คุณสมบัติเบื้องต้นของแคนนาบิสคอนกรีตจากแกนกัญชาผสมเถ้าลอย
Basics Properties of Cannabis Concrete from Cannabis Shiv Containing Fly Ash

พุฒิพัทธ์ ราชคำ[1,*] ภาณุพงศ์ จันฤาไชย[2] อุกฤษฎ์ โข่ศรี[3] ปิโยรส ทะเสนฮด[4] คำภี จิตชัยภูมิ[5] และ ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี[6]

[1,2,3,4] สาขาวิศวกรรมโยธา คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร จ.สกลนคร
[5,6] สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
**Corresponding author; E-mail address: Phutthiphat.ra@rmuti.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการใช้ลำต้นแกนกัญชาแห้งที่ผ่านการย่อยบดละเอียดมาใช้เป็นมวลรวมหยาบในส่วนผสมของคอนกรีต แกนกัญชาแห้งจะถูกบดย่อยให้มีขนาดเล็กเลือกใช้ส่วนของแกนกัญชาที่ค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4# และเบอร์ 8# ร้อยละ 35 และ 65 ใช้อัตราส่วนแกนกัญชาแห้งต่อซีเมนต์ไฮดรอลิก (CS/C) เท่ากับ 0.16, ใช้เถ้าลอย (F) แทนที่ซีเมนต์ไฮดรอลิกในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50 และ 90 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนซีเมนต์ไฮดรอลิกต่อมวลรวมละเอียด (HC/S) เท่ากับ 1:2 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ไฮดรอลิก (W/C) เท่ากับ 0.48 ใช้สารเคมีลดน้ำอย่างมากร้อยละ 1 โดยน้ำหนักซีเมนต์ไฮดรอลิก ใช้อัตราส่วน $Al_2(SO_4)$: $Ca(OH_2)$ เท่ากับ 1:2 เป็นสารละลายประเภทด่าง และใช้ปริมาณของสารละลายในการปรับปรุงคุณภาพแกนกัญชาที่ร้อยละ 54 โดยน้ำหนักของแกนกัญชา ก่อนนำไปใช้เป็นมวลรวมผสมหยาบ ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและกายภาพ เช่น กำลังอัด หน่วยน้ำหนัก การดูดซึมน้ำ และการหดตัวแบบแห้งเชิงปริมาตรของแคนนาบิสคอนกรีต เปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติชุดควบคุม ที่อายุ 7, 14, 28 และ 56 วัน จากผลการทดสอบพบว่า ที่อายุ 28 และ 56 วัน ค่ากำลังอัดอยู่ในช่วง 90.59 ถึง 155.44 กก./ตร.ซม. หน่วยน้ำหนัก 1,373 ถึง 1,781 กก./ลบ.ม. การดูดซึมน้ำร้อยละ 9.23 ถึง 25.13 และค่าการหดตัวแบบแห้งเชิงปริมาตรร้อยละ 0.89 ถึง 1.75 จากผลการทดสอบยังพบว่า การใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการพัฒนากำลังที่เพิ่มขึ้นและลดลงของแคนนาบิสคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ อัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ประโยชน์ที่เข้าเกณฑ์ข้อแนะนำ ACI213R-87 คือ อัตราส่วน CSCF20

คำสำคัญ: แคนนาบิสคอนกรีต, กำลังอัด, หน่วยน้ำหนัก, การดูดซึมน้ำ, การหดตัวแบบแห้ง

Abstract

This research presents the use of crushed dried cannabis shiv as coarse aggregate in concrete mixes. Dried cannabis shiv is crushed to a small size, using standard sieve No. 4# and No. 8# is 35 and 65 percent. Use the ratio (CS/C) = 0.16, use fly ash instead of hydraulic cement at the ratio of 0, 10, 20, 30, 40, 50 and 90 by weight. The ratio of hydraulic cement to fine aggregate (C:S) was 1:2. The ratio of water to hydraulic cement (W/C) was 0.48. The superplasticizer was used at 1% by weight of hydraulic cement. Using the ratio of $Al_2(SO_4)$: $Ca(OH_2)$ was 1: 2 for use as an alkaline solution, and the volume of the solution was used to improve the quality of the cannabis shiv at 54 % by weight of the cannabis core Before being used as a coarse aggregate. The compressive strength, unit weight, water absorption and volumetric dry shrinkage of cannabis concrete were tested. Compared with the control normal concrete set at 7, 14, 28 and 56 days of age. The results showed that at the age of 28 and 56 days compressive strength is in the range of 90.59 to 155.44 kg/sq.cm. unit weight 1,373 to 1,781 kg/cu.m. water absorption 9.23 to 25.13 percent and dry shrinkage 0.89 to 1.75 percent. From the test results, it was also found that The use of fly ash in place of increased amounts of cement significantly contributed to the development of increased and decreased strength of cannabis concrete. The optimal ratio for use that meets the criteria for the ACI213R-87 recommendation is the CSCF20 ratio.

Keywords: cannabis concrete, compressive strength, unit weight, water absorption, dry shrinkage

1. บทนำ

กัญชง (Kanchong) หรือ เฮมพ์ (Hemp) (Cannabis sativa L.subsp. sativa) (ดังรูปที่ 1) และกัญชา (Cannabis sativa L.subsp. indica) (ดังรูปที่ 2) มีชื่อทางพฤกษศาสตร์เดียวกันคือ Cannabis sativa L. แต่เดิมนักพฤกษาศาสตร์ได้จัดให้อยู่ในวงศ์ตำแย (Urticaceae) แต่ต่อมาภายหลังพบว่า มีคุณสมบัติและลักษณะเฉพาะหลายประการที่แตกต่างกันออกไปจากพืชในกลุ่มตำแยมาก ออกเป็นวงศ์เฉพาะคือ (Cannabidaceae) ในปี ค.ศ. 1998 หรือ พ.ศ. 2541 นี้เอง นักพฤกษาศาสตร์ชาวอเมริกัน ได้จำแนก พืชกัญชงและกัญชา ออกจากกันโดยลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) และพฤกษาเคมี (Phytochemistry) โดยให้ชื่อวิทยาศาสตร์ของพืชกัญชงว่า “Cannabis sativa L. subsp. Sativa” และพืชกัญชาว่า “Canabis sativa L. subsp. Indica” เพราะมีต้นกำเนิดมาจากพืชชนิดเดียวกัน ลักษณะภายนอกหรือสัณฐานวิทยาของพืชทั้งสองชนิดนั้น จึงไม่แตกต่างกันหรือมีความแตกต่างน้อยมากจนยากในการจำแนก แต่การที่พืชทั้งสองชนิดนี้มีการใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางมาเป็นระยะเวลายาวนาน จึงทำให้มีการคัดเลือกสายพันธุ์เพื่อให้ได้สายพันธุ์ที่มีคุณสมบัติดีสุดและเหมาะสมที่สุดตรงตามวัตถุประสงค์ของการใช้ประโยชน์ จึงมีความแตกต่างกันชัดเจนมากขึ้นระหว่างต้นกัญชาที่เป็นยาเสพติดและต้นกัญชงที่ใช้เป็นพืชเส้นใยในปัจจุบัน [1],[2]



