

## การใช้ประโยชน์ของเถ้าก้นเตาบดละเอียดในคอนกรีตสมรรถนะสูง

### Utilization of ground bottom ash in high performance concrete

ไกรวุฒิ ตันติสุขารมย์<sup>1</sup>, ธนวัฒน์ โชคสว่างเนตร<sup>2</sup>, ปิยะพล สีหาบุตร<sup>3</sup> และ เรืองรุชดี ชีระโรจน์<sup>4</sup>

Kraiwut Tuntisukrarom<sup>1</sup>, Thanawat Choksawangnetr<sup>2</sup>, Piyaphol Srihabutra<sup>3</sup> and Raungrut Cheerarot<sup>4</sup>

<sup>1,2,4</sup>คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ต.ขามเรียง อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

<sup>3</sup>คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ต.ตลาด อ.เมือง จ.มหาสารคาม 44000

โทร. 081-5559481 โทรสาร 043-754316

E-mail: raungrut@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดในคอนกรีตสมรรถนะสูง โดยออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 700 กก./ซม.<sup>2</sup> และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, และ 60 โดยน้ำหนัก จากผลการทดสอบพบว่า การแทนที่เถ้าก้นเตาบดละเอียดเพิ่มขึ้นในคอนกรีตสมรรถนะสูง ส่งผลต่อความสามารถในการทำงานได้และกำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นลดลงเล็กน้อย โดยการแทนที่ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักสามารถพัฒนากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 90 วัน ส่วนความทนทานของคอนกรีตต่อคลอไรด์และซัลเฟตพบว่า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดจนถึงการแทนที่ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก แต่มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เถ้าก้นเตาบดละเอียดสามารถนำมาใช้ในคอนกรีตสมรรถนะสูงเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้นได้

#### Abstract

This research is to study the utilization of ground bottom ash in high performance concrete. Control concrete was designed the compressive strength at 28 days of 700 ksc. Portland cement was replaced by ground bottom ash at the rate of 0, 20, 40 and 60% by weight. The experimental results showed that the increasing of ground bottom ash in high performance concrete had a little effect on the reducing of workability and

compressive strength of concrete at early ages. At 20% and 40% of replacement, the ground bottom ash concrete could develop the compressive strength higher than that of the control concrete at the ages of 90 days. The durability of ground bottom ash concrete on chloride and sulfate had tend to increase with the replacement of ground bottom ash up to 40% by weight and reduced as the increase of replacement up to 60% by weight. From the result, it was concluded that ground bottom ash could be used to improve the properties of high performance concrete.

#### 1. บทนำ

คอนกรีตสมรรถนะสูงจัดได้ว่าเป็นรูปแบบวิวัฒนาการของงานคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากมีข้อจำกัดเกี่ยวกับพื้นที่ใช้งาน โดยเฉพาะในเมืองใหญ่ๆ ที่มีการก่อสร้างอาคารสูงในพื้นที่จำกัด ทำให้โครงสร้างจำเป็นต้องมีขนาดที่เล็กลง ส่งผลให้มีปริมาณเหล็กเสริมในโครงสร้างมากขึ้นจึงทำให้เกิดความยากของการทำงานได้ของคอนกรีตในการเทเข้าแบบเพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้ คอนกรีตสมรรถนะสูงจึงถูกพัฒนามาเพื่อให้มีความสามารถเทลงในแบบหล่อได้เต็มทุกซอกทุกมุมโดยไม่ต้องใช้เครื่องเขย่า ทั้งยังคำนึงถึงปัญหาของสภาวะการแยกตัว การแตกร้าว การหดตัวและความทนทานของคอนกรีต อย่างไรก็ตาม ส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงจำเป็นต้องใช้สารผสมเพิ่มจำพวกสารลดน้ำและสารลดน้ำพิเศษเพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงาน ระยะเวลาก่อตัวและยังควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เพื่อให้ได้กำลังอัดที่สูง [1] อีกทั้ง

ต้องมีวัสดุผสมเพิ่มจำพวกวัสดุปอซโซลานที่ใช้เป็นส่วนหนึ่งของวัสดุประสาน อาทิเช่น เถ้าลอย ซิลิกาฟูม และตะกรันเตาถลุงเหล็ก จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้วัสดุปอซโซลานเป็นส่วนผสมในคอนกรีตสมรรถนะสูง สามารถเพิ่มคุณสมบัติที่ดีในด้านต่างๆ อาทิเช่น การทำงานได้ของคอนกรีตสด [1] ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน [2] การรับกำลังอัด [2-3] การแทรกซึมคลอไรด์ [3] และการต้านทานซัลเฟต [4]

