

ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด

The Resistance to Chloride Penetration of Ground Bottom Ash Concrete

สมชาย อินทะตา และ เรืองรุชด์ ชีระโรจน์

Somchai Inthata and Raungrut Cheerarot

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

โทร 081-5559481 โทรสาร 043-754316 E-mail: raungrut@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดที่กัลังอัดต่าง ๆ โดยการออกแบบกัลังอัดของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 200, 300 และ 400 กก./ชม.² สำหรับเถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ และนำมาปรับปรุงคุณภาพโดยการบดให้มีขนาดอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ในปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำเถ้าก้นเตาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เพื่อทดสอบกัลังอัดและความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ที่อายุ 28, 60 และ 90 วัน ในการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ใช้วิธีวัดการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าในหน่วยของคูลอมบ์ตามมาตรฐาน ASTM C 1202 และวิธีการแซ่แบบจุ่มทั้งหมดในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3 แล้วฉีดพ่นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท 0.1 N เพื่อเปรียบเทียบสีสำหรับหาความลึกในการแทรกซึมของคลอไรด์ จากผลการทดลองการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งสองวิธี พบว่าความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ขึ้นอยู่กับปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียด และกัลังอัดที่ออกแบบ โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 40 ของทุกกัลังอัดที่ออกแบบ มีความสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์สูงสุด และที่ออกแบบกัลังอัดต่างกันพบว่าคอนกรีตที่ออกแบบกัลังอัดสูงกว่ามีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่า ดังนั้นสรุปได้ว่าเถ้าก้นเตาบดละเอียดสามารถใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตได้

Abstract

This research was to study chloride penetration resistance in ground bottom ash concretes. The mix proportion of control concrete was designed compressive strength at 28 days of 200, 300, and 400 ksc. Bottom ash from Mae Moh power plant was developed a quality by grinding until the particle size retaining on sieve No. 325 less than 5% by weight. Then ground bottom ash was used to replace Portland cement type I at the rate of 0, 10, 20, 30, and 40% by weight of

cementitious material. Compressive strength and resistance to chloride penetration of concrete were determined at the ages of 28, 60, and 90 days. The chloride penetration was evaluated by using measurement of the total charge passed in Coulombs and it was conducted in accordance with ASTM C 1202. The full immersion test in 3% NaCl solution was used and the chloride penetration fronts into concrete specimens were determined using 0.1 N silver nitrate indicator to compare different color. Experimental results from both methods indicated that the resistance to chloride penetration depended on designed strength and percent replacement of ground bottom ash. At all designed strengths, concretes with the 40% replacement of ground bottom ash were the highest chloride penetration resistance. At the different strength, it was found that concrete which designed the higher strength gave the better resistance to chloride penetration. The results confirmed that ground bottom ash could be used for chloride penetration resistance in concretes.

1. บทนำ

ความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติหนึ่งที่มีผลต่อความคงทนของคอนกรีต โดยโครงสร้างภายในคอนกรีตซึ่งมีขนาดเล็กมาก ประกอบด้วยเนื้อคอนกรีตและรูพรุน ที่มีการจัดเรียงและเชื่อมต่อกัน หากคอนกรีตสัมผัสกับสารละลายคลอไรด์ คลอไรด์จะแทรกซึมผ่านทางโพรงน้ำที่เชื่อมต่อกันได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นตัวนำทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม และเป็นสาเหตุที่สำคัญทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสื่อมสภาพลง ดังนั้นความต้านทานการแทรกซึมของไอออนคลอไรด์ของคอนกรีตเป็นตัวแปรที่สำคัญ ซึ่งมีอิทธิพลต่อความคงทนของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีต โดยแหล่งที่มาของคลอไรด์สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ คลอไรด์จากส่วนผสมคอนกรีต เช่น มวลรวม น้ำ สารผสมเพิ่มที่มีคลอไรด์ผสมอยู่ และคลอไรด์จากสิ่งแวดล้อมที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีต เช่น โครงสร้างที่ตั้งอยู่ในบริเวณทะเล บริเวณดินเค็ม หรือบริเวณโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร [1-2]

