# บทที่ 4
# ผลการวิจัยและการวิเคราะห์

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำเถ้าชานอ้อยมาใช้ทดแทนซีเมนต์บางส่วน ในการผลิตคอนกรีตบล็อก ผู้วิจัยได้ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางกล และคุณสมบัติทางเคมี ของคอนกรีตบล็อกที่ผสมเถ้าชานอ้อยในอัตราส่วนซีเมนต์ต่อเถ้าชานอ้อย ปริมาณร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ใช้ระยะเวลาการบ่มคอนกรีตบล็อก 3, 7, 14 และ 28 วัน เพื่อให้สอดคล้องตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล แสดงดังต่อไปนี้

## 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพเบื้องต้นของวัสดุ

การเตรียมวัสดุและทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพเบื้องต้นของวัสดุ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ การดูดซึม วิเคราะห์ขนาดคละ และหน่วยน้ำหนัก ได้ผลการทดสอบตามวัสดุการทดสอบดังนี้

1. ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C188–16 มีค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย 3.17

2. ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะเถ้าชานอ้อย จากโรงงานน้ำตาลครบุรี เป็นโรงงานผลิตน้ำตาล บริเวณ อำเภอครบุรี จังหวัดนครราชสีมา ตามมาตรฐาน ASTM C188–16 มีค่าเฉลี่ย 2.21

3. ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะทราย ตามมาตรฐาน ASTM C127 มีค่าเฉลี่ย 2.54 และร้อยละการดูดซึมของทราย มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 1.01 หน่วยน้ำหนักของทราย ตามมาตรฐาน ASTM C29 มีค่าเฉลี่ย 1,620 กก./ม.$^3$

4. ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะหินเกล็ด ตามมาตรฐาน ASTM C128 มีค่าเฉลี่ย 2.68 และร้อยละการดูดซึมของทราย มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 2.05 หน่วยน้ำหนักของหินเกล็ด ตามมาตรฐาน ASTM C29 มีค่าเฉลี่ย 1,540 กก./ม.$^3$

## 4.2 ผลการทดสอบมอร์ตาร์

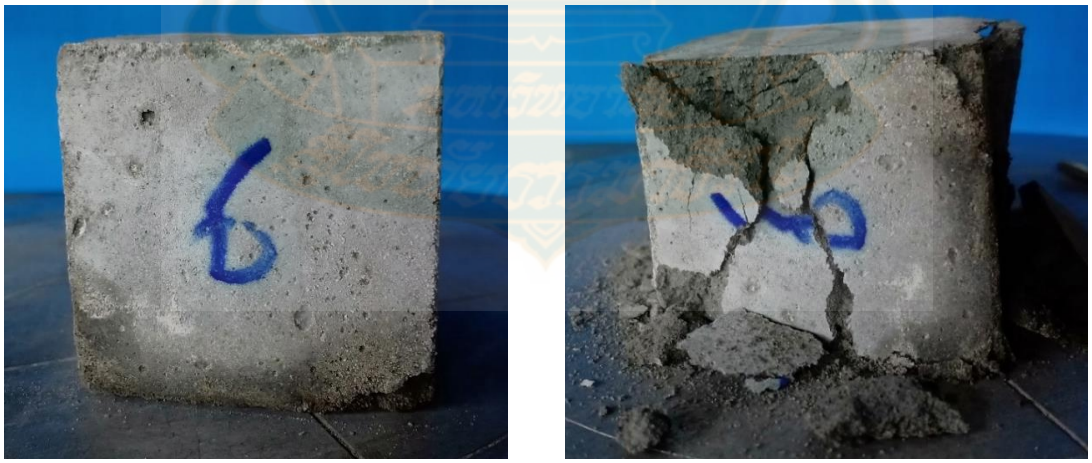
ทดสอบการไหลเพื่อหาความต้องการน้ำในส่วนผสมของมอร์ตาร์ ได้ผลการทดสอบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ เถ้าชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลครบุรี ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 เพื่อแยกสิ่งเจือปนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่เนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ออกและนำมาทำการทดสอบหาปริมาณน้ำโดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C230 ปริมาณเถ้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยควบคุมค่าการไหลร้อยละ 110 ± 5 ตัวอย่างการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 4.1 และทำการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C648 ตัวอย่างการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 4.2 โดยทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ผลการทดสอบเป็นไปดังตารางที่ 4.1

**ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการไหลตามมาตรฐาน ASTM C230 และการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C648**

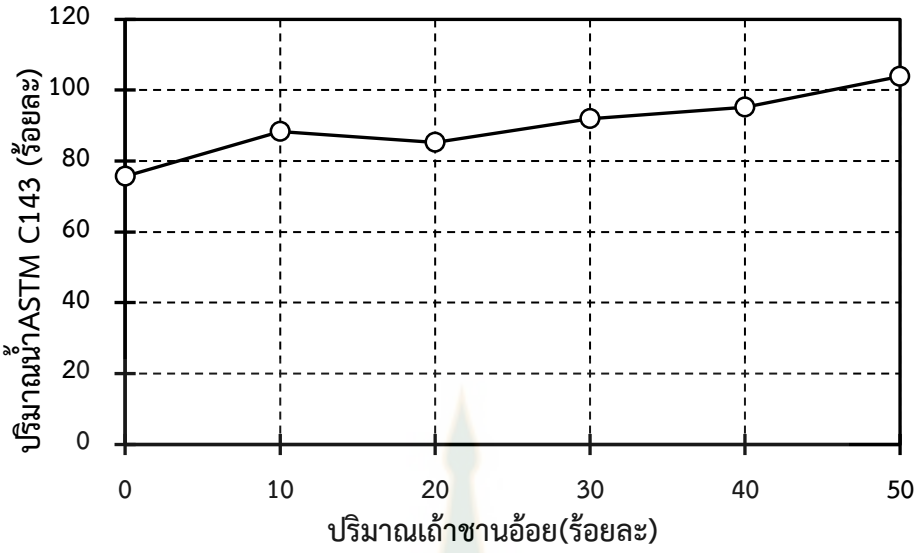
| ตัวอย่างที่ | ปริมาณเถ้าชานอ้อย (ร้อยละ) | ปริมาณน้ำ (ร้อยละ) | ค่าการไหล (ร้อยละ) | การทดสอบกำลังอัด (วัน) | | | | หมายเหตุ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 3 | 7 | 14 | 28 | |
| M-1 | 0 | 75.70 | 110 | 71.94 | 167.86 | 193.76 | 337.53 | ***มาตรฐาน*** |
| M-2 | 10 | 88.38 | 110 | 62.79 | 146.52 | 165.26 | 270.25 | ลำดับที่ 1 |
| M-3 | 20 | 85.29 | 110 | 38.44 | 89.7 | 130.15 | 238.94 | ลำดับที่ 2 |
| M-4 | 30 | 92.01 | 110 | 30.46 | 71.07 | 99.49 | 202.52 | ลำดับที่ 3 |
| M-5 | 40 | 95.15 | 110 | 21.49 | 30.45 | 50.15 | 167.79 | ลำดับที่ 4 |
| M-6 | 50 | 103.91 | 110 | 11.96 | 13.05 | 27.45 | 149.43 | ลำดับที่ 5 |

**<u>หมายเหตุ</u>** ผลการทดสอบจากค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดสูงที่รับกำลังได้ดีในลำดับที่ 1 และ 2

