บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการศึกษา

ในบทนี้กล่าวถึงผลการวิจัยที่ได้จากการทดสอบซึ่งประกอบด้วย ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบเคมีของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ และเถ้าชานอ้อยบดละเอียด การทดสอบความร้อนของคอนกรีตสด รวมทั้งผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต ได้แก่ กำลังอัด กำลังดึงแบบผ่าซีก และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต และการทดสอบความทนทานของคอนกรีต ได้แก่ การทดสอบความต้านทานคลอไรด์ อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต และการหดตัวแห้งของคอนกรีต

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

4.1.1 ลักษณะทั่วไปของวัสดุ

ลักษณะทั่วไปของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าชานอ้อย พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะเป็นฝุ่นผงสีเทาอ่อน ดังรูป 4.1 โดยเถ้าชานอ้อยที่ใช้ในงานวิจัยได้จากการนำเถ้าชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล (รูปที่ 4.2 ก) ซึ่งมีลักษณะสีเทาดำมีเศษชานอ้อยปนอยู่เล็กน้อย นำมาผ่านกระบวนการทำให้มีค่า LOI แตกต่างกัน ด้วยการนำเถ้าชานอ้อยไปลอยน้ำ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ เถ้าชานอ้อยชนิดจมน้ำ (รูปที่ 4.2 ข) มีลักษณะสีเทาดำมีเศษชานอ้อยเจือปนเล็กน้อย และเถ้าชานอ้อยชนิดลอยน้ำ (ดังรูปที่ 4.2 ค) มีลักษณะเป็นสีเทาดำ มีเศษชานอ้อยปริมาณมาก มีลักษณะค่อนข้างหยาบ นำมาผสมกันตามสัดส่วนเพื่อให้ได้เถ้าชานอ้อยที่มีค่า LOI เท่ากับร้อยละ 10.9, 16.1 และ 20.0 แล้วจึงนำมาบดจนละเอียด (รูปที่ 4.3 ก-ค) โดยเถ้าชานอ้อยบดละเอียดของแต่ละค่า LOI มีลักษณะไม่แตกต่างกันมากนัก คือ มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีดำมีความละเอียดมากขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อสัมผัส

รูปที่ 4.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ก. เถ้าชานอ้อยจากโรงงาน ข. เถ้าชานอ้อยชนิดจมน้ำ ค. เถ้าชานอ้อยชนิดลอยน้ำ

รูปที่ 4.2 เถ้าชานอ้อยที่ผ่านกระบวนการทำให้ LOI มีค่าแตกต่างกัน

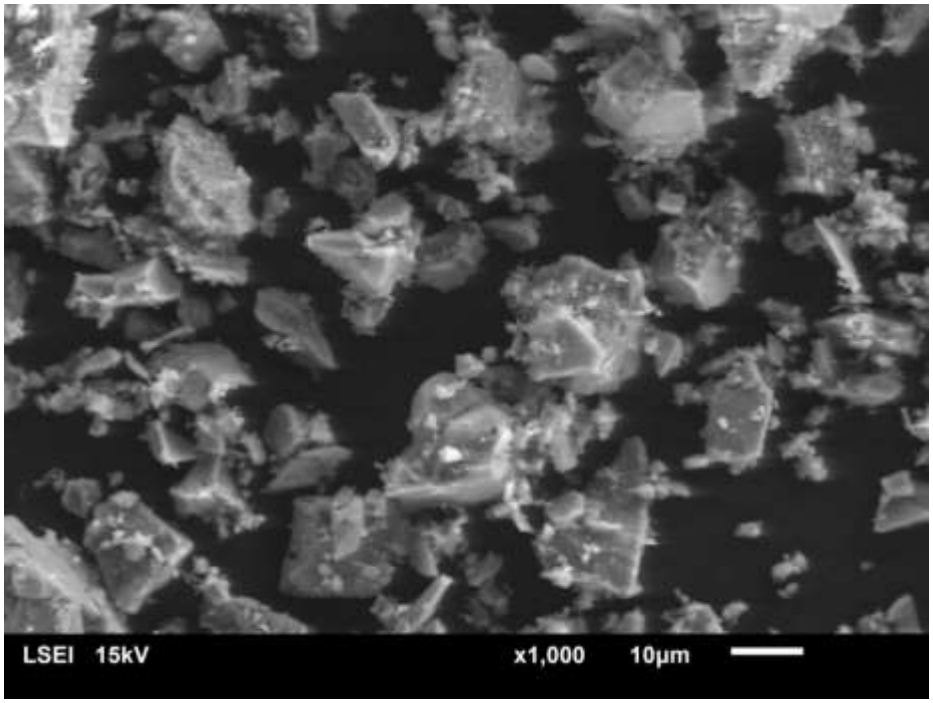
ก. เถ้าชานอ้อยที่มี LOI ร้อยละ 10.9 ข. เถ้าชานอ้อยที่มี LOI ร้อยละ16.1

ค. เถ้าชานอ้อยที่มี LOI ร้อยละ 20.0

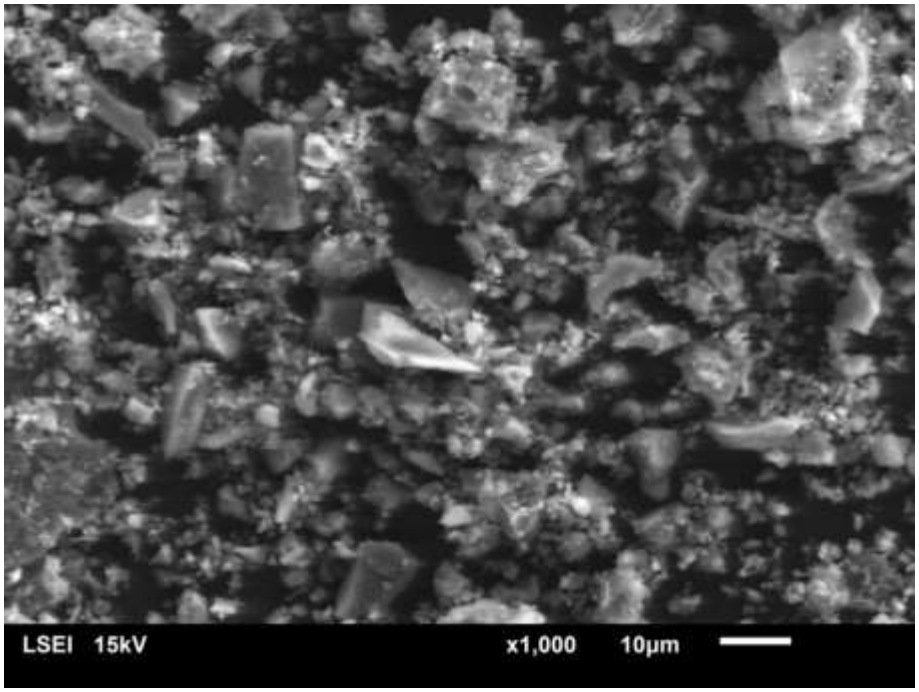
รูปที่ 4.3 เถ้าชานอ้อยบดละเอียด

4.1.2 ลักษณะรูปร่างของอนุภาค

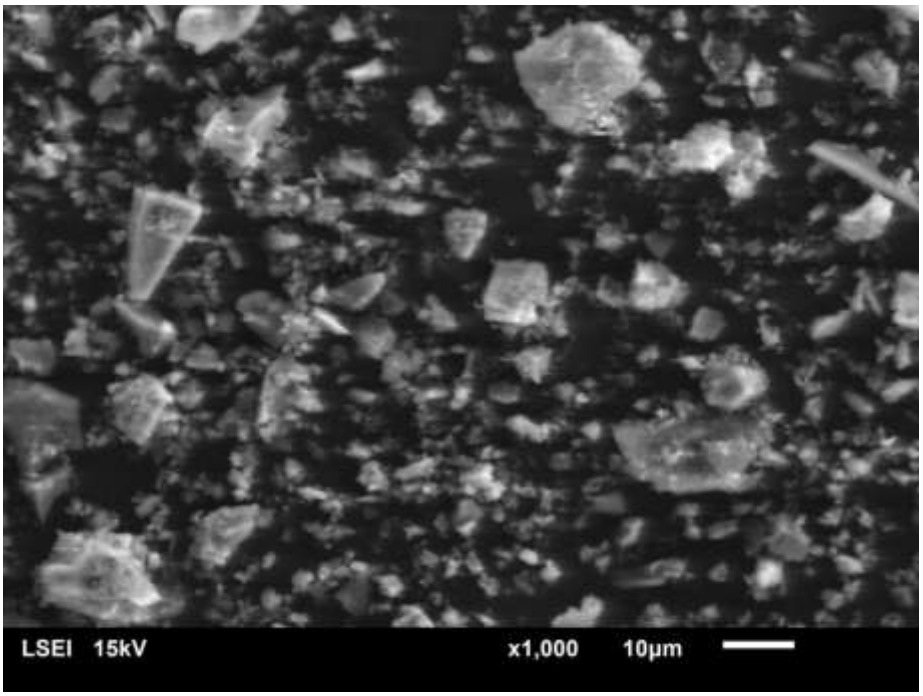
รูปที่ 4.4-4.7 แสดงภาพถ่ายกำลังสูง Scanning Electron Microscope (SEM) ของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาร้อยละ 10.9, 16.1 และ 20.0 พบว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน และมีเนื้อแน่น ส่วนลักษณะอนุภาคของเถ้าชานอ้อยบดละเอียด พบว่า เถ้าชานอ้อย 10BA, 15BA และ 20BA มีลักษณะของอนุภาคที่คล้ายคลึงกัน คือ มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม ผิวมีลักษณะขรุขระ รูปร่างไม่แน่นอน มีทั้งอนุภาคขนาดเล็กและขนาดใหญ่ปะปนกันไป



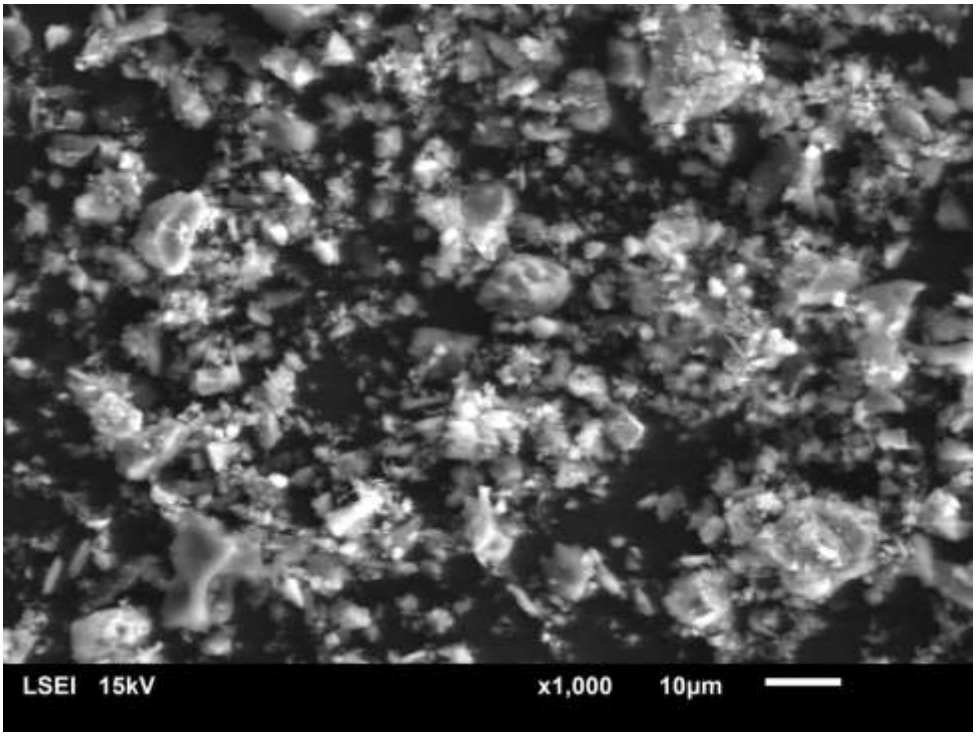
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาร้อยละ 10.9 โดยน้ำหนัก (10BA)



รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาร้อยละ 16.1 โดยน้ำหนัก (15BA)



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาร้อยละ 20.0โดยน้ำหนัก (20BA)

4.1.3 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และการกระจายตัวของวัสดุ

