กำลังอัดและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน และใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียด

ศิระ อาทมาท[1] และทวีชัย สำราญวานิช[2*]
yokkyokk123@gmail.com[1], twc@buu.ac.th[2*]

[1-2*] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

Received	:	1-Nov-2018
Revised	:	27-May-2019
Accepted	:	25-Jun-2019

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งศึกษากำลังอัด ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนแทนที่วัสดุประสาน และใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียด ที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และ 0.55 อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 0.30 และ 0.50 อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยผงหินปูนเท่ากับ 0.10 ใช้อัตราส่วนการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาเท่ากับ 0.10 และ 0.30 บ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำประปาจนกระทั่งอายุครบ 28 วัน 56 วัน และ 91 วัน จึงทำการทดสอบกำลังอัดและการแทรกซึมคลอไรด์ จากการทดสอบกำลังพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 มีกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าก้นเตาและคอนคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ 30 ด้านการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์นั้น คอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 30 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงที่สุด และเมื่อดูผลในระยะยาว คอนกรีตที่อายุ 510 วัน ทดสอบด้วยความต้านทานไฟฟ้า พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50 ร่วมกับเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 มีความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตดีที่สุด

คำสำคัญ: คอนกรีต คลอไรด์ เถ้าก้นเตา เถ้าลอย ผงหินปูน

Compressive Strength and Chloride Penetration Resistance of Concrete with Fly Ash, Limestone Powder and Partial Replacement of Fine Aggregate by Bottom Ash

Sira Arttamart[1] and Taweechai Sumranwanich[2*]
yokkyokk123@gmail.com[1], twc@buu.ac.th[2*]

[1-2*] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burahpa University

Received : 1-Nov-2018
Revised : 27-May-2019
Accepted : 25-Jun-2019

Abstract

The paper aims to study compressive strength, chloride penetration resistance and electrical resistivity of concrete with fly ash and bottom ash as partial replacement of fine aggregate. Ordinary Portland cement was used as a main cementitious material. The water to binder ratio was employed at 0.45 and 0.55. The fly ash to binder ratio was kept at 0.30 and 0.50. The limestone powder to binder ratio was kept 0.10. Fine aggregate was partially replaced by bottom ash at the replacement ratio of 0.10 and 0.30. Specimens were cured in tap water until 28, 56 and 91 days, then compressive strength and chloride penetration were performed. From the experimental results, it was found that concrete with bottom ash replacement ratio of 0.10 has higher compressive strength than concrete without bottom ash and concrete with bottom ash replacement of 0.30. Chloride penetration test concrete with bottom ash replacement of 0.10 and fly ash to binder ratio of 0.30 has the highest chloride penetration resistance. Moreover, concrete with 50% of cement replacement by fly ash and 10% of fine aggregate replacement by bottom ash has the best electrical resistivity at 510 days..

Keywords: Concrete, Chloride, Bottom ash, Fly ash, Limestone powder

1. บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมทางทะเลจำนวนมากเกิดการเสื่อมสภาพและทรุดโทรมเนื่องจากเหล็กเสริมภายในของโครงสร้างเกิดสนิมอันเป็นผลมาจากเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเลแทรกซึมเข้าไปสะสมในคอนกรีตที่ตำแหน่งผิวเหล็กเสริม มากเกินกว่าระดับปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต มีงานวิจัยศึกษาเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวให้อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้สภาพแวดล้อมทางทะเลให้ยาวนานขึ้น โดยมุ่งปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตด้วยการใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อเพิ่มความทึบแน่นของคอนกรีตให้มีแข็งแรงมากขึ้น [1]

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการใช้เถ้าลอย (Fly ash) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นวัสดุประสานหลักบางส่วนเพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต โดยที่เถ้าลอยนั้นมีองค์ประกอบหลักคือ อลูมินา และซิลิกา ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานนิค (Pozzolanic reaction) กับสารประกอบแคลเซียมไอดรอกไซด์ ส่งผลให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตมากขึ้น รวมทั้งได้นำผลพลอยได้อีกชนิดหนึ่งจากการเผาถ่านหินมาใช้คือ เถ้าก้นเตา (Bottom ash) ซึ่งมีอนุภาคที่ใช้ใกล้เคียงกับมวลรวมละเอียด และมีความพรุน (Porosity) ที่สูง จึงสามารถเก็บกักน้ำ (Water retainability) ไว้ภายในได้ ทำให้เถ้าก้นเตาสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุบ่มภายใน (Internal curing materials) เนื้อของคอนกรีตได้ โดยที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดเพื่อเพิ่มความสามารถในบ่มภายในคอนกรีต ซึ่งจากผลการศึกษา [2,3] ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลจริงของไทยพบว่า เมื่อใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 โดยปริมาตรของทราย ทำให้คอนกรีตมีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำลง อีกทั้งยังทำให้คอนกรีตมีกำลังที่สูงขึ้น

