บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

บทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลที่ได้ ประกอบไปด้วยคุณสมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ และผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าถ่านหิน ได้แก่ กำลังอัด การต้านทานการขัดสี การแทรกซึมของอิออนคลอไรด์ และการหดตัวแบบแห้ง

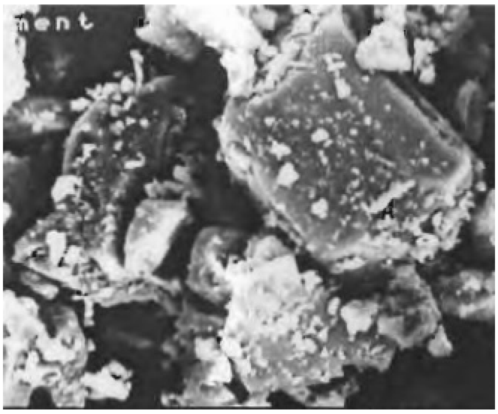
4.1 คุณสมบัติจำเพาะของวัสดุประสาน

4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

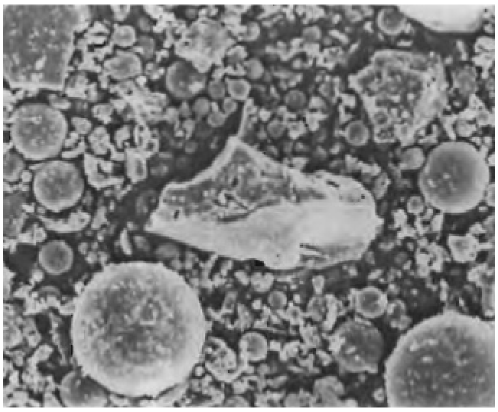
ลักษณะทางกายภาพของวัสดุประสานเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตโดยตรงทั้งคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุประสานเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้วัสดุประสานและวิธีการทดสอบ

4.1.1.1 ลักษณะรูปร่างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าถ่านหินบดละเอียด

จากภาพถ่ายขยายขนาดอนุภาควัสดุที่ถ่ายด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) เห็นได้ว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (รูปที่ 4.1) มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมมีรูปทรงไม่แน่นอนขณะที่เถ้าถ่านหินบดละเอียด (รูปที่ 4.2) มีลักษณะส่วนใหญ่เป็นเหลี่ยมมุมมีทรงกลมปะปนเล็กน้อยเนื่องจากเถ้าถ่านหินบางส่วนไม่ถูกบดจากกระบวนการบดละเอียดทั้งหมด



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (รักษ์ บูรณสิงห์, 2547)



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของเถ้าถ่านหินบดละเอียด (รักษ์ บูรณสิงห์, 2547)

4.1.1.2 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของวัสดุประสาน

ตารางที่ 4.1 ค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุ พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าถ่านหินบดละเอียดมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 และ 2.72 ตามลำดับ ร้อยละอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (45 ไมครอน) ของเถ้าถ่านหินบดละเอียดเท่ากับร้อยละ 1.2 เห็นได้ว่าเถ้าถ่านหินมีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าปูนซีเมนต์เล็กน้อยแต่มีขนาดของอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่าปูนซีเมนต์ครึ่งหนึ่ง

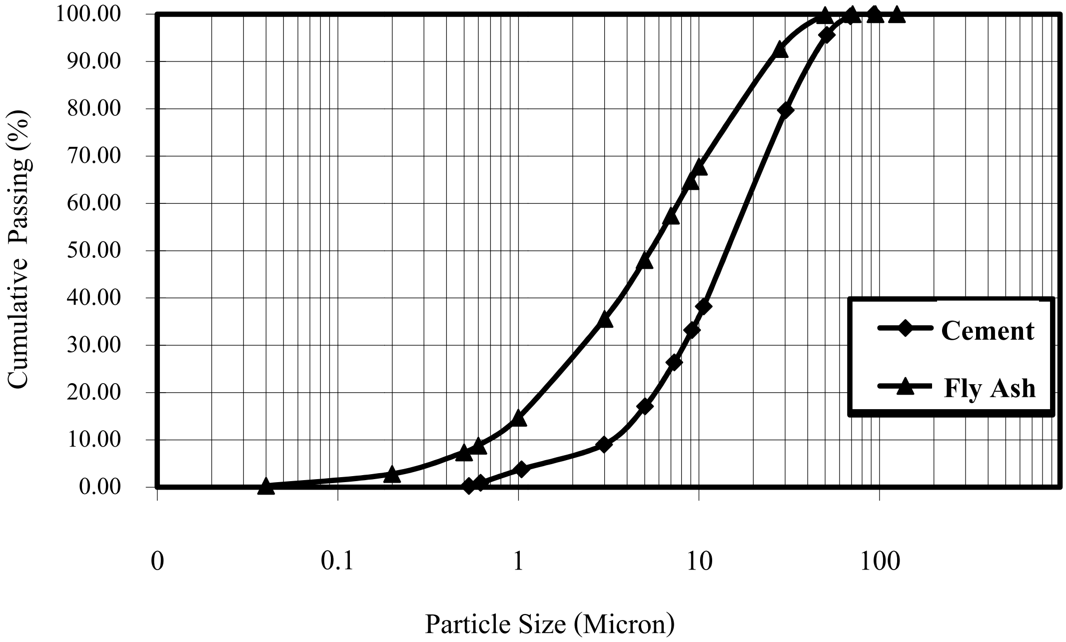
ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัสดุประสาน (รักษ์ บูรณสิงห์, 2547)

Sample	Specific Gravity	Retained on a Sieve No.325 (%)	Median Particle Size (Microns)
Cement	3.15	N/A	14.6
Fly Ash	2.72	1.2	7.7

หมายเหตุ : N/A=Not Applied

4.1.1.3 การกระจายตัวและขนาดเฉลี่ยของอนุภาค

รูปที่ 4.3 การกระจายตัวของวัสดุประสานที่ทดสอบด้วยเครื่อง Particle analyzer microtrace II พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีการกระจายตัวของอนุภาคร้อยละ 80 อยู่ในช่วง 3 ถึง 40 ไมครอน มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 14.6 ไมครอน และเถ้าถ่านหินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยการบดละเอียดมีการกระจายตัวของอนุภาคร้อยละ 80 อยู่ในช่วง 0.7 ถึง 25 ไมครอน มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 7.7 ไมครอน เห็นได้ว่าการกระจายตัวของอนุภาคเถ้าถ่านหินบดละเอียดมีการกระจายตัวที่แคบกว่าปูนซีเมนต์



รูปที่ 4.3 การกระจายตัวของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าถ่านหินบดละเอียด (รักษ์ บูรณสิงห์, 2547)

4.1.2 องค์ประกอบทางเคมี

จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray fluorescence spectroscope แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มี CaO เป็นองค์ประกอบหลักมีค่าเท่ากับร้อยละ 65.41 ขณะที่ปริมาณของ MgO, SO_3 และค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) มีค่าไม่เกินมาตรฐาน ASTM C150 (2001) ส่วนผลรวมขององค์ประกอบทางเคมีหลัก (SiO_2, Al_2O_3และ Fe_2O_3) ของเถ้าถ่านหินบดละเอียดเท่ากับร้อยละ 76.22 ปริมาณ SO_3 เท่ากับร้อยละ 0.64 และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาเท่ากับร้อยละ 0.70 เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีแล้วจัดได้ว่าเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุปอซโซลาน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C618 (2001)

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ (รักษ์ บูรณสิงห์, 2547)

Chemical Composition (%)	Cement	Fly Ash
Silicon Dioxide (SiO_2)	20.90	41.91
Aluminium Oxide (Al_2O_3)	4.76	21.53
Ferric Oxide (Fe_2O_3)	3.41	12.78
Calcium Oxide (CaO)	65.41	13.99
Magnesium Oxide (MgO)	1.25	2.63
Sodium Oxide (Na_2O)	0.24	2.70
Potassium Oxide (K_2O)	0.35	2.58
Sulfur Trioxide (SO_3)	2.71	0.64
Loss On Ignition (LOI)	0.99	0.70
SiO_2+Al_2O_3+ Fe_2O_3	-	76.22
Class	-	F

4.2 คุณสมบัติของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

คุณสมบัติของมวลรวมนับเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตโดยตรงเช่นกัน การศึกษาโครงการวิจัยเฉพาะเรื่องครั้งนี้ได้ใช้มวลรวมที่ได้จาก ทรายแม่น้ำ หินปูนย่อย มวลรวมละเอียดจากเศษคอนกรีตและมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีต โดยมวลรวมแต่ละประเภทมีคุณสมบัติของมวลรวมแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติจำเพาะของมวลรวม (รักษ์ บูรณสิงห์, 2547)

Properties	River Sand	Crushed Limestone	RFA	RCA
Fineness Modulus	3.04	6.79	3.55	6.40
Bulk Specific Gravity	2.60	2.67	2.31	2.45
Absorption (%)	0.94	0.46	11.91	5.61
Dry-rodded Weight (kg/m^3)	1691	1602	1433	1357
Void (%)	34.33	39.41	35.88	41.40

