ผลกระทบจากการใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดต่อกำลังอัดและความทนทานของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต

Effects of Ground Fly Ash on Compressive Strength and Durability of Recycled Aggregate Concretes

ปกป้อง รัตนชู วศ.ม. (Pokpong Rattanachu, M.Eng.)[1]
กฤษฎา เปรมฤทัย วศ.ม. (Krisada Premruethai, M.Eng.)[2]
วีรชาติ ตั้งจิรภัทร ปร.ด.(Weerachart Tangchirapat, Ph.D.)[3]
ชัย จาตุรพิทักษ์กุล ปร.ด. (Chai Jaturapitakkul, Ph.D.)[4]

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งศึกษาการนำเถ้าถ่านหินซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต โดยหล่อคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.48 ควบคุมค่าการยุบตัวให้อยู่ระหว่าง 5 ถึง 10 ซม. ใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานจากนั้นแบ่งคอนกรีตออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 คือคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ กลุ่มที่ 2 คือคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำและมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต และกลุ่มที่ 3 คือ คอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีต ทำการทดสอบกำลังอัด ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต การแทรกซึมของอิออนคลอไรด์ และการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

ผลการทดสอบ พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน สามารถช่วยพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตให้สูงขึ้น โดยเฉพาะคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตสามารถพัฒนากำลังอัดให้มีค่าเทียบเท่าคอนกรีตควบคุมได้ที่อายุ 28 วัน เถ้าถ่านหินบดละเอียดสามารถช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตให้มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดประมาณ 2 เท่า และต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตควบคุมประมาณ 1.5 เท่า นอกจากนี้การใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดเป็นวัสดุประสานส่งผลให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมของอิออนคลอไรด์ดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ผลทดลองยังได้แนะนำอัตราส่วนเถ้าถ่านหินบดละเอียดที่เหมาะสมที่ให้คุณสมบัติที่ดีทั้งด้านกำลังอัด การทึบน้ำ และความต้านทานการแทรกซึมของอิออนคลอไรด์ของคอนกรีต คือ ร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่วนการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าถ่านหินบดละเอียดที่เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : เถ้าถ่านหิน มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต กำลังอัด สัมประสิทธิ์การซึมของน้ำ การแทรกซึมของอิออนคลอไรด์

[1] อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

[2] นักศึกษาโครงการเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

[3] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

[4] ศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

Abstract

This research aimed to utilize a fly ash leftover from the power plant at the Electricity Generating Authority of Thailand, Mae Moh district, Lampang Province, as a pozzolanic material in recycled aggregated concrete in order to improve its quality and durability. Watering binder ratio of all concretes was kept constantly at 0.48 and the slump of concrete was controlled between 5 and 10 cm. Ground fly ash was used partially to replace cement at 20%, 35% and 50% by weight of binder. The concrete samples were casted and divided into 3 groups (1) concrete was made from natural aggregates, (2) concrete was made from river sand and coarse recycled aggregates and (3) concrete was made from both fine and coarse recycled aggregates. Compressive strength, water permeable co-efficiency, chloride ions penetration and hydrating for shrinkage of recycled aggregate for concrete were examined.

The results revealed that the use of ground fly ash could be partially replaced cement that can improve compressive quality of recycled aggregate for concrete. Within 28 days, the recycled coarse aggregate for concrete with ground fly ash would be enhanced the compressive strength of concrete to remain as that of the control concrete. The use of ground fly ash had reduced water permeability of recycled aggregate for concrete , and it was approximately 2 times lower than that of recycled aggregation of concrete without ground fly ash and approximately 1.5 times lower than that of conventional concrete. In addition, the use of ground fly ash had improved the penetration of chloride ions resistance of recycled aggregate for concrete. The research demonstrated that the appropriate replacement of ground fly ash in order to obtain the most appropriate compressive strength, low water permeability, and high chloride ions resistance of recycled aggregate for concrete was 35% by the weight of binder. Moreover, the hydrating for shrinkage of recycled aggregate for concrete had been decreased with the increasing of the replacement of ground fly ash.

Keywords : Fly Ash, Recycled Aggregate, Compressive Strength, Water Permeability, Chloride Ion Penetration

บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตในปัจจุบันที่มีอยู่เป็นจำนวนมากโดยส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างที่ก่อสร้างมาเป็นเวลานานหลายปี ส่งผลให้โครงสร้างต่างๆเหล่านี้เสื่อมสภาพไปตามกาลเวลาจึงจำเป็นต้องมีการรื้อถอนและก่อสร้างทดแทนขึ้นมาใหม่ นอกจากนี้โครงสร้างในบางพื้นที่เกิดความเสียหายเนื่องจากภัยพิบัติทางธรรมชาติที่เกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้เกิดขยะจากโครงสร้างคอนกรีตเป็นจำนวนมาก สิ่งที่ตามมาคือพื้นที่ในการจัดเก็บมีจำนวนจำกัดเมื่อเทียบกับปริมาณซากคอนกรีตที่มีอยู่ ซากคอนกรีตบางส่วนได้นำไปใช้ในการถมที่ และมีอีกจำนวนมากถูกปล่อยทิ้งไว้โดยเปล่าประโยชน์ ซึ่งส่งผลเสียด้านทัศนียภาพอีกด้วย

ปัจจุบันได้มีการนำเศษคอนกรีตเก่ากลับมาใช้เป็นมวลรวมในส่วนผสมของงานคอนกรีต ซึ่งเป็นช่องทางที่สามารถช่วยลดปัญหาเรื่องสถานที่จัดทิ้ง อีกทั้งเป็นการอนุรักษ์แหล่งมวลรวมจากธรรมชาติ แต่ปัญหาที่พบ คือ มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีคุณสมบัติบางประการที่ด้อยกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ เช่น มีค่าความถ่วงจำเพาะและความต้านทานการสึกกร่อนต่ำ รวมถึงมีค่าการดูดซึมน้ำที่สูง (Hansen& Narud, 1983; Chen, et al., 2003) ส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้มวลรวม

