



กำลัง ความพรุน และสภาพต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตไหลเองได้ที่ใช้มวลรวมหยาบคอนกรีตรีไซเคิล  
ผสมเถ้าลอย

**STRENGTH, POROSITY, AND RESISTIVITY OF COARSE RECYCLED CONCRETE AGGREGATE  
SELF-COMPACTING CONCRETE CONTAINING FLY ASH**

พงศ์พล อุดอ้าย<sup>1\*</sup> และ วีระ หอสกุลไท<sup>2</sup>

<sup>1</sup> นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น

<sup>2</sup> รองศาสตราจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น

\*Corresponding author: frenfc@gmail.com

**บทคัดย่อ**

บทความนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำคอนกรีตเหลือทิ้งนำกลับมาใช้ใหม่ในงานคอนกรีตไหลเองได้กำลังสูง คอนกรีตเหลือทิ้งเป็นชิ้นตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 mm สูง 300 mm และทรงลูกบาศก์ขนาด 150 x 150 x 150 mm มีอายุ 1 – 2 ปี ชิ้นตัวอย่างทดสอบถูกย่อยให้ได้ขนาด โดสุด 20 mm เพื่อใช้เป็นมวลรวมหยาบ คอนกรีตไหลเองได้ที่ใช้เป็นคอนกรีตควบคุม (คอนกรีต PC) มีอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ 0.35 และกำลังอัดเป้าหมายของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ 100 x 100 x 100 mm มีค่า 70 MPa ที่อายุ 28 วัน แทนหินปูนย่อยด้วยมวลรวมหยาบคอนกรีตรีไซเคิลผสมในคอนกรีตไหลเองได้ (คอนกรีต CA) และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในอัตราร้อยละ 0 20 40 และ 60 โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ (คอนกรีต CA, 20FA, 40FA และ 60FA ตามลำดับ) ควบคุมค่าการไหลยุบตัวในช่วง 650 – 750 mm ทดสอบกำลังอัด ความพรุน สภาพต้านทานไฟฟ้า และการแพร่ของคลอไรด์ในสถานะไม่คงตัวโดยวิธีการนำพาโดยไฟฟ้า จากผลการทดสอบพบว่า คอนกรีต CA มีกำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม แต่มีค่ากำลังอัดมากกว่ากำลังอัดเป้าหมาย มีความพรุนและสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์มากกว่า แต่สภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม PC ที่อายุ 28 วัน คอนกรีตผสมเถ้าลอยทุกส่วนผสมมีกำลังอัดมากกว่ากำลังอัดเป้าหมายที่อายุ 90 วัน ยกเว้นคอนกรีต 20FA มีกำลังอัดมากกว่ากำลังอัดเป้าหมายที่อายุ 28 วัน ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยสูงกว่าคอนกรีตควบคุม PC และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการผสมเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นที่อายุ 90 วัน

**คำสำคัญ :** คอนกรีตรีไซเคิล, คอนกรีตไหลเองได้, เถ้าลอย, กำลังอัด, ความพรุน, สภาพต้านทานไฟฟ้า, การแพร่ของคลอไรด์

**ABSTRACT**

This article was a study of the possibility of using recyclable waste concrete in high strength self-compacting concrete. The waste concrete was cylindrical specimens with 150 mm diameter and 300 mm height, and 150 mm cubes which were aged 1-2 years. The waste concrete was crushed into a 20 mm maximum nominal size to use as a coarse aggregate. Self-compacting concrete with water to binder ratio of 0.35 was used as controlled concrete (PC), in which the target compressive strength of 100 mm cubes was

Pongpol Ud-ai<sup>1\*</sup> and Veera Horsakulthai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Graduate Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

<sup>2</sup>Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

70 MPa at the age of 28 days. The PC concrete mixture was replaced crushed limestone with crushed recycled concrete aggregate, and the cement was partially replaced by class C fly ash at the dosage of 0%, 20%, 40%, and 60% by weight of the binder to produce concrete (CA, 20FA, 40FA, and 60FA concrete, respectively). The slump flow was controlled in the range of 650-750 mm. The compressive strength, porosity, electrical resistivity, and non-steady state chloride migration were investigated. From the experimental results, it was found that the compressive strength of CA concrete was lower than that of PC controlled concrete but higher than the target compressive strength. The CA concrete had higher the porosity and the chloride diffusion coefficient and lower the electrical resistivity than that of PC controlled concrete at the age of 28 days. The compressive strength of concrete containing fly ash was higher than the target compressive strength at the age of 90 days, except the 20FA concrete was higher at the age of 28 days. The chloride penetration resistance of concrete containing fly ash was higher than that of PC control concrete. The tendency of the chloride penetration resistance increased with containing the fly ash increased at the age of 90 days.

**KEYWORDS:** recycled concrete, self-compacting concrete, fly ash, compressive strength, porosity, resistivity, chloride diffusion.

## 1. บทนำ

นานาประเทศทั่วโลกได้มีการเร่งพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมกันอย่างต่อเนื่อง มีการก่อสร้างสิ่งปลูกสร้าง อาคาร ระบบสาธารณูปโภคอย่างมากมาย ทำให้ต้องมีการรื้อถอนสิ่งปลูกสร้างเดิมและสร้างขึ้นมาใหม่ทดแทน วัสดุหลักที่ใช้ในงานก่อสร้างส่วนใหญ่จะเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งต้องใช้คอนกรีตเป็นจำนวนมาก ในการผลิตคอนกรีตต้องใช้วัตถุดิบหลักประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ หิน ทราย และน้ำ ทำให้ต้องมีการทำลายทรัพยากรธรรมชาติ เช่น การระเบิดหินและย่อยหินให้ได้ขนาดตามต้องการที่จะใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีต ทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ การผลิตปูนซีเมนต์ก็ต้องใช้พลังงานจำนวนมากและมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดสภาวะเรือนกระจก โดยการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตันจะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา 1 ตัน เช่นกัน [1] การทุบทำลายสิ่งปลูกสร้างเก่า ทำให้เกิดขยะจากผลิตภัณฑ์คอนกรีตตามมา การจัดการแบบวิธีดั้งเดิม คือ การกองเก็บ การฝังกลบ ซึ่งต้องใช้พื้นที่จำนวนมากและยังก่อให้เกิดมลพิษเป็นปัญหาต่อสภาพแวดล้อม ดังนั้นการนำเอาขยะจากผลิตภัณฑ์คอนกรีตที่มาจากทุบทำลายสิ่งปลูกสร้างเก่ามาเพิ่มมูลค่า โดยการนำเอามาย่อยให้มีขนาดเท่ากับหินปูนที่ใช้ในงานก่อสร้างเป็นเรื่องที่น่าสนใจและเป็นการช่วยลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ ลดปัญหาความต้องการพื้นที่ฝังกลบ ยังช่วยลดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