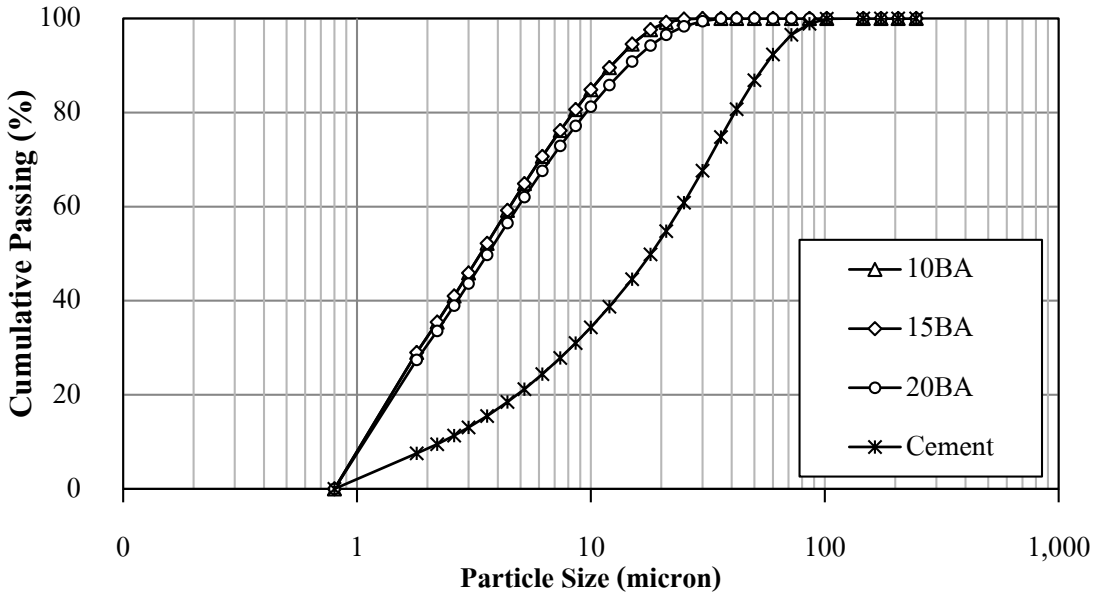
ค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าชานอ้อยที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาร้อยละ 10.9, 16.1 และ 20.0 โดยน้ำหนัก แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 18.0 ไมโครเมตร มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทั่วไป คือ อยู่ในช่วง 3.00 ถึง 3.20 (Lea, 1970) สำหรับเถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาร้อยละ 10.9, 16.1 และ 20.0 โดยน้ำหนัก มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 3.39, 3.57 และ 3.63 ไมโครเมตร ตามลำดับ มีปริมาณวัสดุค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 0.85, 0.90 และ 0.92 ตามลำดับ และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.68, 2.46 และ 2.31 ตามลำดับ เห็นได้ว่าค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าชานอ้อยบดละเอียดทั้ง 3 มีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าชานอ้อยจากโรงงาน โดยงานวิจัยที่ผ่านมา ที่พบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.11 (คาวี มนทการติวงศ์, 2548) ซึ่งการที่ความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นภายหลังจากการบด เนื่องจากอนุภาคที่เป็นรูพรุนแตกออก ทำให้อนุภาคมีความพรุนลดลง และมีขนาดอนุภาคเล็กลง ความถ่วงจำเพาะจึงมีค่าเพิ่มขึ้น (Jaturapitakkul และ Cheerarot, 2003) อย่างไรก็ตามเถ้าชานอ้อยที่มีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผามากขึ้นทำให้

ค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุมีค่าลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chusilp และคณะ (2009) ที่พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าชานอ้อยมีค่าลดลงเมื่อค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของวัสดุ

Sample	Specific Gravity	Retained on a Sieve No. 325%	Mean Particle Size d_{50} (micron)
Cement Type I	3.15	20.00	18.08
10BA	2.68	0.85	3.39
15BA	2.46	0.90	3.57
20BA	2.31	0.92	3.63

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าชานอ้อย แสดงไว้ในรูปที่ 4.8 พบว่า การกระจายตัวของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กว่าร้อยละ 80 มีอนุภาคเล็กกว่า 40 ไมโครเมตร ส่วนการกระจายตัวของอนุภาคเถ้าชานอ้อยบดละเอียดทุกค่า LOI มีการกระจายตัวของอนุภาคที่ใกล้เคียงกัน โดยร้อยละ 80 มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร นอกจากนั้นเห็นได้ว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีอนุภาคใหญ่กว่าอนุภาคของเถ้าชานอ้อย



รูปที่ 4.8 การกระจายตัวของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าชานอ้อยบดละเอียด

4.2 องค์ประกอบทางเคมี

จากตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มี CaO เป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 65.4 และสำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยบดละเอียดแต่ละ LOI ได้แก่ 10BA, 15BA และ 20BA พบว่า มี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 57.1, 54.2 และ 49.4 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C 618 (2012) ในข้อกำหนดของวัสดุปอซโซลาน Class N พบว่ามีปริมาณ SO_3 เท่ากับร้อยละ 0.2, 0.2 และ 0.2 อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้คือต้องต่ำกว่าร้อยละ 4 มีปริมาณผลรวมของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ของเถ้าชานอ้อยทั้ง 3 ชนิดมีค่าเท่ากับ 70.4, 67.3 และ62.5 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้คือร้อยละ 70 เพียงเล็กน้อย เมื่อพิจารณาร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) พบว่า 10BA, 15BA และ 20BA มีค่า LOI เท่ากับ 10.9, 16.1 และ 20.0 ตามลำดับ ซึ่งมาตรฐานได้กำหนดค่า LOI ของวัสดุปอซโซลาน Class N ไว้ไม่เกินร้อยละ 10 จึงไม่สามารถจัดให้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่ใช้ในงานวิจัยเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N ตามมาตรฐานได้ อย่างไรก็ตามวัสดุปอซโซลานนั้นจำเป็นต้องพิจารณาคุณสมบัติด้านอื่นๆ ด้วยนอกจากองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งงานวิจัยของคาวี มนทการติวงศ์ (2548) ได้ศึกษาผลกระทบของค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาของเถ้าชานอ้อย พบว่าการใช้เถ้าชานอ้อยที่มีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาสูงถึงร้อยละ 20.4 ยังสามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้ โดยทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดอยู่ในช่วงร้อยละ 106 - 109 ของคอนกรีตควบคุมตั้งแต่อายุ 7 วัน

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าชานอ้อยบดละเอียด

Chemical Composition (%)	Cement Type I	10BA	15BA	20BA
Silicon Dioxide (SiO_2)	20.9	57.1	54.2	49.4
Calcium Oxide (CaO)	65.4	15.1	13.0	14.0
Aluminium Oxide (Al_2O_3)	4.8	7.1	7.3	6.91
Ferric Oxide (Fe_2O_3)	3.4	6.2	5.8	6.2
Potassium Oxide (K_2O)	0.3	2.0	2.1	2.1
Magnesium Oxide (MgO)	1.3	1.2	1.2	1.2
Sulfur Trioxide (SO_3)	2.7	0.2	0.2	0.2
Sodium Oxide (Na_2O)	0.2	0.1	0.1	0.1
Loss On Ignition (LOI)	2.9	10.9	16.1	20.0

4.3 การเกิดความร้อนของคอนกรีตสด

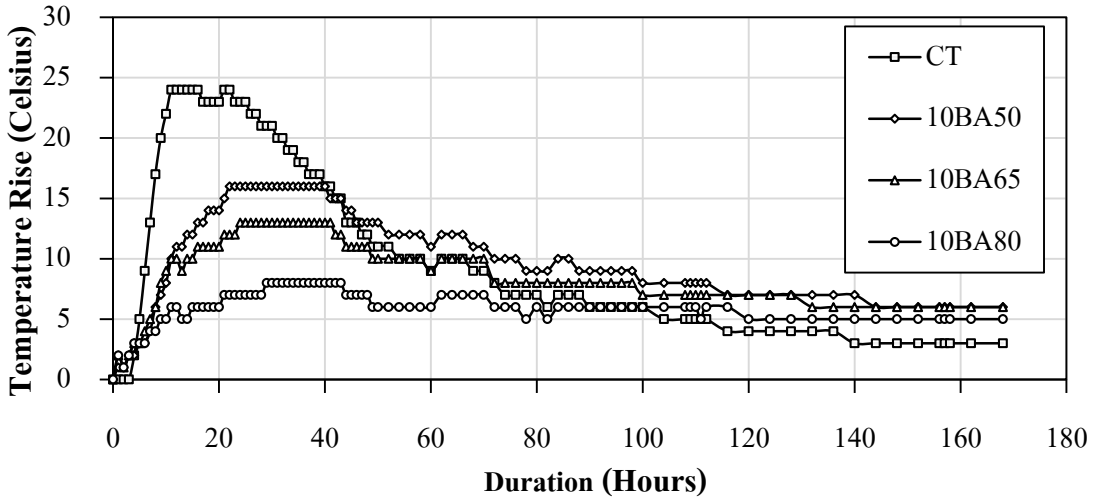
ผลของความร้อนที่เกิดขึ้นของคอนกรีตสดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันแสดงเป็นค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสูงสุด แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าคอนกรีตควบคุมมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 52 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเท่ากับ 24 องศาเซลเซียส หลังจากการหล่อตัวอย่างคอนกรีต 13 ชั่วโมง สำหรับความร้อนที่เกิดขึ้นของคอนกรีตผสมเถ้าชานอ้อยบดละเอียด พบว่าคอนกรีต 10BA50, 10BA65 และ 10BA80 มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 43, 40 และ 35 องศาเซลเซียสตามลำดับ และมีค่าอุณหภูมิต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมเท่ากับ 8, 11 และ 16 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 33, 46 และ 67 ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีต ตามลำดับ ส่วนคอนกรีต 15BA50, 15BA65 และ 15BA80 มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 42, 38 และ 33 องศาเซลเซียส และมีค่าอุณหภูมิต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม เท่ากับ 9, 12 และ 17 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 38, 50 และ 71 ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ และคอนกรีตตัวอย่าง 20BA50, 20BA65 และ 20BA80 มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 42, 37 และ 31 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม เท่ากับ 9, 13 และ 19 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 38, 54 และ 79 ตามลำดับ จากผลการทดสอบ แสดงให้เห็นว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยบดละเอียดในปริมาณที่สูงสามารถลดความร้อนที่เกิดขึ้นได้ โดยการเกิดความร้อนของคอนกรีตสดมีอุณหภูมิสูงสุดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่เถ้าชานอ้อยที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อแทนที่เถ้าชานอ้อยในปริมาณมากขึ้นทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีตมีปริมาณน้อยลง ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงมีค่าลดลง (Sanchez และ Frias, 1996) สอดคล้องกับงานวิจัยงานวิจัยของ Sata (2004) พบว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบเปลือกไม้ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลาน ในอัตราส่วนร้อยละ 10 - 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถลดอุณหภูมิคอนกรีตลง 2.0 - 9.0 องศาเซลเซียส เนื่องจากการแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงในส่วนผสม จึงทำให้ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลดลงด้วย

ตารางที่ 4.3 ความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีตผสมเถ้าชานอ้อยเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม

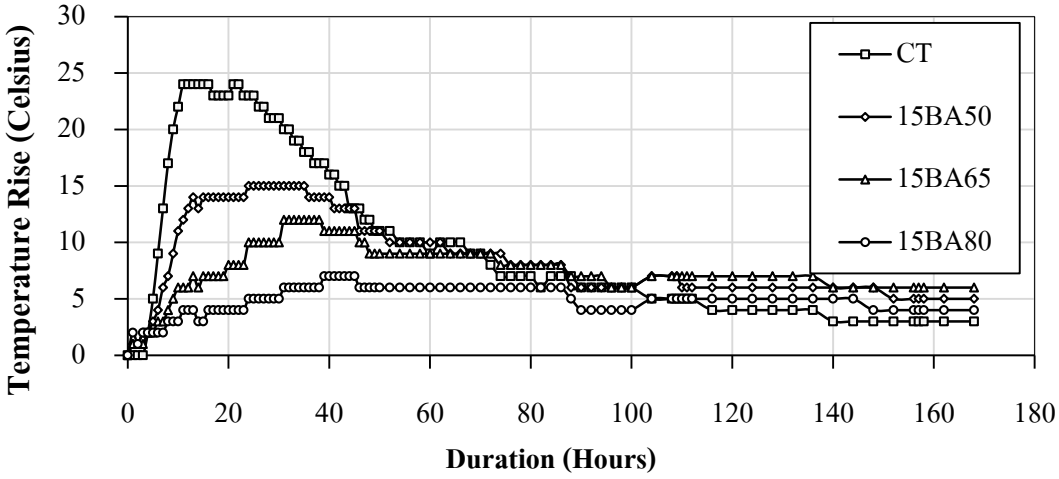
Sample	Peak Temp. Actual (°C)	Peak Temp. Rise (°C)	Reduce Temp. from CT (°C)	Reduce Temp. from CT (%)	Time of Peak Temp. Rise (hr)
CT	52	24	0	0	11
10BA50	43	16	8	33	22
10BA65	40	13	11	46	24
10BA80	35	8	16	67	29
15BA50	42	15	9	38	24
15BA65	38	12	12	50	31
15BA80	33	7	17	71	39
20BA50	42	15	9	38	37
20BA65	37	11	13	54	41
20BA80	31	5	19	79	41

จากรูปที่ 4.9-4.11 แสดงความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของคอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสูงสุดมีแนวโน้มลดลงอย่างมากและมีระยะเวลาของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสูงสุดเลื่อนออกไปตามปริมาณการแทนที่ถึง 11-30 ชั่วโมง จากคอนกรีตควบคุม สอดคล้องกับ คาวี มนทการติวงศ์ (2548) ที่พบว่าการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดในอัตราร้อยละ 20-40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำให้ระยะเวลาของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงสุดเกิดช้ากว่า เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม เนื่องจากการแทนที่ในปริมาณมากขึ้นทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีตมีปริมาณน้อยลง ส่งผลให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chusilp (2009) ที่ใช้เถ้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 20 และ 30 พบว่าการใช้เช้าถานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์สามารถลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันลงได้ โดยความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น และกิติพงษ์ อำนาจเหนือ (2552) ที่พบว่าความร้อนที่เกิดขึ้นของคอนกรีตสดได้รับอิทธิพลมาจากปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสม

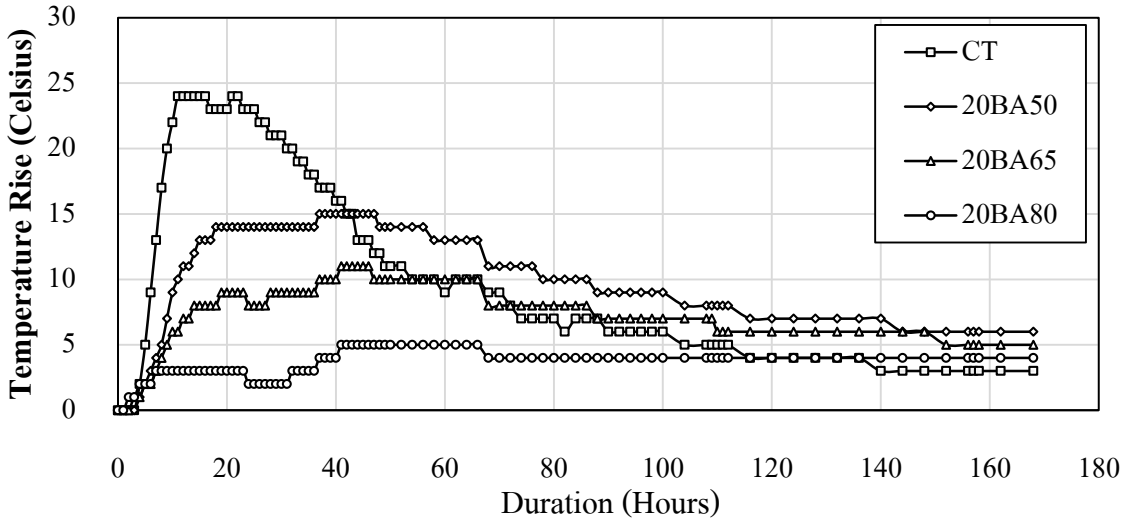
เมื่อพิจารณาผลของค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาต่อการเกิดความร้อนของคอนกรีตสด พบว่าเมื่อพิจารณาการแทนที่เถ้าชานอ้อยในปริมาณเท่ากัน ค่า LOI ส่งผลกระทบต่อค่าความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเพียงเล็กน้อยโดยมีค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสูงสุดแตกต่างกัน 1-2 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของปริมาณการแทนที่ส่งผลกระทบต่อค่าความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตสดมากกว่าค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาของเถ้าชานอ้อย



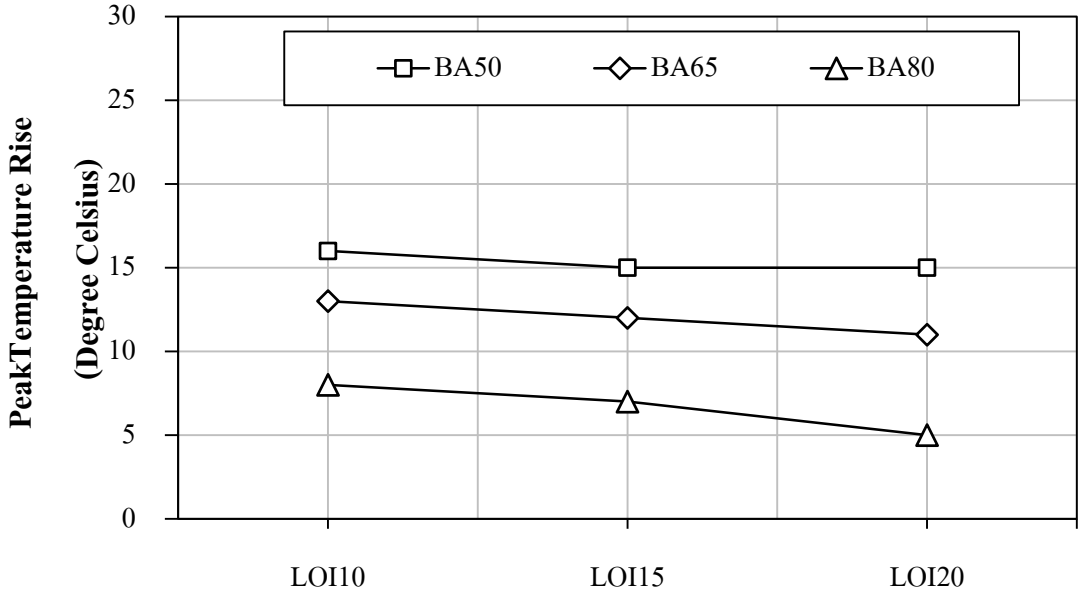
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกับระยะเวลา ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจาการเผา 10.9



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกับระยะเวลา ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจาการเผา 16.1



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกับระยะเวลา ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา 20.0



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกับค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาของการแทนที่เถ้าชานอ้อยอัตรา 50, 65 และ 80 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

4.4 กำลังอัดของคอนกรีต

ผลการทดสอบกำลังอัด และร้อยละกำลังอัดของคอนกรีต เปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม แสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งประกอบด้วย คอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และคอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่มีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ร้อยละ 10.9, 16.1 และ 20.2 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณ 50, 65 และ 80 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยคอนกรีตใช้วัสดุประสานเท่ากับ 400 กก/ม^3 และควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45 ทำการทดสอบคอนกรีตที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน

4.4.1 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียด

คอนกรีตควบคุม มีค่ากำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ 426, 489 และ 494 กก/ซม^2 ที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่มี LOI ร้อยละ 10.9 โดยน้ำหนัก คอนกรีต 10BA50, 10BA65 และ 10BA80 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 349, 269 และ 105 กก/ซม^2 ตามลำดับ ที่อายุ 7 วัน เมื่อคอนกรีตมีอายุเพิ่มขึ้นเป็น 28 และ 90 วัน พบว่ามีกำลังอัดคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 456, 425, 160 กก/ซม^2 และ 509, 489, 214 กก/ซม^2 ตามลำดับ เนื่องจากการบ่มที่นานขึ้นทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มขึ้น ส่วนคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่มีค่า LOI ร้อยละ 16.1 และ 20.0 โดยน้ำหนัก คอนกรีต 15BA50, 15BA65, 15BA80, 20BA50, 20BA65 และ 20BA80 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 275, 212, 102, 266, 175 และ 92 กก/ซม^2 ตามลำดับ ที่อายุ 7 วัน เมื่อคอนกรีตมีอายุเพิ่มขึ้นเป็น 28 และ 90 วัน คอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มเช่นเดียวกับคอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่มีค่า LOI เท่ากับร้อยละ 10.9 โดยคอนกรีต 15BA50, 15BA65, 15BA80, 20BA50, 20BA65 และ 20BA80 มีค่ากำลังอัดเท่ากัน 414, 393, 152, 351, 259 และ 150 กก/ซม^2 ที่อายุ 28 วัน ตามลำดับ และมีค่าเท่ากับ 484, 470, 207, 418, 358, 167 กก/ซม^2 ที่อายุ 90 วัน ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า การใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่มีค่า LOI ต่ำแทนที่ปูนซีเมนต์ ส่งผลให้คอนกรีตมีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยที่มีค่า LOI สูง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chusilp และคณะ (2009) ที่ใช้เถ้าชานอ้อยที่มีค่า LOI ต่างกันแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่าการพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่มีค่า LOI สูง มีการพัฒนากำลังช้ากว่ามอร์ต้าที่ผสมเถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่มีค่า LOI ต่ำ

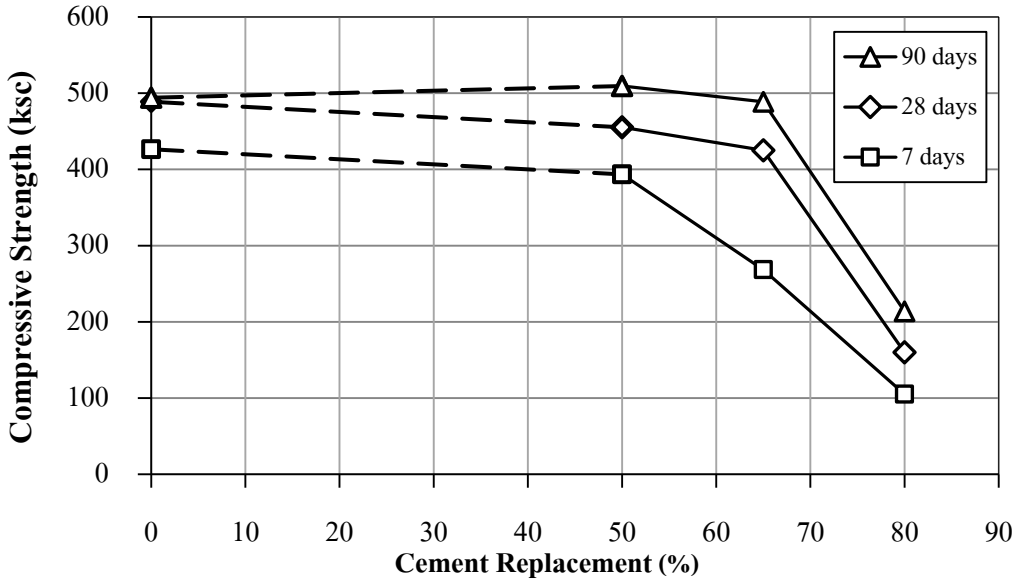
ตารางที่ 4.4 กำลังอัดของคอนกรีต

Sample	Compressive Strength, ksc (***Normalized Compressive Strength, %***)		
	7 days	28 days	90 days
CT	426 ***(100)***	489 ***(100)***	494 ***(100)***
10BA50	349 ***(82)***	456 ***(93)***	509 ***(103)***
10BA65	269 ***(63)***	425 ***(87)***	489 ***(99)***
10BA80	105 ***(25)***	160 ***(33)***	214 ***(43)***
15BA50	275 ***(65)***	414 ***(85)***	484 ***(98)***
15BA65	212 ***(50)***	393 ***(80)***	470 ***(95)***
15BA80	102 ***(24)***	152 ***(31)***	207 ***(42)***
20BA50	266 ***(62)***	351 ***(72)***	418 ***(85)***
20BA65	175 ***(41)***	259 ***(53)***	358 ***(73)***
20BA80	92 ***(22)***	150 ***(31)***	167 ***(34)***

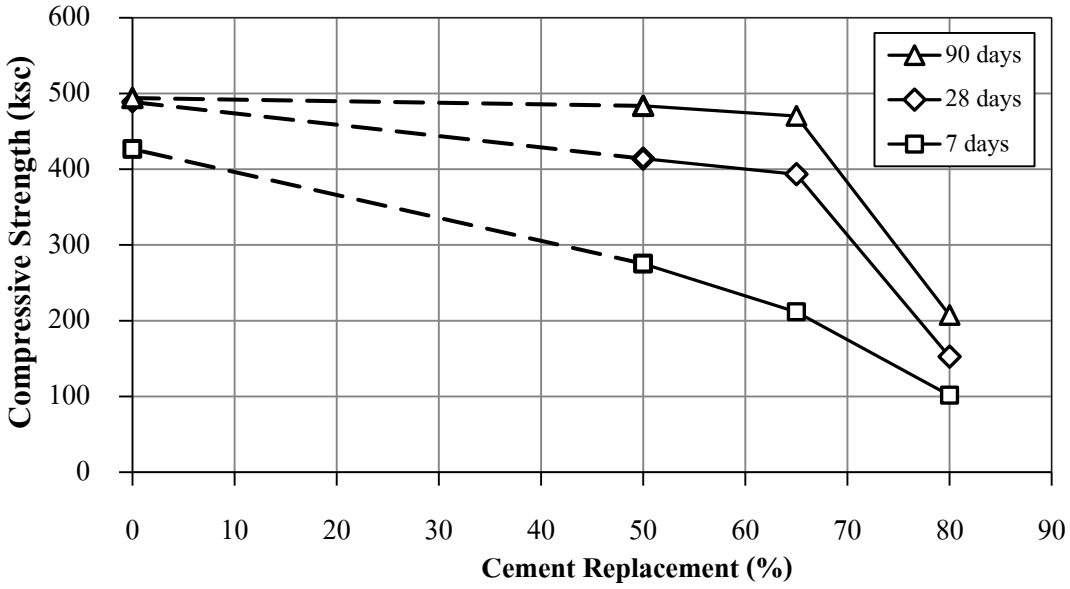
4.4.2 ผลของปริมาณร้อยละการแทนที่เถ้าชานอ้อยบดละเอียดต่อกำลังอัดคอนกรีต

รูปที่ 4.13 - 4.15 แสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าชานอ้อยบดละเอียดร้อยละ 50, 65 และ 80 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาเท่ากัน พบว่า การใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ ทั้งหมดมีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ที่อายุ 7 และ 28 วัน และมีค่าลดลงเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยบดละเอียดในปริมาณสูงขึ้น แต่เมื่อคอนกรีตมีอายุ 90 วัน การใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดในอัตราร้อยละ 50 และ 65 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถพัฒนากำลังอัดคอนกรีตได้เทียบเท่าคอนกรีตควบคุม โดยมีค่ากำลังอัดคอนกรีตมีค่ามากกว่าร้อยละ 90 ของคอนกรีตควบคุม คอนกรีต 10BA50, 10BA65, 15BA50, และ 15BA65 มีค่ากำลังอัดคิดเป็นร้อยละ 103, 99, 98 และ 95 ของคอนกรีตควบคุม เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าชานอ้อยบดละเอียด ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$) ที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ที่เป็นองค์ประกอบของ เถ้าชานอ้อย การพัฒนากำลังของคอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยจึงเกิดช้ากว่าคอนกรีตควบคุม (วิทวัส ทิพย์พิริยพงศ์, 2551) คอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยจึงมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 7 และ 28 วัน แต่จะสามารถพัฒนากำลังอัดที่อายุ 90 วัน ได้เทียบเท่าคอนกรีตควบคุม อีกทั้งการแทนที่ปูนซีเมนต์