อีกทั้งงานวิจัยนี้ยังนำผงหินปูน (Limestone powder) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการย่อยหินเพื่อผลิตมวลรวมหยาบมาใช้ โดยผงหินปูนนั้นสามารถเป็นวัสดุเติมแทรกภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น [4]

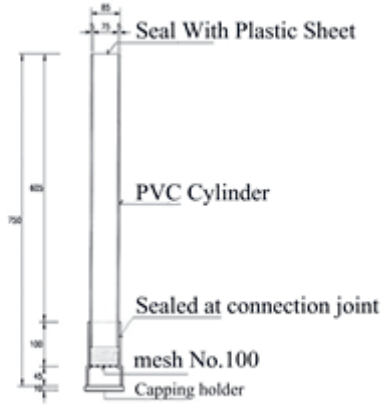
2. รายละเอียดวิธีการศึกษา

2.1 วัสดุและส่วนผสมคอนกรีต

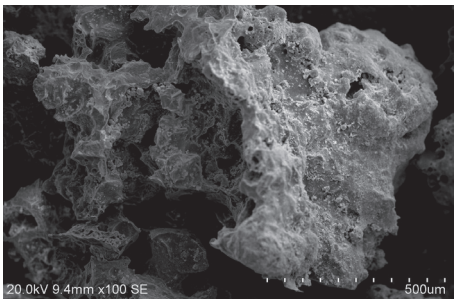
ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักของคอนกรีต ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะแทนที่วัสดุปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนัก และผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 ใช้เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจำนวน 2 ชนิดคือ BA และ BB ซึ่งมีความสามารถเก็บกักน้ำร้อยละ 37.77 และ 30.31 ตามลำดับ แทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 0 10 และ 30 โดยปริมาตร ตารางที่ 1 แสดงสมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ผงหินปูนและเถ้าก้นเตา ตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และ 0.55 ทำการถอดแบบเมื่อคอนกรีตมีอายุครบ 1 วัน หลังจากนั้นนำคอนกรีตบ่มน้ำเป็นระยะเวลาอีก 28 56 และ 91 วัน

อย่างไรก็ตามวิธีการทดสอบการดูดซึมน้ำ (Absorption) ของมวลรวมละเอียด เช่น ทราย

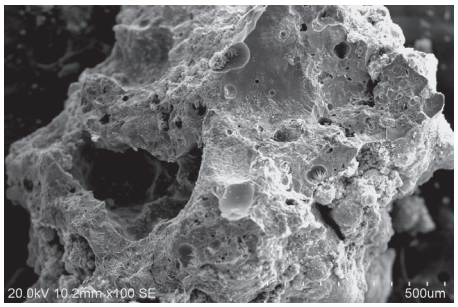
ไม่สามารถใช้กับเถ้าก้นเตาได้ เนื่องจากเถ้าก้นเตามีความพรุนสูงและมีแรงเสียดทานพื้นผิวสูงแม้ในสภาวะที่แห้ง ดังนั้นจึงใช้ค่าความสามารถเก็บกักน้ำ (Water retainability) แทนค่าการดูดซึม โดยความสามารถเก็บกักน้ำหมายถึงปริมาณน้ำที่เติมเต็มช่องว่างในวัสดุพรุนรวมทั้งน้ำที่ถูกยึดจับไว้ที่ร่องพื้นผิวของวัสดุพรุนภายใต้แรงโน้มถ่วง โดยในการทดสอบหาค่าความสามารถเก็บกักน้ำและความถ่วงจำเพาะของเถ้าก้นเตา ทดสอบตามวิธีของ Kasemchaisiri R.และTangtermsirikul S. [5] โดยรูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์ในการทดสอบความสามารถในการเก็บกักน้ำของเถ้าก้นเตา และรูปที่ 2 แสดงอนุภาคของเถ้าก้นเตา



รูปที่ 1 อุปกรณ์ทดสอบความสามารถเก็บกักน้ำของเถ้าก้นเตา



(ก) เถ้าก้นเตาชนิด A



(ข) เถ้าก้นเตาชนิด BB

รูปที่ 2 อนุภาคของเถ้าก้นเตา

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 เถ้าลอย ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา

Chemical composition (%)	OPC	Bottom ash (BA)	Bottom ash (BB)	Fly ash	Limestone powder
SiO_2	19.51	36.29%	30.13%	39.4	0.26
CaO	65.38	20.84%	27.78%	19.19	55.93
Al_2O_3	4.97	19.96%	17.84%	17.93	<0.01
Fe_2O_3	3.78	14.56%	15.99%	12.92	0.07
MgO	1.08	1.96%	2.19%	2.99	0.55
SO_3	2.16	0.96%	1.92%	3.03	<0.01
LOI	2.27	1.36%	0.20%	0.17	43.17
Physical properties					
Specific gravity	3.15	1.78	1.94	2.29	2.69
water retainability	-	37.77	30.31	-	-