รูปที่ 1 ลักษณะต้น ลำต้น และแกนลำต้นเฮมพ์ [1]



รูปที่ 2 ลักษณะต้น ลำต้น ดอก และแกนลำต้นกัญชา [2]

กัญชง (Kanchong) หรือเฮมพ์ (Hemp) เจริญเติบโตได้ง่าย มีความสูงของลำต้น 2 ถึง 4 เมตร ประโยชน์ของกัญชง คือ นิยมนำเส้นใยของต้นกัญชงมาทำเป็นเส้นใยทอผ้าซึ่งเส้นใยที่ได้มีความเหนียวนุ่ม น้ำหนักเบา มีสีออกขาวแกมน้ำตาล จัดได้ว่าเป็นเส้นใยที่มีคุณภาพสูงมีความยืดหยุ่น แข็งแรงทนทาน ถ้าลอกเส้นใยออกจากลำต้นกัญชงหมดแล้ว จะเหลือในส่วนของแกนลำต้น (Hurds) หรือเปลือกแกนลำต้น (Shiv) นิยมเรียกตามภาษาต่างประเทศว่า “แกนเฮมพ์” (ดังรูปที่ 3) ที่มีลักษณะน้ำหนักเบา รูกลวงตรงแกนกลาง มีสีขาวอมน้ำตาล และไม่มีฝุ่น มีคุณสมบัติในการดูดซับกลิ่น น้ำ หรือน้ำมันได้ดี หน่วยน้ำหนักประมาณ 120 – 130 กก./ลบ.ม. และค่าความเป็นฉนวนอยู่ระหว่าง 0.033 – 0.094 วัตต์.ม/°เคลวิน ในต่างประเทศนิยมนำไปผลิตเป็นพลังงานชีวมวลในรูปแบบต่าง ๆ อาทิ ถ่านไม้, เอทานอล, เมทานอล หรือ แอลกอฮอร์



รูปที่ 3 ลักษณะแกนเฮมพ์ (Hemp Shiv) ที่ใช้ทำวัสดุก่อสร้างในปัจจุบัน

การนำแกนเฮมพ์มาผสมร่วมกับปูนไลม์ และน้ำ เมื่อแข็งตัวแล้วกลายเป็น “เฮมพ์กรีต” (Hempcrete) [3] ดังรูปที่ 4 เมื่อผสมร่วมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับมวลรวมละเอียด หรือมวลรวมหยาบบางส่วน, สารปอซโซลาน และน้ำ จะกลายเป็น “เฮมพ์คอนกรีต” (Hemp Concrete) ดังรูปที่ 5 ซึ่งมีคุณสมบัติน้ำหนักและหน่วยน้ำหนักปานกลาง (Moderate Density) หน่วยน้ำหนักที่ 1,420 – 1,470 กก./ลบ.ม. ของโครงสร้างคอนกรีตมวลรวมเบา เมื่อเปรียบเทียบกับหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตปกติที่ 2,320 - 2,400 กก./ลบ.ม. คุณสมบัติต้านทานความร้อน และความเป็นฉนวนภายในตัว ใช้ทำเป็นวัสดุก่อผนัง วัสดุเทพื้น วัสดุโครงสร้าง หรือแม้แต่งานฉนวน ที่รับน้ำหนักบรรทุกไม่มาก [4]



รูปที่ 4 เฮมพ์กรีต” (Hempcrete) [3]



รูปที่ 5 เฮมพ์คอนกรีต” (Hemp Concrete) [4]

จากงานวิจัยที่ผ่านมา Pantawee และคณะ (2017) [4] ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพแกนเฮมพ์ด้วยอะลูมิเนียมซัลเฟต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อที่จะนำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบเพื่อผลิตเป็นเฮมพ์คอนกรีต ผลการวิจัย พบว่า การใช้อลูมิเนียมซัลเฟต ($Al_2SO_4)_3$ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เพื่อปรับปรุงคุณภาพแกนเฮมพ์ ส่งผลให้ค่ากำลังอัดสูงขึ้นมากกว่าเฮมพ์คอนกรีต ที่ใช้แกนเฮมพ์ที่ไม่ได้ผ่าน การปรับปรุงคุณภาพถึง 4 เท่า, พุฒิพัทธ์ และคณะ (2562) [5] ได้ทำการศึกษาวิจัยเฮมพ์คอนกรีตจากแกนเฮมพ์ผสมเถ้าลอย โดยปรับปรุงคุณภาพแกนเฮมพ์ด้วยสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟต ($Al_2SO_4)_3$ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ก่อนนำมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมหยาบ และใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50 และ 90 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ผลการวิจัย พบว่า การใช้เถ้าลอยในปริมาณมากส่งผลให้เกิดการหน่วงการก่อตัวและแข็งตัวของเฮมพ์คอนกรีต อีกทั้งยังส่งผลต่อค่ากำลังอัดของเฮมพ์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยในส่วนผสมมีค่าลดลง, พีระพงศ์ และเอกชัย (2561) [6] ทำการศึกษาการหดตัวแบบแห้งของเฮมพ์คอนกรีตผสมเถ้าลอย ผลการวิจัย พบว่า การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10 – 20 ส่งผลให้ระยะการก่อตัวเร็วขึ้น เมื่อใช้ร้อยละ 30 ขึ้นไป ส่งผลให้ระยะการก่อตัวช้าลง ตามลำดับ ส่วนกำลังอัดของเฮมพ์คอนกรีตผสมเถ้าลอยโดยแทนปูนซีเมนต์บางส่วน ส่งผลให้กำลังอัดลดลงอย่างมากตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น การหดตัวแบบแห้งมีค่าอยู่ในช่วง $1,000x10^{-6}$ ถึง $1,200x10^{-6}$ ที่อายุการแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 1 ปี