จากอดีตที่ผ่านมานักวิจัยมีความเชื่อว่าคลอไรด์เมื่ออยู่ในคอนกรีต

จะถูกจับยึดไว้ที่ซีเมนต์เพสต์ทั้งทางกายภาพ (ซีเมนต์เจล) และทางเคมี โดยไม่เป็นอันตรายต่อเหล็กเสริมตรงเท่าที่ปริมาณคลอไรด์ไม่เกินร้อยละ 0.40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน แต่ในปัจจุบันมีผลการทดลองจำนวนมาก แสดงให้เห็นว่าคลอไรด์ที่ถูกจับยึดไว้จะถูกปล่อยออกมาเมื่อเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน หรือสถานะของน้ำในโพรงเปลี่ยนแปลงไป เช่น ความเป็นกรดต่ำ อุณหภูมิ และความดัน [3] ทั้งนี้คลอไรด์เมื่ออยู่ในคอนกรีตจะมีบางส่วนที่ถูกจับยึดไว้และเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของแคลเซียมคลอไรด์ไฮดรอกไซด์ (Calcium chloroaluminate hydrate) และมีบางส่วนถูกซึมซับโดยไฮดรอกไซด์ของซีเมนต์ ส่วนที่เหลือเรียกว่าไอออนคลอไรด์อิสระ (Free chloride ions) ซึ่งมีบทบาทสำคัญทำให้เกิดสนิมในคอนกรีตเสริมเหล็ก [4] ดังนั้นการลดลงของไอออนคลอไรด์อิสระยิ่งเหลือน้อยเท่าไร ยิ่งเป็นผลดีต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

เป็นที่ทราบกันดีว่าการใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย เถ้าแกลบ ตะกอนเตาถลุงเหล็ก และซิลิกาฟูม มาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ทำให้คุณสมบัติด้านกำลังและด้านความคงทนของคอนกรีตดีขึ้น [5] สำหรับเถ้าก้นเตาเป็นผลพลอยได้จากการเผาไหม้ถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยเถ้าก้นเตามีขนาดอนุภาคที่ใหญ่และมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน พื้นผิวส่วนใหญ่มีลักษณะที่ขรุขระ มีรูพรุนสูง เมื่อนำไปใช้งานคอนกรีตทำให้มีความต้องการน้ำสูง ส่งผลทำให้มีกำลังอัดต่ำลง จึงไม่เป็นที่นิยมในการนำมาใช้งาน ซึ่งถ้าไม่นำมาใช้ประโยชน์ ก็จะกลายเป็นมลภาวะต้องสิ่งแวดล้อม ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในการกำจัดทิ้ง จากงานวิจัยของเรืองรุทธ์และชัย [6] ได้นำเถ้าก้นเตาไปบดจนมีขนาดอนุภาคข้างบนตะแกรง 325 ในปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ แต่งานวิจัยในด้านคุณสมบัติความคงทนของเถ้าก้นเตายังมีไม่มากนัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดเพื่อต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ ซึ่งจะพิจารณาจากการแทรกซึมของคลอไรด์ที่มาจากสิ่งแวดล้อมภายนอก โดยผลของการศึกษาจะเป็นประโยชน์อย่างมาก ที่จะสามารถพัฒนาต่อไปได้อีก อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตปูนซีเมนต์ และอาจจะเป็นวัสดุสำรองที่มีคุณค่าต่อไปในอนาคต

2. การเตรียมวัสดุและการทดลอง

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

2.1.1 ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตามมาตรฐาน มอก. 80-2517

2.1.2 ทราชมะพร้าว มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.73 ค่าความถ่วงจำเพาะรวม 2.64 และร้อยละการดูดซึมเท่ากับ 1.21

2.1.3 หินปูนย่อยขนาดโตสุด 3/4 นิ้ว มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 7.15 ค่าความถ่วงจำเพาะรวม 2.70 และร้อยละการดูดซึม 0.36

2.1.4 เถ้าก้นเตา นำมาจากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง นำมาบดด้วยเครื่องบดแบบตกกระแทกให้มีขนาดอนุภาคข้างบน

ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งใช้เวลาในการบดประมาณ 12 ชั่วโมง โดยเครื่องบดที่ใช้ในการทดลองเป็นเครื่องบดขนาดเล็ก และไม่ได้ออกแบบสำหรับบดวัสดุขนาดเล็กโดยเฉพาะ ดังนั้นจึงใช้เวลาในการบดค่อนข้างนานแต่หากบดด้วยเครื่องบดเฉพาะที่คิดว่าจะใช้เวลาในการบดที่น้อยลง

2.1.5 น้ำประปาในการผสมคอนกรีต และใช้น้ำกลั่น (Distilled water) ในขั้นตอนการทำให้อิ่มตัวด้วยน้ำกับการเตรียมสารละลายในการทดสอบแบบวิธีวัดการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าในหน่วยของคลออมบ์

2.1.6 สารเคมีประกอบด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้นร้อยละ 3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.3 N และสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO₃) 0.1 N

2.2 การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต

คอนกรีตควบคุม (Control concrete, CC) ที่ใช้ในการวิจัยออกแบบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ของ ที่ 200, 300 และ 400 กก./ซม.² ตามวิธี ACI 211.1-91 โดยกำหนดค่าการยุบตัวอยู่ในช่วง 10 - 12 ซม. จากนั้นแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับคอนกรีตควบคุมในแต่ละกำลังอัดที่ออกแบบโดยไม่ควบคุมค่าการยุบตัว ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดมีค่าการยุบตัวที่ใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุมเมื่อมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน [6] อยู่ระหว่าง 0.43-0.80 สำหรับส่วนผสมของคอนกรีตทั้งหมดได้แสดงในตารางที่ 1