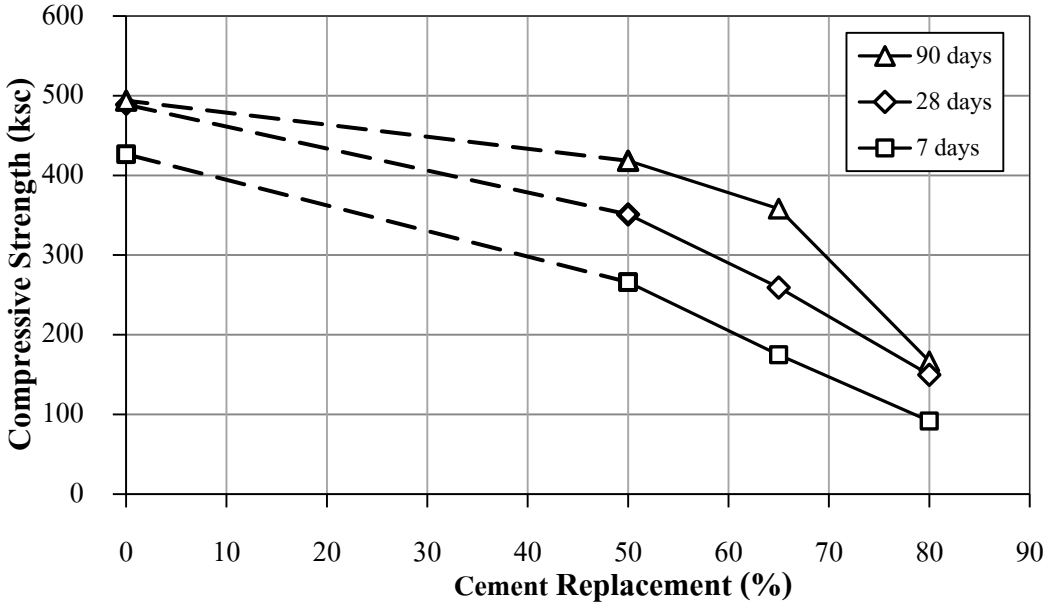
ด้วยเถ้าชานอ้อยบดละเอียดสามารถช่วยให้เนื้อคอนกรีตมีความแน่นขึ้น เพราะอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ของเถ้าชานอ้อยบดละเอียดสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ (Lam, 2000) อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณสูงมากคือแทนที่ในปริมาณร้อยละ 80 โดยน้ำหนักวัสดุประสานส่งผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำลงอย่างมาก เนื่องจากการแทนที่เถ้าชานอ้อยบดละเอียดในปริมาณสูงทำให้ปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ซึ่งเป็นสารประกอบหลักที่ให้กำลังแก่คอนกรีตในช่วงอายุต้นมีค่าน้อยลง ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดในช่วงต้นต่ำและการแทนที่เถ้าชานอ้อยบดละเอียดเพิ่มมากขึ้นทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันก็ลดลงตามไปด้วย ทำให้ค่ากำลังอัดที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานไม่เพียงพอที่จะชดเชยกำลังอัดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่หายไป (รัฐพล สมนา และคณะ, 2550) คอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยในปริมาณสูงมากจึงพัฒนากำลังอัดที่อายุปลายของคอนกรีตได้น้อย



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่มีค่า LOI เท่ากับ 10.9



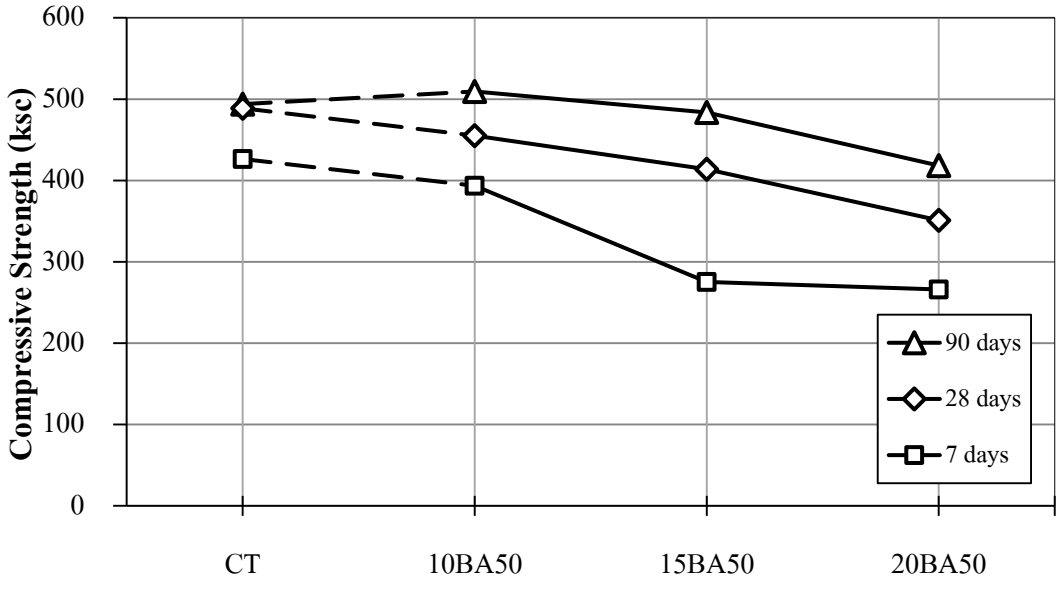
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่มีค่า LOI เท่ากับ 16.1



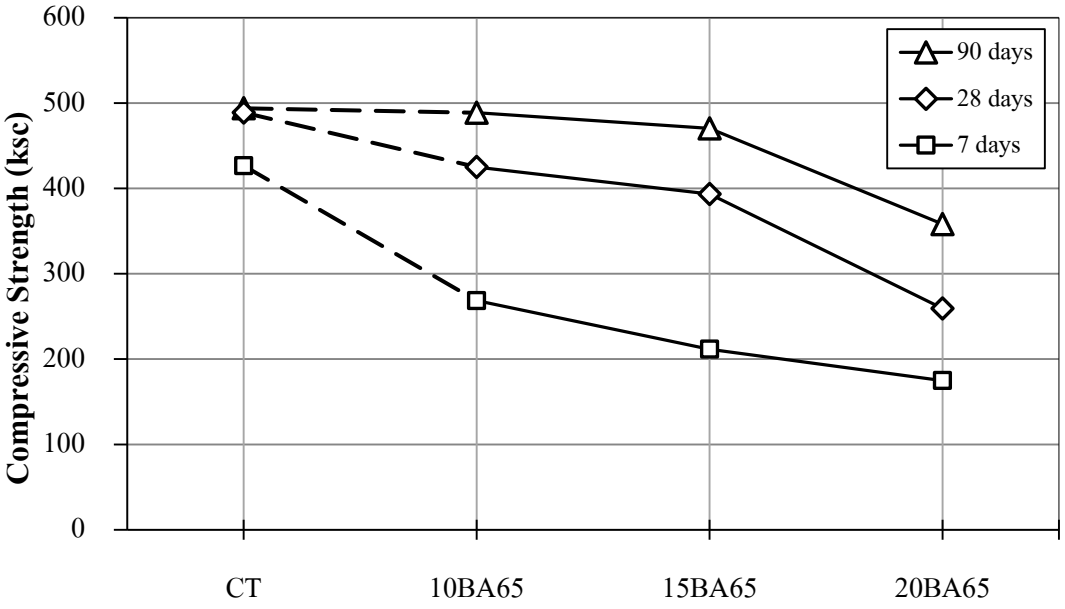
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่มีค่า LOI เท่ากับ 20.0

4.4.3 ผลของค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาต่อกำลังอัดคอนกรีต

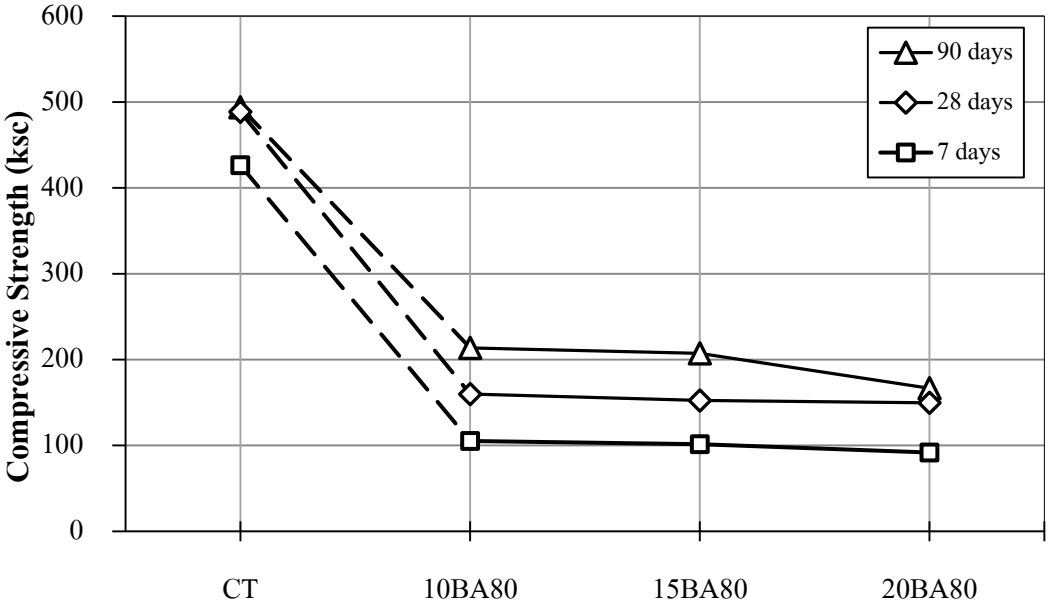
รูปที่ 4.16 - 4.18 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังอัดคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย บดละเอียดกับค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาที่ต่างกัน ในมีปริมาณการแทนที่ที่เท่ากัน พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตมีความสัมพันธ์กับค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา ซึ่งสังเกตได้จากกราฟ เมื่อเถ้าชานอ้อยมีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำลง เนื่องจากเถ้าชานอ้อยที่มีค่า LOI ที่สูงจะมีเส้นใยชานอ้อยที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ปริมาณมาก ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำลง (Rilem, 1991) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ วิทวัส ทิพย์พิริยพงศ์ (2551) พบว่า การแทนที่เถ้าชานอ้อยที่มีค่า LOI ต่ำ โดยแทนที่ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้กำลังอัดดีกว่าคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยที่มีค่า LOI สูง และมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุมโดยคิดเป็นร้อยละ 100, 113 และ 100 ของคอนกรีตควบคุม



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ที่ปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ที่ปริมาณร้อยละ 65 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย ที่ปริมาณร้อยละ 80 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

4.5 กำลังดึงผ่าซีกของคอนกรีต

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบกำลังดึงผ่าซีกของคอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม ที่อายุ 28 และ 90 วัน พบว่ากำลังดึงผ่าซีกของคอนกรีตควบคุมมีค่าเท่ากับ 49 และ 52 กก/ซม^2 ตามลำดับ ส่วนกำลังดึงผ่าซีกของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยที่อายุ 28 และ 90 วัน พบว่า คอนกรีต 10BA50, 10BA65 และ 10BA80 มีค่า เท่ากับ 45, 42, 27 กก/ซม^2 และ 51, 48, 31 กก/ซม^2 ตามลำดับ คอนกรีต 15BA50, 15BA65 และ 15BA80 มีค่ากำลังดึงผ่าซีกเท่ากับ 43, 40, 26 กก/ซม^2 และ 48, 46, 29 กก/ซม^2 ตามลำดับ ส่วน 20BA50, 20BA65 และ 20BA80 มีค่ากำลังรับแรงดึงเท่ากับ 39, 36, 25 กก/ซม^2 และ 40, 36, 26 กก/ซม^2 ตามลำดับ สังเกตได้ว่าเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้นและการบ่มที่นานขึ้นทำให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังดึงผ่าซีกของคอนกรีตได้มากขึ้น