**ภาพที่ 4.1 ทดสอบการไหลตามมาตรฐาน ASTM C230**



**ภาพที่ 4.2 ตัวอย่างก่อนและหลังทดสอบกำลังอัดทดสอบมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C648**



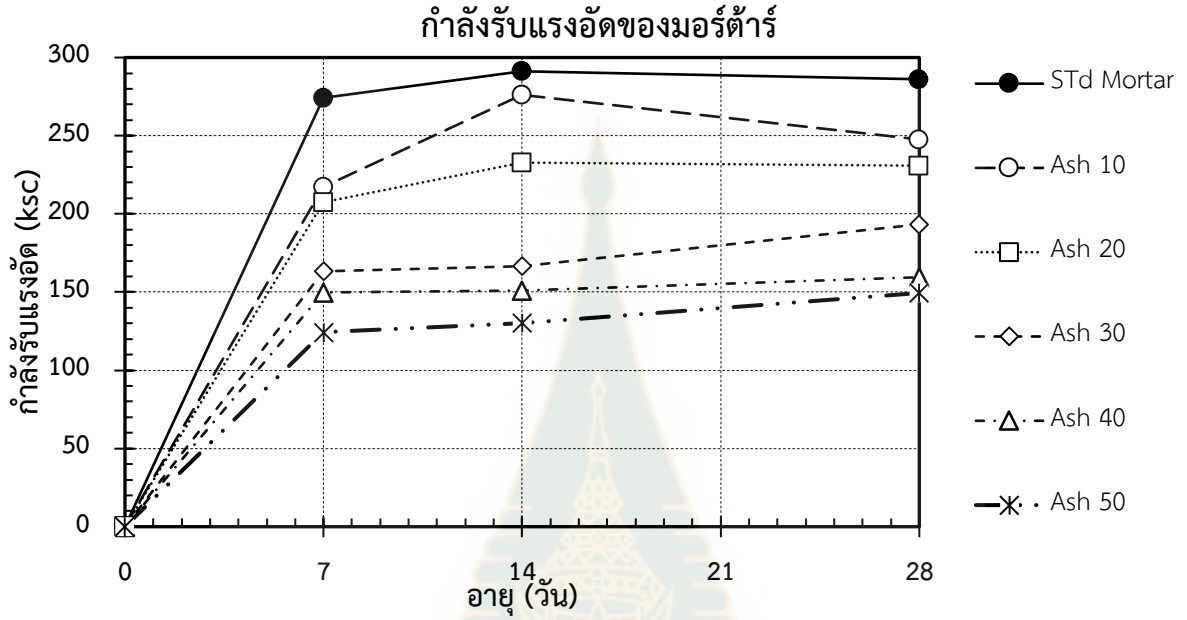

**แผนภูมิที่ 4.1 ปริมาณน้ำเพื่อควบคุมการไหลตามมาตรฐานที่มีผลกระทบต่อปริมาณเถ้าชานอ้อย**

จากแผนภูมิที่ 4.1 ผลจากการทดลองพบว่ามอร์ตาร์มาตรฐานและมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยมีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วง 105 ถึง 115 พบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยมีความต้องการใช้น้ำร้อยละ 75.70, 88.38, 85.29, 92.01, 95.15 และ 103.91 ซึ่งมีความต้องการน้ำมากขึ้นกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานร้อยละ 16.75, 12.67, 21.55, 25.69 และ 37.27 ตามลำดับ และแสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าชานอ้อยผสมมอร์ตาร์มีผลต่อความสามารถเทได้ (Workability) โดยมีแนวโน้มความต้องการใช้น้ำเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีปริมาณเถ้าชานอ้อยเพิ่มขึ้น

**4.3 ผลการทดสอบคอนกรีตบล็อก**

4.3.1 การหาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมก่อนนำไปขึ้นรูปตัวอย่าง โดยขนาดของตัวอย่างมีขนาดตามมาตรฐานอุตสาหกรรม จากกระทรวงอุตสาหกรรม เลขที่ มอก.57-2560 ประเภทคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก และเลขที่ มอก. 58-2560 ประเภทคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก คอนกรีตบล็อก เป็นวัสดุผสมจากซีเมนต์ หินเกล็ด ทรายหยาบ และน้ำ ซึ่งจะมีน้ำหนักมาก จึงได้ออกแบบให้มีรูกลวงเพื่อลดน้ำหนักลง คอนกรีตบล็อกที่ผลิตและใช้งานทั่วไปในท้องตลาด จะมีขนาด 7x19x39 ซม. ดังแสดงในภาพที่ 3.1 ในส่วนนี้จะมุ่งเน้นไปที่การขึ้นรูปเพื่อให้ได้อัตราส่วนของมอร์ตาร์ต่อหินเกล็ด โดยควบคุมค่าการทดสอบการยุบตัวของคอนกรีตตามมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ ASTM C143 การทดสอบหาค่ายุบตัวของคอนกรีต (Slump Test) เป็นวิธีที่ดีและสะดวกมากที่สุดสำหรับการทดสอบในสนาม เพราะว่าวิธีนี้ทำได้ง่าย และเครื่องมือที่ใช้ก็ทำได้ไม่ยากนัก ค่าความยุบตัวของคอนกรีตที่วัดได้จะมีค่าน้อยหรือมากขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต การวัดหาค่าความยุบตัวคอนกรีตที่ใช้ในงานต่าง ๆ ควรทำเป็นประจำ เพื่อจะได้เนื้อคอนกรีตที่มีคุณภาพดีสม่ำเสมอกันตลอดที่ขึ้นรูปได้สมบูรณ์ และนำไปทดสอบวีบี (Vebe Test) ของคอนกรีตบล็อก ตามมาตรฐาน BS EN 12350-3 เพื่อทดสอบวัดความสามารถเทได้ของคอนกรีตที่มีความข้นเหลวต่ำ ดังตัวอย่างของคอนกรีตที่นำไปขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกที่มีค่าการยุบตัวที่มีค่าต่ำ ส่วนที่ 3 นี้ทำการหาร้อยละของปริมาณเพสต์ที่จะใช้ขึ้นรูป

บล็อก เพื่อนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซลเพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดต่อไป และนำผลของกำลังรับแรงอัดที่ดีที่สุดไปทำการหล่อตัวอย่างเพื่อดูแนวโน้มของการพัฒนากำลังต่อไป การทดสอบนี้จะใช้ตัวอย่างทั้งแบบหล่อคอนกรีต (Metal Cube Mould) ขนาด 10x10x10 ซม. และคอนกรีตบล็อกขนาด 7x19x39 ซม. จำนวนตัวอย่างแสดงในตารางส่วนผสมที่ 4.1




**แผนภูมิที่ 4.2 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ต่อการแทนที่ปริมาณเถ้าชานอ้อย**

4.3.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ พบว่ามอร์ตาร์มาตรฐานและมอร์ตาร์ผสมเถ้าชานอ้อยแสดงไว้ใน แผนภูมิที่ 4.2 สามารถอธิบายได้ว่ากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มของมอร์ตาร์ในทุกส่วนผสม ปริมาณซีเมนต์ผสมเข้าไปจะแปรผันตรงกับการพัฒนาของกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ เมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน กำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐานมีค่าเท่ากับ 285.94 ksc ส่วนกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าชานอ้อย มีค่าเท่ากับ 247.59, 230.75, 193.30, 159.53 และ 149.44 ksc ซึ่งลดลงตามลำดับ และพบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าชานอ้อยทั้งหมดมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐานทุกอายุการทดสอบ

นำผลทดสอบมอร์ตาร์ มาทำการทดสอบดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ ค่าดัชนีกำลัง (Strength Activity Index) ตามมาตรฐาน ASTM C311-02 เพื่อตรวจสอบดัชนีกำลังในกรณีของการใช้วัสดุปอซโซลาน ผลการทดสอบเป็นไปดังตารางที่ 4.2

**ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ (Strength Activity Index) ตามมาตรฐาน ASTM C311-02**

| ตัวอย่างที่ | ปริมาณเถ้าชานอ้อย (ร้อยละ) | ค่าดัชนีกำลัง (วัน) | | | | หมายเหตุ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 3 | 7 | 14 | 28 | |
| M-1 | 0 | 100 | 100 | 100 | 100 | มาตรฐาน |
| M-2 | 10 | 87.28 | 87.29 | 85.29 | **80.07** | ลำดับที่ 1* |
| M-3 | 20 | 53.43 | 53.44 | 67.17 | 70.79 | ลำดับที่ 2* |
| M-4 | 30 | 42.34 | 42.34 | 51.35 | 60.00 | ลำดับที่ 3 |
| M-5 | 40 | 29.87 | 18.14 | 25.88 | 49.71 | ลำดับที่ 4 |