2.3 ขั้นตอนการทดสอบ

2.3.1 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 100 x 200 มม. หลังจากหล่อถอดแบบคอนกรีตที่อายุ 1 วัน นำไปบ่มโดยการแช่น้ำ เมื่อครบรอบอายุตามการทดสอบที่อายุ 28, 60 และ 90 วัน จึงนำขึ้นมาทำการหล่อผิวหน้าให้สม่ำเสมอด้วยกัมมะดันตามมาตรฐาน ASTM C 617 และทำการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C 39

2.3.2 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธีการทดสอบวัดการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าในหน่วยของคลออมบ์ หรือการทดสอบคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid Chloride Penetrability Test, RCPT) ตามมาตรฐาน ASTM C 1202 โดยหล่อคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 100 x 200 มม. นำไปบ่มน้ำจนถึง 3 วันก่อนวันครบรอบอายุทดสอบ จากนั้นนำคอนกรีตมาตัดให้มีขนาด 100 x 50 มม. โดยวัดจากกึ่งกลางตำแหน่งของความสูงของตัวอย่างคอนกรีต จากนั้นปล่อยทิ้งไว้ในอากาศ 24 ชั่วโมง จึงเคลือบผิวด้านข้างด้วยอีพอกซีทิ้งไว้ในอากาศอีก 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 1 จึงนำก้อนตัวอย่างไปทำให้อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยนำ

ตัวอย่างไปคู่อากาศออกด้วยปั๊มสุญญากาศ เพื่อให้ระบบโพรงมีเฉพาะอากาศเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยน้ำกลั่นที่ต้มแล้วจากกรวยแก้ว (Separatory funnel) ลงไปในโถแก้ว และเปิดปั๊มสุญญากาศต่ออีก 1 ชั่วโมง แล้วปิดเครื่องและแช่ตัวอย่างไว้ในน้ำกลั่นอีก 16-20 ชั่วโมง ประกอบเซลล์บล็อกปิดหัวท้าย (Cell block end) โดยมีสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) อยู่ที่เซลล์บล็อกหัวลบ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) อยู่ที่เซลล์บล็อกหัวบวก ต่อไฟฟ้ากระแสตรง 60 โวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2 ทำการวัดกระแสไฟฟ้าทุก ๆ 30 นาทีจนกระทั่งครบ 6 ชั่วโมง [7]



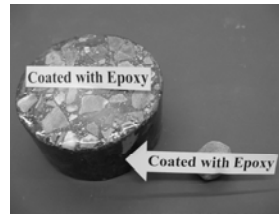
รูปที่ 1 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตในการทดสอบ RCPT



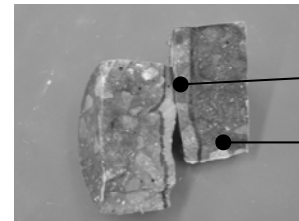
รูปที่ 2 การทดสอบ RCPT ตามมาตรฐาน ASTM C 1202



2.3.3 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธีการแช่แบบจุ่มทั้งหมดในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เป็นการจำลองโครงสร้างคอนกรีตจมน้ำทะเลตลอดเวลา (Submerged zone) ตัวอย่างสำหรับการทดสอบได้จากหลังการบ่ม 28 วัน จากนั้นนำคอนกรีตชิ้นมาตัดให้มีขนาด 100 x 50 มม. และเคลือบผิวตัวอย่างทั้งด้านข้างและด้านบนด้วยอีพอกซีทิงไว้ 24 ชั่วโมง จึงนำไปแช่อยู่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้นร้อยละ 3 ให้ท่วมเหนือผิวบนของตัวอย่างปริมาณ 10 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3 เมื่อแช่จนครบอายุตามการทดสอบ คือ 28, 60 และ 90 วัน จึงนำตัวอย่างไปผ่าแยกออก และพ่นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3) 0.1 N จะเกิดรูปลักษณะของบริเวณที่มีสีเทาและสีน้ำตาลออกดำ โดยถูกแบ่งแยกขอบเขตอย่างชัดเจน บริเวณที่เป็นสีเทาเกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดตะกอนของซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) แสดงว่าบริเวณนี้มีคลอไรด์ ส่วนบริเวณขอบเขตที่เป็นสีน้ำตาลออกดำ บ่งบอกลักษณะว่าเป็นบริเวณที่มีปริมาณคลอไรด์น้อยมากอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งอาจเปรียบเทียบกับได้ว่าเป็นบริเวณไม่มีคลอไรด์ และทำการวัดระยะแทรกซึมของคลอไรด์ ดังรูปที่ 4 [8-9]



รูปที่ 3 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตสำหรับการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธีการแช่แบบจุ่มทั้งหมด