จากเศษการย่อยคอนกรีต เช่น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตลดลง (ปกป้อง รัตนชู และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551) ค่ากำลังอัดของคอนกรีตลดลง (สุรศักดิ์ ภู่สันติพงษ์ และคณะ, 2547; Ravindrarajah & Tam, 1985; Etxeberria, et al., 2007) คอนกรีตมีความพรุนสูง ส่งผลให้ความทนทานของคอนกรีตลดลง (Adnan, et al., 2008) ด้วยเหตุนี้จึงมีการวิจัยเพื่อที่จะนำวัสดุปอซโซลานมาใช้ในการปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตให้ดีขึ้น

เถ้าถ่านหินเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตไฟฟ้า จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานสามารถช่วยพัฒนากำลังอัดและลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตได้(Homwuttiwong, 2006) และการใช้เถ้าถ่านหินสามารถช่วยป้องกันปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าในคอนกรีตได้ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน ขณะที่ผลกระทบของการเพิ่มกำลังอัดที่มีต่อการต้านทานคลอไรด์มีอิทธิพลน้อยกว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในส่วนผสม (Thomas & Matthews, 2004)จะเห็นได้ว่าเถ้าถ่านหินสามารถช่วยพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้นได้หากนำเถ้าถ่านหินมาใช้ในงานคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตเก่า อาจจะสามารถช่วยลดผลกระทบที่เกิดขึ้นจากมวลรวมจากเศษคอนกรีตได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำเถ้าถ่านหินมาทำการปรับปรุงคุณภาพโดยการบด จากนั้นนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพื่อปรับปรุงกำลังอัด การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต การแทรกซึมของอิออนคลอไรด์ และการหดตัวแบบแห้ง ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษากำลังอัด ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำ การแทรกซึมของอิออนคลอไรด์ และการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมร่วมกับเถ้าถ่านหินบดละเอียด

วิธีการศึกษา

1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

1.2 เถ้าถ่านหิน

งานวิจัยนี้ใช้เถ้าถ่านหินจาก อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย มาทำการปรับปรุงคุณภาพโดยการบดจนมีปริมาณอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานที่มีช่องเปิดขนาด 45 ไมโครเมตร (เบอร์ 325) ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ พบว่าเถ้าถ่านหินมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์แต่มีขนาดของอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) เล็กกว่าปูนซีเมนต์ เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2 พบว่าเถ้าถ่านหินบดละเอียดมีองค์ประกอบทางเคมีของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมกันเท่ากับร้อยละ 76.2 มีปริมาณ SO_3 เท่ากับร้อยละ 0.6 และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on ignition) เท่ากับร้อยละ 0.7เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีแล้วจัดได้ว่าเป็นเถ้าถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C618 (2001)

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

วัสดุประสาน	ความถ่วงจำเพาะ	ร้อยละที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (ร้อยละ)	ขนาดกลางของอนุภาค, d_{50} (ไมโครเมตร)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	3.15	13.5	14.6
เถ้าถ่านหินบดละเอียด	2.72	1.2	7.7

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหินบดละเอียด
Silicon Dioxide (SiO_2)	20.9	41.9
Aluminium Oxide (Al_2O_3)	4.8	21.5
Ferric Oxide (Fe_2O_3)	3.4	12.8
Calcium Oxide (CaO)	65.4	14.0
Magnesium Oxide (MgO)	1.3	2.6
Sodium Oxide (Na_2O)	0.2	2.7
Potassium Oxide (K_2O)	0.4	2.6
Sulfur Trioxide (SO_3)	2.7	0.6
Loss On Ignition (LOI)	1.0	0.7
$SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$	-	76.2
Class	-	F

1.3 มวลรวมที่ได้จากธรรมชาติ

มวลรวมละเอียดที่ใช้ คือ ทรายแม่น้ำ ส่วนมวลรวมหยาบจากธรรมชาติใช้หินปูนย่อยขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 19 มม. โดยสมบัติต่างๆของมวลรวมแสดงไว้ในตารางที่ 3

1.4 มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต

มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้จากการนำก้อนคอนกรีตที่ผ่านการทดสอบกำลังอัดในห้องปฏิบัติการคอนกรีต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี มาทำการบดย่อยด้วยเครื่องย่อยคอนกรีตแบบค้อนเหวี่ยง (Swing hammer mills) จากนั้นร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 โดยเศษคอนกรีตที่ผ่านตะแกรง คือ มวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีต (Recycled fine aggregate, RFA) ส่วนเศษคอนกรีตที่ค้างบนตะแกรงและมีขนาดไม่เกิน 19 มม. คือ มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต (Recycled coarse aggregate, RCA)

ตารางที่ 3 แสดงสมบัติของมวลรวม พบว่า มวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าโมดูลัสความละเอียดและช่องว่างระหว่างมวลรวมสูงกว่ามวลรวมละเอียดจากธรรมชาติ มีค่าความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักต่ำกว่ามวลรวมละเอียดจากธรรมชาติ สำหรับค่าการดูดซึมน้ำ พบว่า มวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 11.91 สูงกว่ามวลรวมละเอียดจากธรรมชาติประมาณ 12 เท่า ส่วนมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าโมดูลัสความละเอียดและช่องว่างระหว่างมวลรวมสูงกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติ รวมถึงมีค่าความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักต่ำกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติเช่นเดียวกัน สำหรับค่าการดูดซึมน้ำพบว่ามวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 5.61 สูงกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติประมาณ 12 เท่า เนื่องมาจากความพรุนของซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าร์ที่ยึดเกาะที่ผิวมวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตส่งผลให้มีค่าดูดซึมน้ำสูงขึ้น (Katz, 2003)

ตารางที่ 3 สมบัติของมวลรวม

คุณสมบัติ	ทรายแม่น้ำ	หินปูนย่อย	RFA	RCA
โมดูลัสความละเอียด	3.04	6.79	3.55	6.40
ความถ่วงจำเพาะ	2.60	2.67	2.31	2.45
การดูดซึมน้ำ (%)	0.94	0.46	11.91	5.61
หน่วยน้ำหนัก (กก./ม^3)	1691	1602	1433	1357
ช่องว่างระหว่างมวลรวม (%)	34.33	39.41	35.88	41.40

2. การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

งานวิจัยนี้ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐาน ACI 211.1(2000) โดยควบคุมอัตราส่วนน้ำประสิทธิผลต่อวัสดุประสานที่ 0.48 ควบคุมค่าการยุบตัวให้อยู่ระหว่าง 5 ถึง 10 ซมทั้งนี้น้ำหนักของมวลรวมถูกกำหนดให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งขณะที่มวลรวมจากธรรมชาติและจากเศษคอนกรีตได้เตรียมให้อยู่ในสภาวะผิวแห้งในอากาศ จึงต้องมีการปรับปริมาณน้ำเนื่องจากความชื้นและการดูดซึมน้ำของมวลรวม ทำการหล่อคอนกรีตควบคุม (CON) โดยใช้มวลรวมจากธรรมชาติเป็นส่วนผสม และคอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดจากธรรมชาติร่วมกับมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต (RA) ใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (RA20, RA35 และ RA50) ส่วนคอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต (RB) ใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (RB20, RB35 และ RB50) เช่นเดียวกัน ซึ่งอัตราส่วนผสมคอนกรีตแสดงไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 อัตราส่วนผสมคอนกรีต

Mixes	Mix Proportion (kg/m^3)								W/B	Slump (mm)
	Cement	Fly Ash	Crushed Limestone	Sand	RFA	RCA	Mixing Water	Effective Water		
CON	380	-	1006	798	-	-	191	182	0.48	60
RA	380	-	-	798	-	900	214	182	0.48	70
RA20	304	76	-	794	-	896	214	182	0.48	70
RA35	247	133	-	792	-	893	214	182	0.48	80
RA50	190	190	-	790	-	891	214	182	0.48	85
RB	380	-	-	-	666	900	256	182	0.48	50
RB20	304	76	-	-	663	896	256	182	0.48	60
RB35	247	133	-	-	661	893	256	182	0.48	70
RB50	190	190	-	-	659	891	256	182	0.48	80

3. การทดสอบกำลังอัด

ใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 ซม สูง 20 ซม โดยทดสอบกำลังอัดที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 90 วัน

4. การทดสอบการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

เมื่อบ่มคอนกรีตได้ 28 และ 90 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตมาตัดด้วยเครื่องตัดคอนกรีตบริเวณกึ่งกลางให้มีความสูง 4 ซม. จากนั้นหล่ออีพ็อกซี่โดยรอบเส้นรอบวงของคอนกรีตทิ้งไว้ในร่ม 24 ชม จากนั้นนำไปเข้าเครื่องทดสอบโดยใช้ความดันของน้ำเท่ากับ 5 เมกะปาสคาล คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตโดยใช้สมการของ Darcy ดังแสดงในสมการที่ 1

$$K = \frac{\rho LgQ}{PA} \quad (1)$$

โดยที่ K คือค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต (ม/วินาที), ρ คือความหนาแน่นของน้ำ (กก/ม^3) g คือแรงโน้มถ่วงของโลก (ม/วินาที^{2}), Q คืออัตราการไหลของน้ำ (ม^3/วินาที), L คือความหนาของตัวอย่างคอนกรีต (ม), P คือ แรงดันน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต (นิวตัน/ม^2) และ A คือพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างคอนกรีต (ม^2)

5. การทดสอบการแทรกซึมของอิออนคลอไรด์

ทำการทดสอบการแทรกซึมของอิออนคลอไรด์เมื่อคอนกรีตมีอายุ 28 และ 90 วัน โดยนำก้อนคอนกรีตมาตัดด้วยเครื่องตัดคอนกรีตให้มีความสูง 5 ซม. เช็ดให้แห้งแล้วนำไปเคลือบผิวโดยรอบเส้นรอบวงของคอนกรีตด้วยซิลิโคนทิ้งให้ซิลิโคนแห้ง ทำการทดสอบความสามารถต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตแบบเร่งด้วยไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM C1202(2001) โดยทำการวัดค่าประจุสะสมในหน่วยของคูลอมบ์ที่เคลื่อนที่ผ่านก้อนคอนกรีตทุก 30 นาที ติดต่อกัน 6 ชั่วโมงคำนวณหาประจุไฟฟ้าสะสมที่เคลื่อนที่ผ่านก้อนตัวอย่างคอนกรีตได้จากสมการที่ 2

$$Q_x = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \ldots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (2)$$

โดยที่ Q_x คือ ประจุไฟฟ้าสะสมที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตเส้นผ่านศูนย์กลาง x มม (คูลอมบ์), I0 คือ กระแสไฟฟ้าที่เวลาเริ่มต้น (แอมแปร์), I คือกระแสไฟฟ้าที่เวลา t นาที นับเริ่มจากการทดสอบ (แอมแปร์)

ในงานวิจัยครั้งนี้ชิ้นตัวอย่างที่ทดสอบมีขนาดไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด (มาตรฐานใช้ตัวอย่างมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 95 มม) ดังนั้นต้องทำการปรับแก้ค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ 2 ด้วยสมการที่ 3

$$Q_S = Q_x \left(\frac{95}{x}\right)^2 \quad (3)$$

โดยที่ Q_s คือประจุสะสมที่เคลื่อนที่ผ่านชิ้นตัวอย่างทดสอบเส้นผ่านศูนย์กลาง 95 มม (คูลอมบ์), Q_x คือ ประจุสะสมที่เคลื่อนที่ผ่านชิ้นตัวอย่างทดสอบเส้นผ่านศูนย์กลาง X มม (คูลอมบ์), x คือ เส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นตัวอย่างทดสอบ (มม)