ซึ่งจากงานวิจัยดังกล่าว มีการนำแกนเฮมพ์มาใช้ทดแทนวัสดุมวลรวมในงานคอนกรีตอย่างแพร่หลาย ทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ แต่การนำแกนลำต้นกัญชาซึ่งเป็นพืชตระกูลเดียวกับพืชกัญชงมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างยังมีน้อย ส่วนมากจะเน้นไปทางการนำไปใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ ซึ่งทางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร ได้รับอนุญาตให้มีการปลูกกัญชาแบบถูกกฎหมาย โดยจัดตั้งเป็นสถาบันวิจัยพัฒนากัญชาและกัญชงสมุนไพร มทร.อีสาน ได้ศึกษาการนำใบ กัญชา ดอก ลำต้น เปลือก ราก จากแปลงปลูกไปศึกษาและวิจัยเพื่อใช้เป็นยารักษาโรค แต่ว่าลำต้นกัญชาบางส่วนที่ไม่ถูกนำไปใช้งานได้ถูกทำลายทิ้งโดยการเผา จากเหตุผลดังกล่าว ทำให้ผู้วิจัยเกิดแนวคิดที่จะเพิ่ม มูลค่าและแนวทางจากการใช้ประโยชน์ จากวัสดุเหลือทิ้งทางธรรมชาติ ในเชิงอุตสาหกรรมยังไม่มีการนำลำต้นกัญชามาใช้ในด้านอุตสาหกรรม จึงเกิดแนวคิดที่จะนำแกนกัญชามาใช้ทดแทนมวลรวมหยาบเพื่อพัฒนาเป็นแกนกัญชาผสมคอนกรีตหรือแคนนาบิสคอนกรีต ให้มีความคล้ายคลึงกับเฮมพ์คอนกรีตที่นักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษามาก่อนหน้า จึงได้ใช้ฐานข้อมูลเดิมบางส่วนมาพัฒนาต่อยอดให้เกิดประโยชน์สูงสุด

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อศึกษานำวัสดุเหลือทิ้งจากภาคการเกษตรมาใช้ทดแทนมวลรวมหยาบในงานคอนกรีตโดยการแทนที่บางส่วน

2.2 เพื่อศึกษาการใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์บางส่วน

2.3 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกลและกายภาพ เช่น ค่ากำลังอัด หน่วยน้ำหนัก การดูดซึมน้ำ หน่วยน้ำหนัก และการหดตัวแบบแห้งเชิงปริมาตร ของแคนนาบิสคอนกรีตและเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติที่ผสมมวลรวมธรรมชาติ โดยใช้ข้อแนะนำ ACI 213R-87 [7]

3. การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (C)

2) เถ้าลอย (F) จากโรงไฟฟ้าถ่านหิน อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

3) มวลรวมละเอียด (S) ทรายแม่น้ำจากแหล่งจังหวัดหนองคาย ขนาดคละของมวลรวมละเอียด ดังตารางที่ 1

3) มวลรวมหยาบ (CA) หินปูนจากแหล่งจังหวัดหนองบัวลำภู ขนาดคละของมวลรวมหยาบ ดังตารางที่ 1

4) แกนลำต้นกัญชา (CS) จากคณะทรัพยากรธรรมชาติ มทร.อีสาน วิทยาเขตสกลนคร อำเภอพังโคน จังหวัดสกลนคร ดังรูปที่ 6 ผ่านการย่อยแกนลำต้น แล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน ใช้ส่วนที่ร่อนค้างตะแกรง No.4# และ No.8# (สัดส่วน 35 ต่อ 65) ดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 6 แกนลำต้นกัญชาที่ผ่านการย่อยขนาดจากแปลงปลูก คณะทรัพยากรธรรมชาติ มทร.อีสาน วิทยาเขตสกลนคร

ตารางที่ 1 ขนาดคละแกนกัญชาและมวลรวมละเอียด [4]

ขนาดตะแกรงร่อน	แกนกัญชา (%)	มวลรวมหยาบ (%)	มวลรวมละเอียด (%)
(3/8 in) to (No.4)	35	35	-
(N0.4) to (No.8)	65	65	-
(No.8) to (No.16)	-	-	13.5
(No.16) to (No.30)	-	-	41
(No.30) to Pan	-	-	45.5
รวม	100	100	100

5) สารเคมีปรับปรุงคุณภาพแกนกัญชาอลูมิเนียมซัลเฟต (Aluminium Sulfate) สูตรเคมี $(Al_2SO_4)_3$

6) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide) สูตรเคมี $(Ca(OH)_2)$

7) สารลดน้ำอย่างมาก (Super Plasticizer, SP) Sika-Viscocrete 10

8) น้ำสะอาด

3.2 สัญลักษณ์และตัวแปรของชุดอัตราส่วนผสม

งานวิจัยนี้ได้กำหนดสัญลักษณ์และตัวแปรอัตราส่วนผสมของชุดแคนนาบิสคอนกรีตและคอนกรีตปกติ ดังแสดงในสมการที่ (1) และ (2) ดังนี้

$$CSCFx \quad (1)$$

เมื่อ *CS* คือ แกนกัญชาแห้งย่อยหยาบ, *C* คือ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก, *Fx* คือ ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ไฮดรอลิกด้วยเถ้าลอย เช่น *CSCF90* หมายถึง แคนนาบิสคอนกรีตผสมแกนกัญชาโดยแทนที่ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกด้วยเถ้าลอยร้อยละ 90

$$CACFx \quad (2)$$

เมื่อ *CA* คือ มวลรวมหยาบ (หินปูน) , *C* คือ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก, *Fx* คือ ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ไฮดรอลิกด้วยเถ้าลอย, เช่น *CACF90* หมายถึง คอนกรีตปกติผสมมวลรวมหยาบโดยแทนที่ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกด้วยเถ้าลอยร้อยละ 90