2.2 รายละเอียดวิธีการทดลอง

2.2.1 กำลังอัดของคอนกรีต ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 ซม.3 แล้วบ่มน้ำจนอายุครบ 28 56 และ 91 วัน จึงทดสอบหากำลังอัดของคอนกรีต

2.2.2 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม.บ่ม

ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำครบ 28 56 และ 91 วัน ก่อนทำการตัดตัวอย่างทดสอบให้มีความหนาเท่ากับ 5 ซม. จากนั้นทำการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid chloride penetration test, RCPT) ตามมาตรฐาน ASTM C1202 [6] ด้วยอุปกรณ์ทดสอบ ซึ่งด้านหนึ่งของเซลล์เติมสารละลาย NaCl ความเข้มข้นร้อยละ 3.0 อีกด้านของเซลล์เติมสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.30M ทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต แสดงผลเป็นปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต (Charge passed) เป็นคูลอมบ์ (Coulomb) ซึ่งตามเกณฑ์คุณภาพของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1202 ระบุว่าค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านมีค่ามากกว่า 4,000 คูลอมบ์ ถือว่าการแทรกซึมคลอไรด์ผ่านคอนกรีตมีค่าสูง ถ้าอยู่ในช่วง 2,000-4,000 คูลอมบ์ อยู่ในระดับปานกลาง และ 1,000-2,000 คูลอมบ์ อยู่ในระดับที่ต่ำ

2.2.3 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ของคอนกรีต

ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. บ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำครบ 28 วัน จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM C1556 ความเข้มข้นร้อยละ 5 [7] เป็นระยะเวลา 28 56 และ 91 วัน เมื่อครบกำหนดแล้ว จึงนำตัวอย่างขึ้นมาตัดเป็นชิ้น แต่ละชิ้นมีความหนา 1 ซม. โดยตัดทั้งหมด 5 ชั้น แล้วนำตัวอย่างคอนกรีตมาบดเป็นผงให้ละเอียด จากนั้นนำผงตัวอย่างมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 แล้วนำมาทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ด้วยเครื่อง Potentiometric titration เพื่อหาค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride content) ของคอนกรีต ที่แต่ละระยะจากผิวหน้าของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C1152 [8] นำค่าที่ได้มาหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (Chloride diffusion coefficient) ดังสมการที่ 1

$$C(x,t) = C_s\left[1 - erf\left(\frac{x}{2\sqrt{D_a t}}\right)\right] \qquad (1)$$

C(x, t) คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ระยะความลึก x จากผิวหน้า ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล t (% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)

Cs คือ ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)

Da คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต (ซม.2/ปี)

x คือ ระยะทางจากผิวหน้าคอนกรีต (ซม.)

t คือ ระยะเวลาที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล (ปี)

2.2.4 ความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต

ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดความสูง 20 ซม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. บ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำที่อายุ 510 วัน เพื่อทราบถึงความต้านทานของคอนกรีต โดยเป็นการวัดเชิงกายภาพ ทำให้วัดได้ง่ายและใช้เวลาสั้น

2.2.5 ความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต

หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกความสูง 20 ซม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. และบ่มตัวอย่างในน้ำที่อายุ 510 วัน

ตารางที่ 2 รายละเอียดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้

Mix id.	Mix proportion of concrete (kg/m^3)						
	Binder			Bottom ash	Water	Sand (SSD)	Rock (SSD)
	OPC	Fly ash	Lime stone powder				
I55	388	-	-	-	213	742	995
I55BA10	388	-	-	51	213	668	996
I55BA30	388	-	-	153	214	519	995
I55F30	272	116	-	-	213	732	957
I55F30BA10	272	116	-	50	213	653	974
I55F30BA30	272	116	-	172	214	512	967
I55F30BB10	272	116	-	55	214	653	974
I55F30BB30	272	116	-	164	213	508	974
I55F50	174	174	-	-	214	720	952
I55F50BA10	174	174	-	57	214	643	959
I55F50BA30	174	174	-	170	214	500	959
I55F20L10	271	78	39	-	213	728	977
I55F20L10BA10	271	78	39	50	213	655	977
I55-F20L10BA30	271	78	39	151	213	510	977
I55F40L10	194	155	39	-	213	717	963
I55F40L10BA10	194	155	39	49	213	646	963
I55F40L10BA30	194	155	39	148	213	502	963
I45	439	-	-	-	197	742	995
I45BA10	439	-	-	51	197	668	995
I45BA30	439	-	-	154	197	519	995