**หมายเหตุ** *ผลการทดสอบค่าดัชนีกำลังที่ดีที่สุดในลำดับที่ 1 และ 2

4.3.3 การทดสอบคุณสมบัติทางด้านกายภาพและวิศวกรรมของคอนกรีตบล็อก ผู้วิจัยได้จัดทำแบบหล่อคอนกรีตบล็อกตัวอย่างเพื่อทำการหาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมก่อนนำไปขึ้นรูปตัวอย่าง โดยนำไปทดสอบ Vebe test ตามมาตรฐาน BS EN 12350-3 พบว่าระยะเวลาที่ได้จากการทดสอบและผลการทดสอบ พบว่า ปริมาณแทนที่ร้อยละ 0 ระยะเวลา 8.13 นาที ร้อยละ 10 ระยะเวลา 3.47 นาที และ ร้อยละ 20 ระยะเวลา 2.07 นาที (เวลาเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ) จะเห็นได้ว่าปริมาณเถ้าชานอ้อยที่แทนที่ปูนซีเมนต์มีผลทำให้ระยะเวลาลดลงซึ่งหมายถึงปริมาณเถ้าชานอ้อยที่ใส่ลงไปมีส่วนช่วยให้ความสามารถในการเทได้โดยการขึ้นรูปมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น จากนั้นจึงจะนำส่วนผสมดังกล่าวไปทำการทดสอบการขึ้นรูปตัวอย่างโดยขนาดของตัวอย่างมีขนาดตามมาตรฐานอุตสาหกรรม จากกระทรวงอุตสาหกรรม เลขที่ มอก. 57-2560 แสดงในภาพที่ 3.1 ในบทที่ 3 และแบบหล่อที่ใช้ในการทดสอบเป็นไปภาพที่ 4.4 นำตัวอย่างไปทำการบ่มโดยการแช่น้ำที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน โดยเทียบกับมาตรฐาน มอก.57 -2560 คือ มาตรฐานอุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกผนังรับน้ำหนัก การรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกเฉลี่ย 5 ก้อน ไม่น้อยกว่า 140 ksc การดูดซึมความชื้น (สำหรับคอนกรีตบล็อกที่ควบคุมความชื้น) ไม่เกินกว่าร้อยละ 5 มิติพิกัดของคอนกรีตบล็อก คลาดเคลื่อนไม่เกิน 2 มิลลิเมตร โดยหลักเกณฑ์สำคัญดังกล่าว อ้างอิงจาก มาตรฐานอเมริกา ASTM C140 และ ASTM C90 และ มอก.58- 2560 คือ มาตรฐานอุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกผนังไม่รับน้ำหนัก โดยกำหนดหลักเกณฑ์คอนกรีตบล็อก ที่สำคัญ 2 เรื่อง คือ การรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกเฉลี่ย 5 ก้อนไม่น้อยกว่า 25 ksc มิติพิกัดของคอนกรีตบล็อก คลาดเคลื่อนไม่เกิน 2 มิลลิเมตร อ้างอิงจาก มาตรฐาน ASTM เช่นเดียวกัน

**ภาพที่ 4.3 การทดสอบ Vebe Test ตามมาตรฐาน BS EN 12350-3**

**ภาพที่ 4.4 ลักษณะและแบบหล่อตัวอย่างของคอนกรีตบล็อกก้อนตัวอย่างที่ทำการทดสอบ**

4.3.4 การทดสอบการขึ้นรูปของคอนกรีตบล็อกที่อัตราส่วนซีเมนต์มอร์ตาร์ต่อหินเกล็ด ผลการทดสอบในข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการขึ้นรูป ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการขึ้นรูปเบื้องต้น พบว่าปริมาณของมอร์ตาร์ในส่วนผสมมีน้อยเกินไป ทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปได้และอัตราส่วนที่เริ่มต้นขึ้นรูปได้ที่ 1:1.5 แม้จะขึ้นรูปได้ไม่ดีนัก และเมื่อนำเถ้าชานอ้อยร้อยละ 10 มาแทนที่ซีเมนต์ ผลการทดสอบพบว่ายังพอที่จะขึ้นรูปได้แต่

ตัวอย่างอาจไม่สมบูรณ์นัก และมีการแตกร้าวก่อนการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 4.5 จึงต้องมีการหล่อตัวอย่างทดสอบเพิ่มเติมเพื่อให้มีจำนวนของก้อนตัวอย่างเพียงพอที่จะทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดได้

**ภาพที่ 4.5 การทดลองการขึ้นรูปที่อัตราส่วนมอร์ตาร์ต่อมวลรวมที่ 1:1.5 ที่สามารถขึ้นรูปได้**

**ภาพที่ 4.6 ผลการขึ้นรูปที่อัตราส่วนมอร์ตาร์ต่อมวลรวมที่ไม่สามารถขึ้นรูปได้และขึ้นรูปได้**

ภายหลังการทดสอบการขึ้นรูปในเบื้องต้น ผู้วิจัยได้นำไปทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อก พบว่าเมื่อก้อนตัวอย่างแห้งแล้ว มีบางตัวอย่างที่หดตัวทำให้เกิดรอยร้าวดังแสดงในภาพที่ 4.7 ก่อนที่จะได้ทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัด ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดเบื้องต้นเป็นไปตามตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

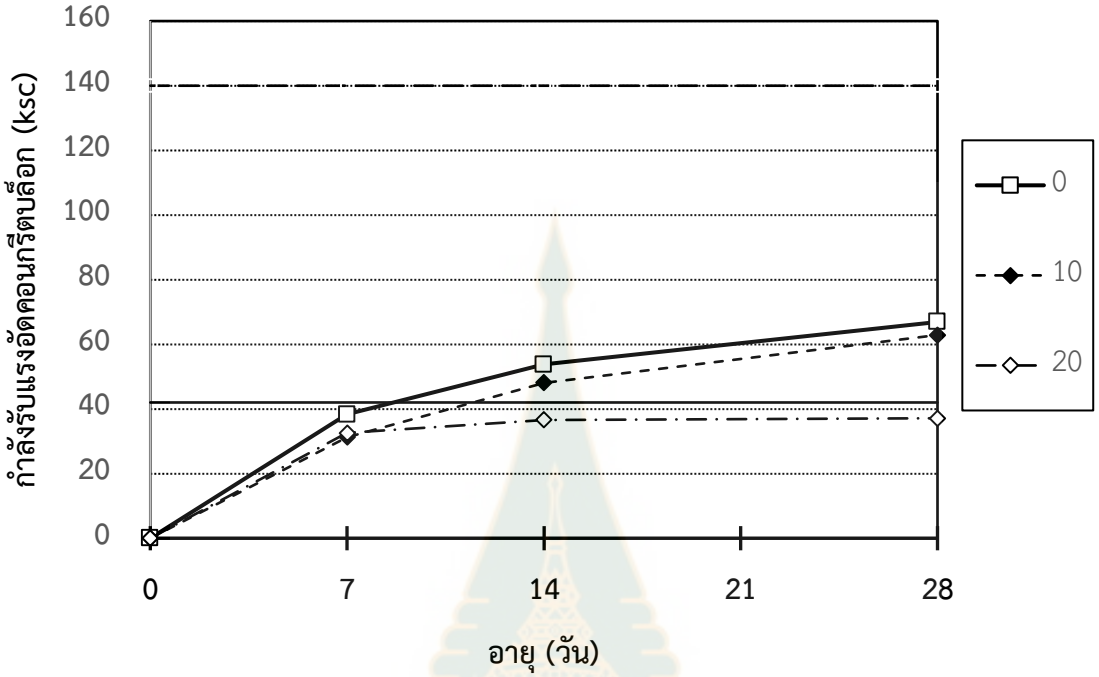
**ภาพที่ 4.7 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ไม่สามารถทดสอบได้และทดสอบได้ที่อายุ 7 วัน**

**ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตบล็อกไม่ผสมเถ้าชานอ้อยและคอนกรีตบล็อกผสมเถ้าชานอ้อยที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน**

| ตัวอย่างที่ | อัตราส่วนซีเมนต์มอร์ตาร์ต่อหินเกล็ด | ปริมาณเถ้าชานอ้อย (ร้อยละ) | กำลังรับแรงอัดคอนกรีตบล็อก (ksc) | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | 7 วัน | 14 วัน | 28 วัน |
| CB-0 | 1:1.5 | 0 | 38.30 | 53.79 | 66.90 |
| CB-10 | 1:1.5 | 10 | 31.29 | 48.07 | 62.86 |
| CB-20 | 1:1.5 | 20 | 32.53 | 36.57 | 37.12 |