6. การทดสอบการหดตัวแบบแห้ง

ใช้แท่งตัวอย่างคอนกรีตขนาด 7.5 x 7.5 x 28.5 ซมถอดแบบหลังหล่อคอนกรีตเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นบ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำประปาเป็นเวลา 72 ชั่วโมงมนำขึ้นมาเช็ดให้แห้ง วัดความยาวเริ่มต้นด้วยอุปกรณ์วัดการหดตัวแบบแห้งแล้วนำตัวอย่างเข้าตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 23$\pm$2°C และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50$\pm$5 ทำการวัดการหดตัวแบบแห้งของตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 3, 7, 14, 21, 28 วัน และทุกๆ 7 วัน ติดต่อกันจนคอนกรีตมีอายุครบ 98 วัน คำนวณค่าการหดตัวแบบแห้งจากสมการที่ 4

$$L = \frac{(Li - Lx)}{Lg} \quad (4)$$

โดยที่ L คือ การหดตัวแบบแห้ง (x10^{-6} นิ้ว/นิ้ว), Lx คือค่าความยาวที่เวลาใดๆ, Li คือ ค่าความยาวที่อายุเริ่มต้น, Lg คือ ค่าระยะพิกัด (Gauge length)

ผลการทดสอบและอภิปรายผล

1. ผลการทดสอบกำลังอัด

ตารางที่ 5 แสดงค่ากำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตเมื่อเทียบกับคอนกรีต CON พบว่าคอนกรีต RAมีกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีต RB ทุกอายุการทดสอบ แต่กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตยังคงมีค่าที่ต่ำกว่าคอนกรีต CON ทุกอายุการทดสอบ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Poon, et al. (2004) ทั้งนี้เป็นผลมาจากมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีความพรุนสูงกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ ซึ่งเห็นได้จากค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าสูงกว่ามวลรวมจากธรรมชาติประมาณ 12 เท่า เนื่องมาจากความพรุนของซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าร์ที่ยึดเกาะที่ผิวมวลรวม ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นภายในก้อนคอนกรีตส่งผลให้กำลังอัดมีค่าลดลงสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hansen & Narud, (1983) และงานวิจัยของ Chen, et al. (2003) โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด

การแทนที่เถ้าถ่านหินบดละเอียดในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต ส่งผลให้ค่ากำลังอัดมีแนวโน้มที่ดีขึ้น การแทนที่เถ้าถ่านหินบดละเอียดในคอนกรีต RA ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าเทียบเคียงคอนกรีต CON โดยกำลังอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีต RA20, RA35 และ RA50 มีค่าเท่ากับ 440, 449 และ 434กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 99, 101 และ 98 ของคอนกรีต CON ตามลำดับ และที่อายุ 90 วันของคอนกรีต RB20, RB35 และ RB50 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 470, 493 และ 463 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 96, 101 และ 95 ของคอนกรีต CON ตามลำดับ การแทนที่เถ้าถ่านหินบดละเอียดในคอนกรีต RB ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าลดลงที่อายุ 7 วัน แต่เมื่ออายุคอนกรีตเพิ่มขึ้น กำลังอัดมีแนวโน้มดีขึ้นเช่นเดียวกัน โดยคอนกรีต RB35 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 376 และ 413 กก/ซม^2 หรือคิดเป็นร้อยละ 85 ของคอนกรีต CON จะเห็นได้ว่าอนุภาคของเถ้าถ่านหินที่บดละเอียดสามารถเข้าไปแทรกช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตส่งผลให้กำลังอัดมีค่าสูงขึ้น แต่การแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงส่งผลต่อกำลังที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น การพัฒนากำลังอัดจึงต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม

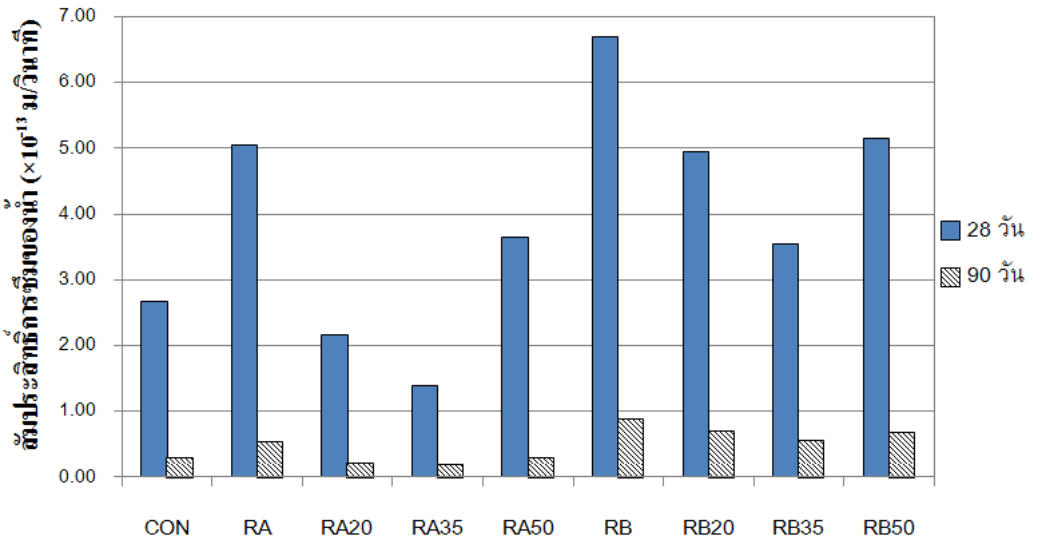
ตารางที่ 5 กำลังอัดและร้อยละของกำลังอัดของคอนกรีต

ตัวอย่างคอนกรีต	กำลังอัด (กก/ซม^2) -ร้อยละของกำลังอัด (%)		
	7 วัน	28 วัน	90 วัน
CON	342 - 100	443 - 100	488 - 100
RA	297 - 87	429 - 97	457 - 94
RA20	329 - 96	440 - 99	470 - 96
RA35	317 - 93	449 - 101	493 - 101
RA50	276 - 81	434 - 98	463 - 95
RB	249 - 73	336 - 76	371 - 76
RB20	232 - 68	347 - 78	377 - 77
RB35	242 - 71	376 - 85	413 - 85
RB50	202 - 59	332 - 75	384 - 79