3.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

1) สัดส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกต่อมวลรวมละเอียด = 1 : 2

2) อัตราส่วนระหว่างแกนกัญชาต่อปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก CS/C = 0.16

3) อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก W/C = 0.48

4) ใช้น้ำ 1.5 เท่าของน้ำหนักแกนกัญชาเจือจางสารละลาย $(Al_2SO_4)_3$

5) ใช้สารลดน้ำจำนวนมากร้อยละ 1 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

6) ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 0, 10, 20, 30, 40, 50, และ 90 % โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก และสัดส่วนระหว่าง $(Al_2SO_4)_3$: $Ca(OH)_2$ = 1 : 2 และใช้ปริมาณสารประกอบเพื่อปรับปรุงคุณภาพแกนกัญชาที่ 54 % โดยน้ำหนักของแกนกัญชา ใช้ทุกส่วนผสมของแคนนาบิสคอนกรีต และคอนกรีตปกติควบคุม (1:2:4) ดังตารางที่ 2 และ 3

7) หล่อก้อนตัวอย่างทดสอบ ขนาด 10x10x10 ซม. ใช้ทดสอบไม่น้อยกว่า 3 ก้อนตัวอย่างต่ออายุการบ่ม

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของแคนนาบิสคอนกรีตและสารเคมีปรับปรุงคุณภาพ

Mix	C



รูปที่ 10 การทดสอบคุณสมบัติทางกลและกายภาพของตัวอย่างทดสอบ

4. ผลการทดสอบ

4.1 ทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของ มวลรวมละเอียดและหยาบ, แกนกัญชา , ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก, แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และเถ้าลอย

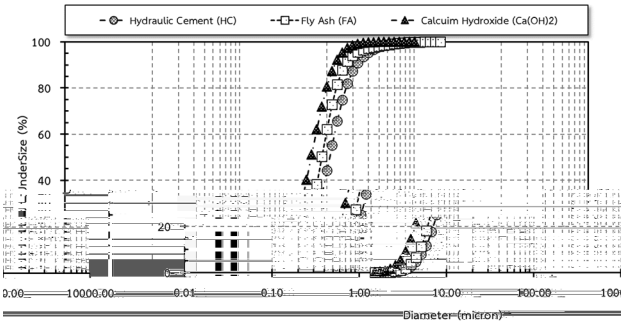
1) ผลทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุวิจัย ดังตารางที่ 4 และ 5 พบว่า ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก, แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และเถ้าลอยแม่เมาะ มีค่าอนุภาคเฉลี่ย (Mean Particle Size, d_{50}) เท่ากับ 14.12, 6.63 และ 8.80 micron (ไมครอน) ตามลำดับ และลักษณะการกระจายตัว ดังรูปที่ 11 ของขนาดอนุภาคของวัสดุยึดประสาน มีลักษณะการกระจายตัวที่ดี นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและเถ้าลอยมีขนาดเม็ดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยสุด

ตารางที่ 4 ค่าคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมละเอียดและหยาบ

วัสดุ	ถ.พ.	F.M.	หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)	การดูดซึมน้ำ (%)
ทราย	2.75	2.21	1,600	0.32
แกนกัญชา	0.62	1.42	120	-
หินปูน	2.23	2.65	1,600	0.72

ตารางที่ 5 ค่าคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน

วัสดุ	ถ.พ.	d_{50} (micron)	หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (cm^2/g)
ปูนซีเมนต์ฯ	3.14	14.12	1,471	3,600
เถ้าลอย	2.34	8.80	1,297	4,310
$Ca(OH)_2$	2.02	6.63	495.2	5,747



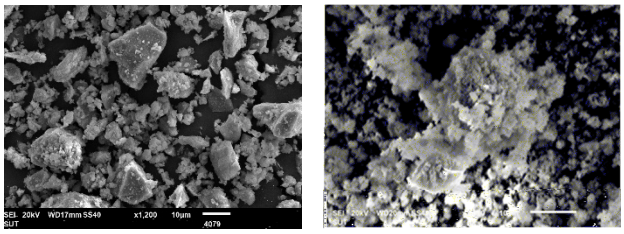
รูปที่ 11 การกระจายตัวของวัสดุประสานที่ใช้ในงานวิจัย

2) องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก, แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และเถ้าลอย ดังตารางที่ 6

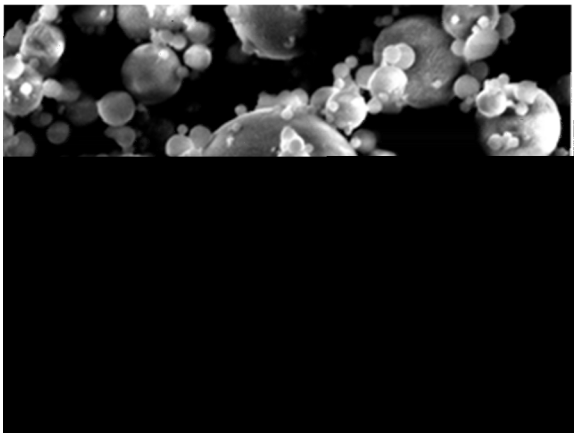
ตารางที่ 6 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี	เถ้าลอย (%)	ปูนซีเมนต์ฯ (%)	$Ca(OH)_2$ (%)
CaO	18.87	66.96	88.15
SiO_2	33.06	19.85	4.18
Al_2O_3	16.01	4.49	1.07
Fe_2O_3	15.90	3.56	0.13
K_2O	1.52	0.34	-
SO_3	10.83	2.46	0.14
MgO	3.10	1.23	6.32
LOI	0.98	1.23	6.93

3) โครงสร้างทางจุลภาคของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก, แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และเถ้าลอย



ก) ภาพ SEM ของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ข) ภาพ SEM ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์