อย่างไรก็ตาม การใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (Recycled concrete aggregate) ผสมในคอนกรีตอาจทำให้กำลังอัดลดลง และการซึมผ่านของน้ำ (Water permeability) เพิ่มขึ้น [2-4] การใช้มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลผสมในคอนกรีตจะก่อให้เกิดบริเวณเปลี่ยนผ่านระหว่างผิว (Interfacial transition zone, ITZ) 2 บริเวณ ได้แก่ ITZ เก่าเป็นบริเวณระหว่างผิวมวลรวมเดิมกับผิวซีเมนต์เพสต์เดิมที่เคลือบผิวมวลรวม และ ITZ ใหม่เป็นบริเวณระหว่างผิวมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิลกับผิวซีเมนต์เพสต์ใหม่ การปรับปรุง ITZ ให้มีความทึบมากขึ้น ลดการซึมผ่านของน้ำ และเพิ่มกำลังให้กับคอนกรีต สามารถกระทำได้ โดยการผสมคอนกรีตแบบสองขั้นตอน (Double mixing) ปรับปรุงผิวของมวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล และผสมวัสดุปอซโซลาน เป็นต้น [5-9]

การใช้วัสดุปอซโซลานผสมในคอนกรีตโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนช่วยลดการใช้ปูนซีเมนต์ และยังช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์ ทำให้ลดการทำลายทรัพยากรธรรมชาติ วัสดุปอซโซลานที่ใช้กันแพร่หลายและหาได้ง่ายคือเถ้าลอย เนื่องจากเถ้าลอยเป็นวัสดุผลพลอยได้ (By-product) จากการผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานความ

ร้อนที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง การใช้เถ้าลอยผสมในคอนกรีต ช่วยให้งานทำได้ดีขึ้น ลดความต้องการน้ำ ลดการแยกตัวและการซึม เพิ่มกำลังในระยะยาว ลดการซึมผ่านและการดูดซึมของน้ำ เพิ่มความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์และทนทานต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ได้คอนกรีตที่มีความทนน้ำมากขึ้น [9-12] มีรายงานการใช้เถ้าลอยในคอนกรีตผสมมวลรวมคอนกรีตริไซเคิลเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น [13] ซึ่งชี้ให้เห็นว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 25 ช่วยลดขนาดของโพรงให้เล็กลงและลดค่าความพรุนรวม [14] รายงานเพิ่มเติมว่าคอนกรีตที่มีมวลรวมคอนกรีตริไซเคิลผสมเถ้าลอยช่วยลดการหดตัวแบบแห้ง (Drying shrinkage) เพิ่มความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ให้กับคอนกรีต และช่วยให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น เถ้าลอยยังถูกใช้ในคอนกรีตไหลเองได้ [15] ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1983 ในประเทศญี่ปุ่นเพื่อแก้ปัญหาขาดแคลนแรงงานที่มีทักษะในด้านการทำคอนกรีตให้แน่น มลพิษทางเสียง และความทนทานของคอนกรีต ส่วนผสมของคอนกรีตไหลเองได้ถูกออกแบบให้มีปริมาณมวลรวมหยาบลดน้อยลงและเพิ่มปริมาณวัสดุละเอียด (สารซีเมนต์) มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ นำไปใช้ก่อสร้างสะพาน สมอซีตลวดสลิง และชิ้นส่วนอุโมงค์ [16]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะนำขยะคอนกรีตกลับมาใช้ใหม่เป็นมวลรวมหยาบ โดยการย่อยเศษคอนกรีตเก่าให้ได้ขนาดละเอียดใกล้เคียงกับหินปูนย่อย และใช้ทดแทนหินปูนย่อยผสมในคอนกรีตไหลเองได้ และใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ทำการศึกษากำลังอัด ความพรุน ความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ และสภาพต้านทานไฟฟ้า

## 2. วิธีการดำเนินการวิจัย

### 2.1 วัสดุ

#### 2.1.1 สารซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ผลิตตามมาตรฐาน ASTM C150 [17] มีความถ่วงจำเพาะ 3.15

เถ้าลอย Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618 [18] จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอมะเมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งเป็น โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนที่ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง มีความถ่วงจำเพาะ 2.65

#### 2.1.2 มวลรวม

หินปูนย่อยขนาดโตสุด 20 mm มีความถ่วงจำเพาะ 2.65 โมดูลัสความละเอียด 7.04 หน่วยน้ำหนักกระทุ้งแน่นแบบแห้ง 1,555 kg/m<sup>3</sup> ความสามารถดูดซึมน้ำร้อยละ 0.54 รูปร่างลักษณะดังรูปที่ 1(ก) และขนาดคละดังรูปที่ 2

มวลรวมหยาบคอนกรีตริไซเคิลย่อย ได้จากชิ้นตัวอย่างทดสอบเหลือทิ้ง จากห้องปฏิบัติการสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น มีกำลังอัดจากการทดสอบ 210 – 350 ksc นำมาทุบด้วยมือให้ได้ขนาด 40 – 50 mm จากนั้นนำไปย่อยขนาดให้เล็กลงด้วยเครื่องย่อยให้ได้ขนาดโตสุด 20 mm แยกขนาดตามเบอร์ตะแกรงมาตรฐาน ASTM C33 [19] จากนั้นนำมาผสมให้ได้ขนาดละเอียดเทียบเท่ากับหินปูนย่อย มีความถ่วงจำเพาะ 2.40 โมดูลัสความละเอียด 6.89 หน่วยน้ำหนักกระทุ้งแน่นแบบแห้ง 1,346 kg/m<sup>3</sup> ความสามารถดูดซึมน้ำร้อยละ 4.54 รูปร่างลักษณะดังรูปที่ 1(ข) และขนาดคละดังรูปที่ 2