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1กำลังอัดของคอนกรีต

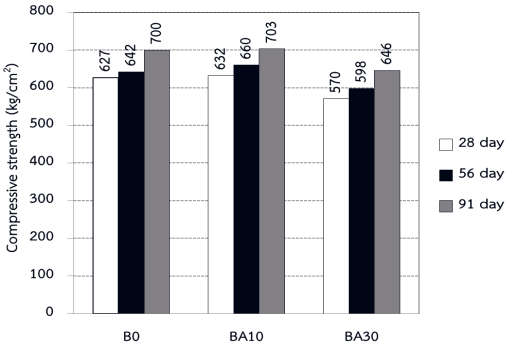
จากผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณต่างๆ ให้ผลดังรูปที่ 3(ก) พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ให้ค่ากำลังอัดที่สูงที่สุดตั้งแต่ในช่วงอายุ 28วัน ไปจนถึงอายุ 91 วัน

รูปที่ 3(ข) แสดงถึง คอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียด พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ให้กำลังอัดสูงที่สุด โดยเมื่อเปรียบเทียบคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 ร่วมกับการใช้เถ้าก้นเตา ดังรูปที่ 4(ก) แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ให้กำลังสูงที่สุด เนื่องจากภายในขอเถ้าก้นเตาสามารถที่จะเก็บกักน้ำไว้ได้ ทำให้เป็นวัสดุบ่มภายในที่ดี อีกทั้งภายในโพรงช่องว่างของเถ้าก้นเตามีเถ้าลอยแทรกตัวอยู่ภายใน ซึ่งเถ้าลอยนี้สามารถที่จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ อีกทั้งเมื่อได้เปรียบเทียบการใช้เถ้าก้นเตาทั้ง 2 ชนิด ดังแสดงในรูปที่4(ก) พบว่าการใช้เถ้าก้นเตาชนิด BA จะให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่า

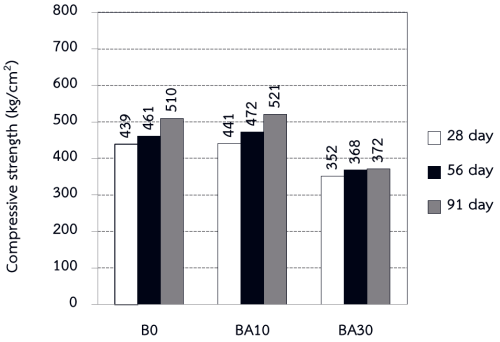
รูปที่ 4(ข) เปรียบคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 50 ร่วมกับการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าที่ต่ำ เนื่องจาก

การนำเถ้าลอยมาทดแทนปริมาณปูน ส่งผลให้ปูนซีเมนต์ในเนื้อคอนกรีตลดลง ส่งผลให้ CH ซึ่งเป็นผลผลิตที่ใช้ในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิคของเถ้าลอยลดลง ทำให้ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานิค เช่น C-A-H และ C-S-H ลดลงตามไปด้วย [8]

รูปที่ 5(ก) แสดงผลกำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ผงหินปูนร้อยละ 10 และเถ้าลอยร้อยละ 20 แทนที่วัสดุประสาน ร่วมกับการใช้เถ้าก้นเตาบางส่วนในมวลรวมละเอียด ซึ่งผลบ่งบอกได้ว่าการใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ10 ร่วมเข้าไปด้วยนั้นจะให้ผลกำลังอัดสูงที่สุดทั้งในช่วงอายุต้นและอายุปลาย เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าก้นเตาและคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 รูปที่ 5(ข) แสดงค่าผลกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ผงหินปูนร้อยละ 10 และเถ้าลอยร้อยละ 40 จะให้ค่ากำลังอัดที่ไม่สูงมาก เนื่องจากการแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์มากเกินไป