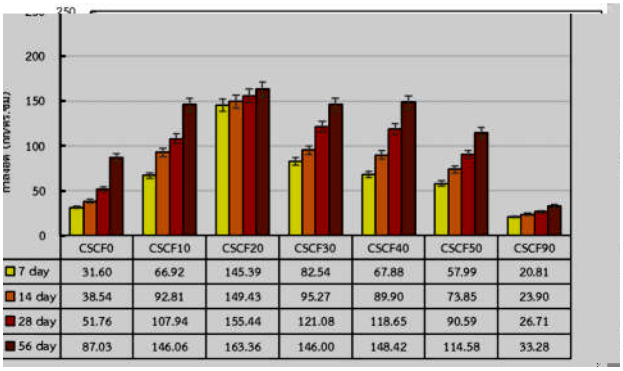


ค) ภาพ SEM ของเถ้าลอยแม่เมาะ

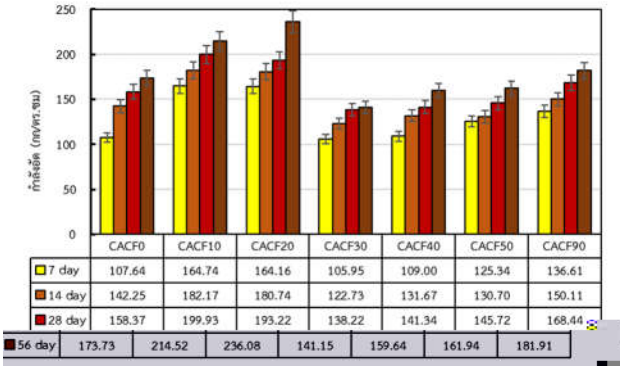
รูปที่ 12 (ก-ค) ภาพถ่าย SEM ของวัสดุประสาน

จากรูปที่ 12 (ก) พบว่า ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก มีลักษณะรูปร่างเป็นก้อนมีเหลี่ยมมุม ผิวค่อนข้างเรียบ และมีก้อนกลมมนของแร่ปอซโซลานกับวัสดุทดแทนฯ ผสมปนอยู่ อนุภาคค่อนข้างกระจัดกระจาย จากรูปที่ 12 (ข) พบว่า แคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือปูนไลม์ไฮเดรต มีลักษณะรูปร่างของอนุภาคเป็นผลึกเล็กๆ คล้ายก้อนสำลีและปุยนุ่น จับเรียงตัวกันเป็นกลุ่มก้อนมีทั้งกลุ่มเล็กและกลุ่มใหญ่ ขนาดอนุภาคมีขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอ จากรูปที่ 12 (ค) พบว่า เถ้าลอย มีรูปร่างลักษณะอนุภาคที่กลมมน ผิวภายนอกเรียบเสมอ เนื้อภายในแน่น การกระจายตัวของอนุภาคมีอย่างสม่ำเสมอ และมีขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกัน

4.2 กำลังอัด (Compressive Strength)



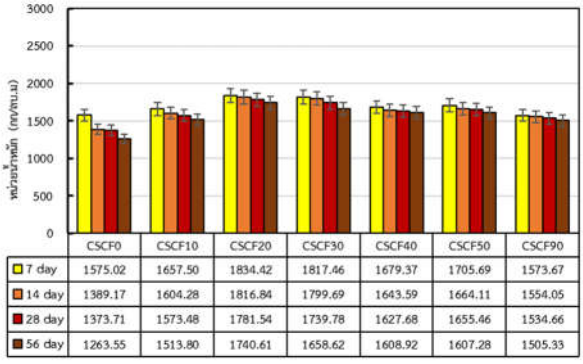
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุการบ่มของแคนนาบิสคอนกรีตแทนที่ด้วยเถ้าลอยในสัดส่วนที่ต่างกัน



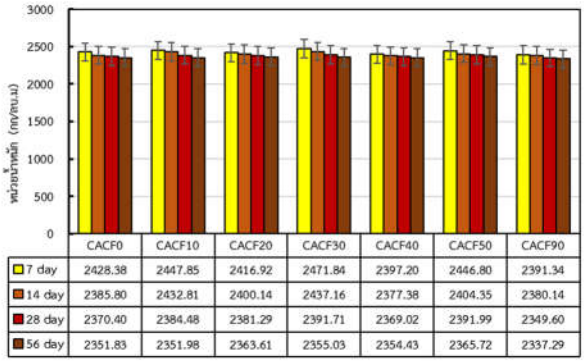
รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุการบ่มของคอนกรีตปกติแทนที่ด้วยเถ้าลอยในสัดส่วนที่ต่างกัน

จากรูปที่ 13 ผลทดสอบกำลังอัดของแคนนาบิสคอนกรีต ที่อายุ 7, 14, 28 และ 56 วัน โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ในสัดส่วนที่ต่างกัน พบว่า ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามลำดับอายุการบ่มกับสัดส่วนแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย โดยค่ากำลังอัดสูงสุดที่การแทนที่ร้อยละ 20 หลังจากนั้นจะเริ่มลดต่ำลงไปจนถึงร้อยละ 90 ปัจจัยเกิดจากผลของปริมาณสารแคลเซียมซิลิเกตออกไซด์ที่มีปริมาณมากในเนื้อแคนนาบิสคอนกรีตส่งผลต่อการลดลงของค่ากำลังอัด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ พุฒิพัทธ์ และคณะ (2562) [5] และจากรูปที่ 14 ผลกำลังอัดของคอนกรีตปกติชุดควบคุม ที่อายุการบ่มเดียวกัน พบว่า ค่ากำลังอัดเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับอายุการบ่มและสัดส่วนแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ค่ากำลังอัดสูงสุดที่การแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 เช่นกัน ค่ากำลังอัดเริ่มลดลงตั้งแต่ร้อยละ 30 ถึง 90 กับค่ากำลังอัดมีช่วงที่แปรปรวน อันเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของเนื้อคอนกรีตที่ผสมมวลรวมหยาบส่งผลต่อค่ากำลังอัดของชุดควบคุม ค่ากำลังอัดของแคนนาบิสคอนกรีต อยู่ในช่วงระหว่าง 90.59-155.44 กก/ตร.ซม และคอนกรีตปกติชุดควบคุม อยู่ในช่วงระหว่าง 138.22-199.93 กก/ตร.ซม ที่อายุ 28 และ 56 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับข้อแนะนำของ ACI213R-87 [7] ระบุไว้ว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตโครงสร้างมวลรวมเบาระดับกลางต้องมีค่ากำลังอัดอยู่ระหว่าง 70 ถึง 176 กก/ตร.ซม เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้ค่ากำลังอัดอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ข้อแนะนำ ค่ากำลังอัดที่ดีสุดของทั้งอัตราส่วน 2 ชุดคอนกรีต อยู่ที่อัตราส่วนผสม CSCF20 และ CAC20