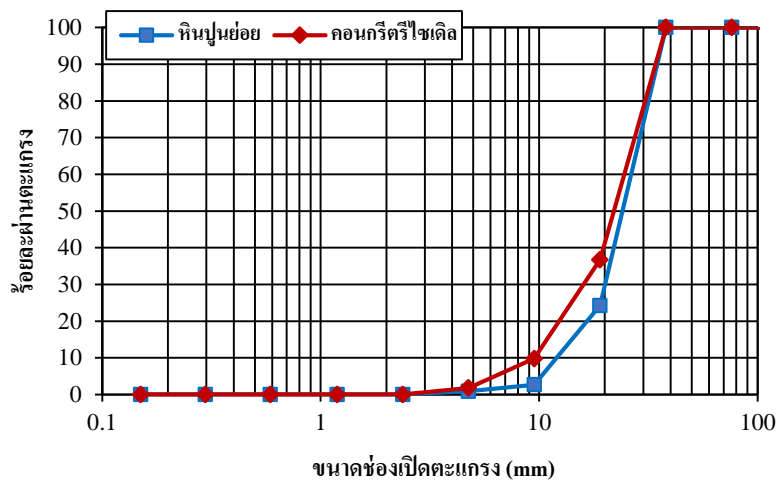


(ก) หินปูนย่อย



(ข) มวลรวมหยาบคอนกรีตรีไซเคิล

รูปที่ 1 มวลรวมหยาบ



รูปที่ 2 ขนาดคละของมวลรวมหยาบ

ทรายคัดขนาด จากท่าทรายอำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น มีความถ่วงจำเพาะ 2.51 โมดูลัสความละเอียด 2.52 และความสามารถดูดซึมน้ำร้อยละ 0.60

### 2.1.3 สารผสมเพิ่ม

สาร Sika VicoCrete 2100 เป็นสารซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ (Superplasticizer, SP) ประเภทโพลีคาร์บอกซิเลต อยู่ในสภาวะของเหลว มีความถ่วงจำเพาะ 1.06 ใช้ผสมในคอนกรีตไหลเองได้เพื่อปรับค่าการไหลยวบตัวให้อยู่ในช่วงควบคุม 650 – 750 mm

## 2.2 ปฏิภาคนส่วนผสมของคอนกรีตไหลเองได้

ปฏิภาคนส่วนผสมของคอนกรีตไหลเองได้ออกแบบตามคำแนะนำของ The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems (EFNARC) [20] ใช้อัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ (water/binder ratio) 0.35 สารซีเมนต์ 500 kg/m<sup>3</sup> ปริมาณน้ำ 175 kg/m<sup>3</sup> และปริมาณมวลรวมหยาบร้อยละ 50 ของหน่วยน้ำหนักกระทุ้งแน่นแบบแห้ง ควบคุมค่าการไหลยวบตัว 650

- 750 mm ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนและหินปูนย่อย กำหนดให้เป็นคอนกรีตควบคุม แทนด้วยสัญลักษณ์ PC จากคอนกรีตควบคุม PC ใช้มวลรวมหยาบคอนกรีตรีไซเคิลแทนหินปูนย่อยทั้งหมด และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 0 20 40 และ 60 แทนสัญลักษณ์ส่วนผสมด้วย CA 20FA 40FA และ 60FA ตามลำดับ รายละเอียดคณิศรภาคส่วนผสมของคอนกรีตไหลเองได้ ดังตารางที่ 1 ในการผสมได้ปรับมวลรวมหยาบให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง

### 2.3 การทดสอบ

#### 2.3.1 กำลังอัด

ขึ้นตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 100 x 100 x 100 mm บ่มน้ำ จำนวน 3 ตัวอย่าง ต่ออายุการทดสอบ ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 28 และ 90 วัน ใช้อัตราการใช้แรง 0.25 MPa/s ตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C39 [21]

ตารางที่ 1 ปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตไหลเองได้

ส่วนผสม	ปฏิภาคส่วนผสม (kg/m <sup>3</sup> )						สาร VicoCrete (kg)	ค่าการไหล ยุปตัว (mm)
	ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย	มวลรวมหยาบ		ทราย	น้ำ		
			หินปูนย่อย	คอนกรีตรีไซเคิล				
PC	500	-	778	-	881	175	4.00	670
CA	500	-	-	673	919	175	3.75	690
20FA	400	100	-	673	904	175	3.10	730
40FA	300	200	-	673	890	175	2.50	740
60FA	200	300	-	673	875	175	1.80	710

#### 2.3.2 ความพรุน

ขึ้นตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 mm หนา 50 ± 2 mm บ่มน้ำได้จากการตัดทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 mm สูง 200 mm เป็นสี่ส่วน ใช้ส่วนตรงกลาง 2 ชิ้น ทดสอบหาความพรุนโดยวิธีแช่น้ำตามมาตรฐาน ASTM C642 [22] ที่อายุ 28 และ 90 วัน

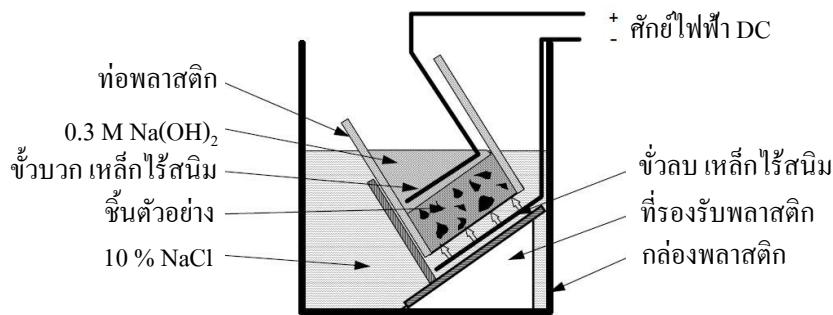
#### 2.3.3 การนำพาคลอไรด์โดยไฟฟ้าในสภาวะไม่คงตัว (Non-steady state chloride migration)