Chloride zone

No chloride zone

รูปที่ 4 การกัดผิวครั้งชักตัวอย่างเพื่อหาระยะการแทรกซึมของคลอไรด์

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

Type of Concrete	Mix Proportion (kg/m^3)					W/B
	Water	Cement	GB	Sand	Stone	
CC-200	195	244	0	798	1024	0.80
CC-300	195	315	0	740	1024	0.62
CC-400	195	406	0	667	1024	0.48
10-GB-200	195	220	24	796	1022	0.80
20-GB-200	195	195	49	794	1020	0.80
30-GB-200	195	171	73	793	1017	0.80
40-GB-200	195	146	98	791	1015	0.80
10-GB-300	195	284	32	738	1021	0.62
20-GB-300	195	252	63	736	1018	0.62
30-GB-300	195	221	95	734	1015	0.62
40-GB-300	195	189	126	732	1012	0.62
10-GB-400	195	365	41	664	1020	0.48
20-GB-400	195	325	81	662	1016	0.48
30-GB-400	195	284	122	659	1012	0.48
40-GB-400	195	244	162	657	1008	0.48

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

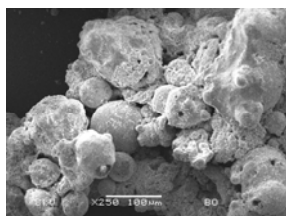
3.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

จากตารางที่ 2 พบว่าถ้าเพิ่มค่าเบตาและปูนซีเมนต์ปอร์ต

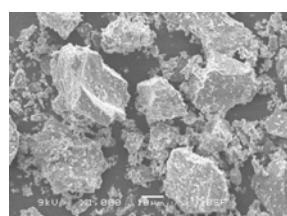
แลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธีของเบลน และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ เท่ากับ 2.70, 6355 ซม.²/ก., 7.0 ไมโครเมตร และเท่ากับ 3.14, 3270 ซม.²/ก., 13.0 ไมโครเมตรตามลำดับ แสดงว่าเถ้าก้นเตาขยะมีขนาดที่เล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จากภาพถ่ายขยายกำลังสูง (Scanning Electron Microscope) ตามแสดงในรูปที่ 5 พบว่าเถ้าก้นเตาก่อนบดมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวโดยส่วนใหญ่ขรุขระ และมีรูพรุน เมื่อนำมาพัฒนาคุณภาพโดยการบดด้วยเครื่องบดแบบคกรกระทบทำให้รูปร่างมีลักษณะขนาดเล็กลงเป็นเหลี่ยมเป็นมุม ผิวเรียบไม่มีรูพรุน และจากรูปที่ 6 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีรูปร่างลักษณะเป็นเหลี่ยมเป็นมุม มีพื้นผิวมีลักษณะขรุขระและเรียบสลับกัน มีเนื้อแน่นเนื่องจากไม่มีรูพรุนที่บริเวณพื้นผิว

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

Physical Tests	Ordinary Portland Cement (OPC)	Ground Bottom Ash (GB)
Specific Gravity	3.14	2.70
Blaine Fineness (cm ² /g)	3,270	6,355
Median Particle Size (micron)	13.0	7.0

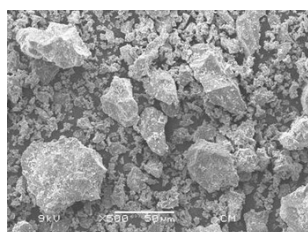


ก) ภาพขยาย 250 เท่า ก่อนบด



ข) ภาพขยาย 1000 เท่า หลังบด

รูปที่ 5 ภาพถ่ายขยาย SEM ของเถ้าก้นเตาก่อนบดและหลังบด



รูปที่ 6 ภาพถ่ายขยาย SEM ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
กำลังขยาย 500 เท่า

3.2 คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุ

จากตารางที่ 3 พบว่า เถ้าก้นเตาขยะมีผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 82.14 มีปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เท่ากับ 1.76 และค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) เท่ากับ 4.02 ซึ่งสามารถจำแนกเถ้าก้นเตาขยะเบื้องต้น จัดเป็นวัสดุปอซโซลานประเภทเถ้าถ่านหินชนิด Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 โดยตามมาตรฐานได้กำหนดไว้ว่าเถ้าถ่านหินชนิด Class F ต้องมีผลรวม $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 ของออกไซด์ทั้งหมด ปริมาณ SO_3 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และมีค่า LOI ไม่เกินร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

Chemical Composition (%)	Ordinary Portland Cement (OPC)	Ground Bottom Ash (GB)
SiO_2	20.62	48.12
Al_2O_3	5.22	23.47
Fe_2O_3	3.10	10.55
CaO	64.99	11.65
MgO	0.91	3.45
K_2O	0.07	3.45
Na_2O	0.50	0.07
Mn_2O_3	0.76	0.07
SO_3	2.70	1.76
LOI	1.13	4.02