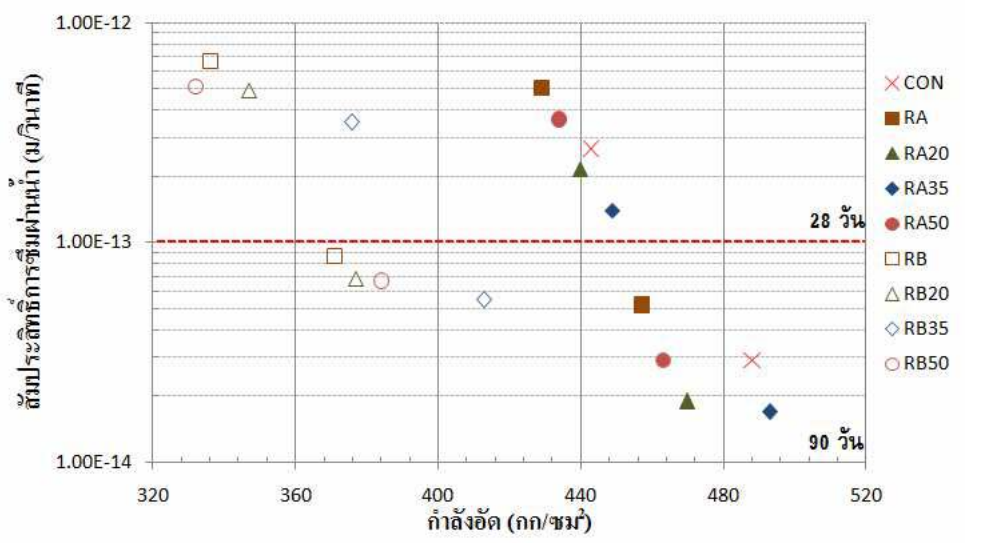
2. ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต

ภาพที่ 1 แสดงสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต พบว่า คอนกรีต CON มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำเท่ากับ $2.67x10^{-13}$ และ $0.29x10^{-13}$ ม/วินาที ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ คอนกรีต RAที่อายุเดียวกันมีค่าเท่ากับ $5.04x10^{-13}$ และ $0.52x10^{-13}$ ม/วินาที หรือคิดเป็นประมาณ 1.9 และ 1.8 เท่าของคอนกรีต CON ส่วนคอนกรีต RB ที่อายุเดียวกันมีค่าเท่ากับ $6.69x10^{-13}$ และ $0.87x10^{-13}$ ม/วินาที หรือคิดเป็นประมาณ 2.5 และ 3 เท่าของคอนกรีต CON เห็นได้ว่าการแทนที่มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้สัมประสิทธิ์การซึมของน้ำมีค่าสูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tangchirapat, et al. (2012) เนื่องจากมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีความพรุนสูงซึ่งเกิดจากมอร์ต้าร์ที่เกาะอยู่บริเวณผิวมวลรวม ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นภายในเนื้อคอนกรีต ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำสูงขึ้น การแทนที่เถ้าถ่านหินบดละเอียดสามารถช่วยทำให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดที่อายุ 28 และ 90 วัน เห็นได้ว่า RA20 และ RA35 มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำต่ำกว่าคอนกรีต CON ที่อายุ 28 และ 90 วัน

จากภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำและกำลังอัดของคอนกรีต ผู้วิจัยได้ทำเส้นประเพื่อแบ่งแยกให้เห็นถึงสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน พบว่า เถ้าถ่านหินบดละเอียดส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Somna, et al. (2012) เห็นได้ว่ากำลังอัดของ RB20, RB35 และ RB50 ที่อายุ 90 วัน แม้จะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีต CON ที่อายุ 28 วัน แต่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำต่ำกว่าประมาณ 4 ถึง 5 เท่า และมีค่าต่ำกว่าคอนกรีต RB ที่อายุ 90 วันประมาณ 2 เท่า เนื่องจากความละเอียดของเถ้าถ่านหินสามารถเข้าไปอุดช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตส่งผลให้คอนกรีตทึบน้ำเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อกำลังอัดคอนกรีตมีค่าสูง (470 ถึง 490 กก/ซม^2) คอนกรีต RB20 และ RB35 มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำลดลงต่ำกว่าคอนกรีต CON ประมาณ 1.5 เท่า และมีค่าต่ำกว่าคอนกรีต RB ประมาณ 2 เท่า อย่างไรก็ตามการแทนที่เถ้าถ่านหินบดละเอียดร้อยละ 35 ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีต คือ อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สามารถให้คุณสมบัติที่ดีทั้งด้านกำลังอัดและการทึบน้ำของคอนกรีต