4.2.1 ลักษณะรูปร่างและการกระจายขนาดของมวลรวม

ตารางที่ 4.3 พบว่าลักษณะรูปร่างของมวลรวมที่ได้จากเศษคอนกรีตเปรียบเทียบกับทรายแม่น้ำและหินปูนย่อย พบว่ามวลรวมละเอียดจากเศษคอนกรีตมีรูปร่างไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุมสูง ขนาดโดยเฉลี่ยค่อนข้างใหญ่กว่าทรายแม่น้ำ มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.55 ซึ่งทรายแม่น้ำมีค่าเท่ากับ 3.04 ทั้งนี้เนื่องจากมวลรวมละเอียดจากเศษคอนกรีตมีขนาดไม่เกิน 4.75 มม. และประกอบด้วยซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าร์จากเศษคอนกรีตเดิมที่มีความพรุนและการแตกหักของหินที่ผ่านการบดเศษคอนกรีตส่งผลต่อค่าโมดูลัสความละเอียด ความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำ และหน่วยน้ำหนัก ส่วนมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตมีรูปร่างใกล้เคียงกับหินปูนย่อยแต่มีขนาดเล็กกว่า โดยขนาดของมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตเท่ากับ 4.75 ถึง 19 มม. โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 6.79 ซึ่งหินปูนย่อยมีค่าเท่ากับ 6.40 และผิวของมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตมีซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าร์จากเศษคอนกรีตเดิมมีความพรุนทำให้มีการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าหินปูนย่อย

รูปที่ 4.4 ทรายแม่น้ำและหินปูนย่อย

รูปที่ 4.5 มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีต

4.2.2 ความถ่วงจำเพาะและอัตราการดูดซึมน้ำของมวลรวม

ตารางที่ 4.3 พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้งของทรายแม่น้ำ หินปูนย่อย มวลรวมละเอียดจากเศษคอนกรีตและมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 2.60, 2.67, 2.31 และ 2.45 ตามลำดับ เห็นได้ว่ามวลรวมจากเศษคอนกรีตมีค่าความถ่วงจำเพาะที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้งต่ำกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ เนื่องจากซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าร์จากเศษคอนกรีตเดิมมีความพรุนส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะลดลงส่วนอัตราการดูดซึมน้ำของทรายแม่น้ำ หินปูนย่อย มวลรวมละเอียดจากเศษคอนกรีตและมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตมีค่าร้อยละ 0.94, 0.46, 11.91 และ5.61 ตามลำดับ สังเกตได้ว่าอัตราการดูดซึมน้ำของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่ามากกว่ามวลรวมจากธรรมชาติมาก โดยมวลรวมละเอียดจากเศษคอนกรีตมีค่ามากกว่าทรายแม่น้ำ 11 เท่า และมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตมีค่ามากกว่าหินปูนย่อย 5 เท่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hansen และ Narud (1983) และ Chen และคณะ (2003) คือมวลรวมละเอียดจากเศษคอนกรีตมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 10.37 ขณะที่มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 5.0 ถึง 5.7

4.2.3 หน่วยน้ำหนักและช่องว่างระหว่างมวลรวม

ตารางที่ 4.3 พบว่าหน่วยน้ำหนักของมวลรวมละเอียดจากเศษคอนกรีตและมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 1433 และ 1357 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าหน่วยน้ำหนักน้อยกว่าทรายแม่น้ำและหินปูนย่อยที่มีค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1691 และ 1602 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากความพรุนของซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้าร์ของคอนกรีตเดิมที่ยึดเกาะที่ผิวของมวลรวมทำให้หน่วยน้ำหนักของมวลรวมจากเศษคอนกรีตมีค่าลดลงส่วนช่องว่างระหว่างมวลรวมของทรายแม่น้ำ หินปูนย่อย มวลรวมละเอียดจากเศษคอนกรีตและมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตมีค่าร้อยละ 34.33, 39.41, 35.88 และ 41.40 ตามลำดับ สังเกตได้ว่ามวลรวมจากเศษคอนกรีตมีช่องว่างระหว่างมวลรวมมากกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ โดยมวลรวมละเอียดจากเศษคอนกรีตมีช่องว่างระหว่างมวลรวมมากกว่าทรายแม่น้ำและมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตมีช่องว่างระหว่างมวลรวมมากกว่าหินปูนย่อย ทั้งนี้เนื่องจากมวลรวมจากเศษคอนกรีตมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนเป็นเหลี่ยมมุมและมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอทำให้มีช่องว่างระหว่างมวลรวมมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ สุรศักดิ์ ภู่สันติพงษ์ และคณะ (2547) ที่พบว่ามวลรวมละเอียดจากเศษคอนกรีตมีช่องว่างระหว่างมวลรวมอยู่ในช่วงร้อยละ 34.21 ถึง 35.74 และมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตมีช่องว่างระหว่างมวลรวมอยู่ในช่วงร้อยละ 39.99 ถึง 41.81

4.3 คุณสมบัติของคอนกรีตสด

โครงการวิจัยเฉพาะเรื่องนี้ได้แบ่งคอนกรีตออกเป็น 3 กลุ่มได้แก่ กลุ่มที่ 1 คือคอนกรีตควบคุม (CON) กลุ่มที่ 2 คือคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียดและใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตและ

ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าถ่านหินบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (กลุ่มคอนกรีต CS) และกลุ่มที่ 3 คือคอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตและปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตด้วยเถ้าถ่านหินบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (กลุ่มคอนกรีต CRE)

4.3.1 ปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสม

ปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีตครั้งนี้ได้ทำการควบคุมอัตราส่วนน้ำประสิทธิผลต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.48 และควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตระหว่าง 5 ถึง 10 ซม. โดยได้ปรับปริมาณน้ำที่ใช้ในแต่ละส่วนผสมเพื่อชดเชยค่าความชื้นและการดูดซึมน้ำของมวลรวมที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าปริมาณน้ำที่ใช้จริงในการผสมคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตมีปริมาณน้ำที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมโดยกลุ่มคอนกรีต CRE มีปริมาณน้ำที่ใช้มากกว่ากลุ่มคอนกรีต CS ทั้งนี้เนื่องจากความพรุนของซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้าร์ของคอนกรีตเดิมที่ยึดเกาะผิวของมวลรวมจากเศษคอนกรีตส่งผลให้กลุ่มคอนกรีต CRE มีการดูดซึมน้ำมากกว่ากลุ่มคอนกรีต CS และกลุ่มคอนกรีต CS มีการดูดซึมน้ำมากกว่าคอนกรีตควบคุม

ตารางที่ 4.4 ปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีต

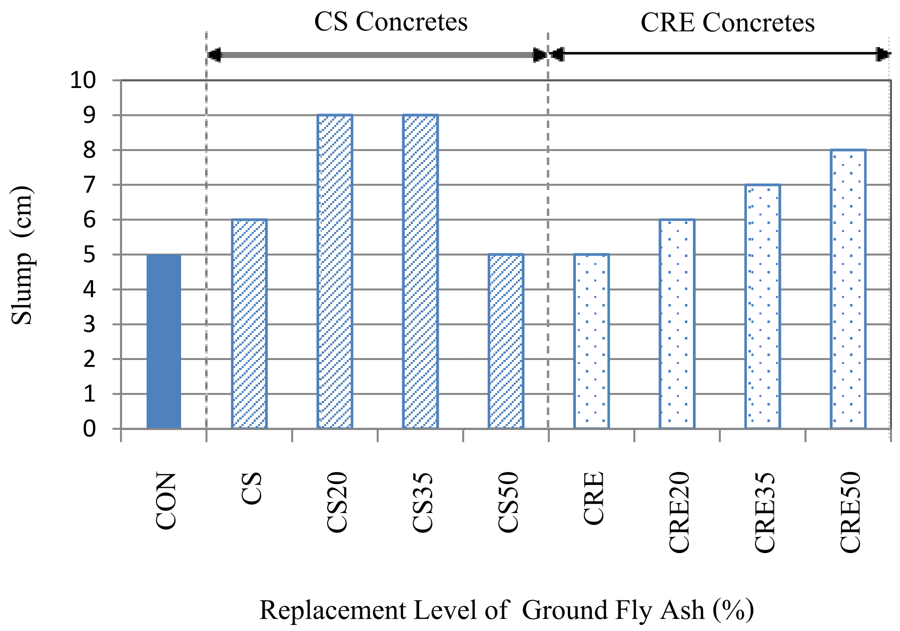
Mixes	Mixing Water (kg/m^3)	W/B*	Effective Water (kg/m^3)	W/B**	Slump (cm)
CON	191	0.50	182.4	0.48	5
CS	214	0.56	182.4	0.48	6
CS20	214	0.56	182.4	0.48	9
CS35	214	0.56	182.4	0.48	9
CS50	214	0.56	182.4	0.48	5
CRE	257	0.67	182.4	0.48	5
CRE20	257	0.67	182.4	0.48	6
CRE35	256	0.67	182.4	0.48	7
CRE50	256	0.67	182.4	0.48	8

หมายเหตุ : * = อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเมื่อรวมการชดเชยค่าการดูดซึมของมวลรวม