ผลการทดสอบในส่วนของกำลังรับแรงอัดนี้จากตารางที่ 4.3 จะแสดงให้เห็นว่า กำลังรับแรงอัดผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.58- 2560 ดังแสดงในภาคผนวก ก คือมาตรฐานอุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกผนังไม่รับน้ำหนัก โดยกำหนดหลักเกณฑ์การรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกเฉลี่ย ไม่น้อยกว่า 42.22 ksc ในส่วนของคอนกรีตบล็อกผนังรับน้ำหนักการรับแรงอัดคอนกรีตบล็อกเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 140.72 ksc ซึ่งไม่มีส่วนผสมใดผ่านมาตรฐานดังกล่าว ผลการทดสอบส่วนผสมที่ผ่านมาตรฐานคอนกรีตบล็อกผนังไม่รับน้ำหนักจะเริ่มต้นที่อายุ 14 วันของส่วนผสมเถ้าที่ร้อยละ 0 และ 10 ในอัตราส่วนเบื้องต้นดังกล่าวมีค่าเฉลี่ยตั้งแต่ 48.07 ksc ไปจนถึง 66.90 ksc ซึ่งมากกว่ามาตรฐานที่กำหนด ในส่วนของอายุ 7 วันนั้นไม่มีส่วนผสมใดผ่าน

มาตรฐาน และเมื่อนำส่วนผสมแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 20 ไปทำการทดสอบไม่พบส่วนผสมใดผ่านมาตรฐาน หากมองในแง่ของการพัฒนากำลังจะเห็นว่าเมื่อแทนที่เถ้าชานอ้อยแนวโน้มของการพัฒนากำลังอัดก็ยังเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่ปัญหาที่พบกลับเป็นปัญหาการขึ้นรูปจากความข้นเหลวที่ได้จากการไหลของมอร์ตาร์




**แผนภูมิที่ 4.3 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกต่อการแทนที่ปริมาณเถ้าชานอ้อย**

4.3.5 การทดสอบคุณสมบัติทางเคมี ประกอบด้วย

1. การวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอรตแลนด์และเถ้าชานอ้อย ทดสอบคุณสมบัติทางเคมีเพื่อจำแนก Class ของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618-05 ประกอบด้วย $SiO_2$, $Al_2O_3$, CaO, $Fe_2O_3$, $K_2O$, MgO, $P_2O_5$, $Na_2O$ และ $SO_3$ ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (X-Ray Fluorescence) และค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา ผลการทดสอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 4.4

**ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอรตแลนด์และเถ้าชานอ้อย**

| องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน | ปูนซีเมนต์ปอรตแลนด์ (ร้อยละ) | เถ้าชานอ้อยบดละเอียด (ร้อยละ) |
|---|---|---|
| Silicon Dioxide ($SiO_2$) | 20.9 | 50.0 |
| Aluminium Oxide ($Al_2O_3$) | 4.8 | 3.16 |
| Calcium Oxide (CaO) | 65.4 | 2.93 |
| Ferric Oxide ($Fe_2O_3$) | 3.4 | 2.49 |
| Potassium Oxide ($K_2O$) | 0.4 | 2.27 |
| Phosphorus pentoxide ($P_2O_5$) | - | 1.21 |
| Magnesium Oxide (MgO) | 1.3 | 1.05 |
| Sulfur Trioxide ($SO_3$) | 2.7 | 0.482 |
| Sodium Oxide ($Na_2O$) | 0.3 | 0.214 |
| Loss on ignition (LOI) | 1.0 | 10.85 |

ผลการทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนตปอรตแลนดเถ้าชานอ้อยในตารางที่ 4.4 พบว่า ปูนซีเมนตปอรตแลนดมีองคประกอบทางเคมีหลัก คือ แคลเซียมออกไซด (CaO) และซิลิกอนไดออกไซด ($SiO_2$) มีคาเทากับ 65.4 และ 20.9 ตามลำดับ เถ้าชานอ้อย ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีสารประกอบที่สำคัญได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ ($SiO_2$) อลูมิเนียมออกไซด์ ($Al_2O_3$) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ไอออนออกไซด์ ($Fe_2O_3$) และฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ ($P_2O_5$) รวมกันประมาณร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก โดยมีซิลิกอนไดออกไซด์ ($SiO_2$) เป็นสารประกอบหลักสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา ร้อยละ 10.85 โดยน้ำหนัก

การวิเคราะห์ผลส่วนที่ 5 นำผลทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าชานอ้อยไปจำแนก Class ของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618-05 และนำผลไปวิเคราะห์ร่วมกับค่าดัชนีกำลัง แสดงดังตารางที่ 4.5 และพบว่าเถ้าชานอ้อยที่นำมาทดสอบมีความเป็นวัสดุปอซโซลานนั้นใกล้เคียงกับชั้นคุณภาพ Class C

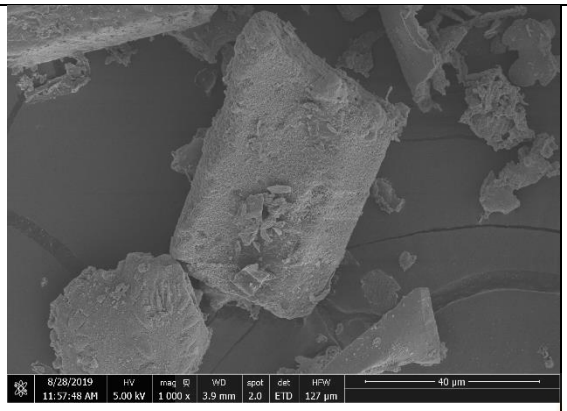
**ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อย เพื่อจำแนก Class ของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618-05**

| ข้อกำหนดทางเคมี | ชั้นคุณภาพ | | | Result |
|---|---|---|---|---|
| | N | F | C | |
| ผลรวมของซิลิกอนไดออกไซด์ ($SiO_2$) อลูมิเนียมออกไซด์ ($Al_2O_3$) ไอร์ออนออกไซด์ ($Fe_2O_3$), ไม่น้อยกว่าร้อยละ | 70.0 | 70.0 | 50.0 | 55.65 |
| ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ($SO_3$), ไม่เกินร้อยละ | 4.0 | 5.0 | 5.0 | 0.482 |
| ปริมาณความชื้น, ไม่เกินร้อยละ | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 2.85 |
| การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI), ไม่เกินร้อยละ | 10.0 | 6.0 | 6.0 | 10.85 |
| ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า $Na_2O$ , ไม่เกินร้อยละ | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.214 |

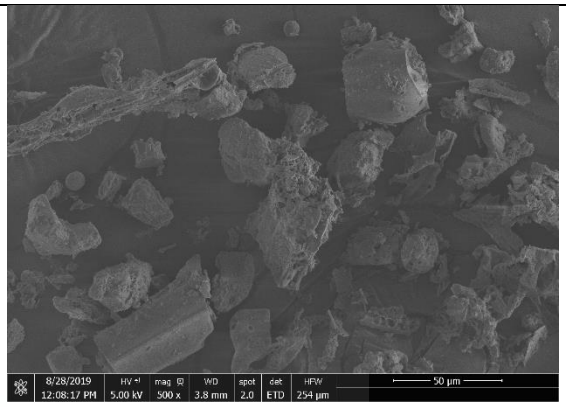
**หมายเหตุ**

1. สารปอซโซลานชั้นคุณภาพ N เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ
2. สามารถใช้เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F ที่มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาสูงถึงร้อยละ 12 ได้ ถ้ามีผลของการใช้งานหรือผลของการทดสอบที่เชื่อถือได้

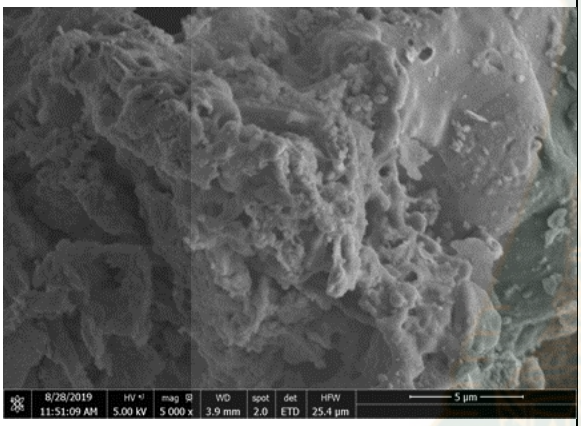
2. ผลการทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยการถ่ายภาพขยายด้วยเครื่องถ่ายภาพกำลังสูง (Scanning Electron Microscope, SEM) เพื่อศึกษาลักษณะรูปร่างของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา พบว่า ขนาดและการกระจายขนาดของเถ้าชานอ้อยมีลักษณะอนุภาคหลากหลายรูปแบบ เช่น เป็นรูปทรงที่ไม่แน่นอน มีรูปทรงหลายเหลี่ยม พื้นผิวภายนอกเรียบ มีลักษณะเป็นไฟเบอร์ บางอนุภาคมีลักษณะพรุน และเป็นโพรงอากาศ เช่นเดียวกับลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ ดังแสดงในภาพที่ 4.8 ก ถึง ฉ