เถ้าก้นเตาเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งที่เป็นผลพลอยได้จากกรรมวิธีการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยถ่านหิน โดยที่โรงผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีปริมาณเถ้าก้นเตาประมาณ 2,000 ตันต่อวัน จึงทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจัดทิ้ง อีกทั้งยังเป็นมลภาวะกับสิ่งแวดล้อม โดยในปัจจุบันการใช้ประโยชน์ของเถ้าก้นเตาในงานคอนกรีตยังมีน้อยมาก เพราะเถ้าก้นเตามีรูปร่างที่พรุนและมีขนาดใหญ่เป็นผลให้มีความต้องการน้ำมากขึ้นและกำลังอัดต่ำลงมาก แต่เมื่อนำมาปรับปรุงคุณภาพโดยการบดให้มีขนาดอนุภาคเล็กกลงพบว่าสามารถใช้เถ้าก้นเตาเป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตได้เป็นอย่างดี [5] และเพื่อเพิ่มศักยภาพในการใช้งานของเถ้าก้นเตาในงานคอนกรีตประเภทต่างๆ ได้ดียิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เถ้าก้นเตาละเอียดเป็นส่วนผสมในคอนกรีตสมรรถนะสูง โดยศึกษาคุณสมบัติด้านต่างๆ เพื่อให้ได้ส่วนผสมในคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ดีขึ้น

**2. การเตรียมวัสดุและวิธีการทดลอง**

**2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง**

**2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1**

**2.1.2** เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง นำมาปรับปรุงคุณภาพโดยการบดให้มีขนาดอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยแสดงคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพในตารางที่ 1

**2.1.3** ทรายแม่น้ำ มีค่าโมดูลัสความละเอียด เท่ากับ 2.76

**2.1.4** หินขนาดโตสุด ½ นิ้ว มีค่าโมดูลัสความละเอียด เท่ากับ 6.32 โดยแสดงคุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวมในตารางที่ 2

**2.1.5** สารลดน้ำพิษชนิด F (Naphthalene base) และ สารลดน้ำและหน่วงการก่อตัวชนิด D ตามมาตรฐาน ASTM C 494

**2.1.6** สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้นร้อยละ 3 และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.3 N เพื่อใช้ในการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เพื่อทดสอบการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากซัลเฟต

**2.1.7** อีพอกซีเรซินชนิดไม่มีการหดตัว (Non-shrinkage epoxy resin) ใช้ในการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์และการซึมผ่านของน้ำ

**ตารางที่ 1** องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

Chemical composition (%)	OPC	GB
SiO <sub>2</sub>	20.62	48.12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.22	23.47
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.10	10.55
CaO	65.00	11.65
SO <sub>3</sub>	2.70	1.76
LOI	1.13	4.02
Specific gravity	3.14	2.82
Blaine fineness (cm <sup>2</sup> /g)	3,270	6,350
Median particle size (micron)	13.0	7.0
Retained on sieve No. 325 (%)	10.8	3.4

GB = Ground Bottom Ash

OPC = Ordinary Portland Cement

**ตารางที่ 2** คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม

Sample	Coarse aggregate	Fine aggregate
Bulk specific gravity (SSD)	2.65	2.62
Bulk specific gravity (OD)	2.64	2.61
Water absorption (%)	0.79	1.37
Maximum size (mm)	12.7	4.75
Fineness modulus	6.32	2.76
Bulk Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )	1,573	-

**2.2 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูง**

ตารางที่ 3 แสดงอัตราส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูง โดยออกแบบคอนกรีตควบคุมให้มีค่ากำลังอัดประลัยที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 700 กก./ซม.<sup>2</sup> จากนั้นแทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยถ้ำกั้น เตาบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 20, 40 และ 60 โดยน้ำหนัก ของวัสดุประสาน และใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อปรับปรุงลดค่า ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีต

**ตารางที่ 3** ส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูง

Mix proportion (kg/m <sup>3</sup> )	CC	GB20	GB40	GB60
Portland cement	550	440	330	220
Ground bottom ash	-	110	220	330
Water	187.0	186.6	186.0	185.5
Sand	940	934	927	921
Stone	700	695	691	686
Superplasticizer (F)	6.9	7.6	8.9	9.8
Water-reducing and retarding admixture (D)	1.2	1.2	1.2	1.2