4.3 หน่วยน้ำหนัก (Unit Weight)



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและอายุการบ่มของแคนนาบิสคอนกรีตแทนที่ด้วยเถ้าลอยในสัดส่วนที่ต่างกัน

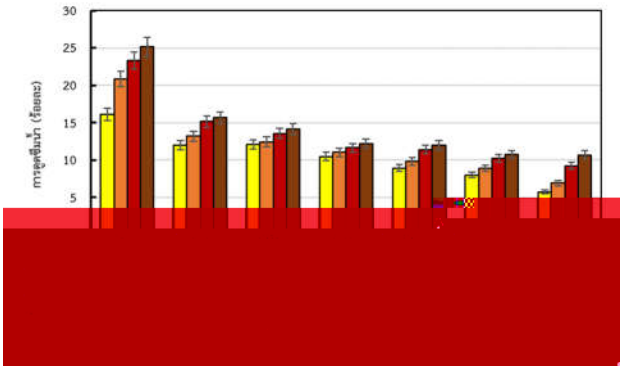


รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและอายุการบ่มของคอนกรีตปกติแทนที่ด้วยเถ้าลอยในสัดส่วนที่ต่างกัน

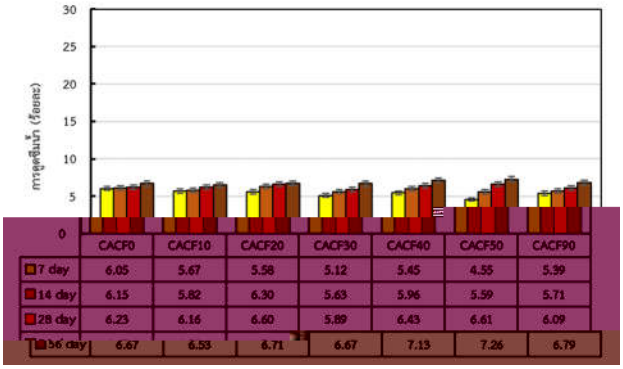
จากรูปที่ 15 ผลทดสอบหน่วยน้ำหนักของแคนนาบิสคอนกรีต ที่อายุ 7, 14, 28 และ 56 วัน โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ในสัดส่วนที่ต่างกัน พบว่า ค่าหน่วยน้ำหนักลดลงตามอายุการบ่ม เป็นผลมาจากความต้องการความชื้นทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของเนื้อคอนกรีตมีค่าสูงที่อายุ 7 กับ 14 วัน หลังจากนั้นเริ่มคงที่และลดต่ำลงที่อายุ 28 กับ 56 วัน และสัดส่วนแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลต่อค่าหน่วยน้ำหนักที่ลดลง โดยรวมแล้วค่าหน่วยน้ำหนักของแคนนาบิสคอนกรีตอยู่ในช่วงที่ไม่แตกต่างกันมาก และจากรูปที่ 16 ผลหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตปกติชุดควบคุม ที่อายุการบ่มเดียวกัน พบว่า ค่าหน่วยน้ำหนักลดลงตามช่วงอายุการบ่ม ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยไม่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มหรือลดของหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตปกติชุดควบคุมมากนัก ผลที่เกิดขึ้นมีต่างกันไม่มาก ค่าหน่วยน้ำหนักของแคนนาบิสคอนกรีตมีค่าอยู่ระหว่าง 1,373.71 – 1,781.54 กก/ลบ.ม และคอนกรีตปกติชุดควบคุม 2,337.29 – 2,384.48 กก/ลบ.ม ที่อายุ 28 และ 56 วัน ในส่วนของชุดควบคุมมีค่าที่สูงกว่าชุดไม่ควบคุมเป็นผลมาจากมวลรวมเบาที่ใช้ทดแทนมวลรวมธรรมชาติมีค่าหน่วยน้ำหนักที่ต่างกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับข้อแนะนำของ ACI213R-87 [7] ระบุไว้ว่าค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตโครงสร้างมวลรวมเบาระดับกลางต้องมีค่าหน่วยน้ำหนักอยู่ระหว่าง 800 ถึง 1,400 กก/ลบ.ม หรือจากงานวิจัยของ Pantawee และคณะ (2017) [4] พบว่า ค่าหน่วยน้ำหนักของเฮมพ์คอนกรีตอยู่ระหว่าง 1,420 – 1,470 กก./ลบ.ม เมื่อเปรียบเทียบกับข้อแนะนำและงานวิจัยที่ผ่านมา ค่าหน่วยน้ำหนักของแคนาบิสคอนกรีตอยู่

ในช่วงที่ยอมรับได้ อัตราส่วนผสมที่มีหน่วยน้ำหนักเบาสุดอยู่ที่ CSCF0 และ CACF90

4.4 การดูดซึมน้ำ (Water Absorption)



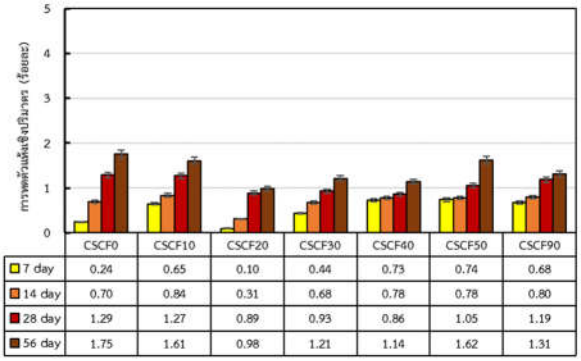
รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำและอายุการบ่มของแคนนาบิสคอนกรีตแทนที่ด้วยเถ้าลอยในสัดส่วนที่ต่างกัน