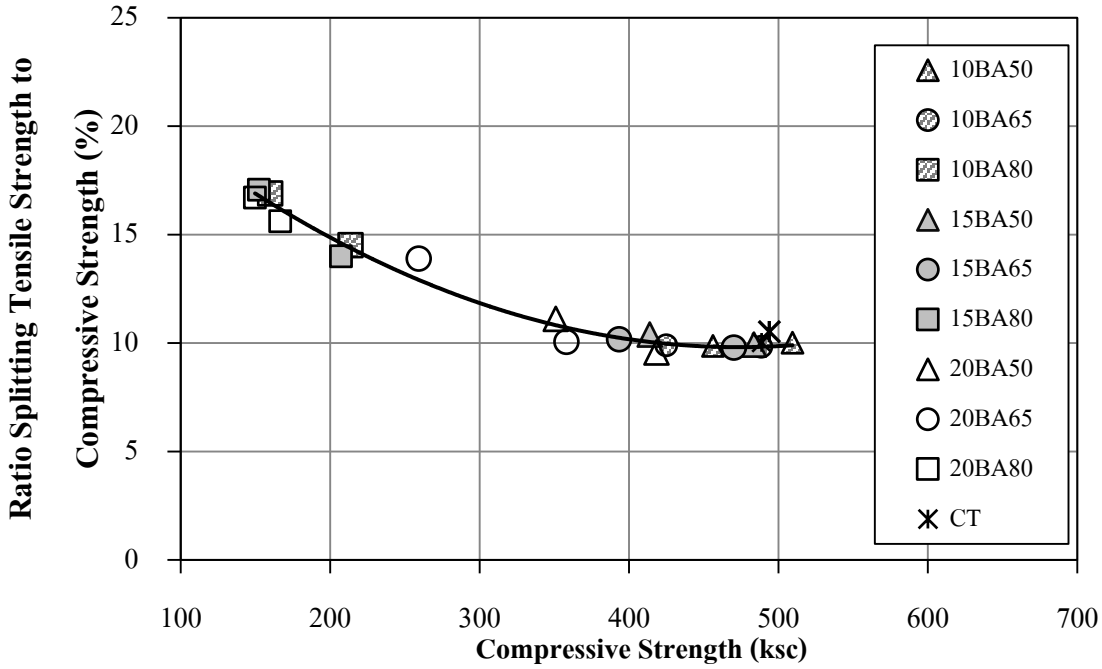
ตารางที่ 4.5 ตารางเปรียบเทียบร้อยละกำลังดึงของคอนกรีตกับกำลังอัดของคอนกรีตแต่ละส่วนผสม

Sample	Compressive Strength (ksc)		SplittingTensileStrength (ksc)		Splitting Tensile Strength / Compressive Strength (%)	
	28 days	90 days	28 days	90 days	28 days	90 days
CT	489	494	49	52	10	11
10BA50	456	509	45	51	10	10
10BA65	425	489	42	48	10	10
10BA80	160	214	27	31	17	15
15BA50	414	484	43	48	10	10
15BA65	393	470	40	46	10	10
15BA80	152	207	26	29	17	14
20BA50	351	418	39	40	11	10
20BA65	259	358	36	36	14	10
20BA80	150	167	25	26	17	16

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนร้อยละของกำลังดึงผ่าซีกต่อกำลังอัดของคอนกรีต แสดงในรูปที่ 4.19 พบว่ากำลังรับแรงดึงต่อกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมมีค่าเท่ากับร้อยละ 10 และ 11 ที่อายุ 28 และ 90 วันตามลำดับ ส่วนคอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 50 และ 65 โดยน้ำหนัก วัสดุประสาน ของทุกๆค่า LOI มีค่าร้อยละของกำลังดึงผ่าซีกต่อกำลังอัดอยู่ระหว่างร้อยละ 10 - 14 เมื่อพิจารณาในช่วงกำลังอัดระหว่าง 260 - 500 กก/ซม^2 นอกจากนั้นอัตราส่วนร้อยละของกำลังดึงผ่าซีกต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนมีแนวโน้มลดลงเมื่อคอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Haque และ Kayali (1998) และ Shannag (2000) ที่พบว่าเมื่อคอนกรีตมีค่ากำลังอัดสูงขึ้นส่งผลให้อัตราส่วนกำลังดึงผ่าซีกต่อกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง แต่การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 80 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีค่าร้อยละกำลังดึงต่อกำลังอัดที่สูงเนื่องจากคอนกรีตมีค่าของกำลังอัดที่ต่ำมาก โดยมีค่าเพียงร้อยละ 22 - 43 ของคอนกรีตควบคุม แต่มีค่ากำลังดึงผ่าซีกสูงถึงร้อยละ 51-60 ของคอนกรีตควบคุม

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณการแทนที่ต่ออัตราส่วนร้อยละกำลังดึกผ่าซีกต่อกำลังอัดของคอนกรีต พบว่า การใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ในปริมาณร้อยละ 50 และ 65 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่าอัตราส่วนร้อยละกำลังดึกผ่าซีกต่อกำลังอัดของคอนกรีตอยู่ในช่วงร้อยละ 10 - 14 ที่อายุ 28 และ 90 วัน เมื่อแทนที่เถ้าชานอ้อยบดละเอียดในปริมาณสูงขึ้น คือ ร้อยละ 80 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้มีค่าอัตราส่วนร้อยละกำลังดึงผ่าซีกต่อกำลังอัดคอนกรีตสูงขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 14 - 17 ที่อายุ 28 และ 90 วัน แสดงให้เห็นว่าการแทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยบดละเอียดในปริมาณสูงมากส่งผลต่อค่าอัตราส่วนร้อยละกำลังดึกผ่าซีกต่อกำลังอัดของคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลของค่า LOI ต่ออัตราส่วนร้อยละกำลังดึกผ่าซีกต่อกำลังอัดของคอนกรีต คือ การแทนที่เถ้าชานอ้อยบดละเอียดในปริมาณที่เท่ากันแต่มีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาแตกต่างกัน เห็นได้ว่าค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ส่งผลกระทบต่ออัตราส่วนร้อยละของกำลังดึงผ่าซีกต่อกำลังอัดของคอนกรีต และการแทนที่เถ้าชานอ้อยบดละเอียดในปริมาณร้อยละ 50 และ 65 ของทุกค่า LOI มีค่าอัตราส่วนร้อยละกำลังดึงผ่าซีกต่อกำลังอัดคอนกรีตที่ใกล้เคียงกัน โดยมีประมาณร้อยละ 10 เช่นเดียวกับคอนกรีตทั่วไปที่ใช้ปูนซีเมนต์



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนร้อยละกำลังดึงผ่าซีกต่อกำลังอัดของคอนกรีต

4.6 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

ผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 และ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 5.03×10^5 และ 5.13×10^5 กก/ซม^2 ส่วนกลุ่มของคอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดเป็นส่วนผสมที่อายุ 28 วัน มีค่าระหว่าง 2.65×10^5 ถึง 4.69×10^5 กก/ซม^2 ที่อายุ 90 วัน มีค่าระหว่าง 2.89×10^5 ถึง 4.67×10^5 กก/ซม^2 นอกจากนี้ยังพบว่าผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตในงานวิจัยมีค่าสูงกว่ามาตรฐาน ว.ส.ท. 1008 เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ทดสอบมีขนาดเล็กกว่ามาตรฐาน ว.ส.ท. 1008 โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซ.ม. สูง 20 ซ.ม. จึงทำให้มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูง (Rashid และคณะ, 2002)

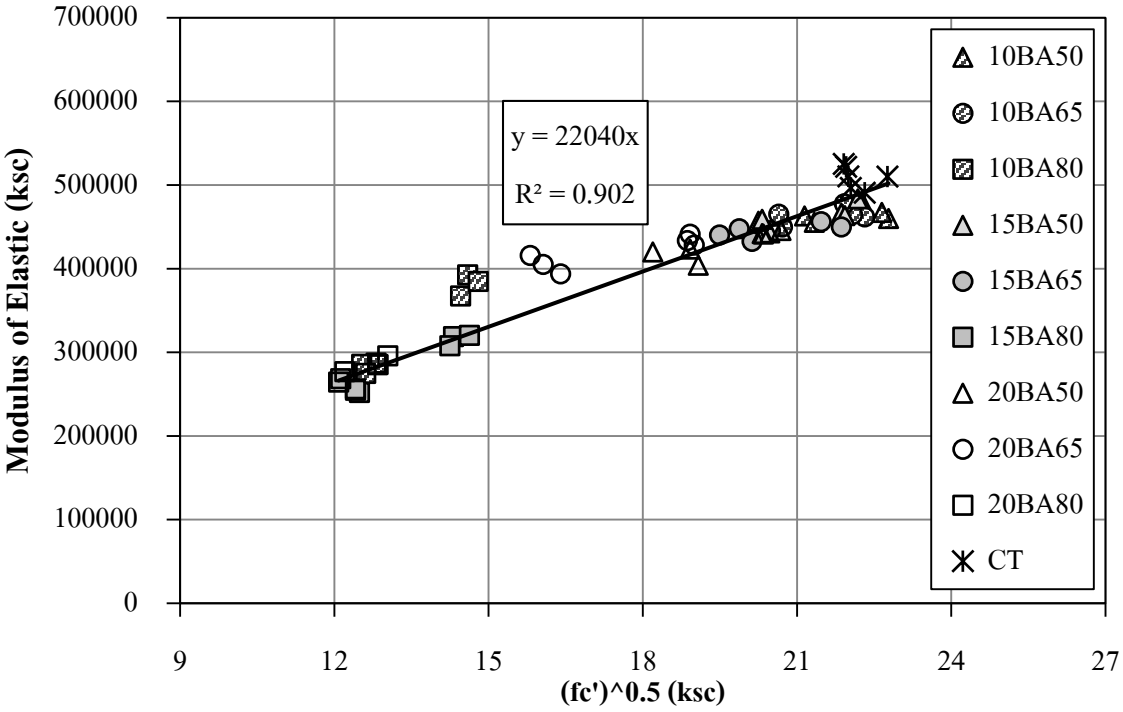
ตารางที่ 4.6 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อย

Sample	Compressive Strength $\sqrt{fc'}$ (ksc)		E_c at 28 days		E_c at 90 days	
			This study ($\times 10^5$ ksc)	EIT 1008 ($\times 10^5$ ksc)	This study ($\times 10^5$ ksc)	EIT 1008 ($\times 10^5$ ksc)
CT	22	22	5.03	3.34	5.13	3.36
10BA50	21	23	4.69	3.21	4.67	3.41
10BA65	21	22	4.53	3.11	4.68	3.34
10BA80	13	15	2.83	1.91	3.75	2.21
15BA50	20	22	4.53	3.07	4.67	3.32
15BA65	20	22	4.40	2.99	4.53	3.27
15BA80	12	14	2.60	1.86	3.19	2.17
20BA50	19	20	4.16	2.83	4.43	3.09
20BA65	16	19	4.05	2.43	4.34	2.86
20BA80	12	13	2.65	1.85	2.89	1.95

รูปที่ 4.20 แสดงการกระจายตัวของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 50, 65 และ 80 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่า สมการที่ได้จากการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแสดงในสมการที่ (4.1) โดยสมการมีความชันเท่ากับ 22,040 นอกจากนี้ยัง พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแปรผันตามกำลังอัดของคอนกรีต (Cetin, 1998) กล่าวคือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าสูงขึ้นเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มขึ้น ดังนั้นการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณสูง คือ ร้อยละ 50, 65 และ 80 โดยน้ำหนักวัสดุประสานไม่มีผลกระทบต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นขึ้นอยู่กับกำลังอัดของคอนกรีต

$$E_c = 22{,}040\sqrt{fc'} \text{ กก/ซม}^2 \quad (4.1)$$

เมื่อพิจารณาผลของค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียด มีแนวโน้มเช่นเดียวกับคอนกรีตควบคุม ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังอัดที่มากขึ้น แสดงให้เห็นว่า ผลของค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไม่ได้ส่งผลกระทบต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของกำลังอัดประลัยกับโมดูลัสยืดหยุ่น ของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่ผสมเถ้าชานอ้อย ที่อายุ 28 และ 90 วัน

4.7 ความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์

ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตทดสอบด้วยวิธีเร่งด้วยกระแสไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM C 1202 (2012) ทำการทดสอบที่อายุ 28 และ 90 วัน ทำการวัดค่าการซึมผ่านของคลอไรด์อิออนในรูปของประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์และร้อยละการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต

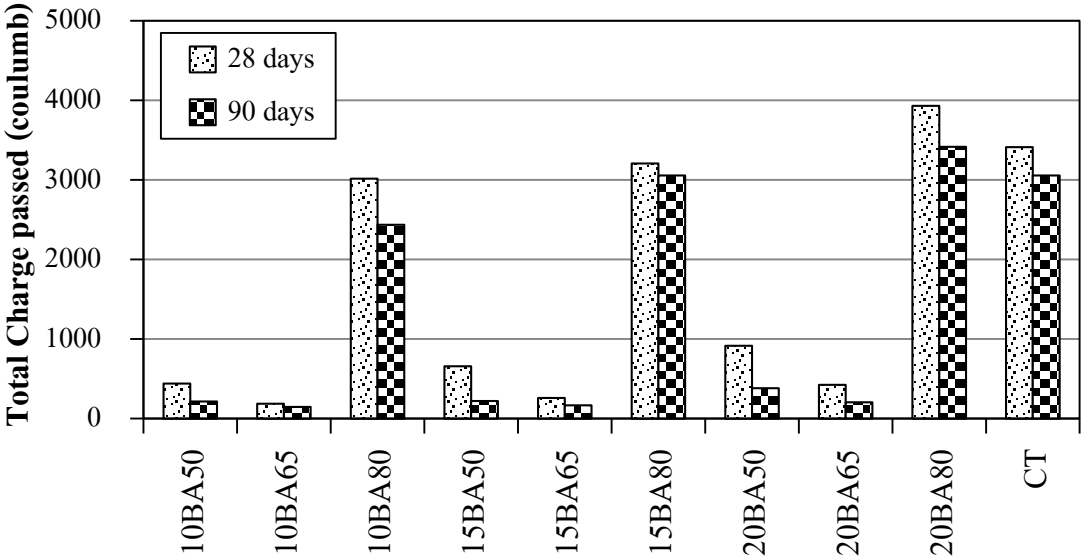
Sample	Total Charge passed, Coulombs (***Normalized Total Charge Passed, %***)	
	28 days	90 days
CT	3,412 ***(100)***	3,055 ***(100)***
10BA50	440 ***(13)***	215 ***(7)***
10BA65	186 ***(6)***	147 ***(5)***
10BA80	3,015 ***(88)***	2,436 ***(80)***
15BA50	657 ***(20)***	220 ***(7)***
15BA65	260 ***(8)***	167 ***(6)***
15BA80	3,206 ***(94)***	3,056 ***(100)***
20BA50	914 ***(27)***	382 ***(13)***
20BA65	424 ***(12)***	204 ***(7)***
20BA80	3,931 ***(116)***	3,416 ***(112)***

การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ พบว่าคอนกรีตควบคุมมีประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านคอนกรีตเท่ากับ 3,412 และ 3,055 คูลอมบ์ ที่อายุ 28 และ 90 วันตามลำดับ จัดอยู่ในกลุ่มที่มีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ในระดับปานกลาง (2,000 - 4,000 คูลอมบ์) เห็นได้ว่าเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้นค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านทั้งหมดมีค่าลดลง เนื่องจากการบ่มอย่างต่อเนื่องทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันมีความสมบูรณ์มากขึ้นทำให้คอนกรีตมีความแน่นมากขึ้นและมีความพรุนในเนื้อคอนกรีตลดลง (Ramezanianpour และ Malhotra, 1995) ส่วนค่ากระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าชานอ้อยบดละเอียด พบว่า คอนกรีต 10BA50, 10BA65, 10BA80, 15BA50, 15BA65, 15BA80, 20BA50, 20BA65 และ 20BA80 มีค่าเท่ากับ 440, 186, 3,015, 657, 260, 3,206, 914, 424 และ 3,931 คูลอมบ์ ที่อายุ 28 วัน เมื่อคอนกรีตมีอายุการบ่มเพิ่มขึ้น

ค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับคอนกรีตควบคุม ซึ่งมีค่าเท่ากับ 215, 147, 2,436, 220, 167, 3,056, 382, 204 และ 3,416 คูลอมบ์ ที่อายุ 90 วัน แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 50 และ 65 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถช่วยลดการแทรกซึมคลอไรด์ได้อย่างมาก เนื่องจากการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้อนุภาคขนาดเล็กของเถ้าชานอ้อยเข้ามาอุดช่องว่างในเนื้อคอนกรีต อีกทั้งยังเกิดจากผลิตผลที่ได้จากปอซโซลาน เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ที่ช่วยลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง จึงทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น (วิทวัส ทิพย์พิริยพงศ์ และคณะ, 2550) ทำให้สารละลายคลอไรด์แทรกซึมเข้าเนื้อคอนกรีตได้ยากขึ้น

4.7.1 ผลของการแทนที่และค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาต่อความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์

รูปที่ 4.21 เห็นได้ว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 50 และ 65 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ของทุกๆค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (คอนกรีต 10BA50, 10BA65, 15BA50, 15BA65, 20BA50 และ 20BA65) มีประสิทธิภาพในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม ซึ่งมีค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านจัดอยู่ในกลุ่มที่มีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ในระดับต่ำมาก (100 - 1,000 คูลอมบ์) เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตได้มากขึ้น (Chindaprasirt และคณะ, 2008) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rukzon และคณะ (2011) ที่ได้ศึกษาการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยในปริมาณร้อยละ 10, 20 และ30 โดยน้ำหนักและ พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยในปริมาณมากขึ้นทำให้ค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านคอนกรีตลดลง โดยการแทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่มีประสิทธิ์ภาพมากที่สุด มีค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดไหลผ่าน เท่ากับ 285 คูลอมบ์ ที่อายุ 90 วัน ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มที่มีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ในระดับต่ำมาก อย่างไรก็ตาม การแทนที่เถ้าชานอ้อยบดละเอียดในปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 80 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ของทุกๆ ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (10BA80, 15BA80 และ 20BA80) มีค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านสูง จัดอยู่ในกลุ่มที่มีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ในระดับปานกลาง (2,000 - 4,000 คูลอมบ์)

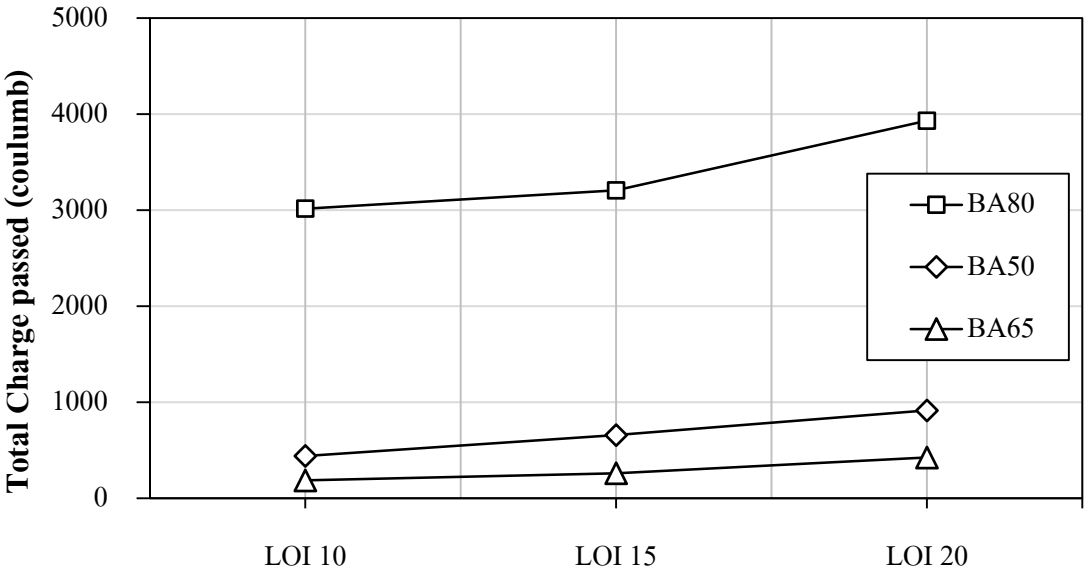


รูปที่ 4.21 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

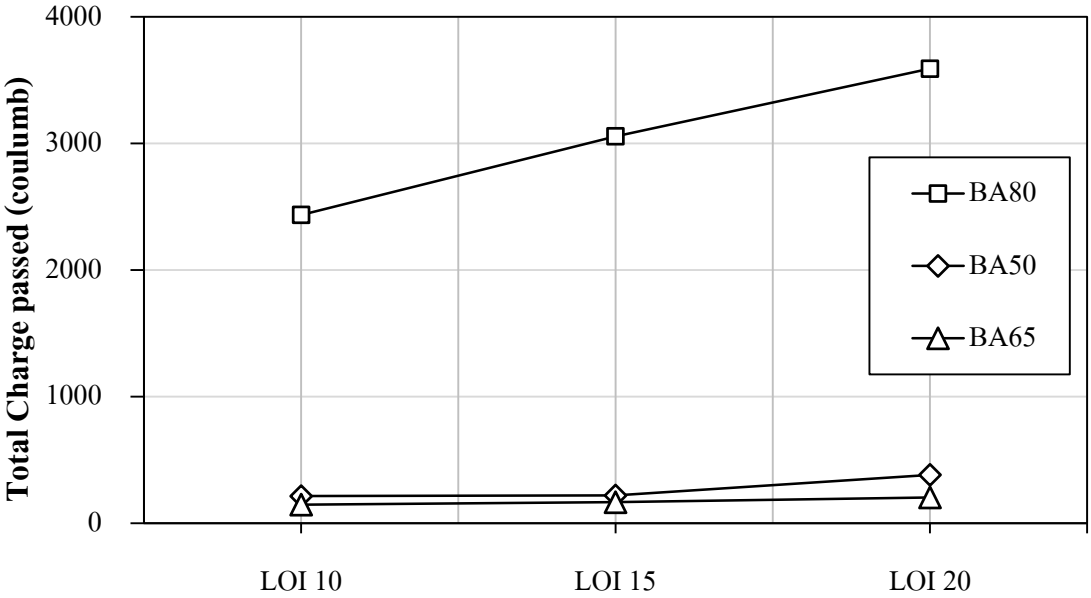
จากรูปที่ 4.22-4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาต่อค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน พบว่าเมื่อพิจารณาการแทนที่เถ้าชานอ้อยบดละเอียดในปริมาณร้อยละที่เท่ากันแต่มีค่า LOI ต่างกัน เห็นได้ว่า LOI ส่งผลกระทบต่อการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต คือ เถ้าชานอ้อยที่มีค่า LOI เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย โดยเฉพาะการแทนเถ้าชานอ้อยในปริมาณที่สูงมาก คือ ร้อยละ 80 ค่า LOI ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตอย่างชัดเจน เนื่องจากปริมาณ LOI ที่สูงขึ้นของเถ้าชานอ้อยเป็นเส้นใยของชานอ้อยที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นน้อยตามไปด้วย ทำให้ปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งทำหน้าที่ในการดักจับคลอไรด์อิออนมีปริมาณลงลด (He และคณะ, 2004)

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณการแทนที่ต่อความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ พบว่า การแทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยในปริมาณ 50 และ 65 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถช่วยให้คอนกรีตมีความต้านทานคลอไรด์สูง แต่การแทนที่เถ้าชานอ้อยในปริมาณสูงถึงร้อยละ 80 ทำให้ความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตต่ำอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจาก การแทนที่เถ้าชานอ้อยในปริมาณสูงมาก ทำให้ปูนซีเมนต์มีปริมาณที่น้อย ส่งผลให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ทำปฏิกิริยาปอซโซลานก็ลดลงตามไปด้วย จึงมีเถ้าชานอ้อยส่วนที่เหลือที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยา ซึ่งทำให้เนื้อคอนกรีตมีความพรุนสูง เกิดเป็นช่องว่างภายในคอนกรีต (ปกป้อง รัตนชู, 2551) ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดสอบ

การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยในปริมาณสูงถึงร้อยละ 80 มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูง



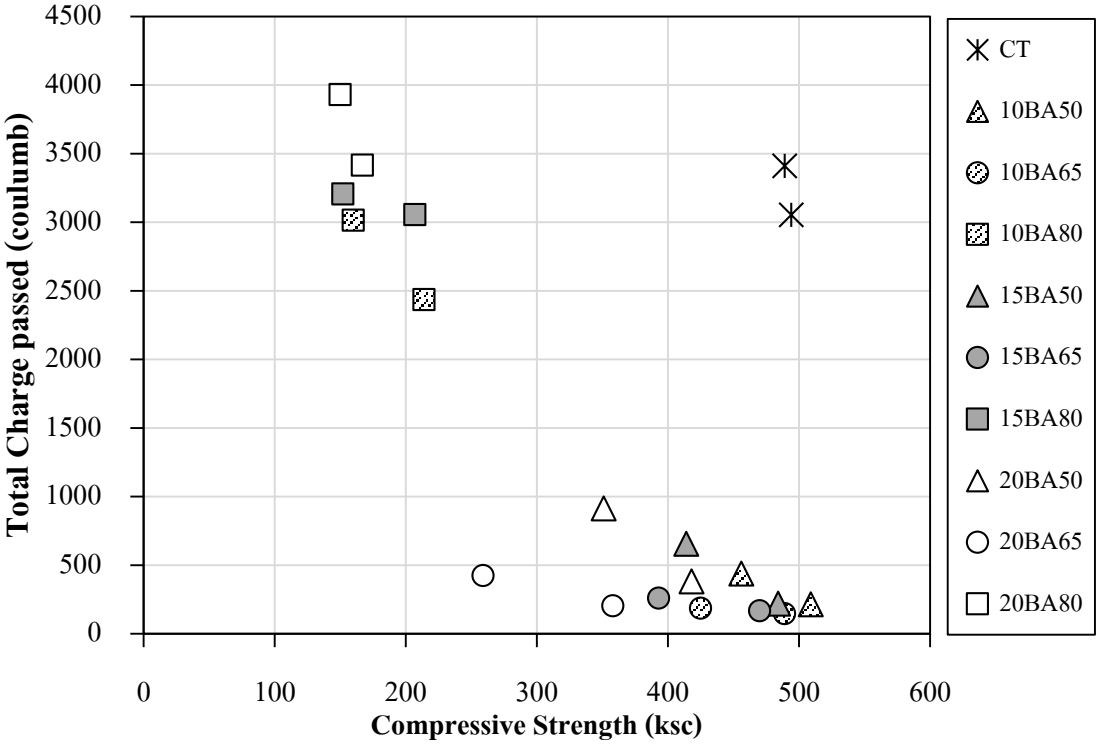
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาและค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาและค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านคอนกรีตที่อายุ 90 วัน

4.7.2 ผลของกำลังอัดต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์

รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่าน เห็นได้ชัดว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีผลต่อการแทรกซึมของคลอไรด์อิออน โดยการแทนที่เถ้าชานอ้อยบดละเอียดในปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 และ 65 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานมีค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านต่ำกว่าการแทนที่ในปริมาณร้อยละ 80 อยู่มาก ทั้งนี้เนื่องจาก คอนกรีต BA50 และ BA65 (มีกำลังอัดอยู่ในช่วงระหว่าง 259 - 509 กก/ซม^2 ที่อายุ 28 และ 90 วัน) มีค่ากำลังอัดคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีต BA80 (มีกำลังอัดอยู่ในช่วงระหว่าง 150 - 294 กก/ซม^2 ที่อายุ 28 และ 90 วัน) ค่อนข้างมาก คอนกรีต BA80 จึงมีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ต่ำ สอดคล้องกับงานวิจัยของ ชัยชาญ และคณะ (2549) ที่พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตมีผลต่อการแทรกซึมของคลอไรด์อิออน กล่าวคือ ค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่านคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลผ่าน