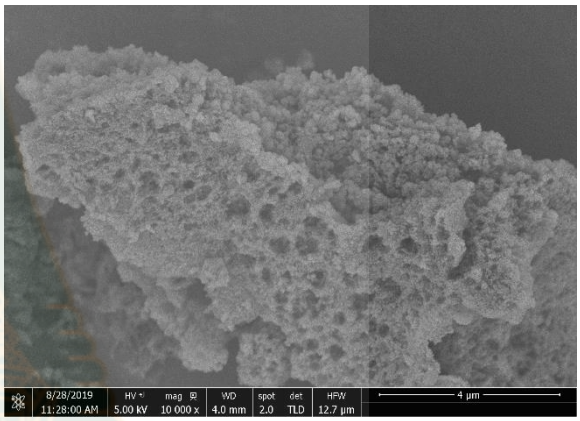
ก.พื้นผิวภายนอกเรียบ ภาพขยาย 1000 เท่า



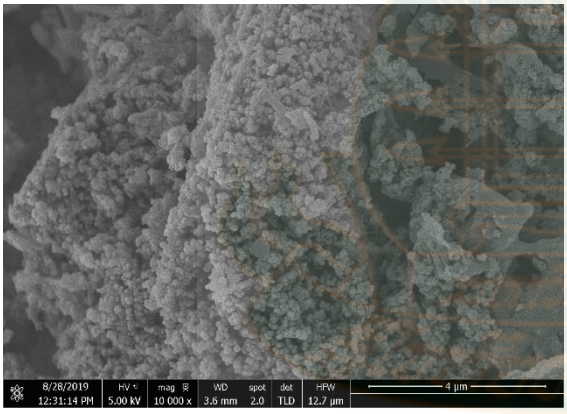
ข.ไฟเบอร์ ภาพขยาย 500 เท่า



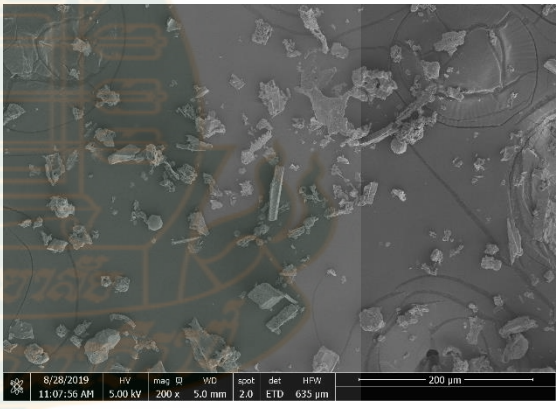
ค.อนุภาคคาร์บอน ภาพขยาย 5000 เท่า



ง.รูพรุนในพื้นผิว ภาพขยาย 10000 เท่า



จ.โพรงอากาศ ภาพขยาย 10000 เท่า



ฉ.ลักษณะรูปทรงที่ไม่แน่นอน ภาพขยาย 200 เท่า

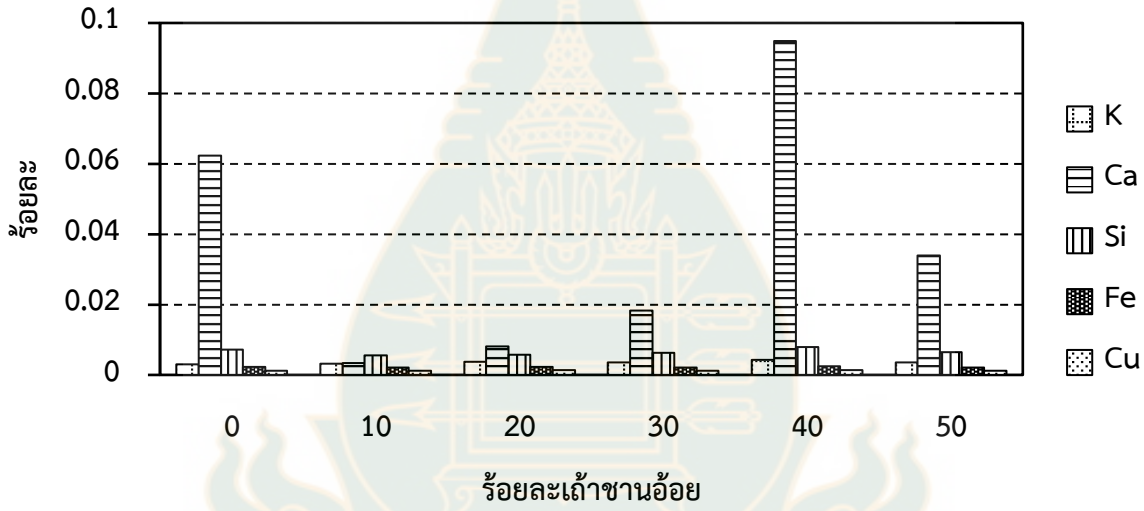
**ภาพที่ 4.8 ภาพถ่ายขยายขนาดอนุภาคของเถ้าชานอ้อยด้วยเครื่องถ่ายภาพกำลังสูง (SEM)**

3.นำมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 มาแช่น้ำ เป็นระยะเวลา 3, 7, 14 และ 28 วัน จากนั้น นำตัวอย่างน้ำไปวิเคราะห์สารประกอบเคมีในรูปของการละลายน้ำของธาตุจากมอร์ตาร์

เพื่อศึกษาปริมาณของธาตุต่างๆ จากการนำตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยมาใช้ ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.6 – 4.10 และแผนภูมิที่ 4.4 – 4.7 *(ผลการทดสอบแสดงใน ภาคผนวก จ)*

**ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์สารประกอบเคมีของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยมาแช่น้ำ เป็นเวลา 3 วัน**

| ร้อยละเถ้าชานอ้อย | K<br>ร้อยละ | Ca<br>ร้อยละ | Si<br>ร้อยละ | Fe<br>ร้อยละ | Cu<br>ร้อยละ |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0.00293 | 0.0624 | 0.00722 | 0.00222 | 0.00124 |
| 10 | 0.00318 | 0.00342 | 0.00554 | 0.00211 | 0.00126 |
| 20 | 0.00365 | 0.00815 | 0.00574 | 0.00226 | 0.00135 |
| 30 | 0.00361 | 0.0183 | 0.00626 | 0.00205 | 0.00125 |
| 40 | 0.00433 | 0.0948 | 0.00794 | 0.00240 | 0.00132 |
| 50 | 0.00358 | 0.0340 | 0.00647 | 0.00209 | 0.00117 |

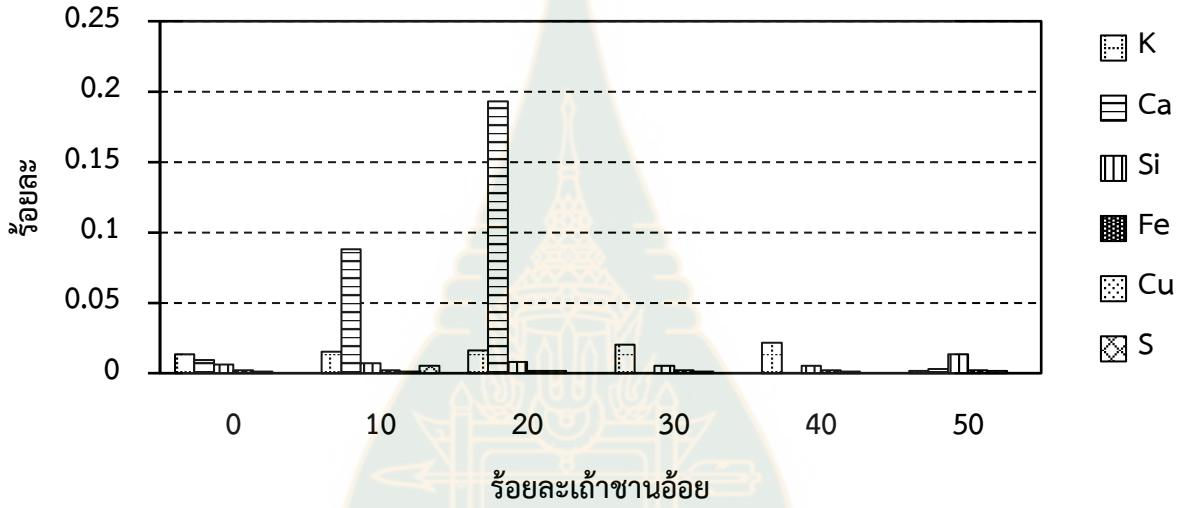



**แผนภูมิที่ 4.4 ผลการทดสอบสารประกอบเคมีของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยมาแช่น้ำ เป็นเวลา 3 วัน**

ผลการทดสอบสารประกอบเคมีของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยออกไซดของ โปแตสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) ซิลิกอน (Si) ไอออน (Fe) และ ทองแดง (Cu) สารละลายที่พบจากมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยที่อายุการบม 3 วัน มีปริมาณสารประกอบเคมีทุกประเภทในปริมาณที่ต่ำมากในทุกอัตราส่วนผสมเถ้าชานอ้อย โดยพบแคลเซียม (Ca) มากที่สุด ในปริมาณรอยละ 0.00342 ถึง 0.0948

**ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์สารประกอบเคมีของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยมาแช่น้ำ เป็นเวลา 7 วัน**

| ร้อยละเถ้าชานอ้อย | K<br>ร้อยละ | Ca<br>ร้อยละ | Si<br>ร้อยละ | Fe<br>ร้อยละ | Cu<br>ร้อยละ | S<br>ร้อยละ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0.0136 | 0.00941 | 0.00610 | 0.002 | 0.00134 | Nd |
| 10 | 0.0154 | 0.088 | 0.00701 | 0.00198 | 0.00109 | 0.00524 |
| 20 | 0.0161 | 0.193 | 0.00809 | 0.00179 | 0.00153 | Nd |
| 30 | 0.0202 | Nd | 0.00546 | 0.00213 | 0.00129 | Nd |
| 40 | 0.0218 | Nd | 0.00516 | 0.00205 | 0.00111 | Nd |
| 50 | 0.00180 | 0.00295 | 0.0134 | 0.00188 | 0.00141 | Nd |

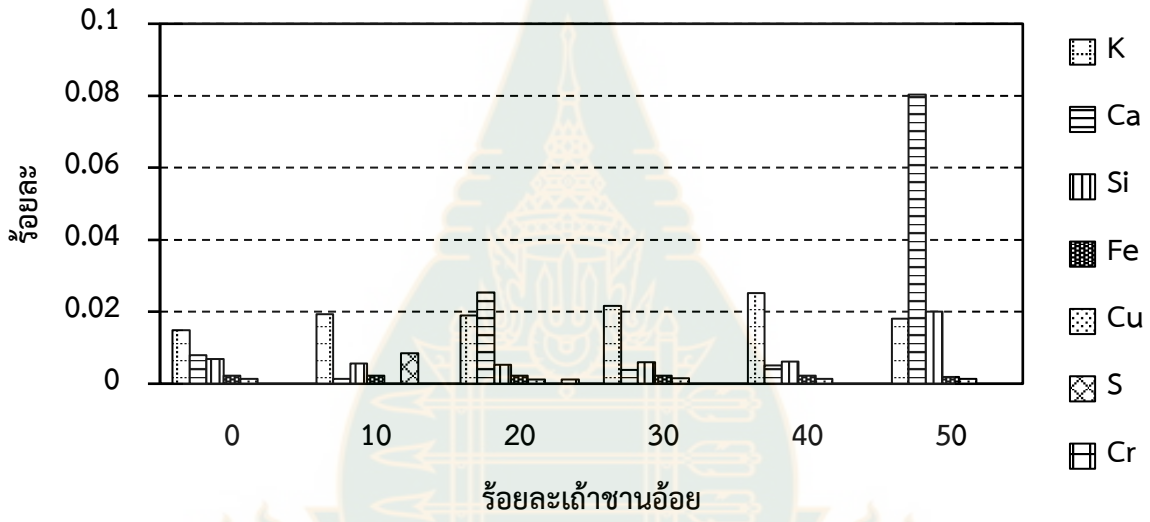



**แผนภูมิที่ 4.5 ผลการทดสอบสารประกอบเคมีของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยมาแช่น้ำ เป็นเวลา 7 วัน**

ผลการทดสอบสารประกอบเคมีของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยในงานวิจัยนี้ เมื่ออายุการบมเพิ่มขึ้นเป็น 7 วัน พบว่า สารละลายที่พบจากมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อย ส่วนใหญ่ยังคงมีค่าน้อยมาก และมีแนวโน้มลดลงในทุกอัตราส่วนผสมเถ้าชานอ้อย โดยพบกำมะถัน (S) เล็กน้อยที่อัตราส่วนผสมเถ้าชานอ้อยร้อยละ 10 และพบแคลเซียม (Ca) มากที่สุด ที่อัตราส่วนผสมเถ้าชานอ้อยร้อยละ 20 ในปริมาณรอยละ 0.193

**ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์สารประกอบเคมีของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยมาแช่น้ำ เป็นเวลา 14 วัน**

| ร้อยละเถ้าชานอ้อย | K ร้อยละ | Ca ร้อยละ | Si ร้อยละ | Fe ร้อยละ | Cu ร้อยละ | S ร้อยละ | Cr ร้อยละ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0.0148 | 0.00796 | 0.00695 | 0.00221 | 0.00139 | Nd | Nd |
| 10 | 0.0194 | 0.00137 | 0.00556 | 0.00227 | Nd | 0.00842 | Nd |
| 20 | 0.0189 | 0.0254 | 0.00531 | 0.00222 | 0.00123 | Nd | 0.00116 |
| 30 | 0.0216 | 0.0039 | 0.00597 | 0.00224 | 0.00146 | Nd | Nd |
| 40 | 0.0251 | 0.00506 | 0.00614 | 0.00225 | 0.00138 | Nd | Nd |
| 50 | 0.0181 | 0.0803 | 0.02 | 0.00193 | 0.00137 | Nd | Nd |

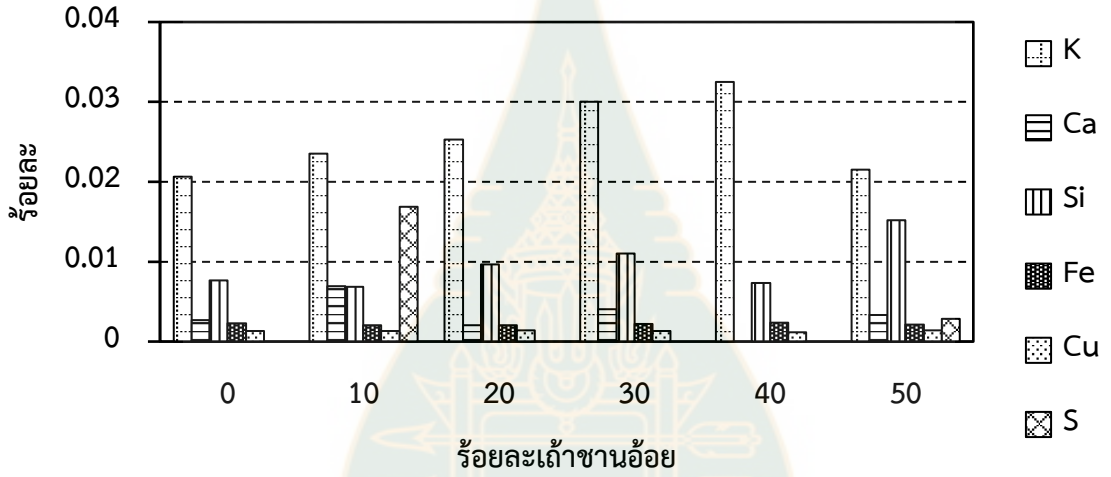



**แผนภูมิที่ 4.6 ผลการทดสอบสารประกอบเคมีของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยมาแช่น้ำ เป็นเวลา 14 วัน**

ผลการทดสอบสารประกอบเคมีของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยในงานวิจัยนี้ เมื่ออายุการบมเพิ่มขึ้นเป็น 14 วัน พบว่า สารละลายที่พบจากมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อย ส่วนใหญ่ยังคงมีค่าน้อยมาก และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในบางอัตราส่วนผสมเถ้าชานอ้อย โดยพบกำมะถัน (S) เล็กน้อยที่อัตราส่วนผสมเถ้าชานอ้อยร้อยละ 10 และโครเมียม (Cr) อัตราส่วนผสมเถ้าชานอ้อยร้อยละ 20 และพบแคลเซียม (Ca) มากที่สุด ที่อัตราส่วนผสมเถ้าชานอ้อยร้อยละ 50 ในปริมาณรอยละ 0.0803

**ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์สารประกอบเคมีของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยมาแช่น้ำ เป็นเวลา 28 วัน**

| ร้อยละเถ้าชานอ้อย | K<br>ร้อยละ | Ca<br>ร้อยละ | Si<br>ร้อยละ | Fe<br>ร้อยละ | Cu<br>ร้อยละ | S<br>ร้อยละ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0.0206 | 0.00265 | 0.00767 | 0.00226 | 0.00133 | Nd |
| 10 | 0.0235 | 0.00692 | 0.00686 | 0.00205 | 0.00131 | 0.0169 |
| 20 | 0.0253 | 0.00203 | 0.00965 | 0.00207 | 0.00144 | Nd |
| 30 | 0.0300 | 0.00406 | 0.0110 | 0.00223 | 0.00136 | Nd |
| 40 | 0.0325 | Nd | 0.00734 | 0.00235 | 0.00114 | Nd |
| 50 | 0.0215 | 0.00336 | 0.0152 | 0.00213 | 0.00142 | 0.00288 |



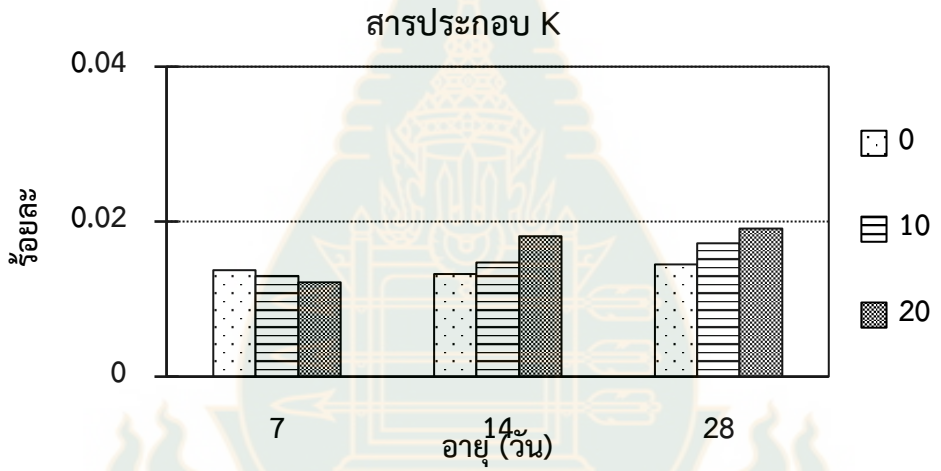

**แผนภูมิที่ 4.7 ผลการทดสอบสารประกอบเคมีของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยมาแช่น้ำ เป็นเวลา 28 วัน**

ผลการทดสอบสารประกอบเคมีของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยในงานวิจัยนี้ เมื่ออายุการบมนานที่สุดที่ 28 วัน พบว่า สารละลายที่พบจากมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อย ทุกอัตราส่วนผสมมีค่าสูงขึ้น โดยพบกำมะถัน (S) เล็กน้อยที่อัตราส่วนผสมเถ้าชานอ้อยร้อยละ 10 และ 50 และพบโปแตสเซียม (K) มากที่สุด ในทุกอัตราส่วนผสมเถ้าชานอ้อย

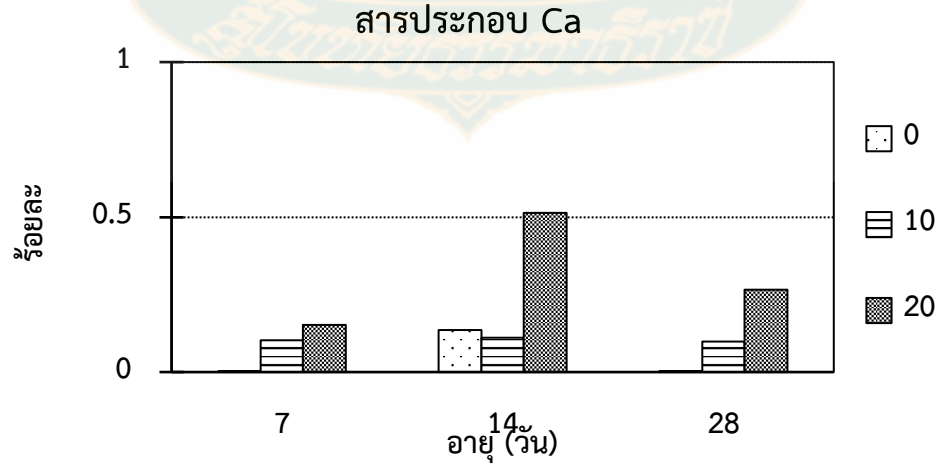
4.จากผลการทดสอบดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ผสมเถ้าชานอ้อย ดังตารางที่ 4.2 ได้ค่าดัชนีกำลังที่ดีที่สุดที่อัตราส่วนผสมเถ้าชานอ้อยร้อยละ 10 และ 20 จากนั้น นำสัดส่วนดังกล่าวมาขึ้นรูปเป็นคอนกรีตบล็อกที่ผสมเถ้าชานอ้อยมาแช่น้ำ เป็นระยะเวลา 7, 14 และ 28 วัน จากนั้น นำตัวอย่างน้ำไปวิเคราะห์สารประกอบเคมีในรูปของการละลายน้ำของธาตุจากคอนกรีตบล็อกอีกครั้ง เพื่อศึกษาปริมาณของธาตุต่างๆ เมื่อปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมจากการนำตัวอย่างคอนกรีตบล็อกที่ผสมเถ้าชานอ้อยมาใช้ ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.9 และแผนภูมิที่ 4.7 *(ผลการทดสอบแสดงใน ภาคผนวก ฉ)*

**ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์สารประกอบเคมีของคอนกรีตบล็อกที่ผสมเถ้าชานอ้อยมาแช่น้ำ เป็นเวลา 7, 14 และ 28 วัน**

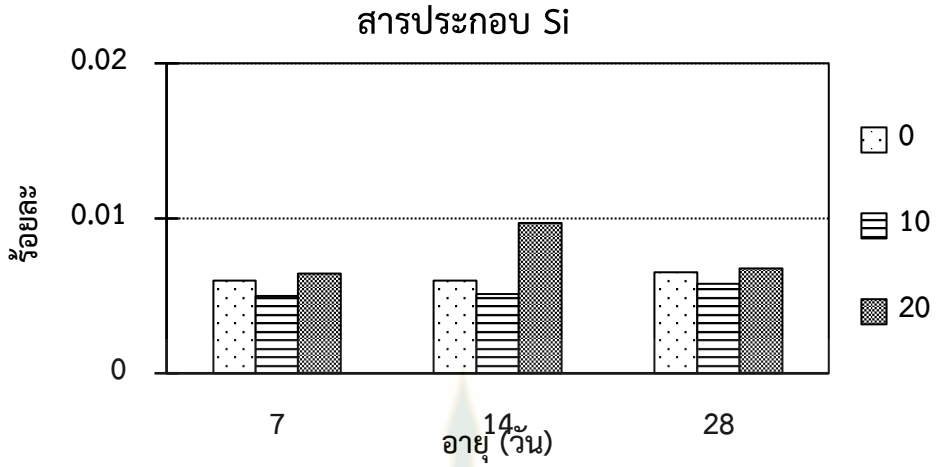
| เถ้าชานอ้อย ร้อยละ | K ร้อยละ | Ca ร้อยละ | Si ร้อยละ | Fe ร้อยละ | Cu ร้อยละ | อายุ วัน |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0.0137 | 0.00357 | 0.006 | 0.00216 | 0.0014 | 7 |
| 10 | 0.0130 | 0.103 | 0.00499 | 0.00212 | 0.00126 | 7 |
| 20 | 0.0122 | 0.152 | 0.00645 | 0.00215 | 0.0014 | 7 |
| 0 | 0.0132 | 0.136 | 0.006 | 0.00218 | 0.00121 | 14 |
| 10 | 0.0147 | 0.110 | 0.00510 | 0.00218 | 0.00150 | 14 |
| 20 | 0.0181 | 0.514 | 0.00969 | 0.00218 | 0.00150 | 14 |
| 0 | 0.0145 | 0.00264 | 0.00652 | 0.00215 | 0.00136 | 28 |
| 10 | 0.0172 | 0.0990 | 0.00578 | 0.00212 | 0.00165 | 28 |
| 20 | 0.0191 | 0.266 | 0.00678 | 0.00205 | 0.00142 | 28 |



