

อิทธิพลของการใช้เถ้าก้นเตาในปริมาณสูงเป็นวัสดุปอซโซลานต่อกำลังอัด การดูดซึมน้ำ และการต้านทานแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีต

Influence of High Volume Bottom Ash as a Pozzolan on Compressive Strength, Water Absorption, and $MgSO_4$ Resistance of Concrete

กมล ตรีผอง^{1*} อรรคเดช อับดุลมาดิน² และวีรพันธุ์ เจริญมีปรีชา³

^{1*}สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

วิทยาเขตวังไกลกังวล อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

²สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

อำเภอเมือง จังหวัดนราธิวาส 96000

³สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

^{1*}E-mail: kamon.tre@rmutr.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลกระทบของเถ้าก้นเตาปริมาณสูงในคอนกรีตเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลานต่อกำลังอัด การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและการดูดซึมน้ำของคอนกรีต เถ้าก้นเตาที่ใช้ในงานวิจัยถูกนำมาบดจนมีปริมาณอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 20, 30, 50 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปาและน้ำที่มีสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่อายุการทดสอบ 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน ในขณะที่การดูดซึมน้ำจะทดสอบที่อายุ 28 วัน ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ใช้ปริมาณเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และคอนกรีตที่ใช้ปริมาณเถ้าก้นเตาแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมอื่นทุกอายุการทดสอบ ค่าร้อยละการสูญเสียกำลังอัดเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีต มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออายุมากขึ้น และร้อยละการสูญเสียกำลังอัดที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตที่มีเถ้าก้นเตาปริมาณร้อยละ 50 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่าสูงกว่าส่วนผสมอื่น ๆ สำหรับค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีต พบว่ามีค่าสูงขึ้นเมื่อคอนกรีตมีปริมาณเถ้าก้นเตาที่

* Corresponding author, e-mail: kamon.tre@rmutr.ac.th

มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบอีกว่าการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อคอนกรีตมีการดูดซึมน้ำมากกว่าร้อยละ 3.10 จากการวิจัยครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่าถึงแม้การใช้เถ้าก้นเตาในปริมาณสูงในส่วนผสมคอนกรีตส่งผลให้มีค่ากำลังต่ำลง แต่กำลังอัดของคอนกรีตที่ได้ยังคงจัดเป็นคอนกรีตทนซัลเฟตประเภท S0 ตามมาตรฐาน ACI 318-14

คำสำคัญ: เถ้าก้นเตา วัสดุปอซโซลาน กำลังอัด การดูดซึมน้ำ สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

Abstract

This article presents the effect of high-volume bottom ash to be used as Pozzolan on compressive strength, percentage compressive strength loss due to immersion in magnesium sulfate ($MgSO_4$) solution, and water absorption of concrete. The bottom ash used in this research was ground until the particles were retained on a No.325 sieve less than 5% by weight. After that, the bottom ash was used to replace Portland cement at the rates of 10, 20, 30, 50, and 70% by weight of the binder. The water to binder ratio was constant at 0.45. Compressive strength, the percentage loss of compressive strength due to immersion in 5% $MgSO_4$ solution, and water absorption of concrete were investigated. The results found that concrete containing bottom ash in the mixture as 10% by weight gave higher compressive strength than control concrete and the others bottom ash concrete mixture. The loss of compressive strength due to immersion in $MgSO_4$ solution was increased when the age of concrete increased. The losses of compressive strength due to immersion in $MgSO_4$ solution in the percentage of concrete containing bottom ash at the rates of 50 and 70% by weight of binder were higher than the others bottom ash concrete. For another result, the water absorption of concrete was increased by enhancing the bottom ash level in the concrete mixture. Additionally, the result also found that the percentage loss of compressive strength due to immersion in $MgSO_4$ solution rapidly raised when the concrete had water absorption higher than 3.10%. This research indicated that, although the use of high-volume bottom ash in the concrete mixture affected the decreasing of compressive strength, their compressive strength could meet the requirement of concrete exposed in a sulfate environment in accordance with ACI 318-14.

Keyword: Bottom ash, pozzolanic material, compressive strength, water absorption, magnesium sulfate solution.