4.8 อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่อยู่ในรูปแบบของสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต (K, m/s) และอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

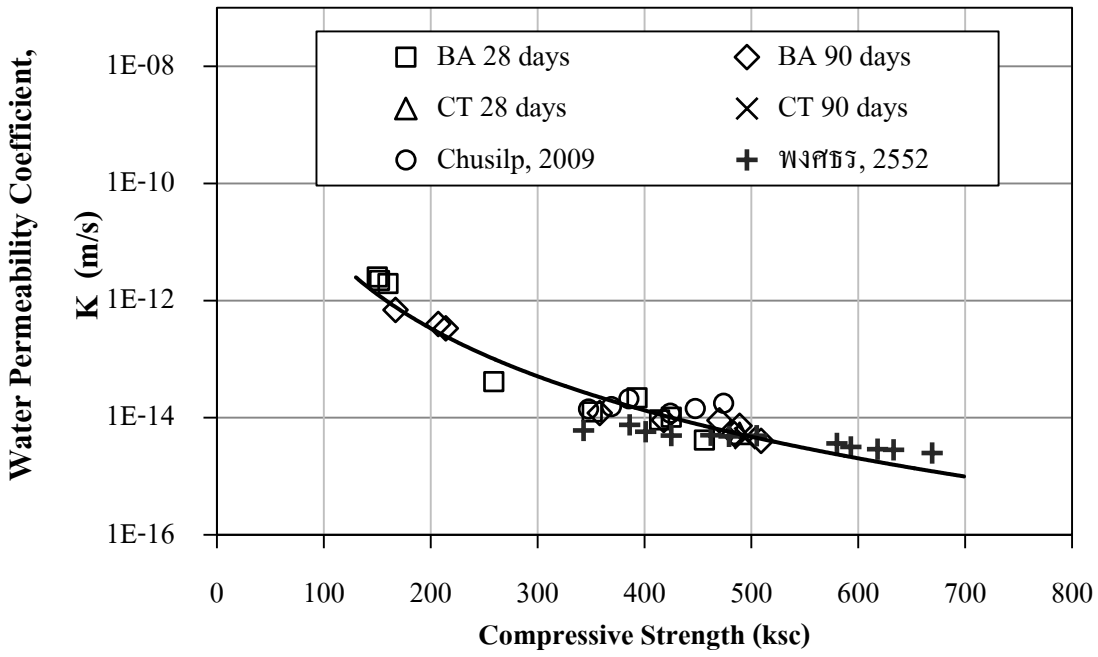
ที่ผสมเถ้าชานอ้อยบดละเอียดต่อสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตของคอนกรีตควบคุม (K/K_{CT}) จากการทดสอบพบว่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตของคอนกรีตควบคุม (CT) ที่อายุ 28 และ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 5.39×10^{-13} และ 4.47×10^{-13} เมตร/วินาที ตามลำดับ เห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตมีค่าลดต่ำลงเมื่อคอนกรีตมีอายุการบ่มมากขึ้น เนื่องจากการบ่มอย่างต่อเนื่องช่วยทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น มีความสมบูรณ์มากขึ้นส่งผลให้ขนาดและปริมาณโพรงในคอนกรีตมีค่าลดลง ทำให้การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตลดลง ส่วนคอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตอยู่ในช่วง 4.14×10^{-13} ถึง 2.53×10^{-10} เมตร/วินาที ที่อายุ 28 วัน และมีค่าลดลงเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้นเช่นเดียวกับคอนกรีตควบคุม โดยมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 4.02×10^{-13} ถึง 6.87×10^{-11} เมตร/วินาที สอดคล้องกับงานวิจัยของวลัยลักษณ์ สาระจันทร์ (2550) ซึ่งใช้คอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 ที่อายุ 28 วัน มีอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตเท่ากับ 20.0×10^{-13}, 31.5×10^{-13}, 43.6×10^{-13} และ 58.0×10^{-13} เมตร/วินาที เมื่อคอนกรีตมีอายุเพิ่มมากขึ้นเป็น 90 วัน ทำให้อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำลงมีค่าเท่ากับ 1.80×10^{-13}, 2.10×10^{-13}, 2.70×10^{-13} และ 4.40×10^{-13} เมตร/วินาที

ตารางที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต และอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

Sample	Coefficient of Water Permeability $\times10^{-13}$, m/s*(K/K_{CT})*	
	28 Days	90 Days
CT	5.39 ***(1.00)***	4.47 ***(1.00)***
10BA50	4.14 ***(0.77)***	4.02 ***(0.90)***
10BA65	10.19 ***(1.89)***	7.25 ***(1.62)***
10BA80	1955.31 ***(362.56)***	334.54 ***(74.82)***
15BA50	9.12 ***(1.69)***	5.25 ***(1.17)***
15BA65	21.85 ***(4.05)***	8.99 ***(2.01)***
15BA80	2200.51 ***(408.03)***	395.48 ***(88.45)***
20BA50	12.51 ***(2.32)***	9.09 ***(2.03)***
20BA65	41.07 ***(7.66)***	12.02 ***(2.69)***
20BA80	2527.40 ***(468.64)***	687.99 ***(153.88)***

4.8.1 ผลของกำลังอัดต่อการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

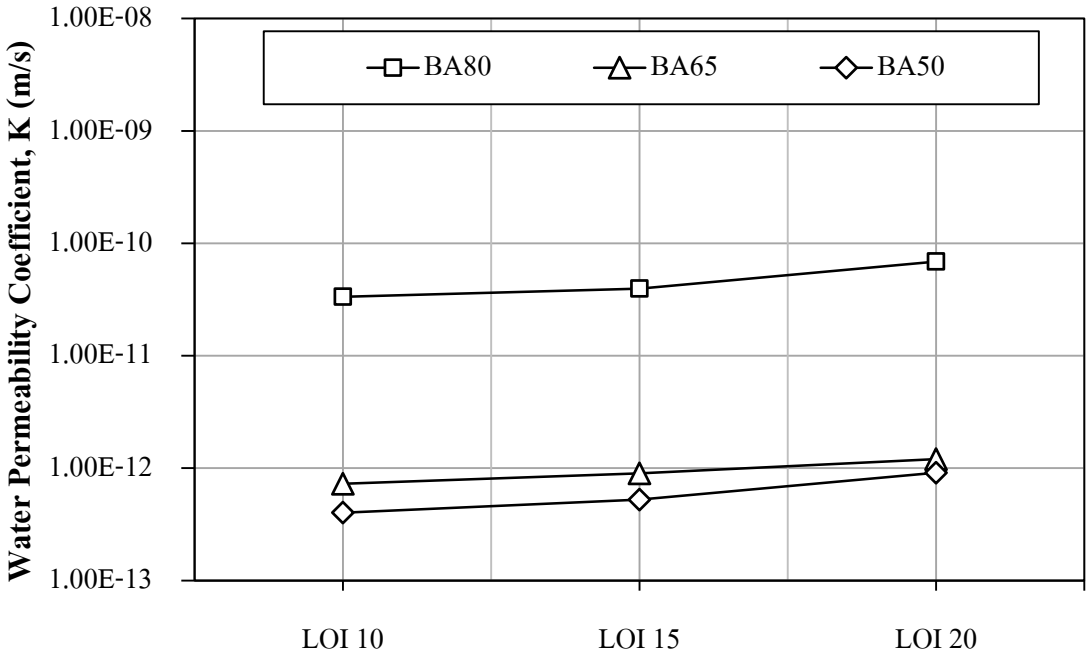
รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตของคอนกรีตที่ผสมเถ้าชานอ้อยบดละเอียด สังเกตได้ว่า กำลังอัดของคอนกรีตมีผลต่อการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต โดยคอนกรีต 10BA50 และ 15BA50 มีค่ากำลังอัดของคอนกรีตเทียบเท่าคอนกรีตควบคุม (คอนกรีตควบคุมมีกำลังอัดเท่ากับ 489 และ 494 กก/ซม^2 ที่อายุ 28 และ 90 วัน) มีค่าอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต เท่ากับ 0.77, 1.69 ที่อายุ 28 และ 0.90, 1.17 ที่อายุ 90 วัน ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม เนื่องจากคอนกรีตมีกำลังอัดสูง ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำและเนื้อคอนกรีตมีความแน่นมากขึ้น นอกจากนั้นอนุภาคที่เล็กของเถ้าชานอ้อยสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานส่งผลให้ช่องว่างในเนื้อซีเมนต์เพสต์และช่องว่างระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวมมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้ช่องว่างมีขนาดเล็กลง ทำให้สัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำลง (ชัย และคณะ, 2550) ส่วนคอนกรีต 10BA65, 10BA80, 15BA65, 15BA80, 20BA50, 20BA65 และ 20BA80 มีกำลังอัดคอนกรีตอยู่ในช่วง 150 - 470 กก/ซม^2 ซึ่งมีค่ากำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม ส่งผลให้คอนกรีตมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นและมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุมควบคุม แสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตขึ้นอยู่กับค่ากำลังอัดของคอนกรีต สอดคล้องกับงานวิจัยของ วชิรกรณ์ เสนาวัง (2554) ที่พบว่าเมื่อคอนกรีตมีกำลังลดต่ำลงส่งผลให้อัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตมีค่าเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน

4.8.2 ผลการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) และการแทนที่เถ้าชานอ้อยบดละเอียดต่อการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

จากรูปที่ 4.26 แสดงให้เห็นผลของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) และการแทนที่เถ้าชานอ้อยบดละเอียดต่อการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต เมื่อพิจารณาผลของปริมาณการแทนที่ต่อการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต พบว่าทุกๆ ค่า LOI ของเถ้าชานอ้อย เมื่อทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าชานอ้อยบดละเอียดในปริมาณที่มากขึ้นทำให้คอนกรีตมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการแทนที่เถ้าชานอ้อยบดละเอียดในปริมาณที่มากเกินไปทำให้เถ้าชานอ้อยส่วนที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยามีมากเพราะมีปูนซีเมนต์ในปริมาณที่น้อย ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นเพื่อจะทำปฏิกิริยารวมกับซิลิกอนไดออกไซด์และอลูมินาไตรออกไซด์ที่มีอยู่ในเถ้าชานอ้อยมีปริมาณที่น้อย ดังนั้นเถ้าชานอ้อยส่วนที่เหลือจึงเป็นส่วนที่ทำให้เกิดช่องว่างภายในคอนกรีต (ปกป้อง รัตนชู, 2551) เมื่อพิจารณาผล LOI ที่มีต่อการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต พบว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาของเถ้าชานอ้อยที่สูงขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีให้คอนกรีตมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจาก LOI ของเถ้าชานอ้อยเป็นพวกกากเส้นใยของอ้อยที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นน้อยตามไปด้วย ดังนั้น ทั้งค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาและปริมาณการแทนที่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการต้านทานการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต กล่าวคือ ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาที่เพิ่มขึ้นและการแทนที่ในปริมาณสูงขึ้น ทำให้คอนกรีตมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเห็นได้ชัดเจนว่า อิทธิพลของปริมาณการแทนที่ส่งผลกระทบต่อการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตมากกว่าค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาของเถ้าชานอ้อย



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผากับค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่อายุ 90 วัน

4.9 การหดตัวแห้งของคอนกรีต

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบการหดตัวแห้งของคอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน และคอนกรีตควบคุม CT พบว่าคอนกรีตทั้งหมดมีค่าการหดตัวแห้งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงอายุ 100 วัน จากนั้นการหดตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนถึงอายุ 182 วัน อาจเป็นเพราะคอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงมีการพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุต้นค่อนข้างช้า ทำให้คอนกรีตต้านทานการยึดรั้งได้น้อยทำให้เกิดการหดตัวแห้งมากในช่วงอายุต้น (อรรคเดช ศรีเสน, 2556) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Barr และคณะ (2003) พบว่า การหดตัวแห้งของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม โดยมีค่าการหดตัวแห้งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายในอายุ 100 วัน และจะหดตัวอย่างช้าๆ เมื่ออายุมากกว่า 100 วัน

