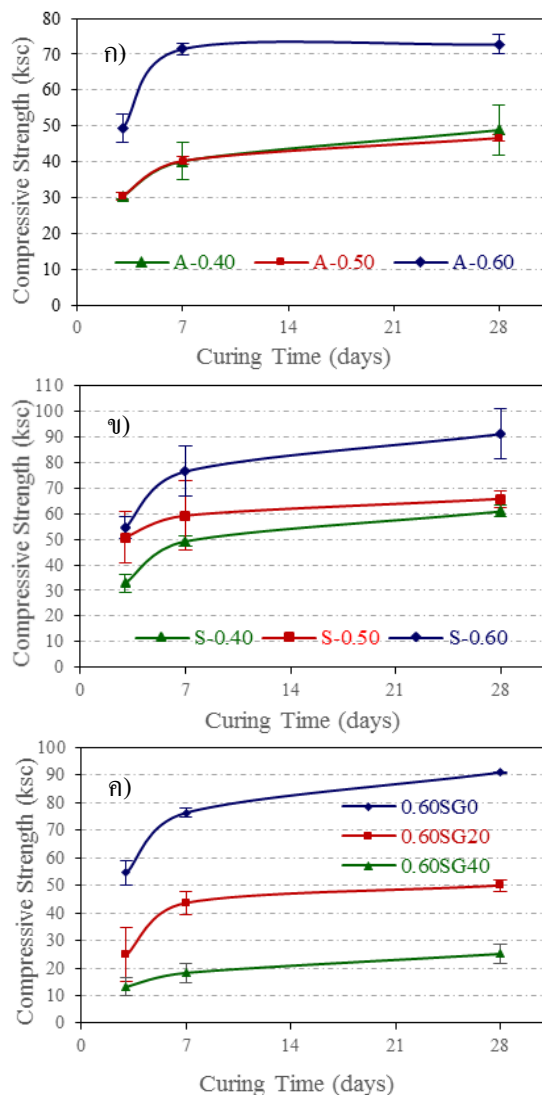
รูปที่ 3 ความหนาแน่นของคอนกรีตพูน ก) บ่มในบรรยากาศห้อง ข) อบไอน้ำแรงดันต่ำก่อนบ่ม และ ค) ผสมยิปซัมสังเคราะห์และอบไอน้ำแรงดันต่ำ

3.4 กำลังอัด

กำลังอัดของคอนกรีตพูน PFA 0.40 บ่มในบรรยากาศห้อง 28 วัน ค่าเฉลี่ย 49 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (รูปที่ 4 ก) ส่วนอบไอน้ำก่อนบ่ม 28 วัน มีค่าเฉลี่ย 61 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (รูปที่ 4 ข) ตัวอย่างใส่สารก่อฟอง 0.50 บ่มในบรรยากาศห้อง 28 วัน กำลังอัดของคอนกรีตพูนเฉลี่ย 47 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หลังอบไอน้ำบ่ม 28 วัน กำลังอัดเฉลี่ย 66 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (รูปที่ 4 ข) และตัวอย่างผสมสารก่อฟอง 0.60 บ่มในบรรยากาศห้องที่ 28 วัน ได้กำลังอัดเฉลี่ย 73 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ขณะที่อบไอน้ำก่อนบ่มที่ 28 วัน กำลังอัดเฉลี่ยสูงสุด 91 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จึงเห็นได้ว่าอายุบ่มและ

การอบไอน้ำก่อนบ่มมีผลต่อพัฒนาการกำลังอัดอย่างชัดเจน [12] อันเป็นปัจจัยเบื้องต้นสำคัญต่อคอนกรีตพูน [13]