1. บทนำ

คอนกรีตถือเป็นวัสดุก่อสร้างที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในประเทศไทย เนื่องจากเป็นวัสดุก่อสร้างที่มีราคาถูกเมื่อเทียบกับเหล็กรูปพรรณ ทั้งในแง่ของราคาระเบียดและค่าแรงงาน ดังนั้นอุตสาหกรรมก่อสร้างในประเทศไทยนิยมใช้คอนกรีตมากกว่าเหล็กรูปพรรณ อย่างไรก็ตามการใช้คอนกรีตในปริมาณที่สูง ก็ย่อมส่งผลให้ความต้องการปูนซีเมนต์ในประเทศเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย จากรายงานภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมปี 2563 มีการผลิตปูนซีเมนต์ (ไม่รวมปูนเม็ด) จำนวน 39.87 ล้านตัน ลดลงจากปี 2562 ร้อยละ 2.62 เนื่องผลกระทบการแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสโควิด 19 โดยเป็นการจำหน่ายในประเทศ จำนวน 35.39 ล้านตัน เพิ่มขึ้นจากปี 2562 คิดเป็นร้อยละ 2.08 จากการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานและโครงการขนาดใหญ่ของภาครัฐ [1] แต่เนื่องจากปัญหาสภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน การที่จะเลือกใช้คอนกรีตที่มีส่วนผสมแบบเดิม คือใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานล้วน จะไม่เป็นที่ยอมรับอีกต่อไป ดังนั้นนักวิจัยจึงได้พยายามนำวัสดุทดแทน เพื่อมาใช้แทนปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงของการผลิตคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และอาศัยผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาปอซโซลาน เพื่อเพิ่มสมบัติด้านความทนทานให้กับคอนกรีต โดยยังคงความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตตามความต้องการได้อย่างปลอดภัย

เถ้าก้นเตา (Bottom ash) เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเผาถ่านหินเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า โดยเกิดเป็นเถ้าลอย (Fly ash) ที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะลอยขึ้นสู่ปล่องควัน ส่วนเถ้าที่มีอนุภาคขนาดใหญ่และเป็นรูปทรง จะตกลงสู่ก้นเตา เรียกว่าเถ้าก้นเตา องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเถ้าก้นเตา ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนกับเถ้าลอย [2] ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมินัมไตรออกไซด์ (Al_2O_3) เฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) โดยที่ปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีจะมีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านหินและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา [3] งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเถ้าก้นเตา เริ่มจากงานวิจัยของ Kurama and Kata [4] ที่ได้นำเสนอการใช้เถ้าก้นเตาจากถ่านหินในคอนกรีตสูงสุดถึงร้อยละ 25 โดยได้ค่ากำลังอัดอยู่ที่ร้อยละ 71.19, 71.22 และ 91.91 ที่อายุการทดสอบ 7, 28 และ 56 วัน ตามลำดับ เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม Wongkeo และคณะ [5] ได้ทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกมวลเบา ที่ใช้เถ้าก้นเตาเป็นวัสดุประสาน โดยค่ากำลังอัดจะเพิ่มสูงขึ้นประมาณร้อยละ 20 จากนั้นงานวิจัยของ Khongpermgoson และคณะ [6] ได้ทำการศึกษากำลังอัดของคอนกรีตโดยใช้เถ้าก้นเตาและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในอัตราส่วนร้อยละ 70:30 ร่วมกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นสารเร่งกำลังร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ซึ่งกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นสารเร่งกำลัง ซึ่งจะสอดคล้องกับงานวิจัยของ กมล ตรีทอง และคณะ [7] ที่ทำคอนกรีตบล็อกจากเถ้าก้นเตาและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นสารเร่งกำลัง

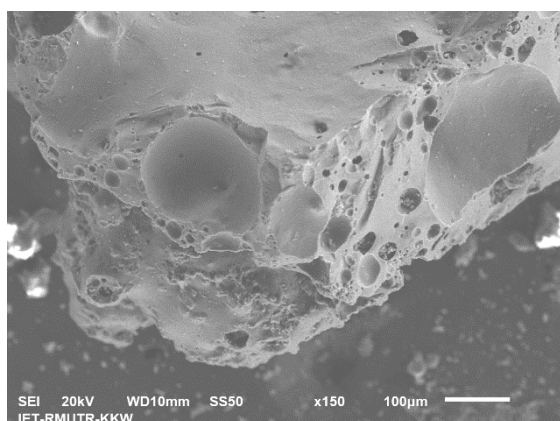
จากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต พบว่าเถ้าก้นเตาสามารถใช้เป็นวัสดุประสานสำหรับคอนกรีตได้ [8-10] โดยงานวิจัยนี้จะเน้นการนำเถ้าก้นเตามาปรับปรุงคุณภาพและใช้ทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณสูง และเพื่อศึกษาผลของซัลเฟตที่มีต่อการใช้งานคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาในส่วนผสมในสภาพแวดล้อมที่มีสารละลายซัลเฟต ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของกำลังอัดและการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและการดูดซึมน้ำ อีกทั้งยังลดปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อม และลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่