** = อัตราส่วนน้ำประสิทธิผลต่อวัสดุประสานเมื่อมวลรวมอยู่ในสภาวะอิ่มตัวแบบแห้ง

4.3.2 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

รูปที่ 4.6 แสดงค่ายุบตัวของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต พบว่าทั้งกลุ่มคอนกรีต CS และกลุ่มคอนกรีต CRE มีค่ายุบตัวเริ่มต้นสูงกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอัตราการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน ยกเว้นคอนกรีต CS50 และคอนกรีต CRE มีค่ายุบตัวเท่ากับคอนกรีตควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณน้ำที่ใช้จริงของกลุ่มคอนกรีต CS และกลุ่มคอนกรีต CRE มีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุมสอดคล้องกับงานวิจัยของ Poon และคณะ (2002) พบว่าค่ายุบตัวของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ใช้เป็นส่วนผสม และพบว่ากลุ่มคอนกรีต CRE มีค่ายุบตัวมากขึ้นเมื่อมีการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราที่มากขึ้นแสดงว่าเถ้าถ่านหินบดละเอียดมีผลต่อการยุบตัวที่มากขึ้นของคอนกรีต



รูปที่ 4.6 ค่ายุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์

4.4 กำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดและร้อยละของกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตร่วมกับเถ้าถ่านหินบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานและควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตระหว่าง 5 ถึง 10 ซม. ซึ่งประกอบไปด้วยคอนกรีตควบคุม (CON) กลุ่มคอนกรีต CS และกลุ่มคอนกรีต CRE

ตารางที่ 4.5 กำลังอัดและร้อยละของกำลังอัดของคอนกรีต

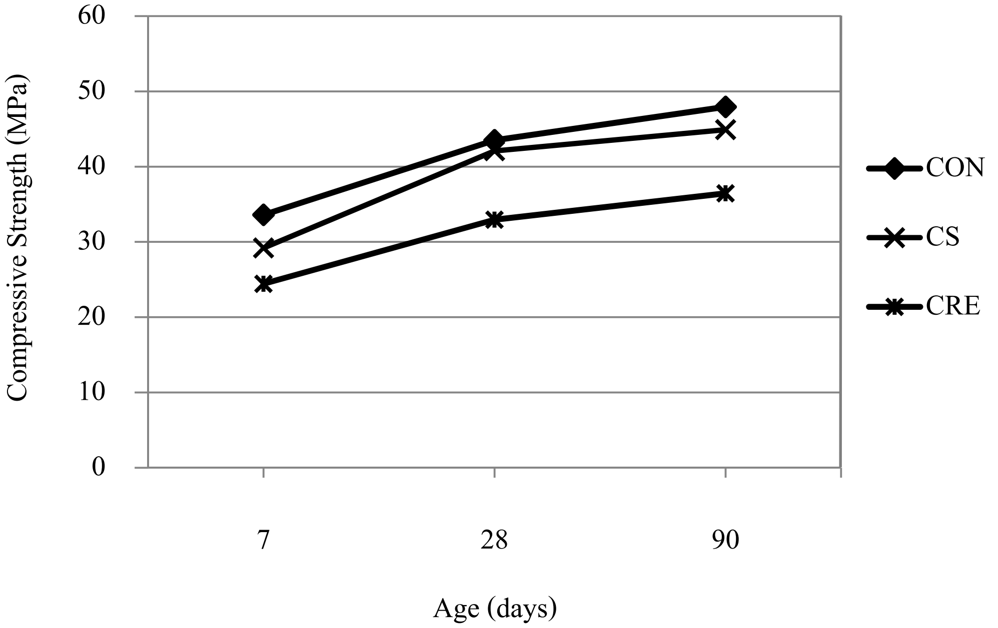
Mixes	Compressive Strength (MPa)			Normalized Compressive Strength (%)		
	7 days	28 days	90 days	7 days	28 days	90 days
CON	33.5	43.4	47.9	100	100	100
CS	29.1	42.1	44.8	87	97	94
CS20	32.3	43.1	46.1	96	99	96
CS35	31.1	44.0	48.3	93	99	101
CS50	27.1	42.6	45.4	81	98	95
CRE	24.4	32.9	36.4	73	76	76
CRE20	22.7	34.0	37.0	68	78	77
CRE35	23.7	36.9	40.5	71	85	85
CRE50	19.8	32.6	37.7	59	75	79

หมายเหตุ : ส่วนที่แรเงาหมายถึงคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดเท่ากับหรือมากกว่าคอนกรีตควบคุม (CON)

4.4.1 ผลกระทบจากการใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติ

รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต พบว่ากำลังอัดของคอนกรีต CS หรือคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำและมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตและใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 29.1, 42.1 และ 44.8 เมกะปาสคาล คิดเป็นร้อยละ 87, 97 และ 94 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ และกำลังอัดของคอนกรีต CRE หรือคอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตและใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 24.4, 32.9 และ 36.4 เมกะปาสคาล คิดเป็นร้อยละ 73, 76 และ 76 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ ผลการทดสอบนี้ชี้ให้เห็นว่าในช่วงอายุ 7 ถึง 28 วัน ทั้งคอนกรีต CS และคอนกรีต CRE มีการพัฒนากำลังอัดอย่างรวดเร็วและมีการพัฒนาช้าลงแต่ก็ยังคงมีการพัฒนาต่อไปเรื่อยๆ เมื่อคอนกรีตมีอายุมากกว่า 28 วัน โดยคอนกรีต CRE มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีต CS และคอนกรีต CS มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทุกช่วงอายุการทดสอบ สาเหตุเนื่องจากซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าร์ที่ยึดเกาะผิวของมวลรวมจากเศษคอนกรีตเดิมมีความพรุน มีช่องว่างระหว่างมวลรวมมากกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ ทำให้คอนกรีต CRE มีความแข็งแรงน้อยกว่าคอนกรีต CS และคอนกรีต CS มีความแข็งแรงน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม และยังพบว่าการใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยไม่ส่งผล

กระทบต่อกำลังอัดมากนักเนื่องจากคอนกรีต CS มีค่ากำลังอัดเท่ากับร้อยละ 94 ของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 90 วัน

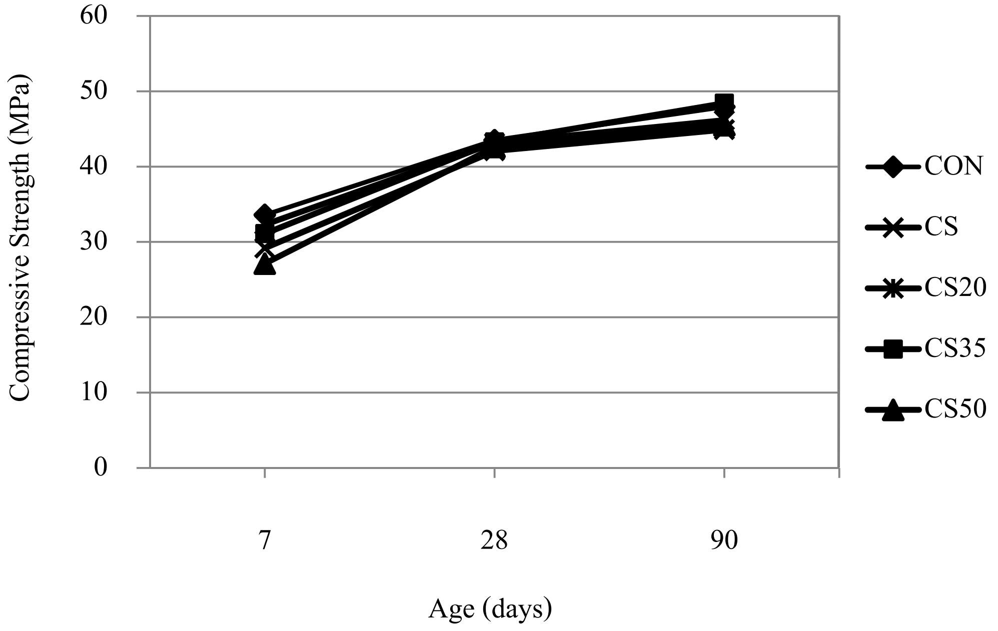


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มของคอนกรีต CS และคอนกรีต CRE