3.3 กำลังอัดของคอนกรีต

จากตารางที่ 4 เป็นที่ทราบกันดีว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำและมีระยะเวลาของการบ่มที่นาน ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่สูงขึ้น ผลที่ได้เป็นไปตามแนวโน้มทั่วไป และที่ทุกอายุการทดสอบคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาขยะในอัตราส่วนร้อยละ 10-20 ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตควบคุมเนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กของเถ้าก้นเตาขยะจะเข้าไปแทรกในช่องว่าง ทำให้ขนาดของโพรงในคอนกรีตลดลง คอนกรีตมีความหนาแน่นมากขึ้น และเนื่องจากเถ้าก้นเตามีความละเอียดมากดังนั้นจึงมีความสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดียิ่งขึ้นส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มสูงขึ้น [10-11] และกำลังอัดเริ่มลดลงเมื่อมีการแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาขยะเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 30-40 เนื่องจากปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาขยะมากเกินไป ทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยลง แต่การแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาขยะของทุกอายุการทดสอบและทุกอัตราส่วนผสม กำลังอัดที่ได้ต่ำสุดเท่ากับร้อยละ 87 ของคอนกรีตควบคุม และพบว่าคอนกรีตที่อายุ

90 วัน ปริมาณร้อยละการแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดในทุกอัตรส่วนมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม แสดงให้เห็นว่าเถ้าก้นเตาบดละเอียดสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ นอกจากนี้ยังพบว่าคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดมีการยุบตัวที่ใกล้เคียงกันเนื่องจากลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมเป็นมุมทำให้เกิดการขัดกันขึ้นภายใน และมีพื้นที่ผิวมากขึ้นทำให้แรงเสียดทานเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [6]

ตารางที่ 4 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีต

Type of Concrete	Compressive Strength (ksc) – Percentage Compressive Strength (%)			Slump (cm)
	28-day	60-day	90-day	
CC-200	222 - (100)	256 - (100)	268 - (100)	11.0
CC-300	324 - (100)	365 - (100)	380 - (100)	10.0
CC-400	410 - (100)	452 - (100)	484 - (100)	12.0
10-GB-200	223 - (100)	256 - (100)	273 - (102)	10.5
20-GB-200	231 - (104)	267 - (105)	284 - (106)	11.0
30-GB-200	215 - (97)	248 - (97)	266 - (99)	11.5
40-GB-200	192 - (87)	234 - (91)	247 - (92)	10.0
10-GB-300	341 - (105)	382 - (105)	408 - (107)	10.5
20-GB-300	339 - (104)	389 - (107)	411 - (108)	12.0
30-GB-300	310 - (96)	353 - (97)	382 - (101)	12.0
40-GB-300	299 - (92)	357 - (98)	381 - (100)	11.0
10-GB-400	437 - (107)	492 - (109)	532 - (110)	10.5
20-GB-400	440 - (107)	495 - (110)	539 - (111)	12.0
30-GB-400	432 - (105)	492 - (109)	542 - (112)	11.5
40-GB-400	402 - (98)	461 - (102)	507 - (105)	12.0

3.4 ผลการทดสอบคลอไรด์แบบเร่ง RCPT

ผลการทดสอบวัดค่าการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าในหน่วยของคลอมบ์ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 7 พบว่าคอนกรีตทุกอายุการทดสอบ ที่มีอัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานลดลงทำให้กระแสไฟฟ้าคลอมบ์ลดลงด้วย คอนกรีตควบคุมมีปริมาณกระแสไฟฟ้าคลอมบ์ไหลผ่านในปริมาณที่สูงมากแต่เมื่อมีการแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดร้อยละ 10 ทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าคลอมบ์ลดลงอย่างมาก และค่อย ๆ ลดลงเมื่อมีการแทนที่ในปริมาณร้อยละที่มากขึ้น และในการเปรียบเทียบตามมาตรฐาน ASTM C 1202 แสดงให้เห็นว่าทุกอัตราส่วนผสมของคอนกรีตควบคุมมีระดับค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ที่สูงมาก แต่เมื่อมีการแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 ทำให้ระดับค่าการซึมผ่านของคลอไรด์จากสูงมากลดลงเหลือ ปานกลาง-สูง ปานกลาง ปานกลาง-ต่ำ และต่ำ-ต่ำมาก ตามลำดับ

จากรูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่าระยะการบ่มที่นานกว่า สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้เพิ่มขึ้น และในการแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 40 ของการทดสอบที่อายุ 90 วัน สามารถเพิ่มความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้สูงสุด คือ ร้อยละ 187-189 ของคอนกรีตควบคุม

3.5 ผลการทดสอบโดยวิธีการแช่แบบจุ่มทั้งหมด

จากรูปที่ 9 พบว่าการใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดเพื่อต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการใช้วัสดุปอซโซลานในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ [7] กล่าวคือคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน และแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีระยะเวลานานกว่าจะมีระยะการแทรกซึมของคลอไรด์ที่มากกว่า และในการทดสอบที่อายุเดียวกันพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำกว่า กับปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดร้อยละที่สูงขึ้น ทำให้ระยะการแทรกซึมของคลอไรด์ลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าคอนกรีตที่ทุกอัตราส่วนผสมเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดร้อยละ 40 ทำให้มีระยะการแทรกซึมของคลอไรด์ต่ำที่สุด