CC = Control Concrete

GB = Ground Bottom Ash Concrete

20, 40, 60 = Percent Replacement of Ground Bottom Ash

**2.3 การทดสอบการทำงานได้ของคอนกรีต**

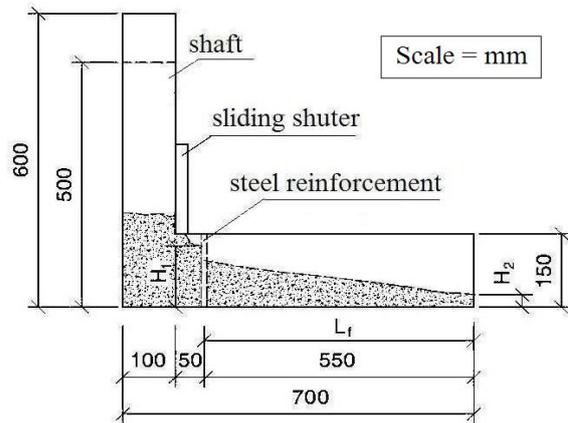
งานวิจัยนี้ทำการทดสอบการทำงานได้ของคอนกรีตสมรรถนะสูงดังต่อไปนี้

**2.3.1 ค่ายุบตัว (Slump)** ตามมาตรฐาน ASTM C143 ซึ่งคอนกรีตสมรรถนะสูงต้องมีค่ายุบตัวมากกว่า 200 มม. [6]

**2.3.2 ค่าการไหลแผ่ (Slump flow)** ตามมาตรฐาน BS EN 12350-5 [7] ซึ่งคอนกรีตสมรรถนะสูงต้องมีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วง 650±50 มม. [6]

**2.3.2 ความสามารถการไหลผ่านและการแยกตัว** โดยชุดทดสอบ L-Box ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยเติมคอนกรีตจนได้ระดับ 500 มม. จากนั้นจึงประตูกั้นออกปล่อยให้คอนกรีตไหลผ่านเหล็กข้ออ้อยขนาด 16 มม. ระยะห่าง 40 มม. โดยอิสระเมื่อคอนกรีตหยุดไหลแล้วจึงวัดความสูงของ H<sub>1</sub> และ H<sub>2</sub> เพื่อ

หาอัตราส่วน H<sub>2</sub>/H<sub>1</sub> ซึ่งต้องมีค่ามากกว่า 0.80 [6-7] จากนั้นนำคอนกรีตส่วนที่ไหลผ่านและไม่ผ่านเหล็กข้ออ้อยใส่แบบขนาด 150x150x150 มม. เพื่อหาค่าการแยกตัวของคอนกรีตโดยชั่งน้ำหนักแล้วต้องมีค่าความแตกต่างกันไม่น้อยกว่าร้อยละ 10 ของน้ำหนัก [8]



**รูปที่ 1** ชุดทดสอบความสามารถในการไหลผ่านและการแยกตัว L-Box

**2.4 การทดสอบความร้อนของคอนกรีต**

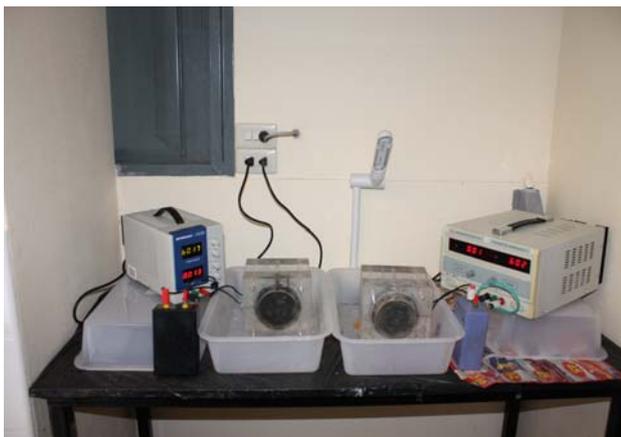
อุณหภูมิและเวลาการเกิดอุณหภูมิสูงสุดของคอนกรีตทำการทดสอบโดยการเทคอนกรีตขนาด 300x300x300 มม. ลงในแบบหล่อโฟมขนาด 400x400x400 มม. โดยฉนวนโฟมมีความหนาชั้นละ 50 มม. เพื่อป้องกันความร้อนจากคอนกรีตถ่ายเทสู่บรรยากาศ ทำการวัดอุณหภูมิด้วยการต่อสายเทอร์โมคัปเปิลฝังลงในคอนกรีต และบันทึกค่าอุณหภูมิด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger)