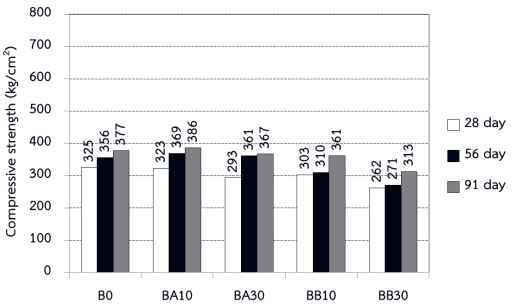


(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45

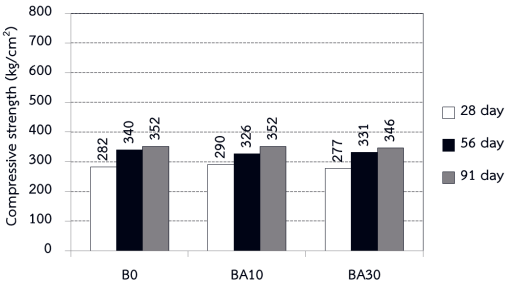


(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

รูปที่ 3 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน

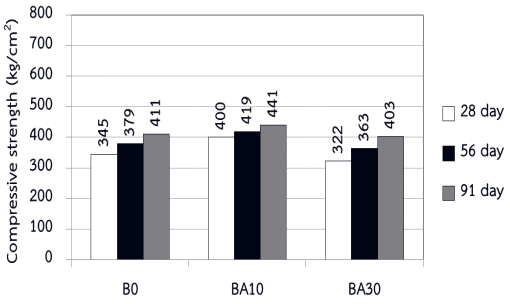


(ก) คอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 30

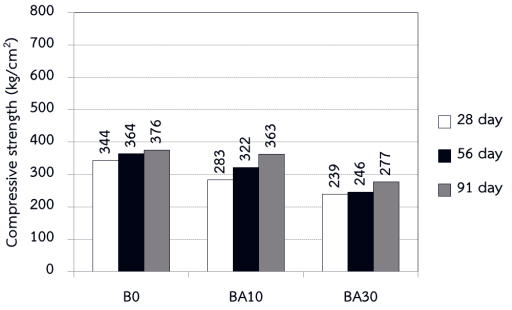


(ข) คอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 50

รูปที่ 4 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดและเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน



(ก) เถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10



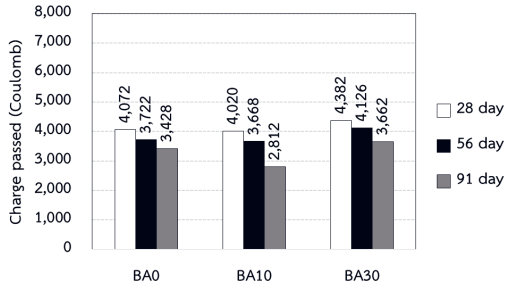
(ข) เถ้าลอยร้อยละ 40ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

รูปที่ 5 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดและใช้เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสาน

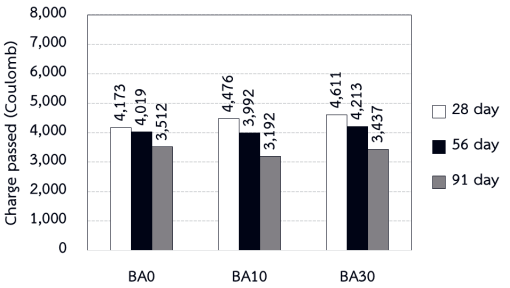
3.2 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต

จากผลการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตนั้นแสดงเป็นค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตมีหน่วยวัดเป็นคูลอมบ์ โดยรูปที่ 6(ก) แสดงถึงคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ให้ค่าปริมาณประจุไฟฟ้าต่ำที่ไหลผ่านคอนกรีตต่ำที่สุด แต่ค่านั้นสูงขึ้นหากใช้เถ้าก้นเตาในปริมาณที่มากถึงร้อยละ 30 เนื่องจากภายในของเถ้าก้นเตานั้นเป็นโพรง หากใส่ในปริมาณที่มากเกินไปอาจทำให้คอนกรีตภายในมีความพรุนมากขึ้น และรูปที่ 6(ข)แสดงถึงผลการทดสอบปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 กล่าวได้ว่าการใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ในการแทนที่มวลรวมละเอียดนั้นให้ค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตต่ำที่สุดในช่วงอายุ 91 วัน อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 มีค่าต่ำกว่า เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่น้อยลง ทำให้ปริมาณน้ำอิสระภายในของคอนกรีตลดลง ส่งผลให้เกิดโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตต่ำลง ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากยิ่งขึ้น

รูปที่ 7(ก) แสดงถึงคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 แทนที่วัสดุประสาน ร่วมกับเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียด พบว่าการใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 30 ให้ค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตต่ำที่สุด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างเถ้าก้นเตาชนิด BA และชนิด BB นั้น สังเกตได้ว่าในช่วงอายุต้นมีค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านใกล้เคียงกัน แต่เมื่อถึงอายุ 91 วันนั้น ถ้าก้นเตาชนิดชนิดBA มีค่าประจุไฟฟ้าไหลผ่านต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใส่เถ้าลอยร้อยละ 30 และคอนกรีตที่ใส่เถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับเถ้าก้นเตาชนิด BB ร้อยละ 10อีกทั้งยังพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50 ร่วมกับเถ้าก้นเตาในปริมาณต่างๆดังแสดงในรูปที่ 7(ข) พบว่าการใช้เถ้าลอยร้อยละ 50 ร่วมกับเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ให้ค่าปริมาณประจุไฟฟ้าไหลผ่านคอนกรีตดีที่สุด และจากรูปที่ 8(ก) การใช้ถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 10 ให้ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านต่ำที่สุด 10 สามารถเพิ่มความสามารถของคอนกรีต แต่เมื่อนำเถ้าก้นเตามาใช้ในปริมาณร้อยละ 30 ค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตกลับมีค่าที่สูงขึ้น