3.6 การเปรียบเทียบการทดสอบคลอไรด์แบบเร่ง RCPT และวิธีการแช่แบบจุ่มทั้งหมด

จากผลการทดลองทั้งสองวิธี พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือ ปริมาณร้อยละการแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดที่สูงขึ้นกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำกว่า มีผลทำให้การแทรกซึมของคลอไรด์ลดลง ดังนั้นคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตามีความสามารถในการลดการแทรกซึมของคลอไรด์ เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะสร้างผลิตภัณฑ์ C-S-H เกล็ดไปแทรกในช่องว่างของโพรง ซึ่งทำให้อัตราส่วนของความพรุนต่อซีเมนต์เฟสลดลง และคอนกรีตมีความหนาแน่นขึ้น ทำให้การซึมผ่านลดลง [12] จากผลแสดงให้เห็นว่าเถ้าก้นเตาบดละเอียดสามารถช่วยในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้เป็นอย่างดี

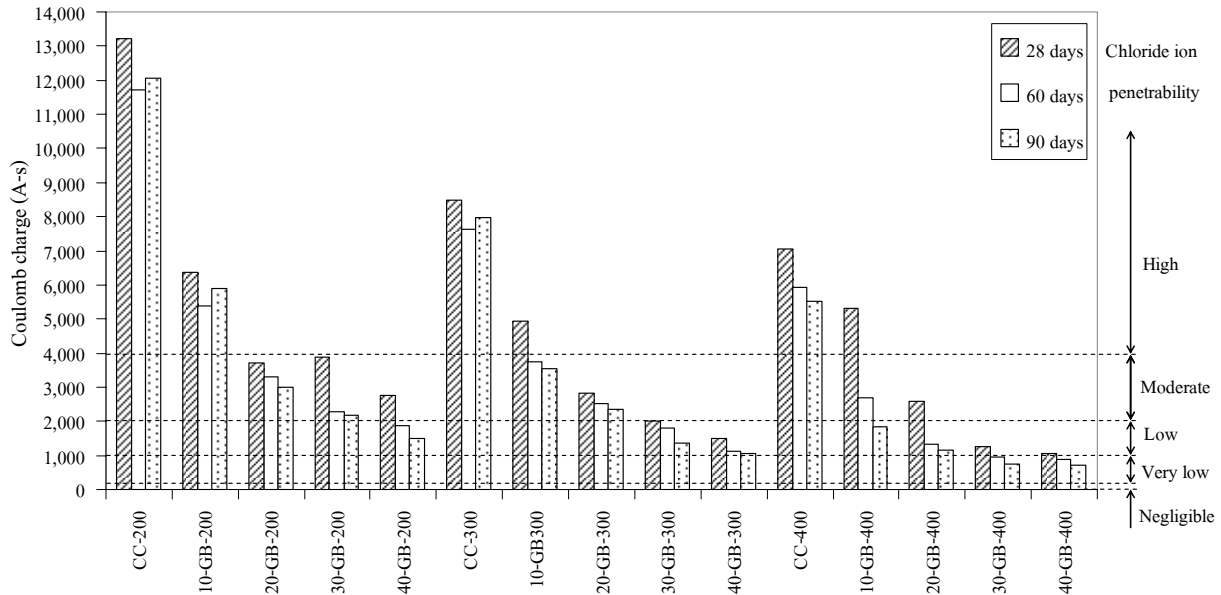
3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและการแทรกซึมของคลอไรด์

จากรูปที่ 10 พบว่า คอนกรีตของทุกกำลังอัดที่ออกแบบมีความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ขึ้นอยู่กับกำลังของคอนกรีต คือ กำลังอัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น สามารถเพิ่มความต้านทานการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ และคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดในปริมาณร้อยละที่สูงขึ้น ทำให้ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์และกำลังอัดคอนกรีตสูงขึ้นด้วย แต่ปริมาณร้อยละการแทนที่ที่ต้องอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมด้วย คือประมาณร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนัก หากต้องการกำลังอัดในช่วงต้นที่สูง แต่หากต้องการความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ดีขึ้นและยอมรับกำลังอัดที่ต่ำลงในช่วงแรกได้สามารถใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดปูนซีเมนต์ได้สูงถึงร้อยละ