**2.5 การทดสอบกำลังอัด**

หล่อคอนกรีตเป็นรูปทรงกระบอกขนาด 100x200 มม. ทำการถอดแบบที่อายุ 1 วันแบ่งคอนกรีตเป็นสองส่วน ส่วนแรกนำมาบ่มในน้ำ และอีกส่วนหนึ่งนำไปแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มในน้ำที่อายุ 1, 7, 28, และ 90 วัน ส่วนคอนกรีตที่แช่ในสารละลายซัลเฟตทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 และ 90 วัน

**2.6 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์**

เป็นการทดสอบวัดการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าในหน่วยของคลอโมบ์ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การทดสอบคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid chloride penetrability test) ตามมาตรฐาน ASTM C 1202 ซึ่งใช้คอนกรีตทรงกระบอกขนาด 100x50 มม. เคลือบผิวด้านข้างด้วยอีพอกซี (Epoxy) ทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศ และนำก้อนตัวอย่างไปคู่อากาศออกด้วยเครื่องปั๊มสุญญากาศเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ต่อมาเติมน้ำกลั่นเข้าไปและคู่อากาศต่ออีก 1 ชั่วโมงและทำการแช่ตัวอย่างไว้ในน้ำกลั่นเพื่อให้ก้อนตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำอีก 16 - 20 ชั่วโมง จากนั้นประกอบเซลล์บลิ๊อคปิดหัวท้าย โดยมีสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) อยู่ที่เซลล์บลิ๊อคซ้าย และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) อยู่ที่เซลล์บลิ๊อคขวามัดต่อไฟฟ้ากระแสตรง 60 โวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ชุดทดสอบคลอไรด์แบบเร่ง (RCPT)

**2.7 การทดสอบการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต**

ในการทดสอบหาค่าการซึมผ่านของน้ำนั้น มีพื้นฐานมาจากวิธีการแทรกซึมและวิธีการไหลแบบคงที่ โดยการหาค่าการซึมผ่านของน้ำจะวัดจากปริมาณของน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีต ซึ่งคำนวณจากกฎของดาร์ซี (Darcy's law) และสมการต่อเนื่อง (Equation of continuity) [9] โดยใช้ก้อนคอนกรีตทรงกระบอก ขนาด 100 x 40 มม. ครอบด้วยท่อพีวีซีขนาด 6 นิ้ว แล้วเทอีพอกซีเรซินหล่อเคลือบผิวด้านข้างเพื่อป้องกันน้ำรั่วซึม จากนั้นทิ้งไว้ให้แห้งอีก 24 ชั่วโมง แล้วทำ

การประกอบตัวอย่างคอนกรีตเข้าเซลล์บลิ๊อค สุดท้ายนำไปทดสอบการซึมผ่านของน้ำ โดยจะใช้ความดันของน้ำที่ 5 บรรยากาศ (72.5 Psi) ในการวัดปริมาตรน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีตจนอัตราการไหลของน้ำคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ชุดทดสอบการซึมผ่านของน้ำ

**3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์**

**3.1 การทำงานได้ของคอนกรีตสมรรถนะสูง**

จากผลการทดสอบการทำงานได้ของคอนกรีตสมรรถนะสูงได้แสดงในตารางที่ 4 พบว่าคอนกรีตควบคุมมีค่าการยุบตัว 265 มม. มีค่าการไหลแม่ 670 มม. อัตราส่วนของ H<sub>2</sub>/H<sub>1</sub> เท่ากับ 0.91 และมีความแตกต่างของน้ำหนักคอนกรีตก่อนและหลังผ่านเหล็กข้ออ้อยเท่ากับร้อยละ 2.03 สำหรับคอนกรีตผสมเถ้ากั้นเตาตะเอยคั้น พบว่าคอนกรีตสดมีค่าการทำงานได้ลด-

ตารางที่ 4 การทำงานได้ของคอนกรีตสมรรถนะสูง

Mix	Slump (mm)	Slump flow (mm)	L-Box (H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> )	Different weight(%)
CC	265	670	0.91	2.03
GB20	260	665	0.87	3.69
GB40	260	660	0.85	2.43
GB60	255	660	0.83	3.03

ลงตามปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้ากั้นเตาตะเอยคั้นมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ทำให้มีพื้นที่ผิว

มากกว่า จึงส่งผลให้ความต้องการน้ำสูงกว่าดังนั้นจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษอีกเล็กน้อย เพื่อให้คอนกรีตสดทุกอัตราส่วนผสมมีค่าการทดสอบของการทำงานได้ในด้านต่างๆ ผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดของคอนกรีตสมรรถนะสูง

**3.2 ความร้อนของคอนกรีตสมรรถนะสูง**

ตารางที่ 5 แสดงความร้อนของคอนกรีตสมรรถนะสูงผสมเถ้ากั้นเตาบดละเอียด จากผลการทดลองพบว่าคอนกรีตควบคุมมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 62.4 องศาเซลเซียส ที่เวลา 19 ชั่วโมง โดยที่อุณหภูมิเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 28.9 องศาเซลเซียส ทำให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 33.5 องศาเซลเซียส ขณะที่คอนกรีตผสมเถ้ากั้นเตาบดละเอียด เมื่อมีปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น อุณหภูมิความร้อนมีค่าลดลงแต่มีระยะเวลาการเกิดความร้อนถึงจุดสูงสุดเพิ่มขึ้น เป็นเพราะว่าการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มีค่าลดลงตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่น้อยลงและสารลดน้ำพิเศษเป็นสาเหตุให้ระยะเวลาที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงสุดของคอนกรีตมีค่ามากขึ้น [2]

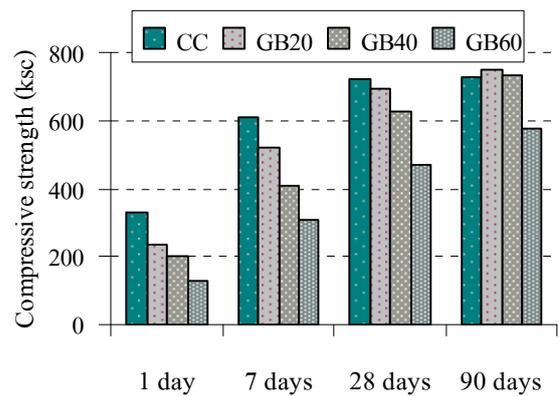
**ตารางที่ 5** ความร้อนของคอนกรีตสมรรถนะสูง

Mix	Peak temp. (°C)	Temp. rise (°C)	Reduce temp. (°C)	Reduce temp. (%)	Peak time (Hour)
CC	62.4	33.5	0	0	19
GB20	56.2	27.3	6.2	18.5	23
GB40	49.7	20.8	12.7	37.9	26
GB60	42.8	13.9	19.6	58.5	31

**3.3 การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง**

รูปที่ 4 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่อายุต่างๆ พบว่าที่อายุช่วงต้น (1-7 วัน) ของคอนกรีตสมรรถนะสูงผสมเถ้ากั้นเตาบดละเอียดมีกำลังอัดลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงตามปริมาณของปูนซีเมนต์ ส่วนการแทนที่เถ้ากั้นเตาบดละเอียดร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก สามารถพัฒนากำลังอัดเทียบเท่าและสูงกว่า

คอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 และ 90 วันตามลำดับ ส่วนการแทนที่ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ไม่สามารถพัฒนากำลังให้สูงกว่าคอนกรีตควบคุมทุกช่วงอายุการทดสอบ แต่สามารถพัฒนากำลังอัดได้ดีที่สุดที่อายุ 90 วัน เท่ากับร้อยละ 78 ของคอนกรีตควบคุม อย่างไรก็ตามทุกปริมาณการแทนที่ของเถ้ากั้นเตาบดละเอียดมีแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานสูงขึ้นตามอายุการทดสอบที่เพิ่มขึ้น



**รูปที่ 4** กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้ากั้นเตาบดละเอียดที่อายุและการแทนที่แตกต่างกัน

**3.4 ผลกระทบของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลังอัด**

ผลการทดสอบกำลังอัดจากการบ่มในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต แสดงในตารางที่ 6 พบว่าการพัฒนากำลังอัดมีลักษณะเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการบ่มในน้ำ และมีกำลังอัดที่ใกล้เคียงกันของทุกอายุการทดสอบ ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลังอัดที่บ่มในน้ำทุกตัวอย่างและทุกอายุการทดสอบ พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.98 - 1.02 แสดงให้เห็นว่าสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ไม่แสดงผลกระทบอย่างชัดเจนต่อกำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่อายุ 28 และ 90 วัน เนื่องจากคอนกรีตสมรรถนะสูงมีอัตราน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นมากขึ้น ส่งผลให้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตไม่สามารถกัดกร่อนคอนกรีตได้