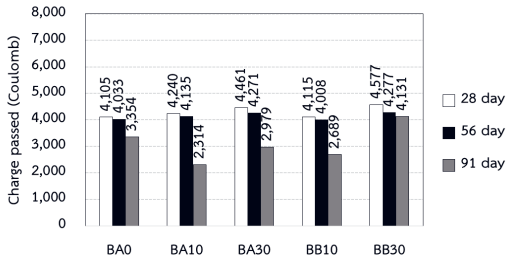


(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45

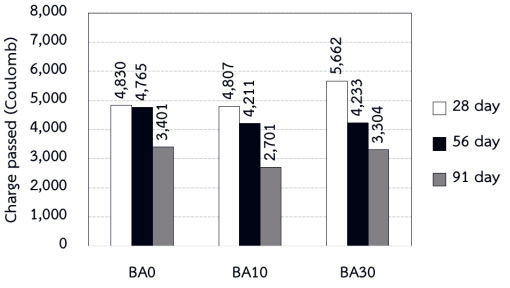


(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

รูปที่ 6 การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียด

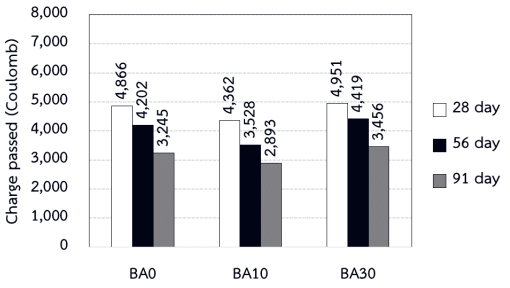


(ก) เถ้าลอยร้อยละ 30



(ข) เถ้าลอยร้อยละ 50

รูปที่ 7 การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดและเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน



รูปที่ 8 การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

3.3 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต

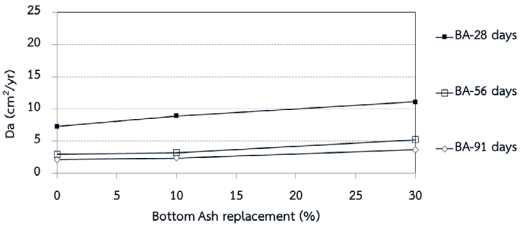
จากผลการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ของคอนกรีตให้ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด เพื่อนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (Da) ซึ่งคอนกรีตมีอายุที่เพิ่มขึ้นสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์นั้นมีค่าที่ต่ำลง เนื่องจากเนื้อของคอนกรีตสามารถเกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์มากขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีเนื้อภายในที่แน่นขึ้นและโพรงช่องว่างภายในลดลง จากรูปที่ (9)ก แสดงถึงคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ร่วมกับเถ้าก้นเตาในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์จะต่ำที่สุด และรูปที่ 9(ข)แสดงถึงคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ร่วมกับเถ้าก้นเตาในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าการใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ต่ำที่สุดเช่นกัน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และ 0.55 สามารถกล่าวได้ว่าการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์มีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณน้ำอิสระที่ลดลง

ช่วยให้คอนกรีตทีโพรงช่องว่างลดลง ส่งผลให้คอนกรีตทึบแน่นมากยิ่งขึ้น

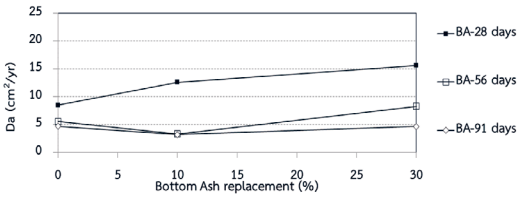
รูปที่ 10(ก) แสดงสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับเถ้าก้นเตาชนิดBAและBB พบว่าคอนกรีตอายุที่ 91 โดยใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 30 มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับค่าปริมาณประจุฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต อีกทั้งเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าระหว่างเถ้าก้นเตาชนิด BA และเถ้าก้นเตาชนิด BB แล้ว การใช้เถ้าก้นเตาชนิด BA มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ต่ำกว่าชนิด BB เนื่องจากความสามารถในการเก็บกักน้ำของเถ้าก้นเตาชนิดBA มีสูงกว่าส่งผลให้เมื่อเวลาผ่านไปปูนซีเมนต์สามารถดึงน้ำภายในเถ้าก้นเตาไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้มาก ทำให้คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาชนิด BA ทึบแน่นมากกว่า