ภาพที่ 1 สัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน

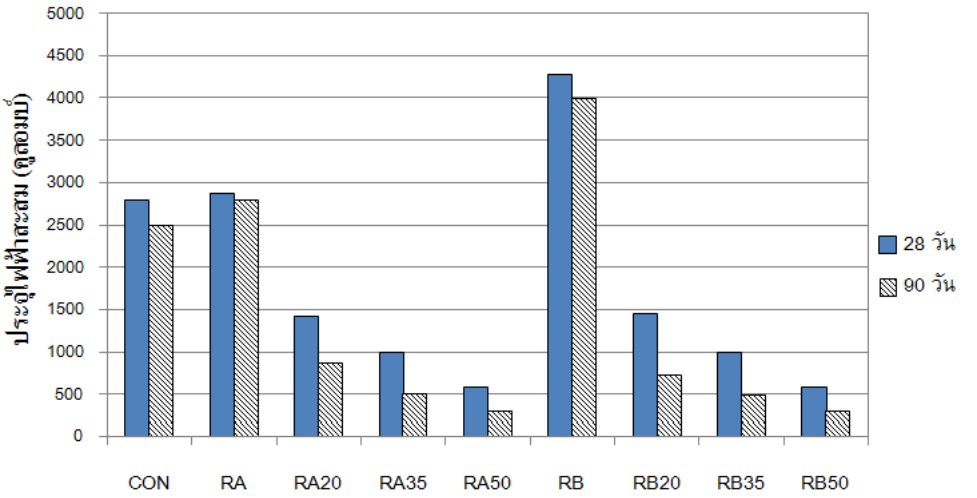


ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำและกำลังอัดของคอนกรีต

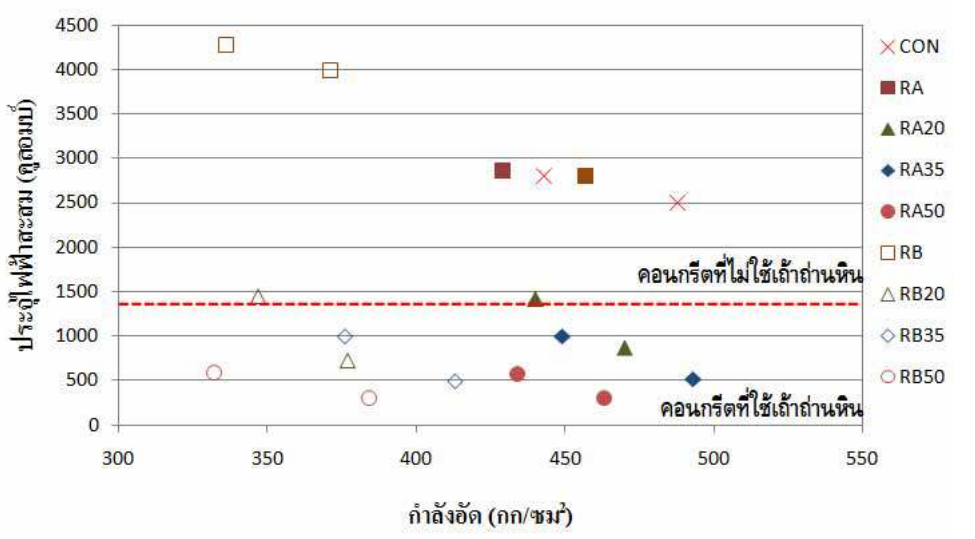
3. ผลการทดสอบการแทรกซึมของอิออนคลอไรด์

ภาพที่ 3 แสดงค่าปริมาณประจุไฟฟ้าสะสมเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีต พบว่าปริมาณประจุไฟฟ้าสะสมเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีต RAมีค่าเท่ากับ 2867 คูลอมบ์ ที่อายุ 28 วัน และลดลงเหลือ 2798 คูลอมบ์ ที่อายุ 90 วัน ซึ่งมีค่าปริมาณประจุไฟฟ้าสะสมมากกว่าคอนกรีต CON ที่อายุเท่ากัน เมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีต RBมีปริมาณประจุไฟฟ้าสะสมเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตเท่ากับ 4281 และ 3994 คูลอมบ์ ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าคอนกรีต CON และ RAอย่างเห็นได้ชัด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kou, et al. (2007) เนื่องจากมวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตมีซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าร์ยึดเกาะทำให้มีความพรุนสูงกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ การเพิ่มปริมาณมวลรวมดังกล่าวทำให้เกิดช่องว่างระหว่างมวลรวมขึ้นในก้อนคอนกรีต ส่งผลให้ปริมาณประจุไฟฟ้าสะสมเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีต RBมากขึ้น

จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณประจุไฟฟ้าสะสมเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตและกำลังอัดของคอนกรีต ดังภาพที่ 4 ผู้วิจัยได้ทำเส้นประเพื่อแบ่งแยกให้เห็นถึงปริมาณประจุไฟฟ้าสะสมเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้และไม่ใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียด พบว่าคอนกรีต RB20, RB35 และ RB50 มีค่ากำลังอัดต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต CON แต่สามารถต้านทานการแทรกซึมของอิออนคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีต CON อย่างเห็นได้ชัด และมีค่าปริมาณประจุไฟฟ้าสะสมใกล้เคียงกับคอนกรีต RA20, RA35 และ RA50 ถึงแม้จะมีค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าก็ตาม จะเห็นได้ว่าการใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดสามารถช่วยลดปริมาณประจุไฟฟ้าสะสมเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตให้ต่ำลงได้ โดยที่ผลกระทบของการเพิ่มกำลังอัดที่มีต่อการต้านทานคลอไรด์มีอิทธิพลน้อยกว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในส่วนผสม (Thomas &Matthews, 2004) เนื่องจากความละเอียดของเถ้าถ่านหินสามารถแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างช่องว่างของมวลรวมและผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นทำให้ช่องว่างคาปิลารีมีขนาดลดลง ส่งผลให้การเคลื่อนที่ผ่านของอิออนคลอไรด์ลดลง (Sim &Park, 2011) รวมถึงการเพิ่มขึ้นของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจากปฏิกิริยาปอซโซลานส่งผลให้คลอไรด์ถูกดักจับด้วยแรงทางกายภาพได้ดีขึ้น (Uysal & Akyuncu, 2012) ทั้งนี้เมื่อพิจารณาปริมาณประจุไฟฟ้าสะสมเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตร่วมกับเถ้าถ่านหินบดละเอียดร้อยละ 35-50พบว่ามีค่าอยู่ในระดับต่ำมาก ตามมาตรฐาน ASTM C1202 (2001)



ภาพที่ 3 ประจุไฟฟ้าสะสมเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน



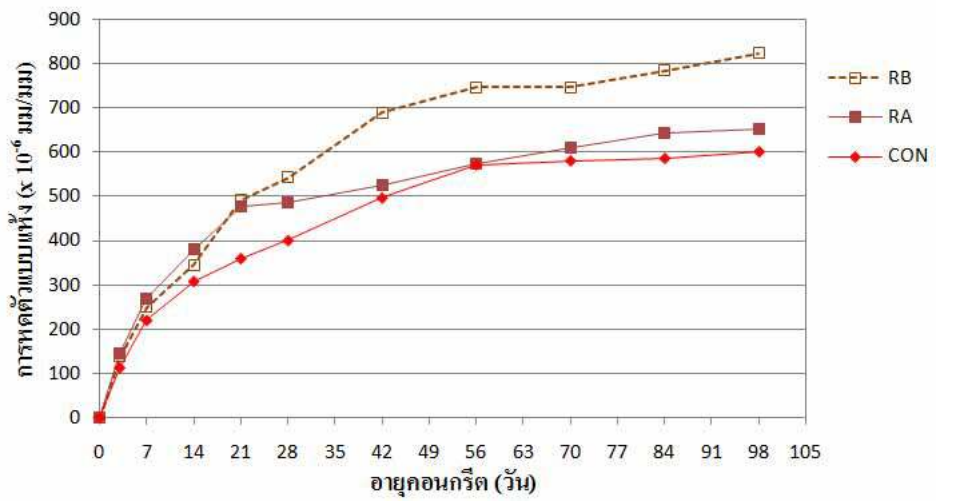
ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าสะสมเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตและกำลังอัดของคอนกรีต

4. ผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง

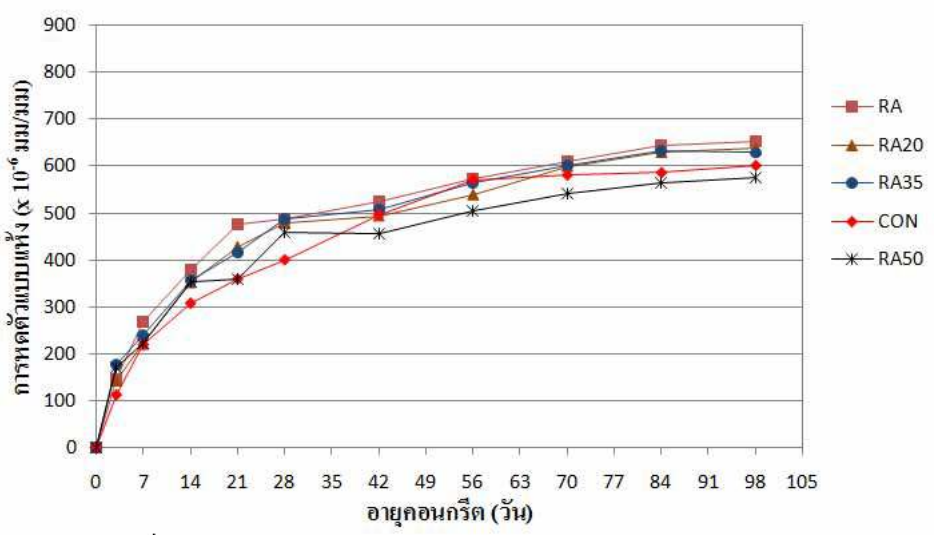
จากภาพที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของคอนกรีต RA และคอนกรีต RB พบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าการหดตัวแบบแห้งมากกว่าคอนกรีต CON ทุกอายุการทดสอบซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chisholm (2011) ที่พบว่า มวลรวมที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตจะมีมอร์ต้าร์ยึดติดกับผิวมวลรวมเดิมซึ่งไม่สามารถยับยั้งการหดตัวได้ดีเท่ามวลรวมจากธรรมชาติ อีกทั้งส่งผลให้ความต้องการน้ำในส่วนผสมคอนกรีตเพิ่มขึ้น การหดตัวแบบแห้งจึงเกิดมากขึ้นโดยที่อายุ 98 วัน คอนกรีต RB มีค่าการหดตัวแบบแห้งสูงถึง 823x10-6 มม/มม ซึ่งสูงกว่าคอนกรีต RA ที่มีค่าการหดตัวแบบแห้งเท่ากับ 652x10^{-6} มม/มมอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากคอนกรีต RB มีปริมาณน้ำในส่วนผสมที่สูงกว่าคอนกรีต RA การสูญเสียน้ำอิสระจึงปริมาณมาก ส่งผลให้การหดตัวแบบแห้งมีค่าสูงขึ้น

จากภาพที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของกลุ่มคอนกรีต RA พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตสามารถช่วยลดการหดตัวแบบแห้งได้ เมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่เพิ่มขึ้น การหดตัวแบบแห้งมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kou, et al. (2007) ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่เถ้าถ่านหินทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลดลง ซึ่งเป็นการลดซีเมนต์เพสต์ที่เป็นต้นกำเนิดการหดตัว (Chindaprasirt & Jaturapitakkul, 2006) รวมถึงอนุภาคขนาดเล็กของเถ้าถ่านหินจะเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างมวลรวม ส่งผลให้น้ำอิสระภายในคอนกรีตเคลื่อนที่ออกได้ยากขึ้นค่าการหดตัวจึงลดลง โดยที่อายุ 98 วัน คอนกรีต RA50 มีค่าการหดตัวแบบแห้งเท่ากับ $567x10^{-6}$ มม/มมซึ่งมีค่าต่ำกว่าคอนกรีต CON ที่มีค่าการหดตัวแบบแห้งเท่ากับ 601x10-6 มม/มม ที่อายุเดียวกัน

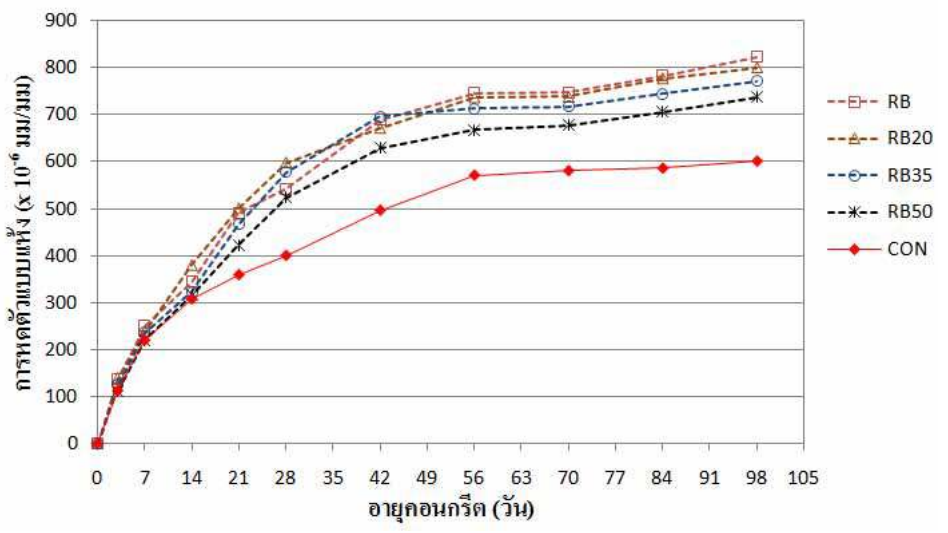
จากความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของกลุ่มคอนกรีต RB ดังภาพที่ 7 พบว่าการใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีตสามารถช่วยลดการหดตัวแบบแห้งได้เช่นกันและการหดตัวแบบแห้งมีค่าลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินเพิ่มขึ้นอย่างไรก็ตามที่อายุ 98 วัน การหดตัวแบบแห้งของกลุ่มคอนกรีต RB มีค่าสูงกว่ากลุ่มคอนกรีต RA และคอนกรีต CON ทั้งนี้เนื่องจากมวลรวมละเอียดจากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่ามวลรวมละเอียดจากธรรมชาติประมาณ 12 เท่าส่งผลให้ความต้องการน้ำในส่วนผสมคอนกรีตเพิ่มขึ้น การหดตัวแบบแห้งจึงเกิดมากขึ้น (Chisholm, 2011)