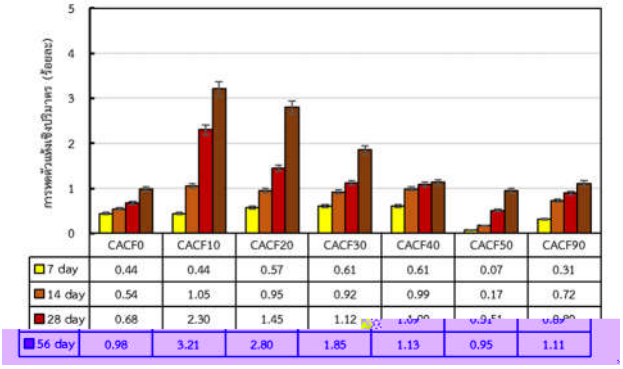
รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำและอายุการบ่มของคอนกรีตปกติแทนที่ด้วยเถ้าลอยในสัดส่วนที่ต่างกัน

จากรูปที่ 17 ผลทดสอบการดูดซึมน้ำของแคนนาบิสคอนกรีต ที่อายุ 7, 14, 28 และ 56 วัน โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ในสัดส่วนที่ต่างกัน พบว่า ค่าการดูดซึมน้ำของก้อนตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่แทนที่ซีเมนต์ในปริมาณเพิ่มขึ้น ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าต่ำช่วงอายุ 7 และ 14 วัน หลังจากนั้นมีความต้องการน้ำทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่อายุ 28 และ 56 วัน ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าที่สูงขึ้นไม่มาก อิทธิพลการใช้เถ้าลอยที่แทนซีเมนต์ร้อยละที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อความทึบน้ำของเนื้อคอนกรีตที่ลดลงตามปริมาณการถูกแทนที่ และจากรูปที่ 18 ผลการดูดซึมน้ำของคอนกรีตปกติชุดควบคุม ที่อายุการบ่มเดียวกัน พบว่า ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตปกติมีค่าที่ไม่สูงมากเมื่อเทียบกับชุดอัตราส่วนแคนนาบิสคอนกรีต เป็นผลมาจากมวลรวมหยาบที่ใช้ผสมมีคุณสมบัติความพรุนที่ต่างกันส่งผลต่อการดูดซึมน้ำของเนื้อคอนกรีตทั้ง 2 ชุด แกนกัญชามีความพรุนภายในมากกว่ามวลรวมหยาบธรรมชาติ (หินปูน) ค่าการดูดซึมน้ำของแคนนาบิสคอนกรีตมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 9.23 – 25.13 และคอนกรีตปกติชุดควบคุมอยู่ระหว่างร้อยละ 5.89– 7.26 ที่อายุ 28 และ 56 วัน เมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบกับข้อแนะนำ ACI213R-87 [7] ไม่ได้ระบุช่วงหรือขั้นต่ำของค่าการดูดซึมน้ำ ระบุเพียงว่าค่าการดูดซึมน้ำของเนื้อคอนกรีตจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความพรุนภายในของเนื้อคอนกรีต ถ้าเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาของพุฒิพัทธ์ และคณะ (2562) [5] และ พีระพงศ์ และเอกชัย (2561) [6] พบว่า ค่าการดูดซึมน้ำของเฮมพ์คอนกรีตจากการวิจัยอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 13.9 – 14.5 และร้อยละ 14 – 17 เมื่อเปรียบเทียบกับข้อแนะนำและงานวิจัยที่ผ่านมา ค่าการดูดซึมน้ำของแคนาบิสคอนกรีตและคอนกรีตปกติชุดควบคุมอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ อัตราส่วนผสมที่มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุดอยู่ที่ CSCF90 และ CACF10

4.5 การหดตัวแห้งเชิงปริมาตร (Volume Dry Shrinkage)



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแห้งเชิงปริมาตรของแคนนาบิสคอนกรีตแทนที่ด้วยเถ้าลอยในสัดส่วนที่ต่างกัน



รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแห้งเชิงปริมาตรของคอนกรีตปกติแทนที่ด้วยเถ้าลอยในสัดส่วนที่ต่างกัน

จากรูปที่ 19 ผลทดสอบการหดตัวแห้งเชิงปริมาตรของแคนนาบิสคอนกรีต ที่อายุ 7, 14, 28 และ 56 วัน โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ในสัดส่วนที่ต่างกัน พบว่า ค่าการหดตัวแห้งเชิงปริมาตรของก้อนตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่แทนที่ซีเมนต์ในปริมาณเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการความแน่นของเนื้อเพสต์ภายในของคอนกรีตทำให้การหดตัวมีค่าที่ลดต่ำลง ซึ่งการหดตัวแบบแห้งเกิดจากการที่คอนกรีตอยู่ในสภาวะอากาศที่มีความชื้นต่ำ ทำให้คอนกรีตบริเวณผิวที่สัมผัสกับอากาศสูญเสียน้ำจึงทำให้เกิดการหดตัวของคอนกรีต ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ พีระพงศ์ และเอกชัย (2561) [6] และจากรูปที่ 20 ผลการหดตัวแห้งเชิงปริมาตรของคอนกรีตปกติชุดควบคุม ที่อายุการบ่มเดียวกัน พบว่า ค่าการหดตัวแห้งเชิงปริมาตรของคอนกรีตปกติมีค่าที่ไม่สูงมากเมื่อเทียบกับชุดอัตราส่วนแคนนาบิสคอนกรีต ค่ามีการปรับตัวสูงช่วงร้อยละ 10 – 30 ของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย อาจเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของก้อนตัวอย่างทดสอบที่ทำให้ค่าหดตัวแห้งมีค่ามีแปรปรวน แต่ภาพรวมของคอนกรีตทั้ง 2 ชุด ค่าที่ได้ไม่

แตกต่างกันมาก ค่าการหดตัวแห้งเชิงปริมาตรของแคนนาบิสคอนกรีตมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0.86 – 1.75 และคอนกรีตปกติชุดควบคุมอยู่ระหว่างร้อยละ 0.51 – 3.21 ที่อายุ 28 และ 56 วัน เมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบกับข้อแนะนำ ACI213R-87 [7] ระบุไว้ว่าไม่ควรมีค่าการหดตัวแห้งเกินกว่าร้อยละ 50 ของปริมาตร เมื่อเปรียบเทียบกับข้อแนะนำและงานวิจัยที่ผ่านมา ค่าการหดตัวแห้งเชิงปริมาตรของแคนาบิสคอนกรีตและคอนกรีตปกติชุดควบคุมอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ไม่เกินขอบเขตของข้อแนะนำ อัตราส่วนผสมที่มีค่าการหดตัวแห้งเชิงปริมาตรต่ำสุดอยู่ที่ CSCF20 และ CACF50