ชั้นบรรยากาศ เนื่องจากการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงเป็นจำนวนมากในอัตราส่วนผสมคอนกรีต อีกทั้งยังเป็นองค์ความรู้สำหรับการใช้งานคอนกรีตที่มีเถ้านเตาในส่วนผสมเพื่อใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีสารละลายซัลเฟต

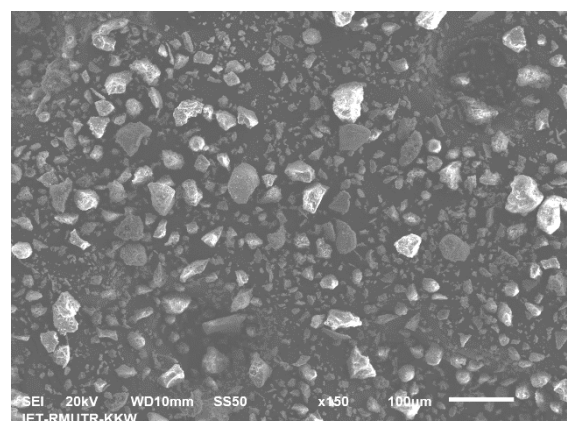
2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

เถ้านเตา (BA) ที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ เป็นเถ้านที่มาจากกระบวนการผลิตไฟฟ้าของโรงผลิตไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งมีลักษณะสีเทาเข้มและเป็นรูพรุน ดังแสดงในรูปที่ 1(ก) จึงจำเป็นต้องทำการปรับปรุงคุณภาพ โดยการบดละเอียดด้วยเครื่อง Los Angeles จนกระทั่งมีปริมาณอนุภาคค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพ พบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.66 และมีปริมาณอนุภาคค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 1.20 โดยน้ำหนัก ซึ่งน้อยกว่าร้อยละ 5 ตามที่กำหนดไว้ จากนั้นนำไปทำการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้านเตา [11] พบว่าเถ้านเตาจะมีองค์ประกอบทางเคมีสอดคล้องกับวัสดุปอซโซลาน Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618 [12] นั่นคือมีผลรวมของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2), อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) อยู่ที่ร้อยละ 70.1 (ASTM C618 กำหนดให้มากกว่าร้อยละ 50 สำหรับ class C) ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เท่ากับร้อยละ 18.7 (ASTM C618 กำหนดให้มากกว่าร้อยละ 18 สำหรับ class C) ส่วนปริมาณของซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) เท่ากับร้อยละ 1.7 (ASTM C618 กำหนดให้ไม่เกินร้อยละ 5 สำหรับ class C) และ 3.6 (ASTM C618 กำหนดให้ไม่เกินร้อยละ 6 สำหรับ class C) ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1 สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ จะเป็นประเภทที่ 1 ที่มีสมบัติตามมาตรฐาน ASTM C188-15 [13] และความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Ordinary Portland Cement, OPC) มีค่าเท่ากับ 3.14 สำหรับมวลรวมละเอียดที่ใช้คือทรายแม่น้ำ และมวลรวมหยาบที่ใช้คือหินปูน โดยมีสมบัติทางกายภาพ ดังแสดงในตารางที่ 2