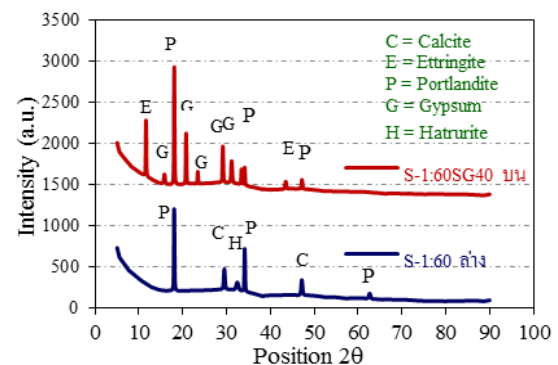
ตัวอย่าง PFA 0.60 อบไอน้ำก่อนบ่ม 28 วัน กำลังอัดของตัวอย่างที่ผสม SG ร้อยละ 20 และร้อยละ 40 ค่ากำลังอัดลดลงเหลือ 44 และ 25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 4 ก) เมื่อเทียบกับไม่ผสม SG กำลังอัดลดลงไปประมาณร้อยละ 50 และ 70 ตามลำดับ ยังพบว่าค่าความหนาแน่นและกำลังอัดของตัวอย่างทดลองทั้งหมดมีความสัมพันธ์ไปทางเดียวกัน ส่วนผสม PFA 0.60 บ่มบรรยากาศห้อง 28 วัน ของคอนกรีตพูนใส่แก้วบดได้กำลังอัด 72 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรสูงกว่าคอนกรีตพูนใส่ทรายล้วน ซึ่งได้กำลังอัดเพียง 15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร [10]



รูปที่ 4 กำลังอัดของตัวอย่าง ก) บ่มในบรรยากาศห้อง ข) อบไอน้ำแรงดันต่ำ และ ค) อบไอน้ำผสมยิปซัมสังเคราะห์

3.5 วิเคราะห์

ตัวอย่างที่โดดเด่นคือ คอนกรีตพูนสารก่อฟอง 0.60 และคอนกรีตพูนที่ผสมยิปซัมสังเคราะห์ร้อยละ 40 อบไอน้ำก่อนบ่ม 28 วัน วิเคราะห์วิธี XRD (รูปที่ 5) พบว่าภาคแร่พอร์ตแลนด์ (portlandite, P) แคลไซต์ (calcite, C) และแฮทรูไรต์ (hatrurite- Ca_3SiO_5 , H) ผลคำนวณปริมาณวัฏภาคแร่แต่ละชนิดด้วยวิธีคำนวณพื้นที่ใต้กราฟ พบว่ามีปริมาณร้อยละ 39.89 15.20 และ 44.91 ตามลำดับ ได้แจกแจงไว้ในตารางที่ 3 ส่วนคอนกรีตพูนผสมยิปซัมสังเคราะห์ร้อยละ 40 พบว่ามีแร่พอร์ตแลนด์ (portlandite, P) ยิปซัม (gypsum, G) เอตทริงไทต์ (ettringite, E) เนื่องจากยิปซัมสังเคราะห์เป็นโครงสร้างโมเลกุลพร่องน้ำ ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.6\text{H}_2\text{O}$) ดังนั้นเมื่อน้ำเติมเข้าไป จึงคืนกลับเป็นแร่ยิปซัมดั้งเดิม [11] ขณะที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์เมื่อมีสถานะน้ำมากก็เกิดเป็นผลึกเอตทริงไทต์ เมื่อลดปูนซีเมนต์สารประกอบ SiO_2 และ CaO เป็นองค์ประกอบสำคัญต่อการเกิดผลึกแคลไซต์และแฮทรูไรต์ลดลงไปด้วย จึงตรวจไม่พบแร่ดังกล่าวแสดงในตารางที่ 3



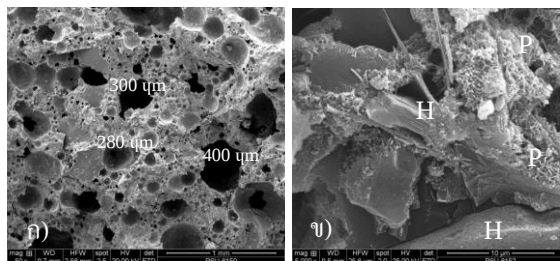
รูปที่ 5 เปรียบเทียบเส้นกราฟการเบี่ยงเบนรังสีเอ็กซ์ของคอนกรีตพูน PFA 0.60 ทั้งผสมและไม่ผสม SG40

ตารางที่ 3 วัฏภาคแร่ของตัวอย่างทดสอบจากผลวิเคราะห์ XRD

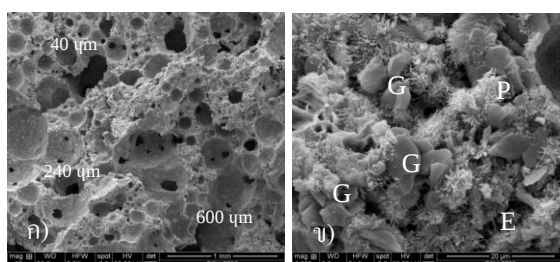
Mineral Composition (%)	S-0.60	S0.60SG40
ยิปซัม (Gypsum, G)	-	38.30
พอร์ตแลนด์ (Portlandite, P)	39.89	37.96
แคลไซต์ (Calcite, C)	15.20	-
แฮทรูไรต์ (Hatrurite, H)	44.91	-
เอตทริงไทต์ (Ettringite, E)	-	23.74