รูปที่ 10(ข) การใช้เถ้าลอยร้อยละ 50 แทนที่วัสดุประสานร่วมกับเถ้าก้นเตาที่แทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 กล่าวได้ว่าการใช้เถ้าลอยร้อยละ50 ร่วมกับเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ส่งผลให้อายุ 91 วันของคอนกรีต มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าก้นเตาและคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30

รูปที่ 11(ก) แสดงสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสานร่วมกับเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์จะต่ำที่สุด และรูปที่ 11(ข) เป็นการใช้เถ้าลอยร้อยละ 40 และผงหินปูนร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าก้นเตา โดยค่าที่ดีที่สุดคือการใช้ร่วมกับเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ที่อายุ 91 วัน ซึ่งการใช้เถ้าลอยมากเกินไป ส่งผลให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง เมื่อปูนซีเมนต์ลดลงผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้แก่ Ca(OH)2 ลดลงเช่นกันส่งผลให้ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานิคลดน้อยลงตามไปด้วยเช่นกัน [9]

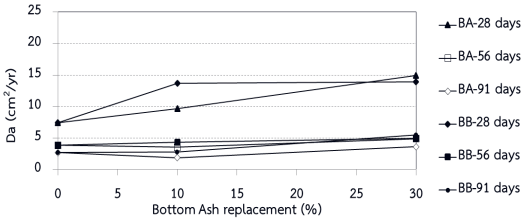


(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45

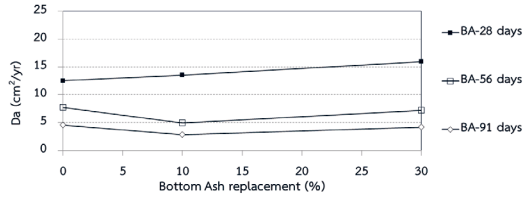


(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

รูปที่ 9 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน

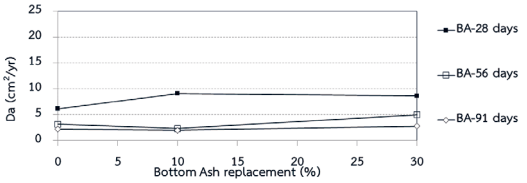


(ก) เถ้าลอยร้อยละ 30

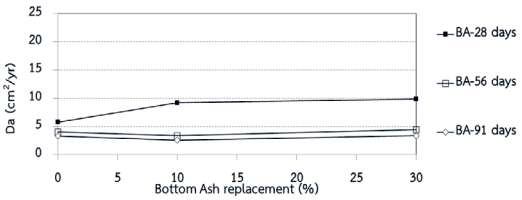


(ข) เถ้าลอยร้อยละ 50

รูปที่ 10 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดและใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน



(ก) เถ้าลอยร้อยละ20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

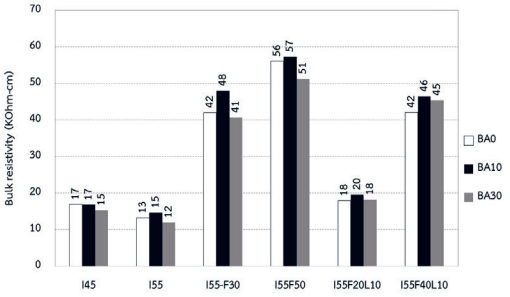


(ข) เถ้าลอยร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

รูปที่ 11 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดและใช้เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสาน

3.4 ความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต

การทดสอบค่าความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีตทดสอบที่อายุ 510 วัน โดยเมื่อพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานดังรูปที่ 12 แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่0.45 มีค่าความต้านทานดีกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 อันเนื่องมาจากการลดน้ำที่ใช้นั้นจะลดปริมาณน้ำอิสระ ส่งผลให้คอนกรีตมีความพรุนลดน้อยลง และเปรียบเทียบคอนกรีตที่ทั้งหมดคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50 ให้ค่าความต้านไฟฟ้าของคอนกรีตดีที่สุดเนื่องจากเมื่ออายุถึง 510 วัน คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยมากสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้มาก ทำให้เนื้อคอนกรีตมีความแน่น โดยให้ผลไปในแนวโน้มเดียวกับผลของปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตและสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต คือเมื่อผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ส่งผลให้คอนกรีตมีความต้านทานดีที่สุด