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของคอนกรีตRA และคอนกรีต RB



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของกลุ่มคอนกรีต RA



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของกลุ่มคอนกรีต RB

สรุปผล

จากผลการวิจัยกำลังอัดและความทนทานของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต โดยใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ไม่เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานสามารถช่วยพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตให้สูงขึ้นได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตสามารถพัฒนากำลังอัดที่ 28 วันให้มีค่าเทียบเท่าคอนกรีตควบคุม

2. การใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดสามารถลดค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตให้มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมชนิดเดียวกันประมาณ 2 เท่า เถ้าถ่านหินบดละเอียดสามารถช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์

การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตให้มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมชนิดเดียวกันประมาณ 2 เท่า และต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตควบคุมประมาณ 1.5 เท่า

3. คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตสามารถต้านทานการแทรกซึมของอิออนคลอไรด์ดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดในส่วนผสม รวมถึงสามารถต้านทานการแทรกซึมของอิออนคลอไรด์ดีกว่าคอนกรีตควบคุมเมื่อใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดเป็นส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ไม่เกินร้อยละ 50โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

4. เถ้าถ่านหินบดละเอียดสามารถช่วยลดการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต และการหดตัวแบบแห้งมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมเมื่อใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดเป็นส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต

5. การแทนที่เถ้าถ่านหินบดละเอียดร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสานเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สามารถให้คุณสมบัติที่ดีทั้งด้านกำลังอัดการทึบน้ำ และความต้านทานการแทรกซึมของอิออนคลอไรด์ของคอนกรีต

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาที่สนับสนุนทุนวิจัยให้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ภายใต้โครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ

รายการอ้างอิง

ปกป้อง รัตนชู และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2551). กำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน. **การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 4 ณ โรงแรมลายทอง อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี** 20-22 ตุลาคม 2551, MAT-102 -MAT-108.

สุรศักดิ์ ภู่สันติพงษ์, รักษ์ บูรณสิงห์ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). การใช้คอนกรีตที่ทดสอบกำลังอัดแล้วเพื่อเป็นมวลรวมของคอนกรีต. **วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา, 15**(3), 22-31.

ACI 211.1-91. (2000). Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. In **2000 ACI Manual of Concrete Practice**, American Concrete Institute.

Adnan, S.H., Lee Yee Loon, L.Y., Ismail Abdul Rahman, I.A., Saman, H.M.,& Soejoso, M.W. (2008). Water permeability of recycled aggregate concrete. **The 2nd Technology and Innovation for Sustainable Development Conference**, 28-29 January 2008, Khon Kean, Thailand, 52-54.

ASTM C618. (2001). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete. In **Annual Book of ASTM Standard**, American Society for Testing and Materials.

ASTM C1202. (2001). Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. In **Annual Book of ASTM Standard**, American Society for Testing and Materials.

Chen, H.J., Yen, T.,& Chen, K.H. (2003). Use of building rubbles as recycled aggregates. **Cement and Concrete Research, 33**(1), 125-132.

Chindaprasirt, P.,& Jaturapitakkul, C. (2006). **Cement, pozzolan and concrete.** Thailand Concrete Association, Bangkok, 214-244. (In Thai)

Chisholm, D. (2011). **Best practice guide for the use of recycled aggregates in new concrete.** Cement and Concrete Association of New Zealand (CCANZ), New Zealand, 1-27.

Etxeberria, M., Vazquez, E., Mari, A.,& Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregates concrete. **Cement and Concrete Research, 37**(5), 735-742.

Hansen, T.C.,& Narud, H. (1983). Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. **Concrete International, 5**(1), 79-83.

Homwuttiwong, S. (2006). **Study of strength and water permeability of concrete containing various pozzolanic materials.** Doctoral Philosophy Dissertation, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi.

Katz, A. (2003). Propertjes of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. **Cement and Concrete Research, 33**(5), 703-711.

Kou, S.C., Poon, C.S., & Chan, D.(2007). Influence of fly ash as cement addition on the hardened properties of recycled aggregate concrete. **Materials and Structures, 41**(7), 1191-1201.

Kou, S.C., Poon, C.S., & Chan, D. (2007). Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering, 19**(9), 709-717.

Poon, C.S., Shui, Z.H., Lam, L., Fok, H., & Kou, S.C. (2004). Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. **Proceedings of Inter-Regional Symposium on Sustainable Development (ISSD)**, 18-19 May 2004, 360-369.

Ravindrarajah, R.S.,& Tam, T.C. (1985). Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. **Magazine of Concrete Research, 37**(130), 29-38.

Sim, J.,& Park, C.(2011) Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate. **Waste Management, 31**, 2352-2360.

Somna, R., Jaturapitakkul, C., Chalee, W., & Rattanachu. P. (2012) Effect of the water to binder ratio and ground fly ash on properties of recycled aggregate concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering, 24**(1), 16-22.

Tangchirapat, W., Khamklai, S., & Jaturapitakkul, C. (2012). Use of ground palm oil fuel ash to improve strength, sulfate resistance, and water permeability of concrete containing high amount of recycled concrete aggregates. **Materials and Design, 31**, 150-157.

Tomas, M.D.A. & Matthews, J.D. (2004). Performance of PFA concrete in a marine enviroment ten year results. **Cement and Concrete Composites, 26**(1), 5-20.

Uysal M, & Akyuncu V. (2012). Durability performance of concrete incorporating Class F and Class C fly ashes. **Construction and Building Materials, 34**, 170-178.