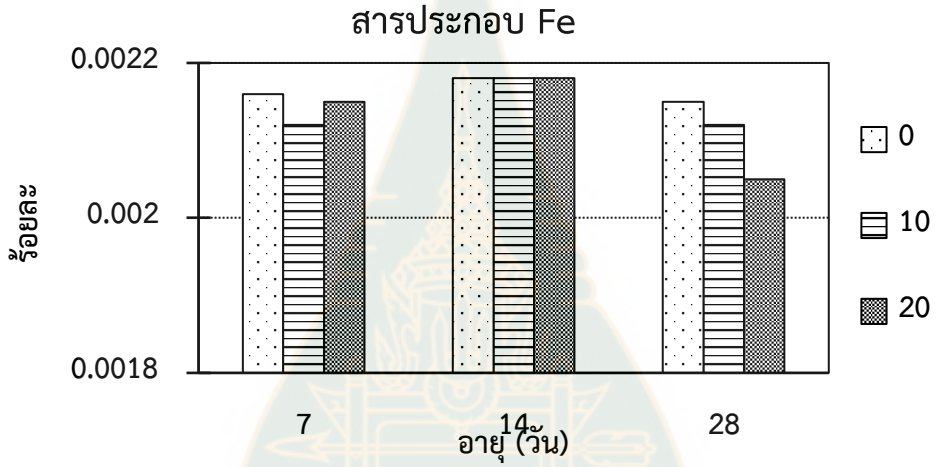

ก. สารประกอบ K



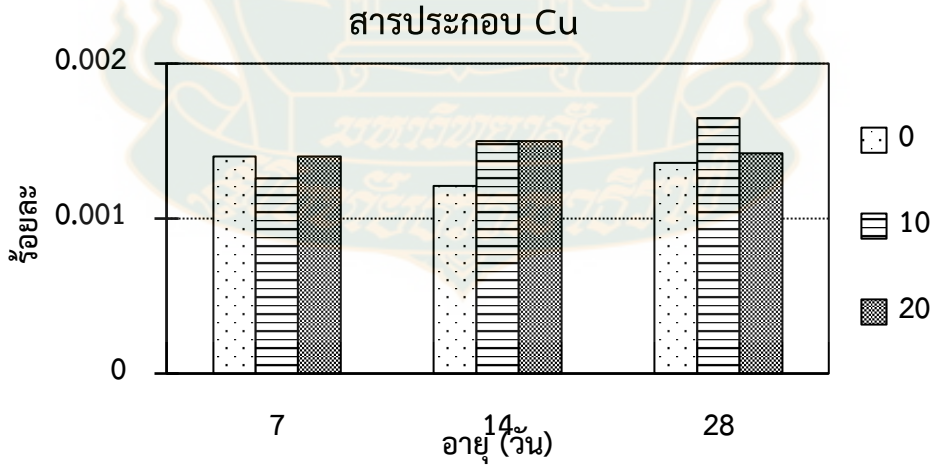

ข. สารประกอบ Ca




ค. สารประกอบ Si



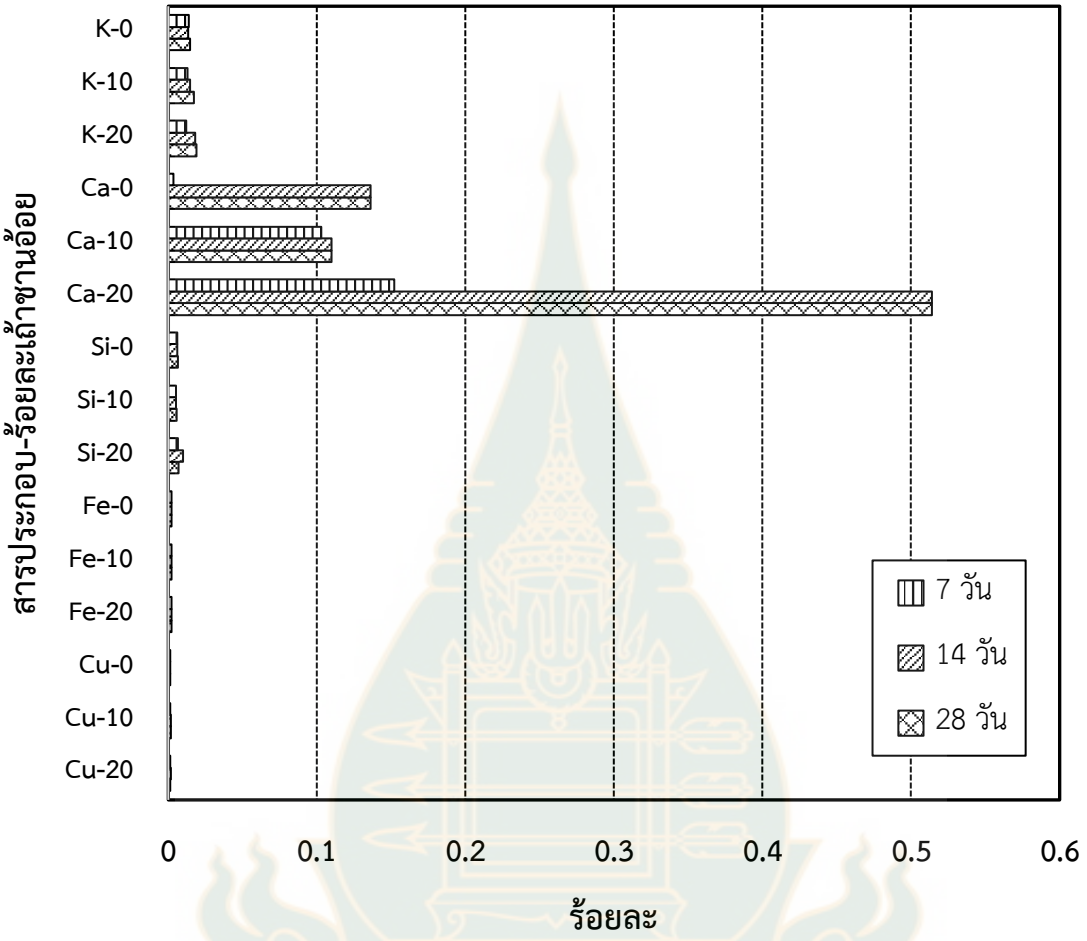

ง. สารประกอบ Fe




จ. สารประกอบ Cu

**แผนภูมิที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์สารประกอบเคมีของคอนกรีตบล็อกที่ผสมเถ้าชานอ้อยมาแช่น้ำ เป็นเวลา 7, 14 และ 28 วัน**

จากแผนภูมิ 4.9 เมื่อเปรียบเทียบสารประกอบเคมีของคอนกรีตบล็อกที่ผสมเถ้าชานอ้อยมาแช่น้ำเป็นเวลา 7, 14 และ 28 วัน พบว่าเมื่อระยะเวลาการบมเพิ่มขึ้น ปริมาณสารประกอบเคมีที่ทุกอัตราส่วนของเถ้าชานอ้อยมีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นปริมาณแคลเซียม มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกอัตราส่วนของเถ้าชานอ้อย ซึ่งแคลเซียมเป็นธาตุที่ไม่เป็นพิษ และมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช และไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม




**แผนภูมิที่ 4.9 ภาพรวมของสารประกอบเคมีของคอนกรีตบล็อกที่ผสมเถ้าชานอ้อยมาแช่น้ำ เป็นเวลา 7, 14 และ 28 วัน**