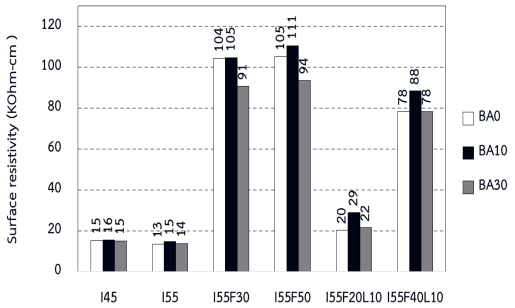


รูปที่ 12 ความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต

3.5 ความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต

การทดสอบค่าความต้านทานที่ผิวของคอนกรีตทดสอบที่อายุ 510 วัน พบว่าเมื่อใช้เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ ค่าความต้านทานที่ผิวของคอนกรีตมากขึ้น และดีที่สุดเมื่อใช้ร่วมกับเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 และการเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 ร่วมกับผงหินปูน ซึ่งการใช้เถ้าลอยร้อยละ 40 ส่งผลให้คอนกรีตมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวได้ดีกว่าและเมื่อใช้ร่วมกับเถ้าก้นเตาที่ร้อยละ 10 เนื่องจากการผสมเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดสามารถเป็นวัสดุบ่ม

ภายในของคอนกรีตได้ และและดีที่สุดเมื่อใช้เถ้าลอยร้อยละ50แทนที่วัสดุประสาน ร่วมกับเถ้าก้นเตาร้อยละแทนที่มวลรวมละเอียด10 มีความสามารถในการต้านทานที่ผิวได้ดีที่สุด



รูปที่ 13 ความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต

4.สรุปผล

1. คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงที่สุดคือ คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่ผสมเถ้าก้นเตาชนิด BA ร้อยละ 10 เนื่องจากเถ้าก้นเตา BA มีความสามารถเก็บกักน้ำได้สูง ทำให้เป็นวัสดุบ่มภายในที่ดี

2. คอนกรีตที่มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีที่สุดคือ คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 แทนที่วัสดุประสาน ร่วมกับเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 เนื่องจากการใช้เถ้าลอยนั้นสามารถ
เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ทำให้คอนกรีตทึบแน่นมากยิ่งขึ้น อีกทั้งเมื่อผสมเถ้าก้นเตาลงไปสามารถเป็นวัสดุบ่มภายในคอนกรีตได้ ทำให้ภายในคอนกรีตเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

3. คอนกรีตที่ใช้ผงหินปูนร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 40 มีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี และดีที่สุดเมื่อใช้ร่วมกับเถ้าก้นเตาร้อยละ 10

4. ความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดและความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 50 ร่วมกับเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 มีค่าความต้านทานดีที่สุด เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเกิดได้อย่างสมบูรณ์ อีกทั้งการใช้เถ้าก้นเตาสามารถเป็นวัสดุบ่มภายในได้

5. เมื่อพิจารณาที่อายุ 510 วัน คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 50 ร่วมกับเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 มีความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวและความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดดีที่สุด เนื่องจากระยะเวลาที่นานคอนกรีตภายในที่ผสมเถ้าลอยสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้มาก อีกทั้งเมื่อผสมเถ้าก้นเตาที่เป็นวัสดุบ่มภายใน ทำให้ปฏิกิริยาภายในเกิดได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (Construction & Maintenance Technology Research Center, CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สำหรับผู้แต่งที่ 1 และหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา (BCONTEC) มหาวิทยาลัยบูรพา

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Poon C.S, Kon S.C, Lam L. Compressive strength chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. Construction and building material.2006,20:858-865.

[2] Kunmongkol U. Rapid chloride penetration resistance and chloride threshold content of concrete of concrete containing fly ash and limestone powder and using bottom ash as partial replacement of fine aggregate

[master's thesis]. Chonburi: Burapha university; 2013. (in Thai)
[3] Namchan S. The application of bottom ash as partially sand replacement for concrete under marine environment. Annual concrete conference 11th. 2016 Feb 17-19; Thailand. Nakhon Ratchasima ; 2016 (in Thai)
[4] Hornain H, Marchand J, Duhot V, Moranville M. Diffusion of chloride ions in limestone filler blended cement pastes and motars. Cement and concrete research. 1995 Dec;25(8): 1667-1678.
[5] Kasemchaisiri R, Tangtermsirikul S. A method to determine water retainability of porous fine aggregate for design and quality control of fresh concrete. Construction and building Materials. 2007; 21: 1322-1334.
[6] ASTM C1202, Standard test method for electrical indication concrete's ability to resist chloride ion penetration. 2004. Vol 4.02
[7] ASTM C1556, Standard test method for determining the apparent chloride diffusion coefficient of cementitious mixtures by bulk diffusion. 2004. Vol 4.02
[8] ASTM C1152, Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete. 2004. Vol 4.02
[9] Chindaprasirt P, Jaturapitakkul C and Sinsiri T. Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste. Construction and Building Materials. 2007; 21: 1534-1541.