(ก) ก่อนบด



(ข) หลังบด

รูปที่ 1 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้านเตา

2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

อัตราส่วนผสมของเถ้าก้นเตาแทนที่ปูนซีเมนต์ในงานวิจัยครั้งนี้ จะอยู่ที่ร้อยละ 10, 20, 30, 50 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 มีการใช้สารลดน้ำพิเศษชนิด F เพื่อคงค่ายุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ในช่วง 5-10 ซม. สำหรับงานวิจัยครั้งนี้มีสัญลักษณ์แทนชื่อตัวอย่างคอนกรีตเป็น 2 รูปแบบ สัญลักษณ์ CT คือคอนกรีตควบคุม และ CB คือคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ปูนซีเมนต์ สำหรับตัวเลขหลังสัญลักษณ์ CB คือปริมาณที่ใช้เถ้าก้นเตาในส่วนผสม ยกตัวอย่างเช่น CB50 หมายถึงคอนกรีตที่มีเถ้าก้นเตาในส่วนผสมร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และแบ่งลักษณะการบ่มออกเป็น 2 ประเภท คือบ่มในน้ำประปาใช้สัญลักษณ์ W และบ่มในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ใช้สัญลักษณ์ S ที่อายุการทดสอบ 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน สำหรับการทดสอบกำลังอัด ในขณะที่การทดสอบการดูดซึมน้ำจะทำการทดสอบที่อายุ 28 วันเท่านั้น สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3 โดยคอนกรีตตัวอย่างจะถูกหล่อในตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. และสูง 200 มม. ตามมาตรฐาน ASTM C39 [14]

สำหรับขั้นตอนการทดสอบการดูดซึมน้ำ จะสามารถทำได้โดยการนำตัวอย่างไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อหาปริมาณน้ำที่ดูดซึมเข้าไป ค่าเฉลี่ยการดูดซึมน้ำของคอนกรีตทั้ง 3 ตัวอย่าง นำมาใช้ในการรายงานผล

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตาและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [11]

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	BA	OPC
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	35.6	20.9
อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3)	19.6	4.8
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)	14.9	3.4
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	18.7	65.4
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	1.7	2.7
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	2.4	1.3
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	1.2	0.3
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	2.3	0.4
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI)	3.6	2.9

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของมวลรวม

มวลรวม	ความถ่วงจำเพาะ	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
ทรายแม่น้ำ	2.63	1.52
หินปูน	2.75	0.23

ตารางที่ 3 ส่วนผสมของคอนกรีต

คอนกรีต	สัดส่วนผสม (กก./ลบ.ม.)						ค่าการยุบตัว (ชม.)
	ปูนซีเมนต์	เถ้าก้นเตา	ทรายแม่น้ำ	หินปูน	น้ำ	สารลดแรงตึงผิว	
CT	350	0	900	1,035	157.5	-	10.0
CB10	315	35	900	1,035	157.5	-	9.0
CB20	280	70	900	1,035	157.5	-	9.0
CB30	245	105	900	1,035	157.5	-	5.5
CB50	175	175	900	1,035	157.5	2.10	7.0
CB70	105	245	900	1,035	157.5	3.50	7.5

3. ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

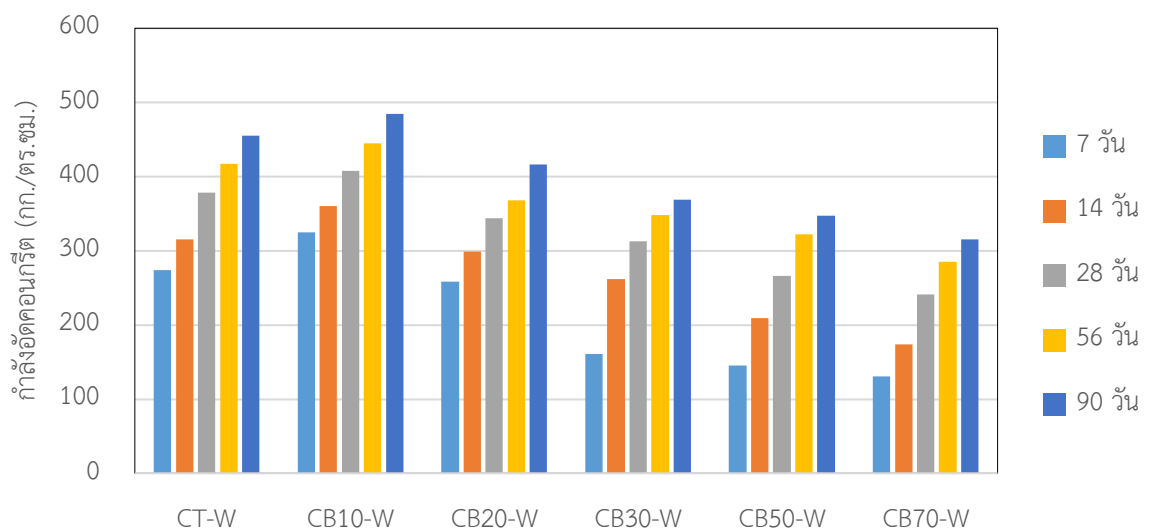
3.1 กำลังอัดคอนกรีต

กำลังอัดของคอนกรีต CT-W และคอนกรีต CB-W สำหรับคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปาแสดงดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่าคอนกรีต CT-W มีกำลังอัดเท่ากับ 274 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 7 วัน และเพิ่มขึ้นเป็น 378 และ 455 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ การแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุปอซโซลานในคอนกรีต มีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับคอนกรีต CT-W ยกตัวอย่างเช่น คอนกรีต CB10-W มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมตั้งแต่อายุ 7 วัน และสูงขึ้นต่อเนื่องจนถึงอายุ 90 วัน ซึ่งมีกำลังอัดเท่ากับ 485 กก./ตร.ซม. ในขณะที่คอนกรีต CB20-W จะมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมเล็กน้อย ประมาณร้อยละ 5-10 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kurama และ Kaya [15] ที่ได้รายงานไว้ว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาแต่ละเอียงร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จะส่งผลทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้นประมาณร้อยละ 6 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม อย่างไรก็ตามเมื่อคอนกรีตมีส่วนผสมของเถ้าก้นเตาแต่ละเอียงเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จะพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตลดลงประมาณร้อยละ 5 ของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 56 วัน

เมื่อใช้เถ้าก้นเตาในปริมาณสูง (ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานขึ้นไป) ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงอายุต้น โดยคอนกรีต CB50-W และ CB70-W มีกำลังอัดที่

อายุ 7 วันเท่ากับ 145 และ 131 กก./ตร.ชม. หรือคิดเป็นร้อยละ 53 หรือ 48 ของคอนกรีต CT-W ตามลำดับ การที่กำลังอัดของคอนกรีต CB50-W และ CB70-W มีกำลังลดลงประมาณร้อยละ 50 ของคอนกรีตควบคุมนั้น เป็นผลเนื่องมาจากการลดปูนซีเมนต์ลงส่งผลให้สารประกอบ C_3S และ C_2S ลดลงทำให้กำลังอัดในช่วงอายุต้นลดลงมากตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าก้นเตา อย่างไรก็ตามเมื่ออายุเพิ่มขึ้นไปที่ 28 วัน คอนกรีต CB50-W และ CB70-W มีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเท่ากับ 266 และ 241 กก./ตร.ชม. หรือคิดเป็นร้อยละ 70 และ 64 ของคอนกรีต CT-W ตามลำดับ และยังเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็น 347 และ 315 กก./ตร.ชม. หรือคิดเป็นร้อยละ 76 และ 69 ของคอนกรีตควบคุม ที่อายุ 90 วัน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดในช่วงอายุปลาย เป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าก้นเตา จากการศึกษาของ อรรถเดช อับดุลมาติน และคณะ [16] รายงานว่า กำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าก้นเตาที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่าประมาณร้อยละ 3 ของกำลังอัดทั้งหมด (กำลังอัดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน) ที่อายุ 7 วัน และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 11 และ 17 ของกำลังอัดทั้งหมด นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังอัดของคอนกรีต CB50-W มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตใช้เถ้าถ่านหินหยาบเป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 55 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.32 [17] โดย CB50-W มีกำลังอัดเท่ากับ 266 และ 347 กก./ตร.ชม. ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีตที่มีเถ้าถ่านหินหยาบร้อยละ 55 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ในส่วนผสมมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 240 และ 327 กก./ตร.ชม. ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ

จากผลกำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดด้วยปริมาณร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถผลิตเป็นคอนกรีตสำหรับใช้ในงานคอนกรีตที่สัมผัสกับดินหรือน้ำที่มีซัลเฟตไอออนทั้ง 4 ระดับชั้นคุณภาพ ที่กำหนดโดยมาตรฐาน ACI 318M-14 [18] ดังตารางที่ 4 นอกจากนี้ยังพบอีกว่ากำลังอัดที่ 28 วัน ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาในปริมาณสูงในส่วนผสมคอนกรีตร้อยละ 50 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เมื่อพิจารณาเฉพาะผลของกำลังอัดสามารถจัดให้อยู่ในชั้นคุณภาพของคอนกรีตทนซัลเฟตประเภท S0 ซึ่งต้องมีกำลังอัดมากกว่า 170 กก./ตร.ชม. ที่อายุ 28 วัน ทั้งนี้จำเป็นต้องพิจารณาคุณสมบัติด้านอื่นของคอนกรีตเพิ่มเติมด้วย