3.6 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

จากภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของตัวอย่างคอนกรีตพูน PFA 0.60 ผสมและไม่ผสมยิปซัมสังเคราะห์ร้อยละ 40 เมื่อเปรียบเทียบภาพกำลังขยาย 50 เท่า คอนกรีตพูน PFA 0.60 ไม่ผสม SG มีการกระจายฟองอากาศขนาดตั้งแต่ 30 – 500 ไมครอน (รูปที่ 6 ก) เกิดแร่เสทรูไรต์ที่มีความแข็ง 6 ตามมาตราความแข็งของโมส์ (รูปที่ 6 ข) จึงช่วยเพิ่มกำลังแก่ตัวอย่าง แต่เมื่อเติม SG ลงไปร้อยละ 40 พบว่าขนาดฟองใหญ่ขึ้น มีขนาดตั้งแต่ 40 – 600 ไมครอน ลักษณะกลุ่มรูพรองและรอยหลุมค่อนข้างทรงกลม และไม่เชื่อมต่อกัน แพร่กระจายทั่วไป (รูปที่ 7 ก) มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมความหนาแน่นตัวอย่างลดลง [14,15,16] (รูปที่ 3 ค) ขณะที่กำลังขยาย 2,500 เท่า รูปที่ 7 ข) พบว่าบริเวณรอยต่อระหว่างผิว (interfacial transition zone) มีอนุภาคยิปซัมอยู่ (G) จึงทำให้โครงสร้างระหว่างพรองอากาศมีสภาพเปราะ [17] และไม่เกิดวัฏภาคแร่ (mineral phase) ชนิดอื่นที่มีค่าความแข็งสูง (ตารางที่ 3) ส่งผลกระทบให้กำลังอัดของคอนกรีตผสมนี้ลดลง



รูปที่ 6 รูปถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวอย่าง S-0.60 ก) ขนาดและการกระจายของฟองอากาศ และ ข) ชนิดวัฏภาคที่เกิดขึ้นในตัวอย่าง



รูปที่ 7 รูปถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวอย่าง S-0.60SG40 ก) ขนาดของฟองอากาศกระจายสม่ำเสมอ และ ข) ชนิดวัฏภาคแร่เกิดในโครงสร้างตัวอย่าง

4. สรุป

การศึกษานี้ใช้แก้วขวดสีน้ำตาลมีสมบัติเป็นวัสดุลิกาทนทรายที่นิยมใช้กันผลิตคอนกรีตพูนทั่วไปในประเทศไทย [5] และน้ำยาก่อฟองชนิดโปรตีน พบว่าสามารถใช้แทนกันได้ ไม่ส่งผลเสียแก่ผลิตภัณฑ์คอนกรีตพูน บังคับปริมาณสารก่อฟอง แร่ผสมเพิ่มชนิดยิปซัมสังเคราะห์ และเงื่อนไขอายุบ่ม ส่วนมีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติทั้งทางกายภาพและเชิงกลของคอนกรีตพูนที่ทดลอง มีแนวทางสรุปได้ดังนี้

1. ยิปซัมสังเคราะห์หีบดเคี้ยวเคลือบแข็งมีค่า SO_3 และ LOI สูง จึงขาดสมบัติทางวัสดุยึดประสาน แต่ขณะเดียวกันมีองค์ประกอบของ CaO สูง จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้น มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดฟองอากาศในโครงสร้างเนื้อคอนกรีตพูนเพิ่มมากขึ้น คอนกรีตพูนมวลเบาขึ้น

2. คอนกรีตพูนเดิม PFA 0.60 ทั้งอบและไม่อบไอน้ำ 8 ชั่วโมง ก่อนบ่มในบรรยากาศ 3 7 และ 28 วัน เหมาะสมกว่าสารก่อฟอง 0.40 และ 0.50 นั่นคือปริมาณสารก่อฟองมากขึ้นเกิดฟองอากาศในช่วงสัดมีความเสถียรอุณหภูมิลดลง BBG ไว้มียุบตัวหลังแข็งตัว จึงทำให้ความหนาแน่นและกำลังอัดมากขึ้น ตัวอย่าง PFA 0.60 พิจารณากำลังอัด (91 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) และความหนาแน่น (1,260 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) จัดอยู่ในคอนกรีตมวลเบาชั้น C 14 ตามเกณฑ์ มอก [5]