ขึ้นตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 mm หนา 50 ± 2 mm บ่มน้ำ ได้จากการตัดทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 mm สูง 200 mm เป็นสี่ส่วน ใช้ส่วนตรงกลาง 2 ชิ้น ก่อนการทดสอบทำขึ้นตัวอย่างให้อิ่มตัวด้วยน้ำในสภาพสุญญากาศและการติดตั้งชุดทดสอบ เป็นไปตามมาตรฐาน NT Build 492 [23] เริ่มการทดสอบโดยการประยุกต์ศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง 30 V เข้าที่ขั้วบวกและขั้วลบดังรูปที่ 3 วัดกระแสไหลผ่านขึ้นตัวอย่าง เพื่อหาศักย์ไฟฟ้าและเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการทดสอบ ประยุกต์ศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมเข้าที่ขั้วบวกและลบ วัดกระแสไหลผ่านขึ้นตัวอย่างและอุณหภูมิเริ่มต้น ทั้งชุดทดสอบไว้ตามเวลาที่กำหนด วัดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขึ้นตัวอย่างและอุณหภูมิสุดท้าย จากนั้นนำขึ้นตัวอย่างไปหาความลึกของการซึมผ่าน

ของคลอไรด์โดยวิธีปรากฏสี (Colorimetric method) ใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรดความเข้มข้น 0.1 N (0.1 N AgNO<sub>3</sub>) นีดพบนบน  
ชั้นตัวอย่างที่ผานึก สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในสภาวะไม่คงตัว (Non-steady state chloride migration coefficient,  $D_{nssm}$ )  
คำนวณหาได้จากสมการ (1)

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} \left( x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273+T)Lx_d}{U-2}} \right) \quad (1)$$

- โดยที่  $D_{nssm}$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในสภาวะไม่คงตัว ( $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s)  
 $U$  = ค่าสัมบูรณ์ของศักย์ไฟฟ้าที่ประยุกต์ใช้ (V)  
 $T$  = ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายของการทดสอบในสารละลาย Na(OH)<sub>2</sub> (°C)  
 $L$  = ความหนาของชั้นตัวอย่าง (mm)  
 $x_d$  = ค่าความลึกเฉลี่ยของการแพร่ของคลอไรด์ (mm)  
 $t$  = ช่วงเวลาทดสอบ (hour)



รูปที่ 3 การติดตั้งชุดทดสอบการนำพาคลอไรด์โดยไฟฟ้าในสภาวะไม่คงตัว [23]

### 2.3.4 สภาพต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistivity)

การทดสอบสภาพต้านทานไฟฟ้าใช้ชุดทดสอบเดียวกับการทดสอบการนำพาคลอไรด์โดยไฟฟ้าในสภาวะไม่คงตัว ในหัวข้อ  
2.3.3 ก่อนทดสอบการนำพาคลอไรด์โดยไฟฟ้าจะประยุกต์ศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง 30 volts และวัดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านชั้นตัวอย่าง  
คำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจากสมการ (2)

$$\rho = \frac{VA}{IL} \quad (2)$$

- โดยที่  $\rho$  = สภาพต้านทานไฟฟ้า ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )  
 $V$  = ศักย์ไฟฟ้าที่ประยุกต์ระหว่างขั้วไฟฟ้า (V)  
 $I$  = กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน (Amp)  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัดชั้นตัวอย่าง (cm<sup>2</sup>)  
 $L$  = ความหนาของชั้นตัวอย่าง, cm

### 3. ผลการทดสอบ

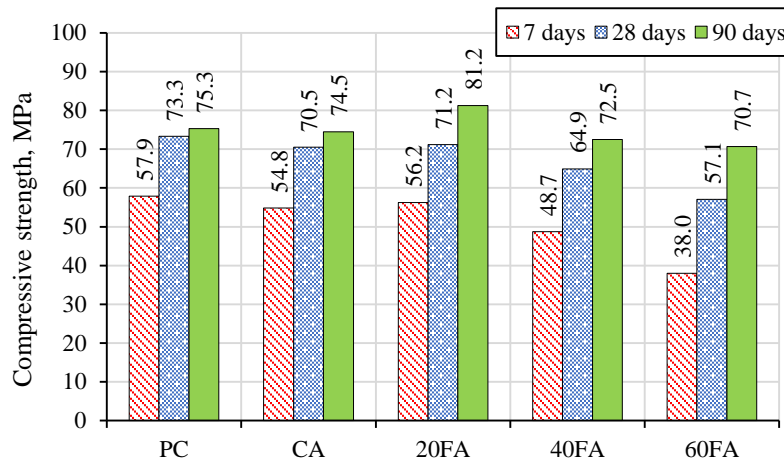
#### 3.1 กำลังอัด

##### 3.1.1 ผลกระทบของมวลรวมหยาบคอนกรีตไร้ซิลิกา

ผลลัพธ์ของการทดสอบกำลังอัด ดังรูปที่ 4 จากการสังเกตพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตควบคุม PC มีค่า 57.9 73.3 และ 75.3 MPa ที่อายุ 7 28 และ 90 วัน ตามลำดับ เมื่อผสมมวลรวมหยาบคอนกรีตไร้ซิลิกาแทนหินปูนย่อยทำให้กำลังอัดลดลง โดยที่คอนกรีต CA มีค่ากำลังอัด 54.8 70.5 และ 74.5 MPa คิดเป็นร้อยละ 94.6 96.2 และ 98.6 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ เนื่องจากซีเมนต์เพสต์ที่เคลือบผิวมวลรวมหยาบคอนกรีตไร้ซิลิกามีรอยร้าวจิ๋ว (Microcrack) จากการย่อยเศษคอนกรีตทำให้เป็นจุดอ่อนในการรับแรง [24-25] เมื่อพิจารณาการพัฒนากำลังของคอนกรีตพบว่าคอนกรีตมีอัตราการพัฒนากำลังได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม PC ทำให้ที่อายุ 90 วัน คอนกรีต CA มีกำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีต PC ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าปูนซีเมนต์ที่หลงเหลือจากการเกิดปฏิกิริยาในซีเมนต์เพสต์ที่เคลือบผิวมวลรวมหยาบไร้ซิลิกากลับมาทำปฏิกิริยาอีกครั้ง เนื่องจากเศษคอนกรีตที่นำมาใช้มีอายุไม่มากนัก