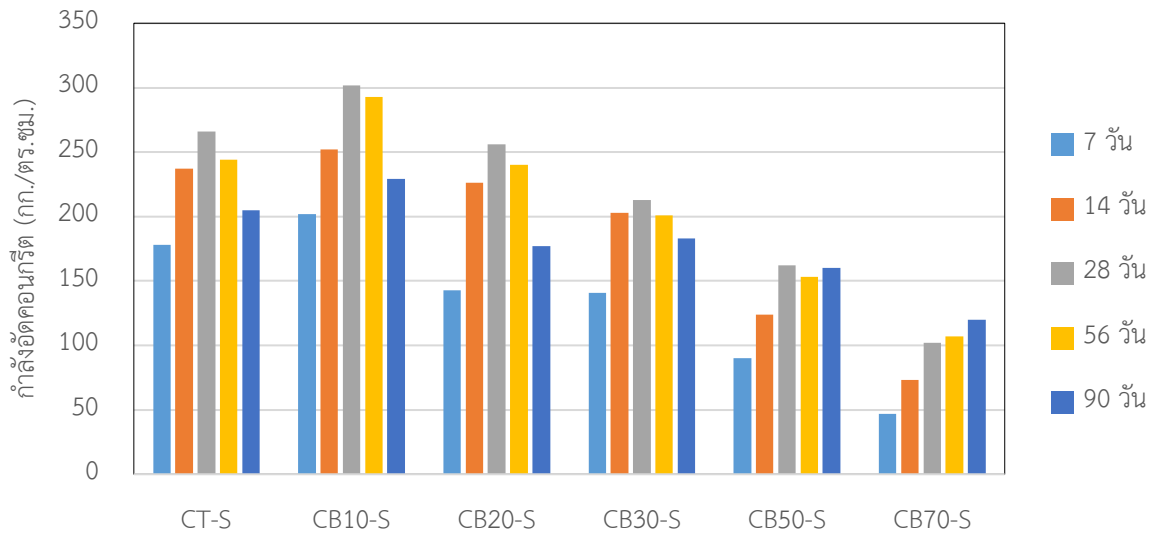
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปาและอายุของคอนกรีต

ตารางที่ 4 เกณฑ์ชั้นคุณภาพของคอนกรีตที่สัมผัสดินหรือน้ำที่มีซัลเฟตไอออน [18]

ระดับชั้นคุณภาพของคอนกรีต	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานชั้นต่ำ	กำลังอัดขั้นต่ำที่อายุ 28 วัน (กก./ตร.ซม.)
S0	N/A	170
S1	0.50	280
S2	0.45	310
S3	0.45	310