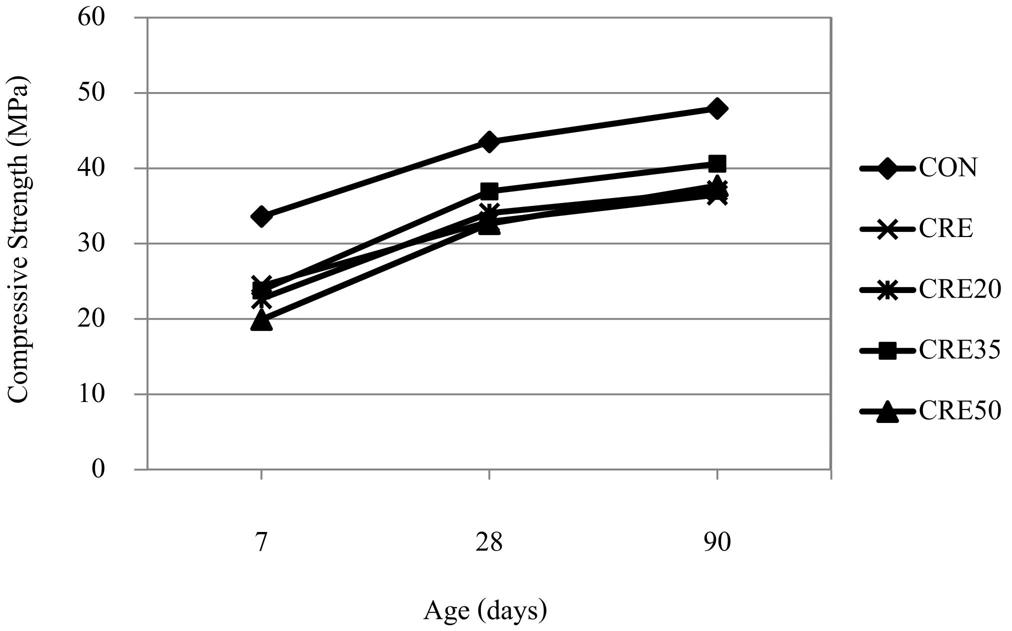
4.4.2 ผลกระทบจากการใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มของคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำและมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตร่วมกับเถ้าถ่านหินบดร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานหรือกลุ่มคอนกรีต CS พบว่าแนวโน้มในการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต CS20, CS35 และ CS50 ช่วงอายุ 7 ถึง 28 วัน มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วและมีการพัฒนาช้าลงแต่ยังคงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเมื่อคอนกรีตมีอายุมากกว่า 28 วัน เช่นเดียวกับคอนกรีตควบคุมโดยมีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมเล็กน้อยและเป็นที่สังเกตว่าเมื่อคอนกรีตมีอายุครบ 90 วัน กำลังอัดของคอนกรีต CS20, CS35 และ CS50 มีค่าเท่ากับ 46.1, 48.3 และ 45.4 เมกะปาสคาล คิดเป็นร้อยละ 96, 101 และ 95 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ โดยที่คอนกรีต CS35 ให้ผลด้านกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมและคอนกรีต CS20, CS35 และ CS50 ยังให้ผลกำลังอัดที่อายุ 90 วัน สูงกว่าคอนกรีต CS ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เถ้าถ่านหินบดละเอียดเข้าไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีผลต่อคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำและมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรงมากขึ้น

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มเทียบกับคอนกรีตควบคุมของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตร่วมกับเถ้าถ่านหินบดหรือกลุ่มคอนกรีต CRE พบว่าแนวโน้มในการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต CRE20, CRE35 และ CRE50 ช่วงอายุ 7 ถึง 28 วัน มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วและมีการพัฒนาช้าลงแต่ยังคงมีการพัฒนาต่อไปเมื่อคอนกรีตมีอายุมากกว่า 28 วัน เช่นเดียวกับคอนกรีตควบคุมและกลุ่มคอนกรีต CS โดยมีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมและคอนกรีต CS มาก ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่น้อยลงส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าร์ในมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตเดิมที่ยึดเกาะผิวของมวลรวมมีความพรุน มีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ และมีปริมาณมากขึ้นทำให้การพัฒนากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมและที่อายุ 90 วัน กำลังอัดของคอนกรีต CRE20, CRE35 และ CRE50 มีค่าเท่ากับ 37.0, 40.5 และ 37.7 เมกะปาสคาล คิดเป็นร้อยละ 77, 85 และ 79 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ เป็นที่สังเกตว่าที่อายุ 90 วัน แม้คอนกรีต CRE20, CRE35 และCRE50 กำลังอัดจะต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมมากแต่ก็มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีต CRE ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวและคอนกรีต CRE35 ยังให้ผลกำลังอัดคิดเป็นร้อยละ 85 ของคอนกรีตควบคุม แสดงว่าปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหินมีผลกระทบในทางที่ดีขึ้นต่อคอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีต



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มของกลุ่มคอนกรีต CS



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มของกลุ่มคอนกรีต CRE

4.5 การต้านทานการขัดสี

ผลการทดสอบการต้านทานการขัดสีตามมาตรฐาน ASTM C944 (2001) กับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าถ่านหินอัตราร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานทดสอบที่อายุ 28 และ 90 วัน ทำการขัดก้อนคอนกรีตทุกส่วนผสมครั้งละ 2 นาทีแล้วนำมาชั่งหาน้ำหนักที่สูญหายในแต่ละครั้งติดต่อกัน 6 ครั้งรวม 12 นาที เพื่อหาค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีจากน้ำหนักคอนกรีตที่สูญหายแสดงในตารางที่ 4.6

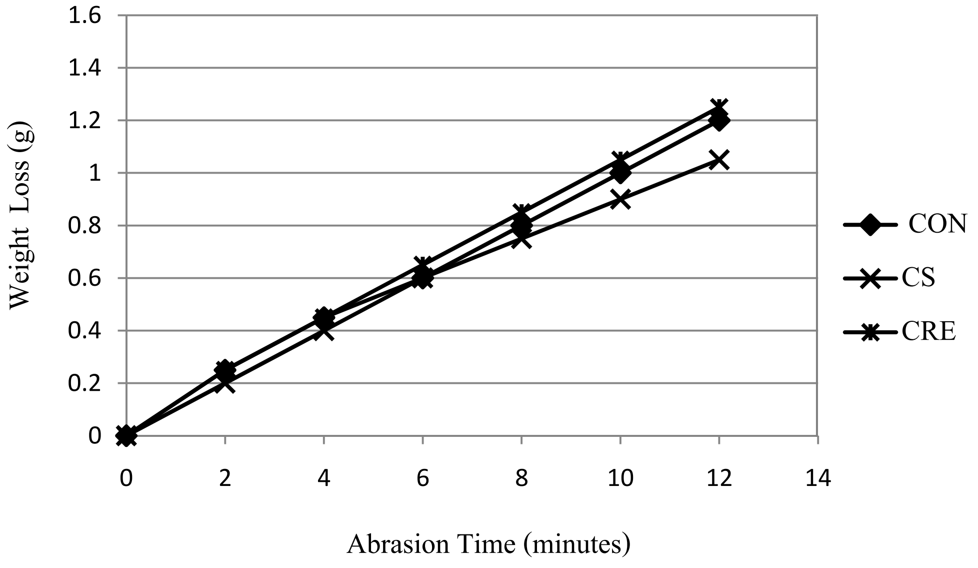
ตารางที่ 4.6 การสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต

Age	Cumulative Weight Loss (g)								
(days)	CON	CS	CS20	CS35	CS50	CRE	CRE20	CRE35	CRE50
28	1.20	1.05	1.05	1.05	1.10	1.25	1.35	1.40	1.40
90	1.15	1.10	1.15	1.25	1.25	1.25	1.00	1.05	1.25

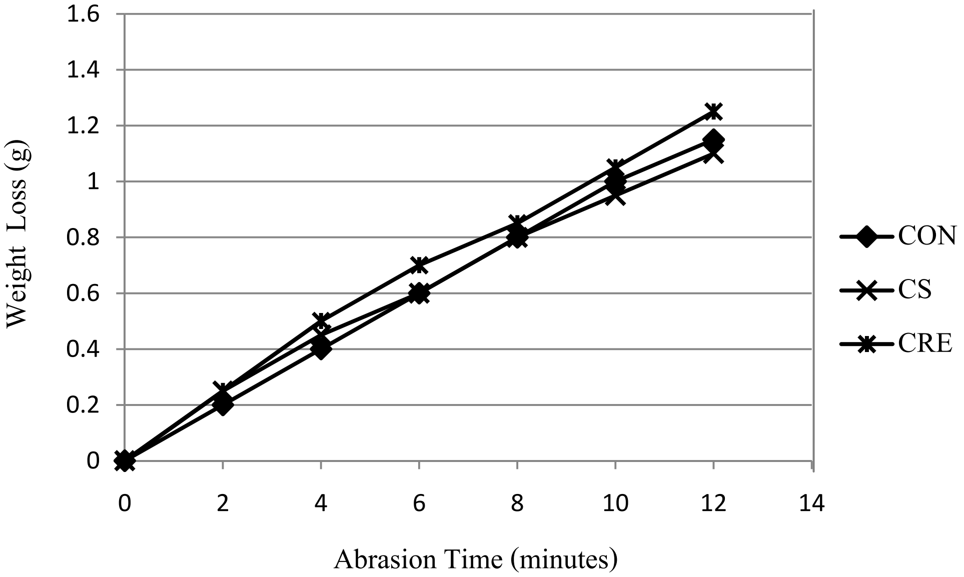
4.5.1 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต

รูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีกับเวลาของคอนกรีต CS และคอนกรีต CRE เปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม พบว่าคอนกรีต CS และคอนกรีต CRE ที่อายุ 28 วัน มีค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีเท่ากับ 1.05 และ 1.25 กรัม ตามลำดับ