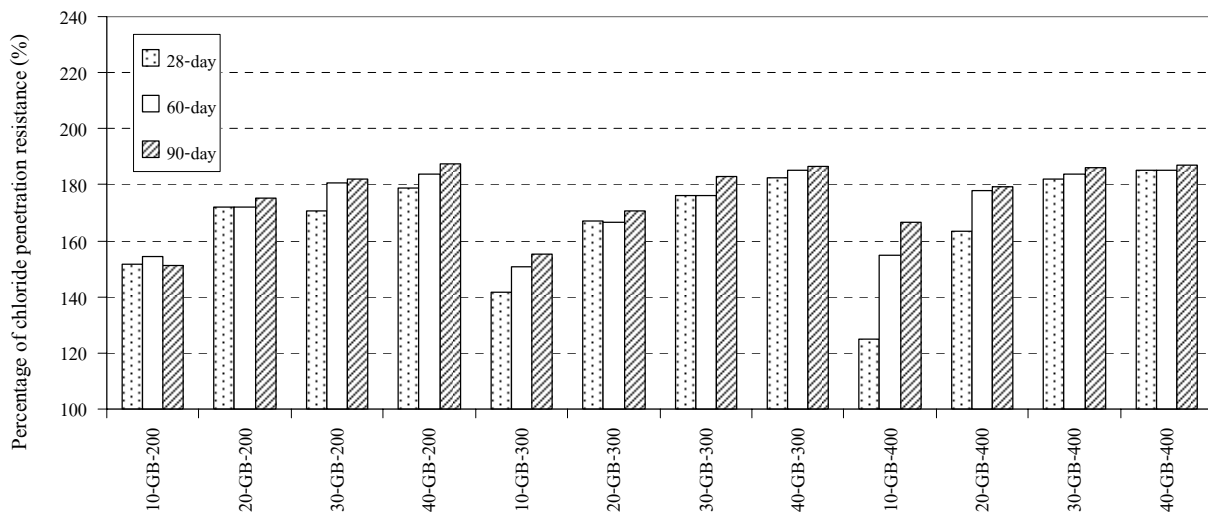
30-40 โดยน้ำหนัก

นอกจากนี้ยังพบว่าคอนกรีตส่วนผสม CC-200 CC-300 และ 10-GB-200 ในระหว่างอายุ 60 และ 90 วัน มีกระแสไฟฟ้าลุลอมบ์เพิ่มขึ้น ซึ่งคาดว่าที่ถูกต้องน่าจะมีแนวโน้มที่กลับกัน ซึ่งเหตุผลยังไม่

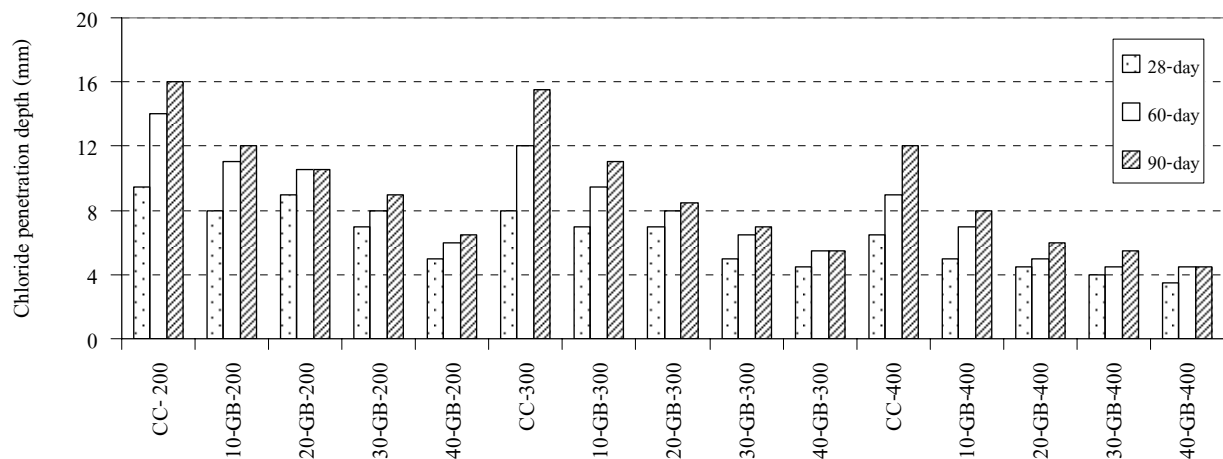
ทราบแน่ชัดอาจเนื่องมาจากในวิธีการทดลองหาไอออนคลอไรด์อิสระในโพรงคอนกรีตต้องใช้ความละเอียดมาก ความไม่เสถียรอาจเกิดขึ้นได้ไม่บ่อยครั้ง หรืออาจเกิดจากสาเหตุการเปลี่ยนแปลงของสารเคมีภายในโพรงคอนกรีตเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างต่อเนื่อง [13]



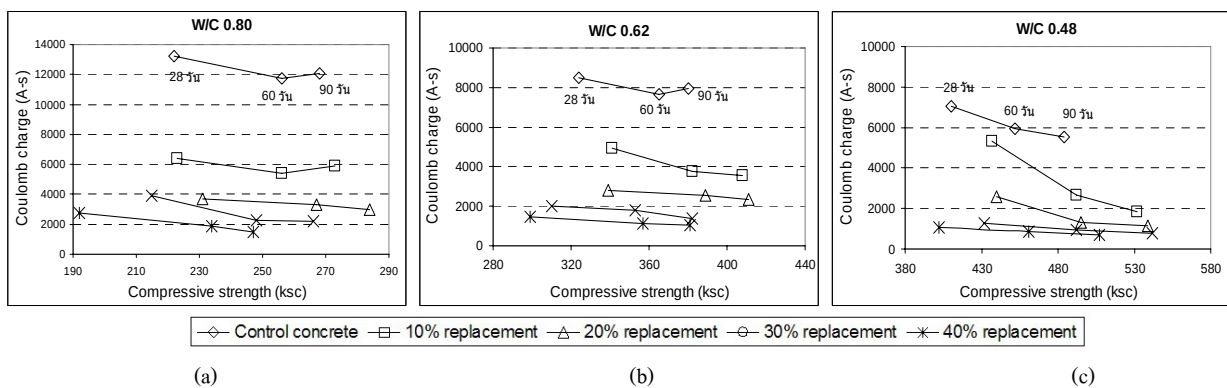
รูปที่ 7 กระแสไฟฟ้าในหน่วยของคูลอมบ์ ตามมาตรฐาน ASTM C 1202