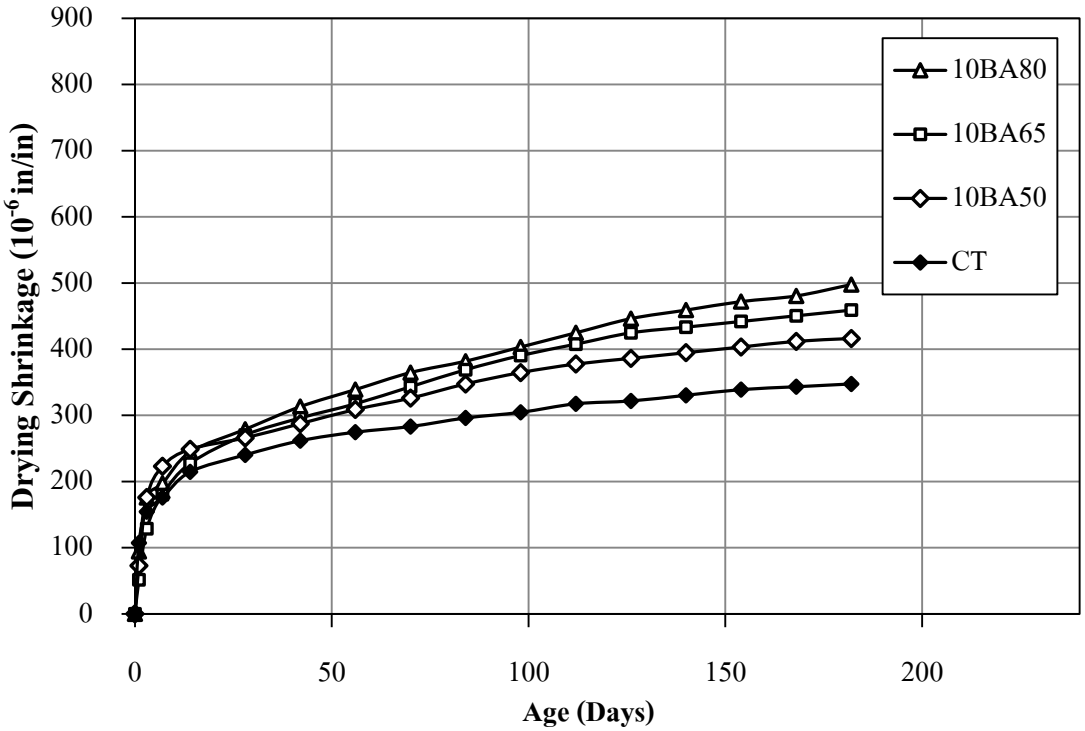
ตารางที่ 4.9 การหดตัวแห้งของคอนกรีต

Age (Days)	Drying Shrinkage ($x10^{-6}$in/in)									
	CT	10BA50	10BA65	10BA80	15BA50	15BA65	15BA80	20BA50	20BA65	20BA80
1	107	73	51	94	47	64	129	64	197	167
3	154	176	129	176	103	112	215	133	266	292
7	176	223	180	197	159	206	270	206	339	399
14	215	249	227	245	210	262	326	279	408	481
28	240	266	270	279	257	305	425	343	472	571
42	262	287	296	313	287	348	472	386	523	618
56	275	309	317	339	309	386	511	429	575	669
70	283	326	343	365	335	416	532	459	618	721
84	296	348	369	382	356	442	549	485	652	747
98	305	365	390	403	378	468	571	511	678	768
112	317	378	408	425	390	493	588	528	691	785
126	322	386	425	446	408	519	601	545	704	798
140	330	395	433	459	416	541	609	566	716	807
154	339	403	442	472	425	558	618	575	725	815
168	343	412	450	481	433	566	631	583	734	824
182	348	416	459	498	442	571	639	592	742	832

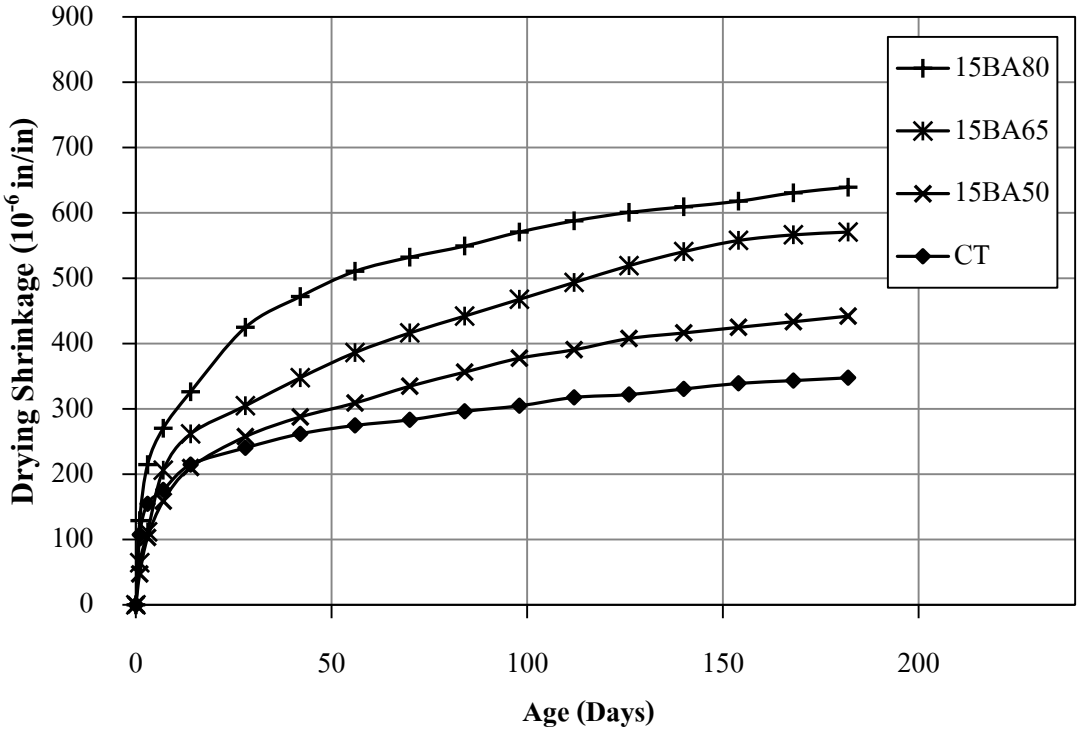
4.9.1 การหดตัวแห้งของคอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดเป็นวัสดุประสาน

รูปที่ 4.27-4.29 แสดงการหดตัวแห้งของคอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าคอนกรีตควบคุมมีค่าการหดตัวแห้งเท่ากับ 348×10^{-6} นิ้ว/นิ้ว ส่วนคอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่มีค่า LOI ร้อยละ 10.9 โดยน้ำหนักแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 50, 65 และ 80 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีค่าการหดตัวแห้งเท่ากับ 416×10^{-6}, 459×10^{-6} และ 498×10^{-6} นิ้ว/นิ้ว ตามลำดับ คอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่มีค่ามีค่า LOI ร้อยละ 16.1 โดยน้ำหนักแทนที่ปูนซีเมนต์มีค่าการหดตัวแห้งเท่ากับ 442×10^{-6}, 571×10^{-6} และ 639×10^{-6} นิ้ว/นิ้ว ตามลำดับ และคอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดที่มีค่ามีค่า LOI ร้อยละ 20.0 โดยน้ำหนัก

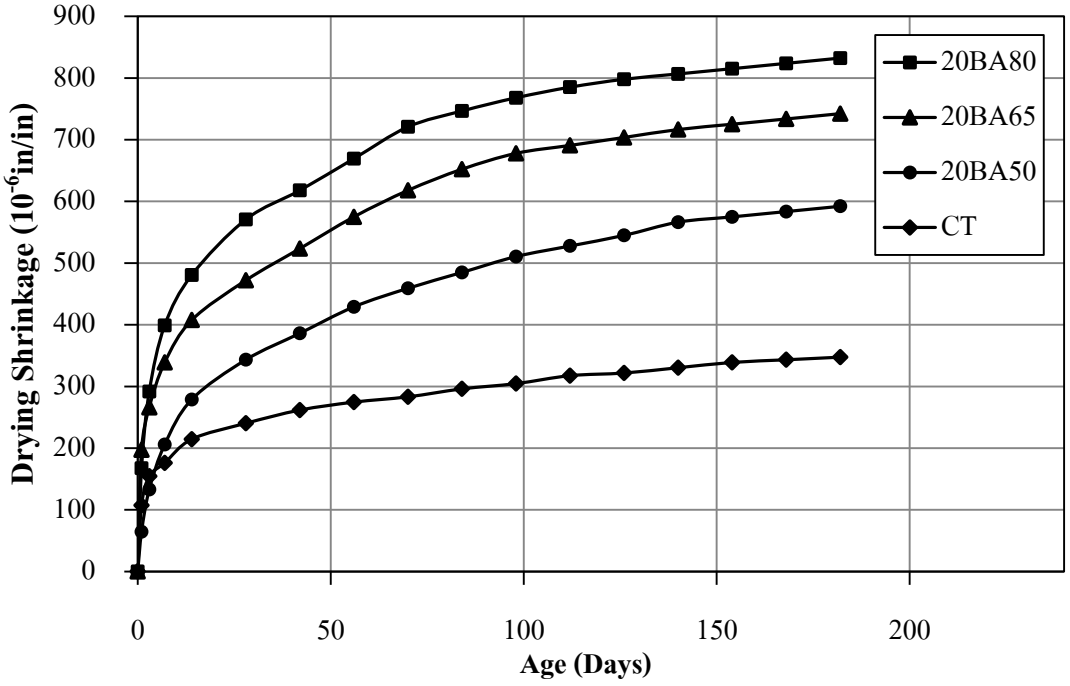
แทนที่ปูนซีเมนต์มีค่าการหดตัวแห้งเท่ากับ 529×10^{-6}, 742×10^{-6} และ 832×10^{-6} นิ้ว/นิ้ว ตามลำดับ ทั้งนี้สังเกตได้ว่าการใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าการหดตัวแห้งสูงกว่าคอนกรีตควบคุมทุกกรณี ทั้งนี้เนื่องจากปริมาตรของวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ มีมากกว่าคอนกรีตควบคุมที่มีปูนซีเมนต์ที่น้ำหนักเท่ากัน เพราะค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าชานอ้อย และปูนซีเมนต์มีค่าที่ต่างกันซึ่งเท่ากับ 2.68, 2.46, 2.31 ส่วนปูนซีเมนต์มีค่าเท่ากับ 3.15 ทำให้คอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์มีปริมาณเพสต์มากกว่าคอนกรีตควบคุม และมีปริมาณเพสต์เพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่เถ้าชานอ้อยบดละเอียดในปริมาณที่สูงขึ้นจึงส่งผลให้คอนกรีตกรีตมีการหดตัวแห้งที่มากกว่าคอนกรีตควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Guneyisi และคณะ (2010) ที่พบว่าการใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานในปริมาณสูงขึ้นทำให้การหดตัวแห้งมีค่าสูงขึ้นตามด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาตามมาตรฐาน ACI 209 (2008) ได้กำหนดค่าการหดตัวแห้งสูงสุดไว้ไม่เกิน 780×10^{-6} นิ้ว/นิ้ว พบว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูง โดยส่วนใหญ่มีค่าการหดตัวแห้งน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้มาตรฐาน ACI ยกเว้นคอนกรีต 20BA80 ที่มีค่าการหดตัวแห้งเท่ากับ 832×10^{-6} นิ้ว/นิ้ว ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน ดังนั้น การใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงสามารถนำไปใช้งานได้ แม้ว่าจะมีค่าการหดตัวแห้งสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวแห้งและอายุของคอนกรีตที่มีค่า LOI 10

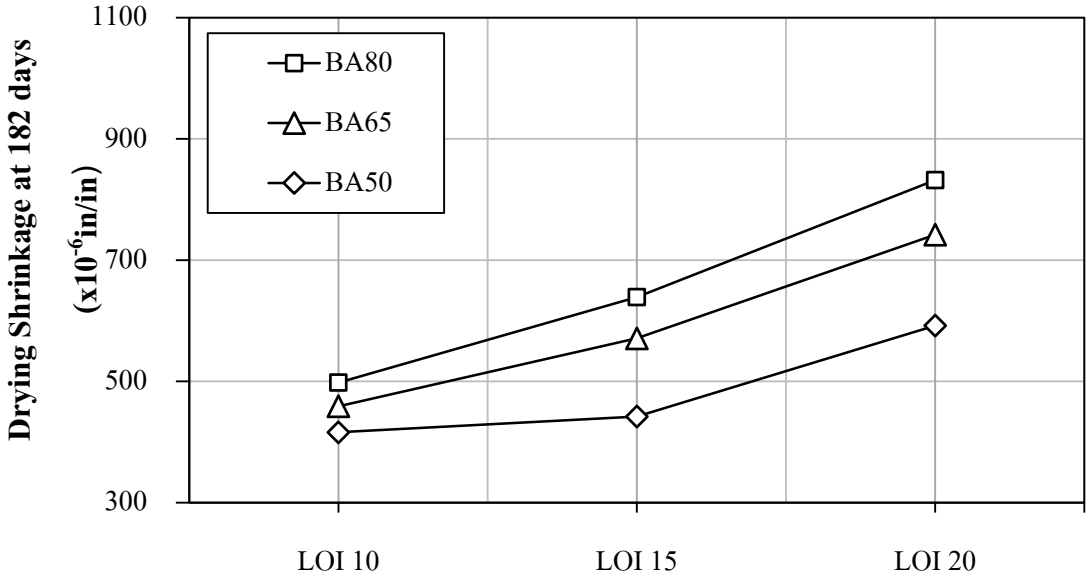


รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวแห้งและอายุของคอนกรีตที่มีค่า LOI 15



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวแห้งและอายุของคอนกรีตที่มีค่า LOI 20

จากรูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผากับค่าการหดตัวแห้งของคอนกรีต เมื่อพิจารณากราฟเห็นได้ชัดเจนว่า ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาที่เพิ่มขึ้นและปริมาณการแทนที่ที่มากขึ้นส่งผลให้การหดตัวแห้งของคอนกรีตมีค่ามากขึ้น เนื่องจากการใช้เถ้าชานอ้อยที่มีค่า LOI สูงและการแทนที่ในปริมาณสูง ต้องใช้สารลดน้ำในปริมาณที่มากขึ้นทำให้คอนกรีตมีการหดตัวแห้งสูง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Atis (2003) ที่ศึกษาการหดตัวแห้งของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณสูง พบว่า คอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำในส่วนผสมมีค่าการหดตัวแห้งสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีสารลดน้ำในส่วนผสมถึงร้อยละ 50



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผากับค่าการหดตัวแห้งของคอนกรีต ที่อายุ 182 วัน