และที่อายุ 90 วัน มีค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีเท่ากับ 1.10 และ 1.25 กรัม ตามลำดับ สังเกตได้ว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีที่อายุทดสอบ 28 และ 90 วัน มีทิศทางเดียวกันคือคอนกรีต CS มีค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีน้อยกว่าคอนกรีต CRE เพียงเล็กน้อย โดยที่คอนกรีต CRE เป็นคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตในปริมาณที่มากกว่าคอนกรีต CS คือใช้เศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ ซึ่งผลที่ได้คือคอนกรีต CRE มีค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีมากกว่าคอนกรีต CS ซึ่งสอดคล้องกับ Malesev และคณะ (2010) ที่พบว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีขึ้นอยู่กับปริมาณของมวลรวมจากเศษคอนกรีต โดยคอนกรีตจะมีค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีมากขึ้นเมื่อมีปริมาณมวลรวมจากเศษคอนกรีตมากขึ้นเนื่องจากปริมาณที่เพิ่มขึ้นของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวสามารถถูกขัดสีออกได้ง่ายกว่าอนุภาคของมวลรวมจากธรรมชาติ แต่ขณะเดียวกันพบว่าคอนกรีต CS มีค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีที่อายุ 28 และ 90 วัน น้อยกว่าคอนกรีตควบคุมทั้งที่มีปริมาณของมวลรวมจากเศษคอนกรีตมากกว่าคอนกรีตควบคุมคือใช้เศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมหยาบที่เป็นหินปูนย่อยในขณะที่คอนกรีตควบคุมไม่ได้ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตเลย ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยของ Malesev และคณะ (2010) เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบเป็นไปได้ว่ามวลรวมจากเศษคอนกรีตที่นำมาใช้แทนที่หินปูนย่อยในคอนกรีต CS ได้มาจากก้อนคอนกรีตทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งส่วนใหญ่เป็นคอนกรีตกำลังสูงส่งผลให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีของคอนกรีต CS ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม



รูปที่ 4.10 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีกับเวลาของคอนกรีต CS และคอนกรีต CRE ที่อายุ 28 วัน

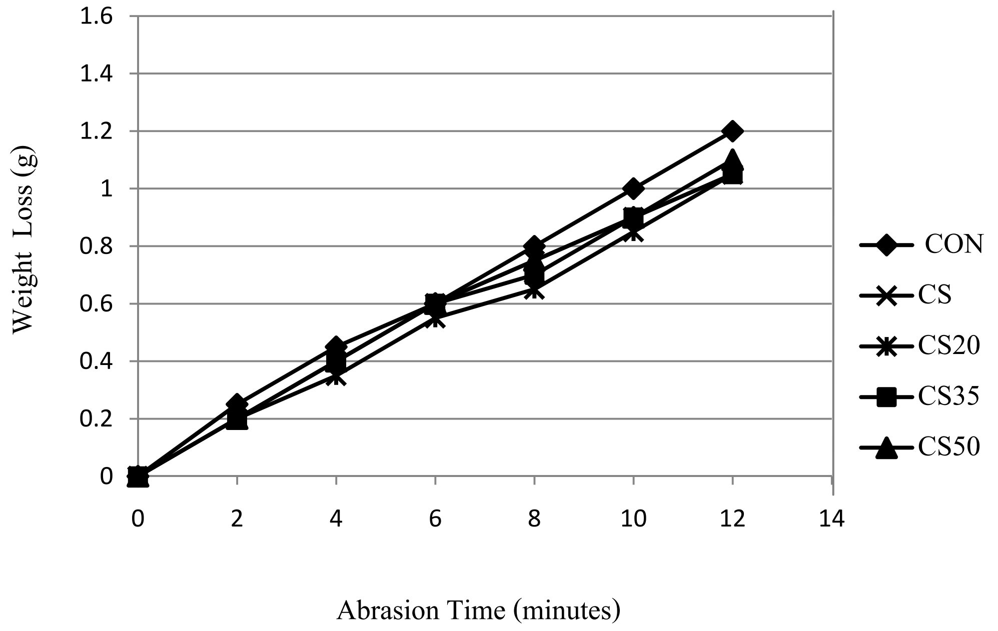


รูปที่ 4.11 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีกับเวลาของคอนกรีต CS และคอนกรีต CRE ที่อายุ 90 วัน

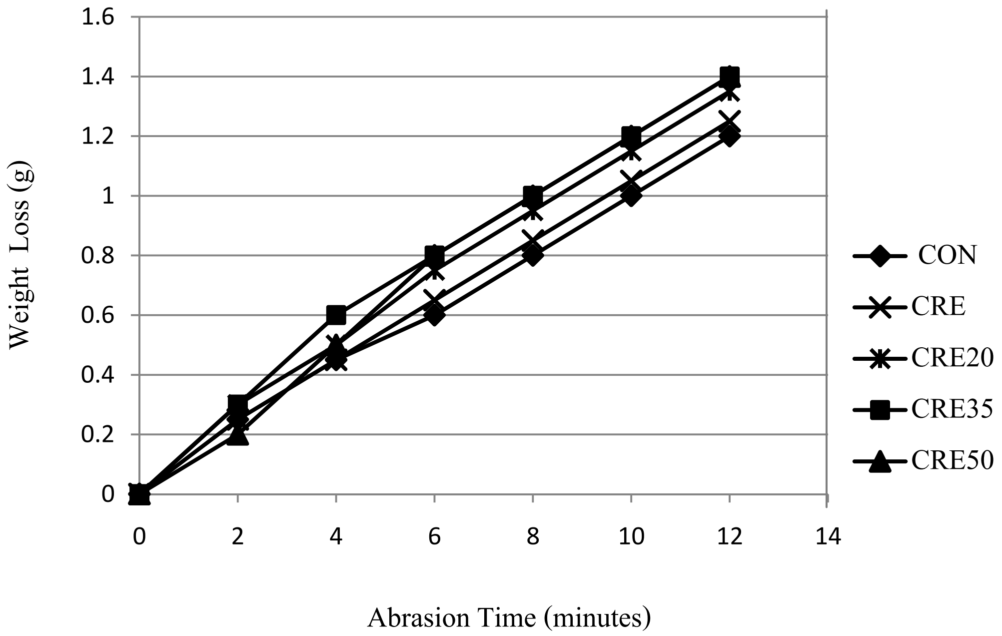
4.5.2 ผลกระทบจากการใช้เถ้าถ่านหินต่อการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต

รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีกับเวลาของกลุ่มคอนกรีต CS เปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน พบว่าคอนกรีต CS20, CS35 และ CS50 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีดังแสดงในตารางที่ 4.6 เท่ากับ 1.05, 1.05 และ 1.10 กรัม ตามลำดับ ทุกส่วนผสมมีค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม แต่มีค่าเท่ากับคอนกรีต CS ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ยกเว้นคอนกรีต CS50 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีมากกว่าคอนกรีต CS เท่ากับ 0.05 กรัม ส่วนรูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีกับเวลาของกลุ่มคอนกรีต CRE เปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน พบว่าคอนกรีต CRE20, CRE35 และ CRE50 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีเท่ากับ 1.35, 1.40 และ 1.40 กรัม ตามลำดับ ทุกส่วนผสมมีค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีมากกว่าคอนกรีตควบคุมและมากกว่าคอนกรีต CRE ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวโดยมีค่ามากกว่าเล็กน้อย สังเกตได้ว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีที่อายุ 28 วัน ของกลุ่มคอนกรีต CS และกลุ่มคอนกรีต CRE มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย แสดงว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละที่มากขึ้นในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตไม่ส่งผลกระทบต่อค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีของ

คอนกรีตขณะที่ Chisholm (2011) ได้ศึกษาวิจัยพบว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีของคอนกรีตมีอิทธิพลมาจาก กำลังอัด อัตราส่วนผสม การตกแต่งผิวคอนกรีต และการบ่มคอนกรีต

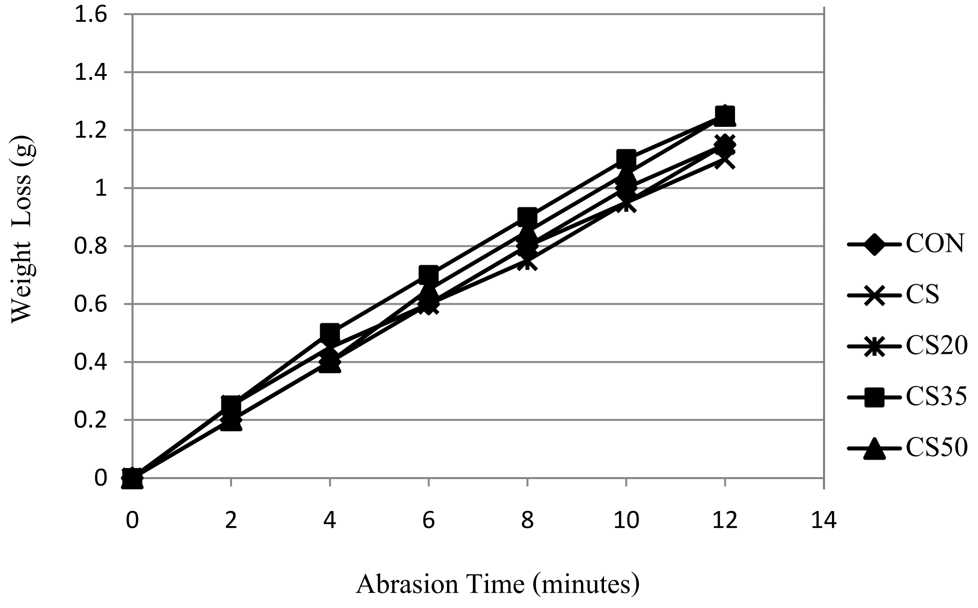


รูปที่ 4.12 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีกับเวลาในกลุ่มคอนกรีต CS ที่อายุ 28 วัน