##### 3.1.2 ผลกระทบของเถ้าลอยในคอนกรีตไร้ซิลิกาได้ผสมมวลรวมหยาบคอนกรีตไร้ซิลิกา

เมื่อผสมเถ้าลอยในคอนกรีต CA โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 20 40 และ 60 โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ (คอนกรีต 20FA 40FA และ 60FA ตามลำดับ) ผลลัพธ์ของการทดสอบกำลังอัด ดังรูปที่ 4 จะเห็นว่ากำลังอัดของคอนกรีต 20FA 40FA และ 60FA มีค่า 56.2 48.7 และ 38.0 MPa คิดเป็นร้อยละ 102.6 88.9 และ 69.3 ของคอนกรีต CA ตามลำดับ ที่อายุ 7 วัน ในช่วงอายุต้นปฏิกิริยาปอซโซลานยังไม่เกิด แต่มีการพัฒนากำลังได้ค่อนข้างสูงโดยเฉพาะคอนกรีต 20FA มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีต CA ซึ่งมีสาเหตุจากผลกระทบของการเติมเต็มของเถ้าลอย (Filler effect) ทำให้เม็ดปูนซีเมนต์มีการกระจายตัวได้ดีขึ้นมีระยะห่างระหว่างเม็ดปูนซีเมนต์มากขึ้นทำให้มีที่ว่างในการแตกตัวของปูนซีเมนต์ได้มากขึ้นส่งผลให้ปูนซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้มากขึ้นตามไปด้วย [1, 26] คอนกรีตมีการพัฒนากำลังอย่างต่อเนื่องโดยที่คอนกรีต 20FA 40FA และ 60FA มีกำลังอัด 71.2 64.9 และ 57.1 MPa คิดเป็นร้อยละ 101.0 92.1 และ 81.0 ของคอนกรีต CA ที่อายุ 28 วัน ตามลำดับ จะเห็นว่าคอนกรีต 40FA และ 60FA มีการพัฒนากำลังมากกว่าคอนกรีต CA ในช่วงอายุ 7 วัน ถึง 28 วัน อาจมีปัจจัยมาจากเถ้าลอยที่ใช้เป็นเถ้าลอย class C ที่มีปริมาณ CaO สูงและซิดเกาะ SiO<sub>2</sub> อยู่ในรูปของ CaO-SiO<sub>2</sub> ซึ่งเป็นผลึกเหมือนกับในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ แต่ปฏิกิริยาจะช้ากว่าปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตามมาตรฐาน ASTM C618 [18] กำหนดเถ้าลอย class C เป็นเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูง มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานและเป็นวัสดุซีเมนต์สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ กำลังอัดของคอนกรีต 20FA 40FA และ 60FA ที่อายุ 90 วัน มีค่า 81.2 72.5 และ 70.7 MPa คิดเป็นร้อยละ 109.0 97.3 และ 94.9 ของคอนกรีต CA จากการสังเกตพบว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยทุกส่วนผสมมีการพัฒนากำลังอัดได้มากกว่าคอนกรีต CA ในช่วง 28 ถึง 90 วัน ซึ่งเป็นผลกระทบของปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยที่เกิดหลังจากอายุ 28 วัน



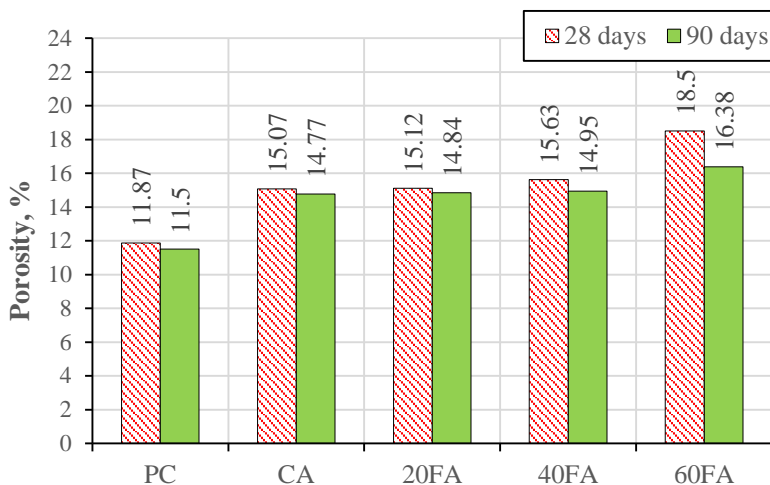
รูปที่ 4 กำลังอัดของคอนกรีตไหลเองได้ที่อายุ 7 28 และ 90 วัน

### 3.2 ความพรุน

ความพรุนของคอนกรีตคำนวณหาได้จากการทดสอบโดยวิธีแช่น้ำ ตามมาตรฐาน ASTM C642 [22] ดังรูปที่ 5 จากการสังเกตพบว่าคอนกรีตมีความพรุนลดลงเมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้น คอนกรีต CA มีความพรุนมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม PC ทั้งนี้เนื่องจากมวลรวมหยาบคอนกรีตรีไซเคิลมีความพรุนมากกว่าหินปูนย่อยและเมื่อใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตในปริมาณที่เท่ากันจึงทำให้คอนกรีต CA มีความพรุนรวม (Bulk porosity) มากกว่า โดยที่คอนกรีตควบคุม PC และคอนกรีต CA มีความพรุนร้อยละ 11.87 และ 15.07 ที่อายุ 28 วัน และลดลงเป็นร้อยละ 11.50 และ 14.77 ที่อายุ 90 วัน ตามลำดับ

เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในอัตราร้อยละ 0 20 40 และ 60 โดยน้ำหนัก ผสมในคอนกรีตที่มีมวลรวมหยาบคอนกรีตรีไซเคิลเป็นส่วนผสม ความพรุนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการผสมเถ้าลอยในอัตราที่เพิ่มขึ้น โดยที่คอนกรีต CA, 20FA, 40FA และ 60FA มีความพรุนร้อยละ 15.07 15.12 15.63 และ 18.50 ตามลำดับ ที่อายุ 28 วัน และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 90 วัน ความพรุนลดลงเป็นร้อยละ 14.77 14.84 14.95 และ 16.38 ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อผสมเถ้าลอยในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณโพรงคาปิลารีเพิ่มขึ้นตาม จึงส่งผลให้ความพรุนรวมเพิ่มขึ้น ตามที่ Jiang and Guan [27] พิสูจน์ให้เห็นว่าปริมาณโพรงคาปิลารีและความพรุนรวมของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้นตามการผสมเถ้าลอยในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น โดยผสมเถ้าลอยในอัตราร้อยละ 40 55 และ 75 โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ Pandey and Sharma [28] ชี้ให้เห็นว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ ทำให้ความพรุนรวมและปริมาณโพรงคาปิลารีเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และ Chindaprasirt et al, [29] ยืนยันว่าเมื่อผสมเถ้าลอยในซีเมนต์เพสต์ร้อยละ 20 และ 40 ทำให้ความพรุนรวมและความพรุนคาปิลารีเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่ผสมเพิ่มมากขึ้น และความพรุนรวมและความพรุนคาปิลารีลดลงตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น

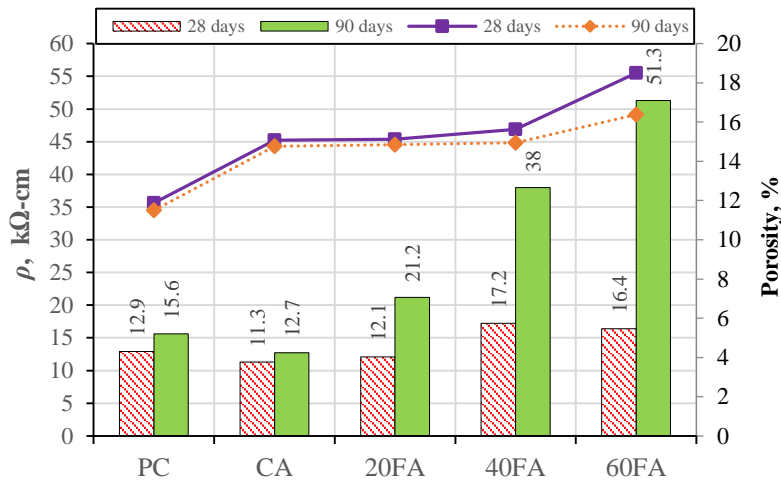




รูปที่ 5 ความพรุนของคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน

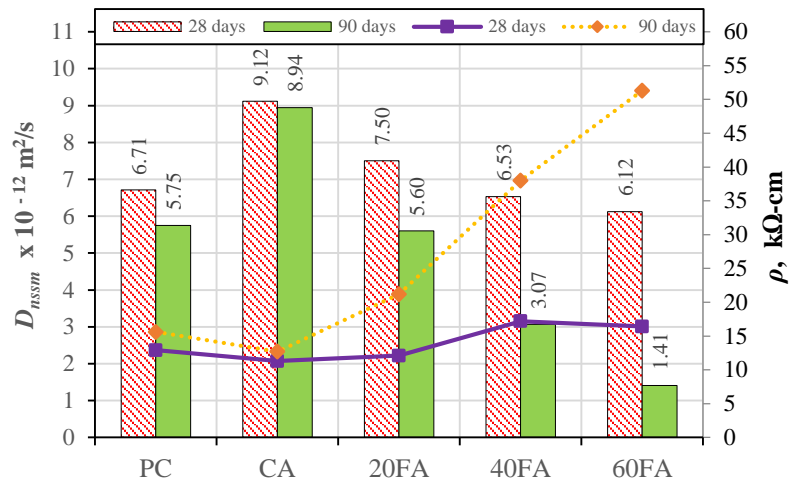
### 3.3 สภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์

สภาพต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตเป็นความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านคอนกรีต คำนวณหาได้จากการทดสอบการนำพาคลอไรด์โดยไฟฟ้า ตามมาตรฐาน NT Build 492 [23] โดยใช้ค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านคอนกรีตจากการประยุกต์ศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์ เข้ากับชุดทดสอบ ผลลัพธ์ของการทดสอบ ดังรูปที่ 6 จะเห็นว่าเมื่อใช้มวลรวมหยาบคอนกรีตริชเกิดเป็นส่วนผสมในคอนกรีตไหลเองได้ (คอนกรีต CA) สภาพต้านทานไฟฟ้าลดลงร้อยละ 12.4 และ 18.4 ที่อายุ 28 และ 90 วัน โดยที่คอนกรีตควบคุม PC และคอนกรีต CA มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า 12.9 และ 11.3  $k\Omega\text{-cm}$  ที่อายุ 28 วัน และ 15.6 และ 12.7  $k\Omega\text{-cm}$  ที่อายุ 90 วัน ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปในทิศทางตรงกันข้ามกับค่าความพรุนของคอนกรีต CA ที่มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากสภาพผิวมวลรวมคอนกรีตริชเคลือบมีเศษมอร์ตาร์เคลือบอยู่ เมื่อผสมแล้วลอยในคอนกรีต CA ร้อยละ 0 20 40 และ 60 พบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณแฉะลอยที่ผสมในคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น บ่งชี้ถึงความสามารถต้านทานการไหลผ่านของไอออนหรือการแพร่ของไอออนได้ดีขึ้น จากการสังเกตยังพบอีกว่าเมื่อผสมแล้วลอยในคอนกรีต CA ความพรุนของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณแฉะลอยที่ผสมมากขึ้น ถึงแม้ว่าความพรุนของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นแต่ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ากลับเพิ่มขึ้นตาม ดังรูปที่ 6 ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเติมแฉะลอยในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณโพรงรวมเพิ่มมากขึ้นตาม แต่ปริมาณโพรงคาปิลารีขนาดเล็กมีปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้ค่าเฉลี่ยของโพรงคาปิลารีเล็กลง การซึมผ่านของน้ำหรือการแพร่ของไอออนได้ยากขึ้นทำให้ได้คอนกรีตที่มีความทึบน้ำมากขึ้น [27-29] สภาพต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต 20FA, 40FA และ 60FA มีค่า 12.1 17.2 และ 16.4  $k\Omega\text{-cm}$  ที่อายุ 28 วัน และมีค่า 21.2 38.0 และ 51.3  $k\Omega\text{-cm}$  ที่อายุ 90 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 6 สภาพต้านทานไฟฟ้าและความพรุนของคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน

การทดสอบการนำพาคลอไรด์โดยไฟฟ้า เป็นการวัดความสามารถไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านคอนกรีตแสดงผลในรูปแบบของสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ ผลการทดสอบ ดังรูปที่ 7 ซึ่งให้เห็นว่าเมื่อใช้มวลรวมหยาบคอนกรีตริไซเคิลแทนหินปูนย่อยผสมคอนกรีตส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์เพิ่มขึ้นซึ่งแปรผกผันกับสภาพต้านทานไฟฟ้า โดยที่คอนกรีตควบคุม PC และคอนกรีต CA มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์  $6.71 \times 10^{-12}$  และ  $9.12 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  ที่อายุ 28 วัน และลดลงเป็น  $5.75 \times 10^{-12}$  และ  $8.94 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  ที่อายุ 90 วัน ตามลำดับ เมื่อผสมเถ้าลอยในคอนกรีต CA ทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ลดลงตามปริมาณการผสมเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ของคอนกรีต 20FA, 40FA และ 60FA มีค่า  $7.5 \times 10^{-12}$ ,  $6.53 \times 10^{-12}$  และ  $6.12 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  ที่อายุ 28 วัน และลดลงเป็น  $5.60 \times 10^{-12}$ ,  $3.17 \times 10^{-12}$  และ  $1.41 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  ที่อายุ 90 วัน ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่อายุ 28 วัน พบว่าคอนกรีต 20FA มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์มากกว่าคอนกรีตควบคุม PC ร้อยละ 11.8 แต่คอนกรีต 40FA และ 60FA มีค่าลดลงร้อยละ 2.7 และ 8.8 ตามลำดับ เป็นผลมาจากการเติมเถ้าลอยในคอนกรีตทำให้มีการปรับปรุงโครงสร้างโพรงในซีเมนต์เพสต์ ลดขนาดของโพรงคาปิลลารีลงทำให้โพรงคาปิลลารีขนาดเล็กมีปริมาณเพิ่มขึ้น และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 90 วัน ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าลอยกับด่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  จากผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันให้ผลึกของแข็งที่ไ้กำลังช่วยลดขนาดของโพรงให้เล็กลงอีกและทำให้โครงสร้างโพรงขาดความต่อเนื่องและยังช่วยปรับปรุงผิวสัมผัสระหว่างมวลรวมหยาบคอนกรีตริไซเคิลและซีเมนต์เพสต์ (Interfacial transition zone, ITZ) [30] สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ของคอนกรีต 20FA, 40FA และ 60FA ลดลงร้อยละ 2.6, 46.6 และ 75.5 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม PC



รูปที่ 7 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และสภาพต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน

#### 4. สรุปผล

จากผลลัพธ์ของการทดสอบกำลังอัด ความพรุน สภาพต้านทานไฟฟ้า และการแพร่ของคลอไรด์ในสถานะไม่คงตัวของคอนกรีตไหลเองได้ที่ใช้มวลรวมหยาบคอนกรีตริไซเคิลผสมเกล็ดลอยที่มีอัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์ 0.35 สามารถนำไปสู่ข้อสรุปดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 คอนกรีตไหลเองได้ควบคุม PC มีกำลังอัดเป้าหมายของทรงลูกบาศก์ 100 x 100 x 100 mm เป็น 70 MPa ที่อายุ 28 วัน จากการทดสอบ คอนกรีตควบคุม PC ให้กำลังอัด ความพรุน สภาพต้านทานไฟฟ้า และสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์มีค่าเป็น 73.3 MPa, ร้อยละ 11.87, 12.9 k $\Omega$ -cm, และ  $6.71 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  ตามลำดับ ที่อายุ 28 วัน และมีค่า 75.3 MPa, ร้อยละ 11.50, 15.6 k $\Omega$ -cm และ  $5.75 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  ตามลำดับ ที่อายุ 90 วัน

4.2 คอนกรีต CA มีกำลังอัดมากกว่ากำลังอัดเป้าหมาย ที่อายุ 28 วัน และมีค่ากำลังอัดน้อยกว่า ความพรุนมากกว่า สภาพต้านทานไฟฟ้าน้อยกว่า และสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์มากกว่าคอนกรีตควบคุม PC ซึ่งมีค่าคิดเป็นร้อยละ 96 127 88 และ 136 ของคอนกรีตควบคุม PC ตามลำดับ ที่อายุ 28 วัน และคิดเป็นร้อยละ 99 128 81 และ 155 ของคอนกรีตควบคุม PC ตามลำดับ ที่อายุ 90 วัน

4.3 คอนกรีต 20FA มีกำลังอัดมากกว่ากำลังอัดเป้าหมาย และมีกำลังอัด ความพรุน และสภาพต้านทานไฟฟ้ามากกว่า แต่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์น้อยกว่าคอนกรีตควบคุม PC ที่อายุ 90 วัน ซึ่งมีค่าคิดเป็นร้อยละ 97 127 94 และ 112 ของคอนกรีตควบคุม PC ตามลำดับ ที่อายุ 28 วัน และคิดเป็นร้อยละ 108 129 136 และ 97 ของคอนกรีตควบคุม PC ที่อายุ 90 วัน ตามลำดับ

4.4 คอนกรีต 40FA มีกำลังอัดมากกว่ากำลังอัดเป้าหมาย และมีกำลังอัดน้อยกว่าเล็กน้อย ความพรุนและสภาพต้านทานไฟฟ้ามากกว่า แต่สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์น้อยกว่าของคอนกรีตควบคุม PC ที่อายุ 90 วัน และมีค่าคิดเป็นร้อยละ 89 132 133 และ 97 ของคอนกรีตควบคุม PC ตามลำดับ ที่อายุ 28 วัน และคิดเป็นร้อยละ 96 130 244 และ 53 ของคอนกรีตควบคุม PC ตามลำดับ ที่อายุ 90 วัน