รูปที่ 8 ร้อยละความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม



รูปที่ 9 ความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์ที่แช่แบบจุ่มทั้งหมดในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับกระแสไฟฟ้าหน่วยคูลอมบ์ของคอนกรีตทุกส่วนผสม

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองของงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1. กำลังอัดและความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าแกวและเถ้าลอยขึ้นอยู่กับกำลังอัดที่ออกแบบ และร้อยละการแทนที่ด้วยเถ้าแกวและเถ้าลอย โดยคอนกรีตที่ออกแบบกำลังอัดสูงกว่ามีแนวโน้มสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่า

2. คอนกรีตผสมเถ้าแกวและเถ้าลอยในปริมาณที่สูงกว่า มีผลการแทรกซึมของคลอไรด์ลดลง แต่ปริมาณร้อยละการแทนที่ที่ต้องอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมด้วย ดังนั้นการใช้เถ้าแกวและเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 20 ขึ้นไป สามารถใช้เพื่อต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ให้อยู่ในระดับต่ำได้

3. คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกวและเถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 40 มี

ความสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์สูงสุด และมีกำลังอัดที่อายุ 90 วัน สูงกว่าคอนกรีตควบคุม

4. ผลการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์แบบเร่ง RCPT และวิธีการแช่แบบจุ่มทั้งหมด ให้ผลที่สอดคล้องกันและแสดงให้เห็นว่าเถ้าแกวและเถ้าลอยสามารถใช้ในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้เป็นอย่างดี

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณ คุณเอกชัย แก่นวงศ์คำ และคุณชญญรัตน์ แสนวิชัย ที่ช่วยในการเตรียมตัวอย่างทดลอง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] C.C. Yang, L.C. Wang and T.L. Weng, "Using charge passed and total chloride content to assess the effect of penetrating silane sealer on the transport properties of concrete", *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 85, 2004, pp. 238-244.
- [2] A.M. Neville, "Chloride attack of reinforced concrete: an overview," *Material and Structures*, Vol. 28, 1995, pp. 63-70.
- [3] L. Mejlbro and E. Poulsen, "Diffusion of chloride in concrete", *Modern Concrete Technology*, Vol. 14, 2006, pp. 2-4.
- [4] M.N. Haque, O.A. Kayyali and M.K. Gopalan, "Fly ash reduces harmful chloride ions in concrete", *ACI Materials Journal*, Vol. 89, 1992, pp. 238-241.
- [5] ปริญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล "ปูนซีเมนต์ปอซโซลานและคอนกรีต" *สมาคมคอนกรีตไทย (สคท.) พ.ศ. 2547* หน้า 283-290
- [6] เรืองรุชดี ชีระโรจน์ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล "การใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดเป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต" *วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา ฉบับที่ 2 ปีที่ 14 พ.ศ. 2546* หน้า 1-7
- [7] ชัยชาญ โชติฉนอม บพิท นุพลโชติ และปริญา จินดาประเสริฐ "การศึกษาการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะกักขนาด" *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ฉบับที่ 2 ปีที่ 29 พ.ศ. 2549* หน้า 203-214
- [8] E. Meck and V. Sirivivatnanon, "Field indicator of chloride penetration depth", *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, 2003, pp. 1113-1117.
- [9] N. Otsuki, S. Nagataki and K. Nakashita, "Evaluation of AgNO₃ solution spray method for measurement of chloride penetration into hardened cementitious matrix materials", *ACI Materials Journal*, Vol. 89, 1992, pp. 587-592.
- [10] P. Chindaprasirt, C. Jaturapitakkul and T. Sinsiri, "Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, 2005, pp. 425-428.
- [11] K. Erdogdu and P. Turker, "Effect of fly ash particle size on compressive strength of portland cement fly ash mortars", *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, 1998, pp. 1217-1222.
- [12] T.R. Naik and S.S. Singh, "Permeability of concrete containing large amounts of fly ash", *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, 1994, pp. 913-922.
- [13] J.M. Scanlon and M.R. Sherman, "Fly ash concrete: An evaluation of chloride penetration testing methods", *Concrete International*, Vol. 2, 1996, pp. 57-62.