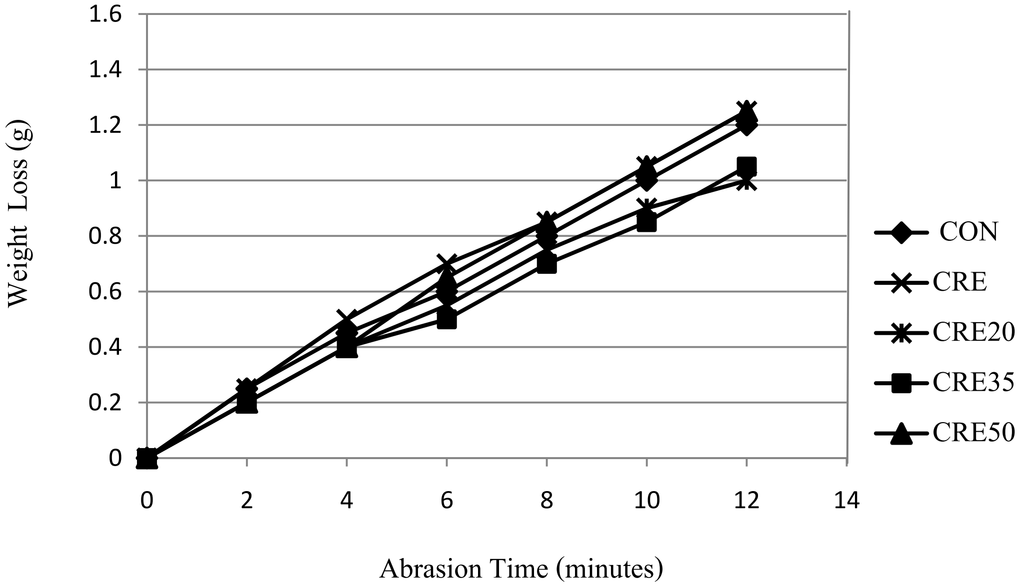


รูปที่ 4.13 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีกับเวลาในกลุ่มคอนกรีต CRE ที่อายุ 28 วัน

รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีกับเวลาของกลุ่มคอนกรีต CS เปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่อายุ 90วัน พบว่าคอนกรีต CS20, CS35 และ CS50 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีเท่ากับ 1.15, 1.25 และ 1.25 กรัม ตามลำดับ โดยที่คอนกรีต CS20 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีเท่ากับคอนกรีตควบคุม ส่วนคอนกรีต CS35 และ CS50 มีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุมเท่ากับ 0.10 กรัม และคอนกรีต CS20, CS35 และ CS50 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีมากกว่าคอนกรีต CS ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ส่วนรูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีกับเวลาของกลุ่มคอนกรีต CRE เปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่อายุ 90วัน พบว่าคอนกรีต CRE20, CRE35 และ CRE50 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีเท่ากับ 1.00, 1.05 และ 1.25 กรัม ตามลำดับ คอนกรีต CRE20 และ CRE35 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีน้อยกว่าคอนกรีต CRE ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวโดยมีค่าน้อยกว่าเล็กน้อยแต่คอนกรีต CRE50 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีเท่ากับคอนกรีต CRE เมื่อพิจารณาค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีที่อายุ 90 วัน ของกลุ่มคอนกรีต CS และกลุ่มคอนกรีต CRE มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยเช่นเดียวกับที่อายุ 28 วัน เห็นได้ว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเถ้าถ่านหินในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต สอดคล้องกับ Tarun และคณะ (2002) ที่กล่าวว่าการผสมเถ้าถ่านหินในคอนกรีตถึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานไม่ได้มีอิทธิพลต่อค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเนื่องจากการขัดสีของคอนกรีตและจะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อมีการผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 50



รูปที่ 4.14 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีกับเวลาในกลุ่มคอนกรีต CS ที่อายุ 90 วัน



รูปที่ 4.15 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการขัดสีกับเวลาในกลุ่มคอนกรีต CRE ที่อายุ 90 วัน

4.6 การแทรกซึมของอิออนคลอไรด์

ผลการทดสอบการแทรกซึมของอิออนคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM C1202 (2001) กับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตและปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทำการวัดค่าประจุสะสมในหน่วยของคูลอมบ์ที่เคลื่อนที่ผ่านก้อนคอนกรีตทุก 30 นาที ติดต่อกัน 6 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมผลแสดงในตารางที่ 4.7

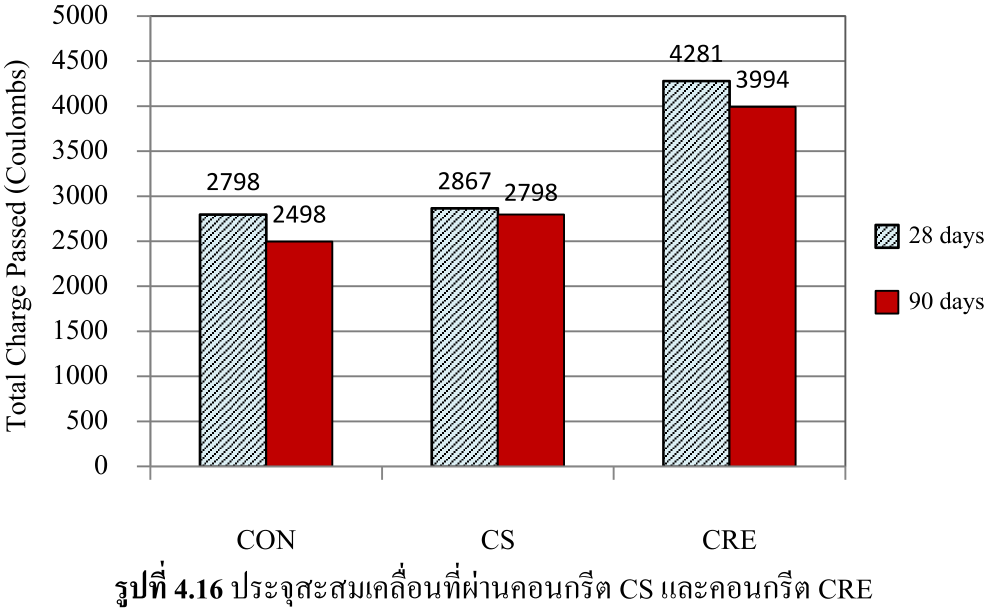
ตารางที่ 4.7 จำนวนประจุสะสมเคลื่อนที่ผ่านก้อนคอนกรีต

Mixes	Total Charge Passed (Coulombs)	
	28 days	90 days
CON	2798 (100)	2498 (100)
CS	2867 (102)	2798 (112)
CS20	1412 (50)	870 (35)
CS35	994 (36)	515 (21)
CS50	579 (21)	310 (12)
CRE	4281 (153)	3994 (160)
CRE20	1453 (52)	729 (29)
CRE35	999 (36)	491 (20)
CRE50	588 (21)	305 (12)

หมายเหตุ : ตัวเลขในวงเล็บเป็นค่าประจุสะสมเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตร้อยละของคอนกรีตควบคุม

4.6.1 การแทรกซึมของอิออนคลอไรด์ผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต

รูปที่ 4.16 แสดงจำนวนประจุสะสมเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีต CS และคอนกรีต CRE เปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม พบว่าที่อายุ 28 วัน จำนวนประจุสะสมเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีต CS มีค่าเท่ากับ 2867 คูลอมบ์ ลดลงเป็น 2798 คูลอมบ์ เมื่อคอนกรีตมีอายุ 90 วัน โดยมีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอายุการทดสอบและคอนกรีต CRE ที่อายุ 28 วัน จำนวนประจุสะสมเคลื่อนที่ผ่านมีค่าเท่ากับ 4281 คูลอมบ์ ลดลงเป็น 3994 คูลอมบ์ เมื่อคอนกรีตมีอายุ 90 วัน โดยมีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุมและคอนกรีต CS ทุกอายุการทดสอบ สังเกตได้ว่าคอนกรีต CRE ซึ่งเป็นคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตแทนที่ทรายแม่น้ำและหินปูนย่อยทำให้มีปริมาณของเศษคอนกรีตมากกว่าคอนกรีต CS และจากซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าร์ที่ยึดเกาะผิวของมวลรวมจากเศษคอนกรีตเดิมมีมากกว่าและมีความพรุน มีช่องว่างระหว่างมวลรวมที่มากกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ ส่งผลให้มีค่าประจุสะสมเคลื่อนที่ผ่านมีค่ามากกว่าคอนกรีต CS และคอนกรีต CS มีค่าประจุสะสมเคลื่อนที่ผ่านมากกว่าคอนกรีตควบคุม สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kou และคณะ (2007) พบว่าการเพิ่มปริมาณของมวลรวมจากเศษคอนกรีตจะทำให้ค่าการแทรกซึมของอิออนคลอไรด์เพิ่มขึ้นด้วย