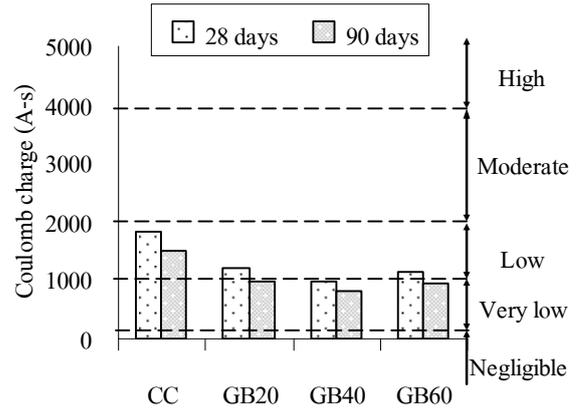
ตารางที่ 6 กำลังอัดและอัตราส่วนกำลังอัดที่บ่มในน้ำกับแช่ใน

สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

Compressive strength (ksc)						
Mix	Sulfate immersion		Water curing		Sulfate/Water	
	28-D	90-D	28-D	90-D	28-D	90-D
					28-D	90-D
CC	711	720	719	728	0.98	0.99
GB20	688	748	695	751	0.98	1.00
GB40	640	728	625	731	1.02	1.00
GB60	483	569	469	574	1.02	0.99

3.5 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตสมรรถนะสูง

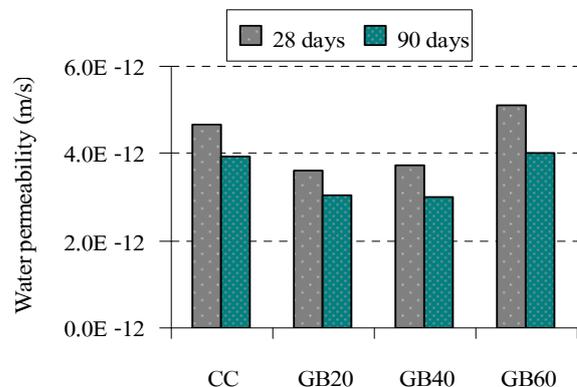
การทดสอบแทรกซึมของคลอไรด์ พบว่าคอนกรีตควบคุมมีการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าในหน่วยของคูลอมบ์สูงสุดทั้งอายุ 28 และ 90 วัน โดยมีค่าเท่ากับ 1,819 และ 1,492 คูลอมบ์ ตามลำดับ สำหรับการแทนที่เถ้ากั้นเตาบดละเอียดในปริมาณร้อยละ 20, 40 และ 60 โดยน้ำหนัก ที่อายุ 28 และ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 1,289, 983 และ 1,137 คูลอมบ์ และ 992, 801 และ 953 คูลอมบ์ตามลำดับ สังเกตได้ว่าทุกปริมาณการแทนที่ของเถ้ากั้นเตาบดละเอียดมีค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทุกช่วงอายุ สาเหตุการลดลงของการแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตที่ผสมเถ้ากั้นเตาบดละเอียด เนื่องจากอนุภาคของเถ้ากั้นเตาบดละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์จะเข้าไปแทรกตัวในช่องว่าง ดังนั้นโพรงในคอนกรีตจึงมีขนาดลดลง ปริมาณไอออนคลอไรด์ที่ละลายอยู่ในโพรงจึงลดลงตามไปด้วย [10] นอกจากนี้ไอออนของคลอไรด์จะถูกจับยึดโดยไฮดรอกไซด์ของซีเมนต์ โดยส่วนใหญ่แล้วเป็น C-S-H ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน [11] อย่างไรก็ตามทุกปริมาณการแทนที่ของเถ้ากั้นเตาบดละเอียดที่อายุ 90 วันของงานวิจัยนี้จัดอยู่ในเกณฑ์ที่มีการซึมผ่านของคลอไรด์ต่ำมากตามมาตรฐาน ASTM C 1202 ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้ากั้นเตาบดละเอียด

3.6 ค่าการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตสมรรถนะสูง

รูปที่ 6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของคอนกรีตควบคุม และการแทนที่เถ้ากั้นเตาบดละเอียดร้อยละ 20, 40 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานที่อายุ 28 และ 90 วัน มีค่าเท่ากับ  $4.68 \times 10^{-12}$ ,  $3.61 \times 10^{-12}$ ,  $3.72 \times 10^{-12}$ ,  $5.12 \times 10^{-12}$  และ  $3.93 \times 10^{-12}$ ,  $3.04 \times 10^{-12}$ ,  $2.98 \times 10^{-12}$ ,  $4.02 \times 10^{-12}$  เมตร/วินาทีตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเถ้ากั้นเตาบดละเอียดแทนที่ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก ที่อายุ 28 และ 90 วัน มีค่าการซึมผ่านของน้ำน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม เนื่องจากขนาดอนุภาคเถ้ากั้นเตาที่เล็กกว่าปูนซีเมนต์สามารถแทรกในบริเวณ Interfacial zone ระหว่างมวลรวมกับมอร์ตาร์ทำให้ระบบการเชื่อมต่อ (Connectivity of pore system) ในแต่ละโพรงของคอนกรีตมี