5. สรุปผลการวิจัย

5.1) การใช้แกนลำต้นกัญชาวัสดุเหลือทิ้งจากภาคการเกษตรมาใช้เป็นวัสดุชีวภาพทดแทนมวลรวมหยาบในงานคอนกรีต ช่วยลดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตลงได้ระดับหนึ่ง แต่ยังไม่เป็นที่แพร่หลายเมื่อเทียบกับแกนเฮมพ์ ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน

5.2) การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้เกิดการหน่วงการก่อตัวและแข็งตัวของแคนนาบิสคอนกรีต อีกทั้งยังส่งผลให้กำลังอัดของแคนนาบิสคอนกรีตที่มีเถ้าลอยในส่วนผสมมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ไม่ใช้เถ้าลอยแทนที่ ร้อยละของการแทนที่เถ้าลอยที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ไม่เกินร้อยละ 20

5.3) แคนนาบิสคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่ใช้แกนกัญชาผ่านการปรับปรุงคุณภาพ มีค่ากำลังอัดอยู่ในช่วงระหว่าง 90.59 ถึง 155.44 กก/ตร.ซม หน่วยน้ำหนักอยู่ในช่วงระหว่าง 1,373 ถึง 1,781 กก/ลบ.ม การดูดซึมน้ำร้อยละ 9.23 ถึง 25.13 และการหดตัวเชิงปริมาตรอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 0.86 ถึง 1.75 ที่อายุ 28 และ 56 วัน ทั้งแคนนาบิสคอนกรีตและคอนกรีตปกติชุดควบคุมต่างก็มีคุณสมบัติที่จุดด้อยและจุดเด่นต่างกัน ภาพรวมเมื่อเทียบกับข้อแนะนำ ACI213R-87 [7] และสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

5.4) แคนนาบิสคอนกรีตที่มีอัตราส่วนที่ดีสุดเหมาะสำหรับนำไปใช้ประโยชน์ คือ อัตราส่วน CSCF20 ที่มีคุณสมบัติเข้าเกณฑ์ข้อแนะนำและสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา

6. การนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์/ข้อเสนอแนะ

6.1) การใช้แกนลำต้นกัญชาซึ่งเป็นวัสดุชีวภาพมวลรวมเบาในงานคอนกรีตซึ่งการใช้งานยังไม่แพร่หลายเหมือนแกนลำต้นกัญชงและเป็นวัสดุใหม่จึงควรศึกษาคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องให้รอบด้านก่อนนำไปใช้งานจริง

6.2) การนำแคนนาบิสไปใช้ประโยชน์ เหมาะสำหรับนำไปใช้งานเป็นคอนกรีตโครงสร้างที่รับน้ำหนักไม่มาก เช่น คอนกรีตเทพื้น บล็อกปูทางเท้า อิฐก่อผนัง ผนังโชว์ลายวัสดุ เป็นต้น

6.3) ควรศึกษาวัสดุที่เกี่ยวข้องกับกัญชาหรือกัญชงให้มากขึ้น เช่น การใช้เถ้าชีวมวลเพื่อใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณอภิสิทธิ์ วรรณศรี และคุณยุวดี กล้าณรงค์ นักศึกษาปริญญาตรีจากสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทางด้านจัดเก็บข้อมูลทางเทคนิค , ผลการทดสอบในเบื้องต้น, ผลทดสอบทางกล และกายภาพ

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.อินทร์ธัชว์ ศรีบุตต์ สถาบันวิจัยพัฒนากัญชาและกัญชงสมุนไพร มทร.อีสาน จากคณะทรัพยากรธรรมชาติ มทร.อีสาน วิทยาเขตสกลนคร อ.พังโคน จ.สกลนคร ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์วัสดุลำต้นแกนกัญชาและข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องกับวัสดุงานวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัท ซิก้า (ประเทศไทย) จำกัด ประจำเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สารผสมเพิ่มในงานคอนกรีตสารลดน้ำอย่างมาก (Super Plasticizer) Sika Viscocrete-10 สำหรับใช้วิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร ในด้านส่งเสริมองค์ความรู้ทางด้านการวิจัย งบประมาณในการนำเสนอผลงานวิจัย และอำนวยความสะดวกในการเข้าใช้ห้องปฏิบัติการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและชั้นสูง

เอกสารอ้างอิง

[1] สริตา ปิ่นมณี (2558). *การพัฒนาเส้นใยเฮมพ์สู่พืชเศรษฐกิจในประเทศไทย.*[ออนไลน์].สืบค้นจาก: https://www.nstda.or.th/nac2015/download/presentation/April2/CC404-Sarita.

[2] Schilling, S., Melzer, R., & McCabe, P. F. (2020). Cannabis sativa. *Current Biology*, 30(1), R8-R9.

[3] Plamen Ivanov Peev, Jesper Saxgren (2012), *Is industrial hemp a sustainable construction materials,* Bachelor of Architectural Technology and Construction Management, VIA University College, Horsens, Denmark

[4] Pantawee, S., Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C., & Chindaprasirt, P. (2017). Utilization of hemp concrete using hemp shiv as coarse aggregate with aluminium sulfate [$Al_2(SO_4)_3$] and hydrated lime [$Ca(OH)_2$] treatment. *Construction and Building Materials*, 156, pp.435-442.

[5] พุฒิพัทธ์ ราชคำ, ธีรวัฒน์ สินศิริ, ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี และ รัฐพล สมนา (2562). คุณสมบัติเบื้องต้นของเฮมพ์คอนกรีตจากแกนเฮมพ์ผสมเถ้าลอย.*การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 14*, ประจวบคีรีขันธ์ , 6-8 มีนาคม 2562, หน้า 141-147.

[6] พีระพงศ์ จำรัสประเสริฐ และ เอกชัย บุญทันใจ (2561). *การศึกษาการหดตัวแบบแห้งของเฮมพ์คอนกรีตผสมเถ้าลอย.* ปริญญานิพนธ์ระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

[7] ACI.213R-87, *Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete.* Technical Documents.