4.5 คอนกรีต 60FA มีค่ากำลังอัดมากกว่ากำลังอัดเป้าหมายเล็กน้อย และมีกำลังอัดน้อยกว่า ความพรุนและสภาพต้านทานไฟฟ้ามักกว่า แต่สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์น้อยกว่าของคอนกรีตควบคุม PC ที่อายุ 90 วัน ซึ่งมีค่าคิดเป็นร้อยละ 78 156 127 และ 91 ของคอนกรีตควบคุม PC ตามลำดับ ที่อายุ 28 วัน และคิดเป็นร้อยละ 94 142 329 และ 25 ของคอนกรีตควบคุม PC ตามลำดับ ที่อายุ 90 วัน

#### กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอแสดงความขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น สำหรับทุนอุดหนุนการค้นคว้าและวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ และบริษัท ชิก้า (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สาร ViConcrete

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] วีระ หอสกุลไท, *โครงสร้างไมโครคอนกรีตและการกักกรองของเหล็กเสริมในคอนกรีต*, กรุงเทพมหานคร, 2561.
- [2] Chen, H.J., Yen, T., Chen, K.H., Use of building rubbles as recycled aggregates. *Cement and concrete Research*, 2003, 33 (1), pp. 125-132
- [3] Xiao, J., Lia, J., Zhang C., Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and concrete Research*, 2005, 35 (6), pp. 1187-1194.
- [4] Berndt, M.L., Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 2009, 23 (7), pp. 2606-2613.
- [5] Ryu, J.S., Improvement on strength and impermeability of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Journal of Materials Science Letters*, 2002, 21 (20), pp. 1565-1567.
- [6] Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A.R., Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete. *Magazine of Concrete Research*, 2006, 58 (10), pp. 683-690.
- [7] Wang, H., Wang, J., Sun, X., Jin, W., Improving performance of recycled aggregate concrete with superfine pozzolanic powders. *Journal of Central South University*, 2013, 20 (12), pp. 3715-3722.
- [8] Kurda, R., de Brito, J., Silvestre, J.D., Water absorption and electrical resistivity of concrete with recycled concrete aggregates and fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 95, pp. 169-182.
- [9] Chindapasirt, P., Jaturapitakkul, C., Sinsiri, T., Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 2005, 27 (4), pp. 425-8.
- [10] Chindapasirt, P., Chotithanorm, C., Cao, H. T., Sirivivatnanon, V., Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete. *Construction and Building Materials*, 2007, 21 (2), pp. 356-371.
- [11] Horsakulthai, V., Paopongpaiboon, K., Strength, chloride permeability and corrosion of course fly ash concrete with Bagasse- Rice Husk-Wood Ash additive. *American Journal of Applied Sciences*, 2013, 10 (3), pp. 239-246.
- [12] Poon, C.S., Wong, Y.L., Lam L., The influence of different curing conditions on the pore structure and related properties of fly ash cement pastes and mortars. *Construction and Building Materials*, 1997, 11 (7-8), pp. 383-93.
- [13] Kou, S. C., Poon, C. S., Compressive strength, pore size distribution and chloride-ion penetration of recycled aggregate concrete incorporation class-F fly ash. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 2006, 21 (4), pp. 130-136.
- [14] Kou, S. C., Poon, C. S., Chan, D., Influence of fly ash as a cement addition on the hardened properties of recycled aggregate concrete. *Materials and Structures*, 2008, 41 (7), pp. 1191-1201.

- [15] Ouchi, M., Self-compacting concrete development, applications and investigations. *Proceedings of the Nordic Concrete Research Meeting in Reykjavik*, Oslo. Norwegian Concrete Association, 1999, pp.29-34.
- [16] Okamura, H., Ouchi, M., Self-compacting concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2003, 1 (1), pp. 5-15.
- [17] American Society for Testing and Materials. ASTM C150/ C150M: 2012. *Standard specification for Portland cement*. West Conshohocken. Pennsylvania: ASTM, 2012
- [18] American Society for Testing and Materials. ASTM C618 – 12, *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. West Conshohocken. Pennsylvania: ASTM, 2012.
- [19] American Society for Testing and Materials. ASTM C33/C33M – 12, *Standard specification for Concrete Aggregates*. West Conshohocken. Pennsylvania: ASTM, 2012.
- [20] Specification and Guides for Self-Compacting Concrete. EFNARC: 2002. *Association House. 99 West Street. Farnham. Surrey GU9 7EN. United Kingdom*: EFNARC, 2002
- [21] American Society for Testing and Materials. ASTM C 39/C 39M: 2018. *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimen*. West Conshohocken. Pennsylvania: ASTM, 2018
- [22] American Society for Testing and Materials. ASTM C642: 2006. *Standard specification for density, absorption, and voids in hardened concrete*. West Conshohocken. Pennsylvania: ASTM, 2006
- [23] NT build 492 : 1999. *Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments*. Nordtest, Espoo, Finland, 1999
- [24] Poon, C.S., Shui, Z.H., Lam, L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construct Build Mater*, 2004, 18(9), p.p. 461–468.
- [25] Tam, V.W.Y., Gao, X.F., Tam, C.M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cem Concr Res*, 2005, 35(6), p.p. 1195–1203.
- [26] Scrivener, K. L., Juilland, P., Monteiro, P. J. Advances in understanding hydration of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 2015, 78(6), pp. 38-56.
- [27] Jiang, L., Guan, Y. Pore structure and its effect on strength of high-volume fly ash paste. *Cem Concr Res*, 1999, 29 (4), pp. 631-633.
- [28] Pandey, S.P., Sharma, R.L. The influence of mineral additives on the strength and porosity of OPC mortar. *Cem Concr Res*, 2000, 30(1), pp. 19–23.
- [29] Chindapasirt, P., Jaturapitakkul, C., Sinsiri, T. Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cem Concr Compos*, 2005, 27(2), pp. 425–428.
- [30] Xiao, J., Li, W., Fan, Y., Huang, X. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011). *Constr Build Mater*, 2012, 31, pp. 364–383.