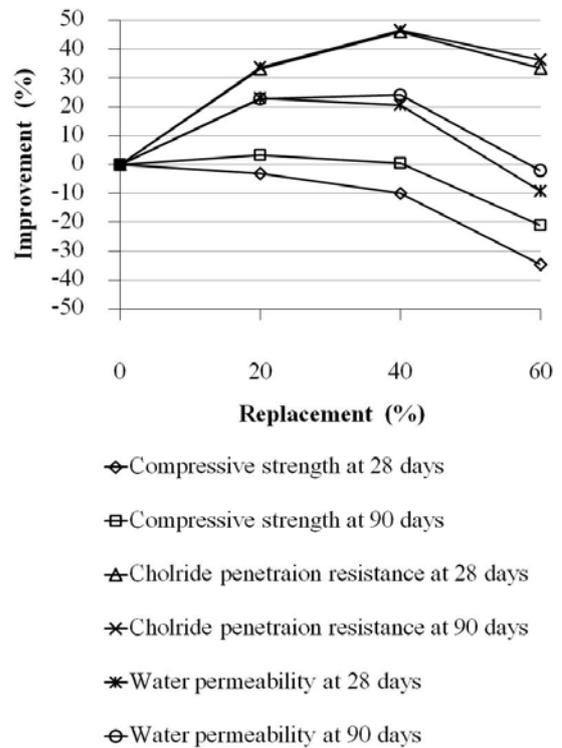
รูปที่ 6 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคอนกรีตผสมเถ้ากั้นเตาบดละเอียด

ขนาดเล็กกลองและคอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าการซึมผ่านจึงดีกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุช่วงต้นและการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ของเถ้าก้นเตาบดละเอียดส่งผลช่วยให้ค่าการซึมผ่านที่อายุช่วงปลายดีขึ้น สำหรับเถ้าก้นเตาบดละเอียดแทนที่ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ที่อายุ 28 วัน มีค่าการซึมผ่านของน้ำสูงกว่าคอนกรีตควบคุม เนื่องจาก C-S-H จากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงมาก อย่างไรก็ตามที่อายุ 90 วัน สามารถพัฒนาค่าการซึมผ่านเทียบเท่าคอนกรีตควบคุม เนื่องจากระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้นทำให้ C-S-H จากปฏิกิริยาปอซโซลานมีปริมาณเพิ่มขึ้นนั่นเอง โดยผลการทดลองงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของการใช้เถ้าปาล์ม น้ำมันและเถ้าแกลบเปลือกไม้ (12)

รูปที่ 7 แสดงร้อยละการปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตสมรรถนะสูง ซึ่งหาได้จากค่าร้อยละของผลต่างระหว่างคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดและคอนกรีตควบคุมเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม พบว่าเถ้าก้นเตาบดละเอียดทุกปริมาณการแทนที่มีค่าร้อยละการปรับปรุงของการแทรกซึมคลอไรด์และการซึมผ่านของน้ำดีกว่าคอนกรีตควบคุม ยกเว้นค่าการซึมผ่านน้ำของการแทนที่เถ้าก้นเตาบดละเอียดร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก โดยเฉพาะการแทนที่ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ให้ค่าร้อยละการปรับปรุงสูงสุดของการแทรกซึมคลอไรด์ที่อายุ 28 และ 90 วัน เท่ากับร้อยละ 45.9 และ 46.3 ของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ และการซึมผ่านของน้ำที่อายุ 90 วัน เท่ากับร้อยละ 24.2 ของคอนกรีตควบคุม สำหรับการแทนที่เถ้าก้นเตาบดละเอียดร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักนั้น พบว่าการแทนที่ร้อยละ 40 มีค่าร้อยละการปรับปรุงของกำลังอัดกับการซึมผ่านของน้ำใกล้เคียงกัน และมีค่าการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าการแทนที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

**4.สรุปผลการทดลอง**

1. การใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดในคอนกรีตสมรรถนะสูง ส่งผลให้ต้องใช้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยตามปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้นของเถ้าก้นเตาบดละเอียด เพื่อให้ความสามารถในการทำงานได้อยู่ในมาตรฐานที่กำหนด