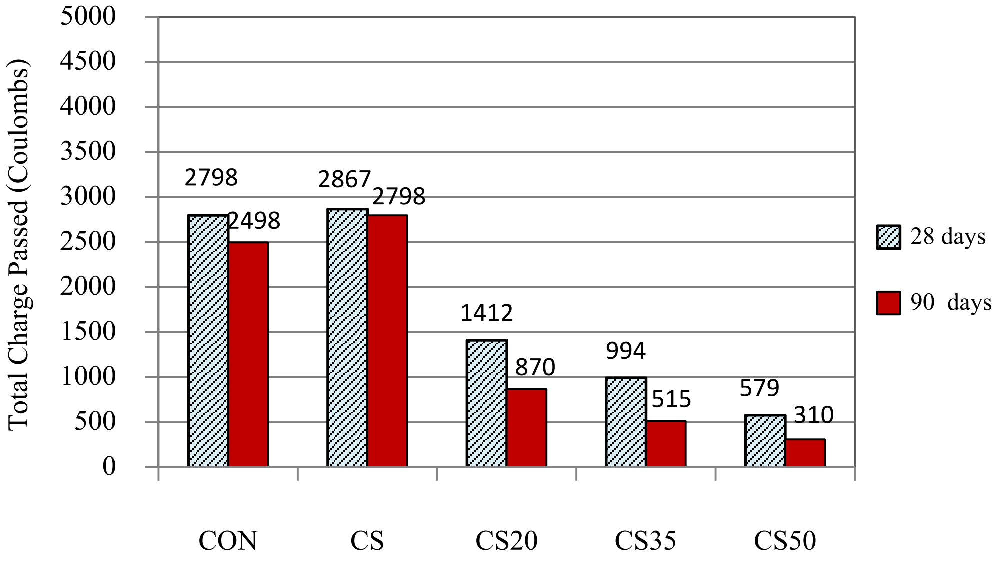
รูปที่ 4.16 ประจุสะสมเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีต CS และคอนกรีต CRE

4.6.2 ผลกระทบจากการใช้เถ้าถ่านหินต่อการแทรกซึมของอิออนคลอไรด์

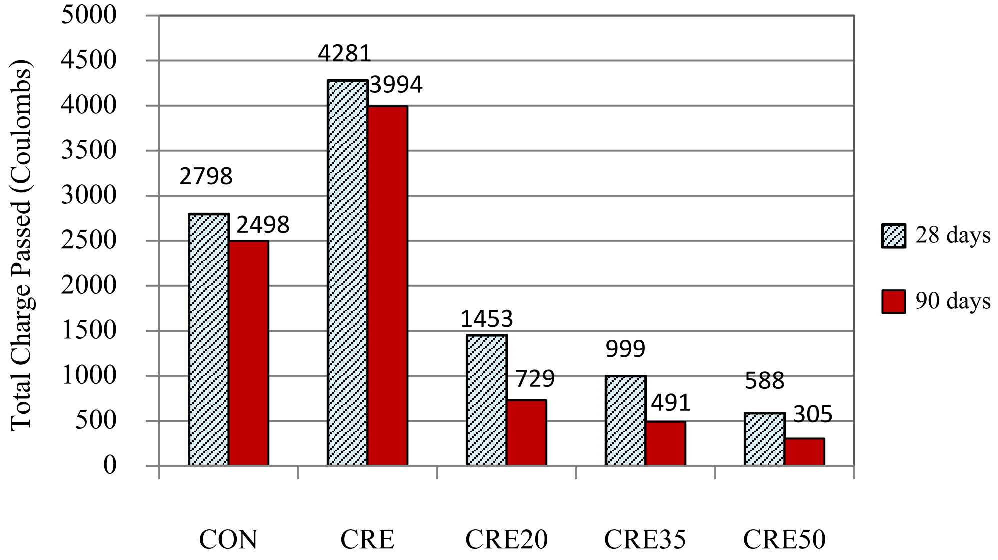
รูปที่ 4.17 แสดงค่าประจุสะสมเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำและมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตหรือกลุ่มคอนกรีต CS และใช้เถ้าถ่านหินแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20, 35 และ 50 พบว่าค่าประจุสะสมเคลื่อนที่ผ่านก้อนคอนกรีต CS20, CS35 และ CS50 ที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 1412, 994

และ 579 ตามลำดับ คอนกรีตทุกส่วนผสมมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมและน้อยกว่าคอนกรีต CS ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวและที่อายุ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 870, 515 และ 310 ตามลำดับ คอนกรีตทุกส่วนผสมมีค่าประจุสะสมเคลื่อนที่ผ่านก้อนคอนกรีตน้อยลงและน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมและคอนกรีต CS สังเกตได้ว่าค่าประจุสะสมเคลื่อนที่ผ่านก้อนคอนกรีตมีค่าลดลงตามร้อยละการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินที่มากขึ้น อันเป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหิน แสดงว่าเถ้าถ่านหินบดละเอียดสามารถเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างระหว่างมวลรวมส่งผลต่อความทึบของคอนกรีต สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kou และคณะ (2007) ที่พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้นมีผลกระทบต่อค่าการแทรกซึมของอิออนคลอไรด์ที่ลดลง

รูปที่ 4.18 แสดงค่าประจุสะสมเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตหรือกลุ่มคอนกรีต CRE และใช้เถ้าถ่านหินแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20, 35 และ 50 พบว่าค่าประจุสะสมเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีต CRE20, CRE35 และ CRE50 ที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 1453, 999 และ 588 ตามลำดับ คอนกรีตทุกส่วนผสมมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมและน้อยกว่าคอนกรีต CRE ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวและที่อายุ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 729, 491 และ 305 ตามลำดับ คอนกรีตทุกส่วนผสมมีค่าประจุสะสมเคลื่อนที่ผ่านก้อนคอนกรีตลดลงและมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมและคอนกรีต CRE สังเกตได้ว่าค่าประจุสะสมเคลื่อนที่ผ่านก้อนคอนกรีตมีค่าลดลงตามร้อยละการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มากขึ้น แสดงว่าเถ้าถ่านหินบดละเอียดสามารถแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างมวลรวมส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นมากขึ้นและผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหินทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรงมากขึ้น



รูปที่ 4.17 ประจุสะสมเคลื่อนที่ผ่านกลุ่มคอนกรีต CS



รูปที่ 4.18 ประจุสะสมเคลื่อนที่ผ่านกลุ่มคอนกรีต CRE

4.7 การหดตัวแบบแห้ง

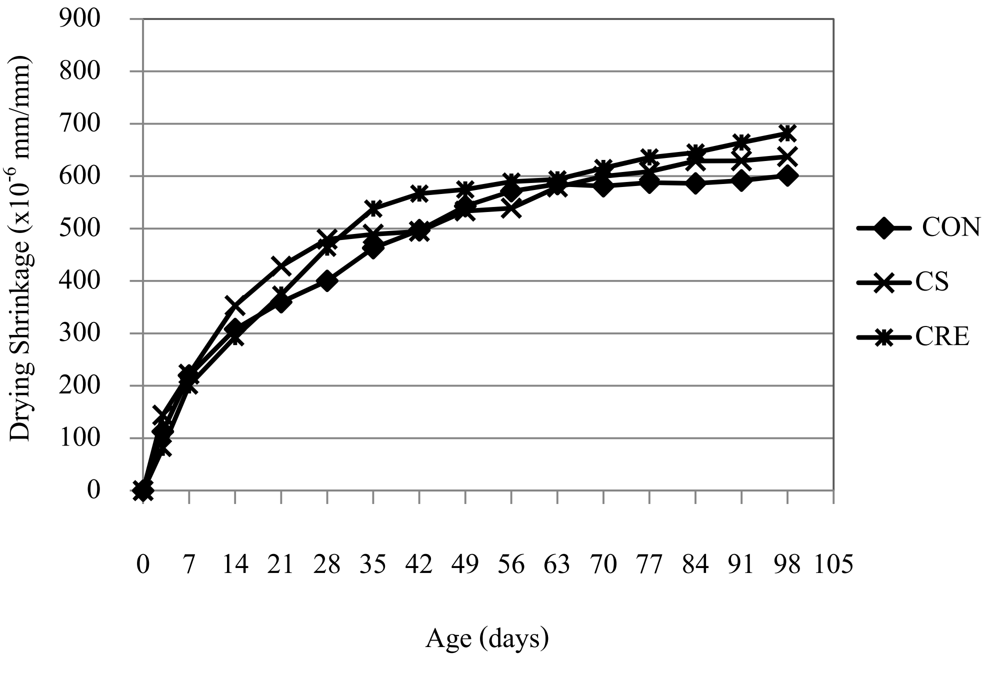
การทดสอบการหดตัวแบบแห้งกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานที่อายุคอนกรีต 3, 7, 14, 21, 28 และทุกๆ 7 วัน จนมีอายุครบ 98 วัน โดยทำการวัดความยาวของแท่งคอนกรีตเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต

Mixes	Drying Shrinkage ($\times 10^{-6}$ mm/mm)									
	3 days	7 days	14 days	21 days	28 days	42 days	56 days	70 days	84 days	98 days
CON	113	220	308	360	400	497	571	581	586	601
CS	147	268	380	477	486	524	574	610	644	652
CS20	144	222	353	428	480	494	539	599	629	637
CS35	177	240	357	417	488	507	564	602	633	628
CS50	171	221	355	360	459	457	506	542	565	576
CRE	138	250	345	491	542	689	745	747	783	823
CRE20	140	239	380	501	599	672	737	738	778	801
CRE35	125	236	323	467	578	697	713	717	744	771
CRE50	112	220	316	423	524	630	668	677	706	738

4.7.1 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต

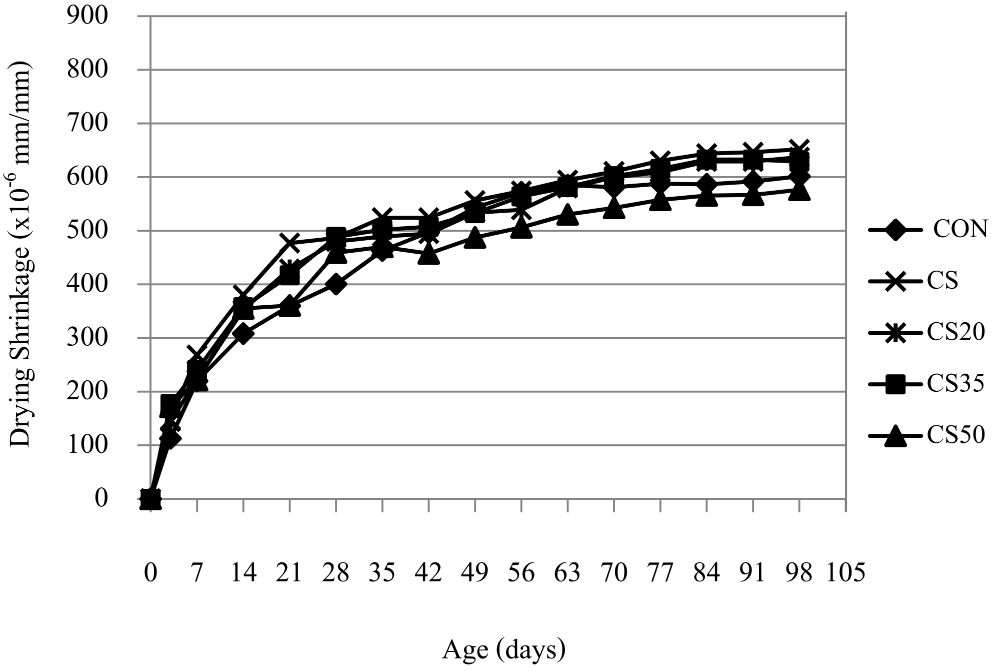
รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับเวลาของคอนกรีต CS และคอนกรีต CRE เปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม พบว่าในช่วงแรกคอนกรีต CRE มีค่าการหดตัวแบบแห้งต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมแต่คอนกรีต CS มีค่าการหดตัวสูงกว่าคอนกรีตควบคุม ค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต CS และคอนกรีต CRE จะมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุมด้วยกันทั้งคู่เมื่อคอนกรีตมีอายุ 21 วัน โดยที่คอนกรีต CS มีค่าการหดตัวแบบแห้งสูงกว่าคอนกรีต CRE และการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต CS กับคอนกรีต CRE จะมีค่าการหดตัวใกล้เคียงกันที่อายุ 28 วัน จากนั้นคอนกรีต CRE จะมีค่าการหดตัวแบบแห้งสูงที่สุดเมื่ออายุของคอนกรีตมากกว่า 28 วัน ไปจนถึง 98 วัน ซึ่งสอดคล้องกับ Chisholm (2011) ที่กล่าวว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตมีความต้องการน้ำในส่วนผสมมากกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติซึ่งส่งผลต่อค่าการหดตัวแบบแห้งที่มากขึ้นและมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีมอร์ต้าร์เกาะติดกับมวลรวมเดิมจะไม่มีคุณสมบัติช่วยยับยั้งการหดตัวได้ดีเท่ามวลรวมจากธรรมชาติ นอกจากนี้การใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตแทนที่หินปูนย่อยทั้งหมดจะมีการหดตัวแบบแห้งสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติร้อยละ 20 ถึง 50



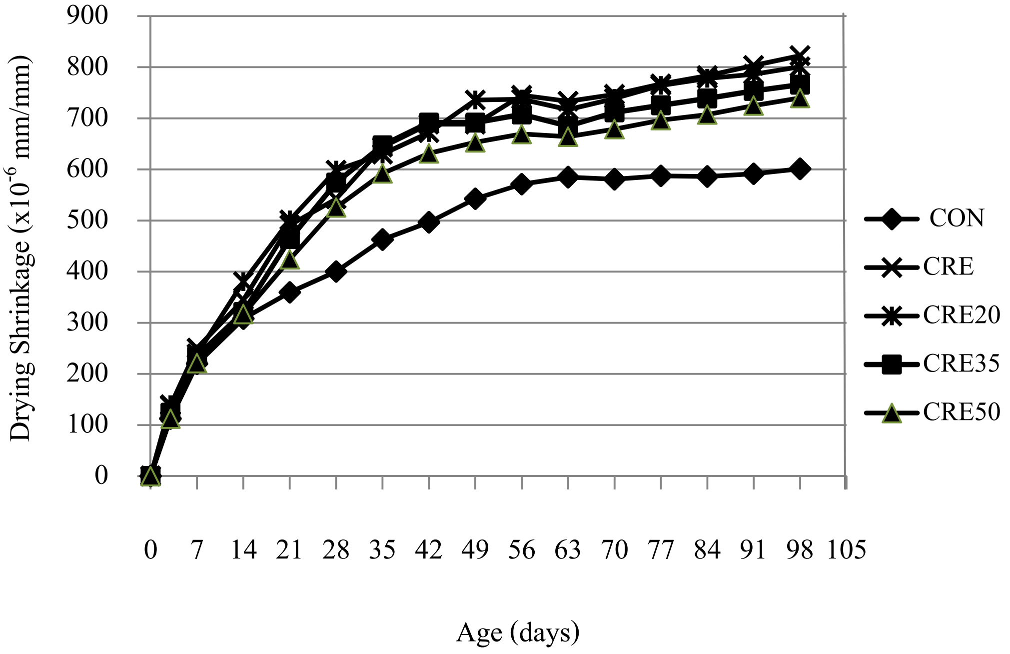
รูปที่ 4.19 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต CS และคอนกรีต CRE ที่อายุทดสอบต่างๆ

4.7.2 ผลกระทบของเถ้าถ่านหินต่อการหดตัวแบบแห้ง

รูปที่ 4.20 และ 4.21 เห็นได้ว่าทุกส่วนผสมเมื่ออายุของคอนกรีตมากขึ้นจะมีการหดตัวแบบแห้งเพิ่มมากขึ้นแต่จะเพิ่มขึ้นในอัตราที่น้อยลงเมื่อคอนกรีตมีอายุมากกว่า 28 วัน โดยมีค่าการหดตัวแบบแห้งที่อายุ 98 วัน อยู่ระหว่าง 576×10^{-6} มม./มม. ถึง 823×10^{-6} มม./มม. โดยกลุ่มคอนกรีต CS มีค่าการหดตัวแบบแห้งเพิ่มมากขึ้นใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุมโดยมีค่าการหดตัวแบบแห้งมากกว่าคอนกรีตควบคุมเล็กน้อย ค่าการหดตัวแบบแห้งมากที่สุดคือคอนกรีต CS มีค่าการหดตัวสูงสุดเท่ากับ 652×10^{-6} มม./มม. ส่วนคอนกรีต CS50 มีค่าการหดตัวแบบแห้งน้อยสุดเท่ากับ 576×10^{-6} มม./มม. และน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 98 วัน ส่วนกลุ่มคอนกรีต CRE มีค่าการหดตัวแบบแห้งไปในทิศทางเดียวกันกับกลุ่มคอนกรีต CS แต่มีค่าการหดตัวแบบแห้งมากกว่าคอนกรีตควบคุมทุกส่วนผสม โดยคอนกรีต CRE มีค่าการหดตัวสูงสุดเท่ากับ 823×10^{-6} มม./มม. และคอนกรีต CRE50 มีค่าการหดตัวน้อยสุดเท่ากับ 738×10^{-6} มม./มม. ที่อายุ 98 วันซึ่งสอดคล้องกับ Kou และคณะ (2007) ได้กล่าวไว้ว่าการเพิ่มปริมาณของมวลรวมจากเศษคอนกรีตจะทำให้ค่าการหดตัวแบบแห้งมีค่ามากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตสามารถลดค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตได้



รูปที่ 4.20 การหดตัวแบบแห้งของกลุ่มคอนกรีต CS ที่อายุทดสอบต่างๆ



รูปที่ 4.21 การหดตัวแบบแห้งของกลุ่มคอนกรีต CRE ที่อายุทดสอบต่างๆ