3. ยิปซัมสังเคราะห์หีบดเคี้ยวแทนปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ให้ค่าความหนาแน่นและกำลังอัดลดลงเหลือ 1,096 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 44 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ จัดอยู่ในเกณฑ์คอนกรีตมวลเบาชั้น C 12 [5] ขณะที่ SG แทนร้อยละ 40 ค่าความหนาแน่นลดลงเหลือ 971 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และกำลังอัดลดลงเหลือ 25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จัดอยู่ในคอนกรีตมวลเบาชั้น C 10 [5]

5. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ได้รับการสนับสนุนจากบริษัทบุญเจริญ จำกัด จังหวัดสตูล ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Q-CON, "Lightweight Concrete," URL: <http://www.qcon.co.th/knowledge>, Retrieved 12/07/2560.
- [2] Promotion and Publication Section, "Recycle Waste Bank Manual," 7thed., Dept. of Environmental Quality Promotion, Ministry of Natural Resources and Environment, 2017.
- [3] 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*, Vol.10, No.1, pp.63-75, 2014.
- [4] Foam Concrete. URL http://www.clcprolison.com/th/article07_1.php Retrieved 1/07/2560.
- [5] TIS 2601-2556, "Cellular Lightweight Concrete Blocks using Preformed Foam", Thai Industrial Standards, 2556.
- [6] M. Limbachiya, M.S. Meddah, and S. Fotiadou, "Performance of Granulated Foam Glass Concrete," *Construction and Building Materials*, Vol.28, Issue1, pp.759-768, March, 2012.
- [7] S. K Lim, C.S. Tan, X. Zhao and T.C. Ling, "Strength and Toughness of Lightweight Foamed Concrete with Different Sand Grading," *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.19, Issue7, pp. 2191-2197, Nov., 2015.
- [8] ASTM C618-15, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete," West Conshohocken, PA, 2015.
- [9] ASTM D5370-14, "Standard Specification for Pozzolanic Blended Materials in Construction Applications," West Conshohocken, PA, 2014.
- [10] P. Suksawat and P. Bunkongthong, "Foam Concrete Containing Para Rubber Wood Ash and Oil Palm Ash," *Mining Engineering Project Report*, No. MNE1/2557, Prince of Songkla University, 2013.
- [11] S. Nikhom and D. Tonnayopas. "Characterization of Some Properties of Flue Gas Desulfurization Gypsum Composite Blending Rubber Wood Fly Ash," *The 14th National Convention on Civil Engineering*, 13-15 May 2009, Suranaree University of Technology, Vol.5, pp.1793-1799, 2009.
- [12] D. Falliano, D. De Domenico, G. Ricciardi, and E. Gugliandolo, "Experimental Investigation on the Compressive Strength of Foamed Concrete: Effect of Curing Conditions, Cement Type, Foaming Agent and Dry Density," *Construction and Building Materials*, Vol.165, pp.735-749, March, 2018.
- [13] Y. H. Mugahed Amran, N. Farzadnia, A.A. Abang Al, "Properties and Applications of Foamed Concrete; A Review," *Construction and Building Materials*, Vol.101, Part1, pp.990-1005, Dec., 2015.
- [14] A. A. Hilal, N.H. Thom, A.R. Dawson, "On Void Structure and Strength of Foamed Concrete Made without/with Additives," *Construction and Building Materials*, Vol.85, pp.157-164, June, 2015.
- [15] J. Jiang, Z. Lu, Y. Niu, J. Li, and Y. Zhang, "Study on the Preparation and Properties of High-Porosity Foamed Concretes Based on Ordinary Portland Cement," *Materials and Design*, Vol.92, pp.949-959, Feb., 2016.
- [16] T. T. Nguyen, H.H. Bui, T.D. Ngo, and G.D. Nguyen, "Experimental and Numerical Investigation of Influence of Air-voids on the Compressive Behaviour of Foamed Concrete," *Materials & Design*, Vol.130, pp.103-119, Sept., 2017.
- [17] J. Zhang, Y. Yan, Z. Hu, "Preparation and Characterization of Foamed Concrete with Ti-Extracted Residues and Red Gypsum," *Construction and Building Materials*, Vol.171, pp.109-119, May, 2018.