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ร้อยละการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตกับร้อยละการแทนที่เถ้าก้นเตาบดละเอียด

2. การใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ช่วยลดอุณหภูมิความร้อนในคอนกรีตตามปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น โดยการแทนที่ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก สามารถลดความร้อนของคอนกรีตสูงสุดเท่ากับร้อยละ 58.5 ของอุณหภูมิสูงสุดของคอนกรีตควบคุม
3. คอนกรีตสมรรถนะสูงผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดทุกปริมาณการแทนที่มีค่ากำลังอัดลดลงต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุช่วงต้น แต่มีแนวโน้มดีขึ้นเมื่อมีอายุมากขึ้น โดยการแทนที่ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักจะมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 90 วัน
4. การแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตสมรรถนะสูงทุกอัตราส่วนผสมมีค่าลดลงตามอายุที่เพิ่มขึ้น โดยเถ้าก้นเตาบดละเอียดทุกส่วนผสมที่อายุ 90 วัน มีค่าการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมและจัดอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำมากตามมาตรฐาน ASTM C 1202
5. คอนกรีตสมรรถนะสูงมีค่าการซึมผ่านของน้ำลดลงตามอายุที่เพิ่มขึ้น โดยการแทนที่ของเถ้าก้นเตาบดละเอียดร้อยละ 60

โดยน้ำหนัก ที่อายุ 90 วันมีค่าการซึมผ่านของน้ำเทียบเท่าคอนกรีตควบคุม อย่างไรก็ตามการแทนที่ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก ทุกอายุการทดสอบมีค่าการซึมผ่านของน้ำต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม

6. การใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดในปริมาณที่เหมาะสมคือร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก เนื่องจากกำลังอัดมีค่าเทียบเท่าคอนกรีตควบคุมและความทนทานดีกว่าคอนกรีตทุกส่วนผสม

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

## 6. เอกสารอ้างอิง

[1] P.K. Chang, "An Approach to Optimizing Mix Design for Properties of High-Performance Concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 34, No. 4, April 2004, pp. 623-629.

[2] Y. Zhang, W. Sun and S. Liu, "Study on the Hydration Heat of Binder Paste in High-Performance Concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 32, No. 9, April 2002, pp. 1483-1488.

[3] M.H. Zhang and V.M. Malhotra, "High-Performance Concrete Incorporating Rice Husk Ash as a Supplementary Cementing Material", ACI Materials Journal, Vol. 93, No. 6, Dec 1996, pp 629-636.

[4] M.J. Shannag and H.A. Shaia, "Sulfate Resistance of High-Performance Concrete", Cement & Concrete Composites, Vol. 25, No. 3, April 2003, pp 363-369.

[5] C. Jaturapitakkul and R. Cheerarot, "Development of Bottom Ash as Pozzolanic Material", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 13, No. 1, February 2003, pp. 48-53.

[6] EFNARC., "Specification & Guidelines for Self-Compacting Concrete", English ed. Norfolk (UK) : European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete System, February 2002.

[7] British Standard Institute, "BS EN 12350-5 Test Fresh Concrete-Part 5 : Flow Table Test", London, 2000.

[8] V.K. Bui, D. Montgomery, I. Hinczak and K. Turner, "Rapid Test Method for Segregation Resistance of Self-Compacting Concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 32, No. 9, Sep 2002, pp. 1489-1496.

[9] R.P. Khatri and V. Sirivivatnanon, "Methods for the Determination of Water Permeability of Concrete", ACI Materials Journal, Vol. 94, No. 3, 1997, pp. 257-261.

[10] S. Mustafa, Y.O. Ismail and T. Mustafa, "Transport and Mechanical Properties of Self Consolidating Concrete with High Volume Fly Ash", Cement & Concrete Composites, Vol. 31, No. 2, Feb 2009, pp. 99-106.

[11] M.N. Haque, O.A. Kayyali and M.K. Gopalan, "Fly Ash Reduces Harmful Chloride Ions in Concrete", ACI Materials Journal, Vol. 89, No. 3, June 1992, pp. 102-108.

[12] P. Chindapasirt, S. Homwuttiwong and C. Jaturapitakkul, "Strength and Water Permeability of Concrete Containing Plam Oil Fuel Ash and Rice Husk-Bark Ash", Construction and Building Materials, Vol. 21, No. 7, July 2007, pp. 1492-1499.