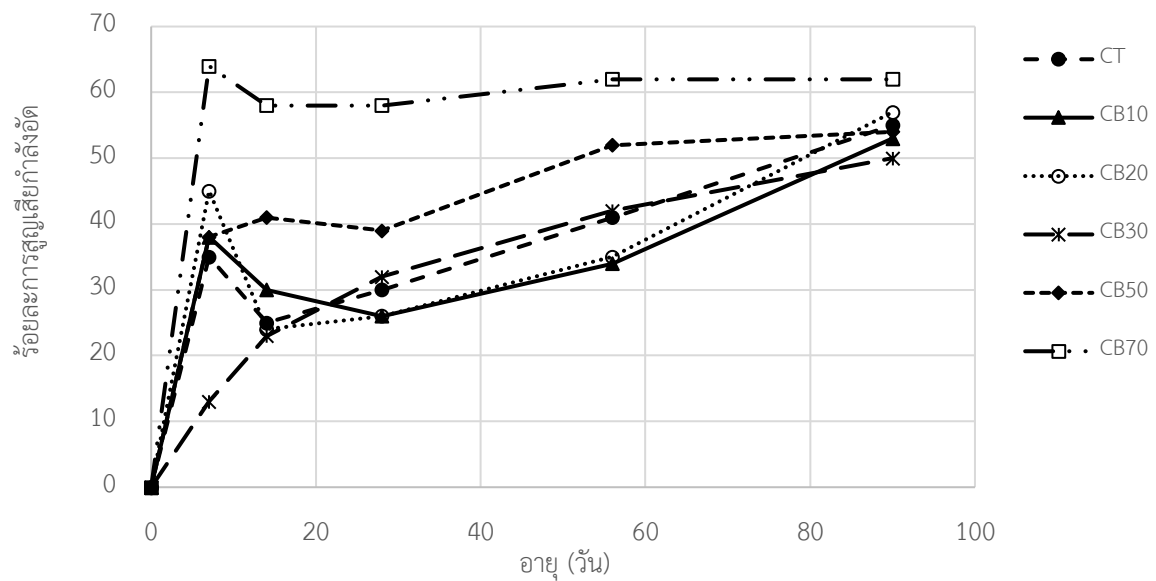
3.2 กำลังอัดของคอนกรีตเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ตัวอย่างคอนกรีตทั้งหมดทุกส่วนผสมถูกบ่มในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 ตั้งแต่หลังจากการถอดแบบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อศึกษากำลังอัดที่สูญเสียไปของคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 3 จะสังเกตได้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตในทุกส่วนผสม ทั้งคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่มีเถ้ากันเตาบาดละเอียดในส่วนผสมมีค่าน้อยกว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปา และยังสังเกตได้ว่าพฤติกรรมของการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต มีลักษณะที่แตกต่างจากการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปา โดยเฉพาะอย่างยิ่งคอนกรีต CT-S, CB10-S, CB20-S และ CB30-S กลุ่มคอนกรีตดังกล่าวจะมีกำลังอัดลดลงเมื่อคอนกรีตถูกบ่มในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมากกว่า 28 วัน ยกตัวอย่างเช่น คอนกรีต CT, CB10-S, CB20-S, และ CB30-S พัฒนากำลังอัดได้เท่ากับ 266, 302, 256 และ 213 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 วัน ตามลำดับ อย่างไรก็ตามกำลังอัดที่อายุ 56 วัน กลับลดลงเหลือ 244, 293, 240 และ 201 กก./ตร.ซม ตามลำดับ และลดลงมากยิ่งขึ้นที่อายุ 90 วัน จนมีกำลังอัดเหลือ 205, 229, 177 และ 183 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 90 วัน ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าคอนกรีต CB50-S และ CB70-S มีการพัฒนากำลังอัดหลังอายุ 28 วัน น้อยลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปา ลักษณะเช่นนี้สามารถอธิบายได้จากการศึกษาของ Baghabra Al-Amoudi [19] ซึ่งรายงานว่ แมกนีเซียมซัลเฟตสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่มีอยู่ในคอนกรีต เกิดเป็นยิปซัม (CSH_2) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Mg(OH)_2) โดยทั่วไปแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะมีค่า pH ต่ำกว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ [20] การที่ค่า pH ในระบบภายในคอนกรีตลดลงส่งผลให้แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) เกิดการสูญเสียเสถียรภาพความเป็นต่าง จึงทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮดรตทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลเฟตอีกครั้ง และเกิดเป็นยิปซัมและซิลิกาเจล จากการเปลี่ยนแปลงของแคลเซียมซิลิเกต เนื่องจากการทำปฏิกิริยาจึงส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต หลังจากอายุ 28 วัน มีค่าลดลง และสำหรับการแทนที่เถ้ากันเตาในปริมาณสูงซึ่งทำให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคอนกรีตลดลง เนื่องจากการทำปฏิกิริยาทำให้สารตั้งต้นที่จะทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลเฟตน้อยลงทำให้กำลังอัดในช่วงอายุปลายไม่ลดลงหรือลดลงน้อย อย่างไรก็ตามกำลังอัดของคอนกรีต CB50-S และ CB70-S ยังคงมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้ากันเตาในปริมาณร้อยละ 10, 20, และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและอายุของคอนกรีต

เมื่อคิดการสูญเสียกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เปรียบเทียบกับกำลังอัดคอนกรีตที่แช่ในน้ำประปา ดังรูปที่ 4 จากผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าร้อยละการสูญเสียกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเมื่อเทียบกับน้ำประปามีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น อย่างไรก็ตามสำหรับคอนกรีต CT, CB10, CB20 และ CB30 ไม่สามารถสรุปได้เกี่ยวกับค่าร้อยละการสูญเสียกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เนื่องจากคอนกรีตมีกำลังอัดไม่ต่างกันมากนัก ซึ่งอาจจำเป็นต้องศึกษาในระยะเวลาที่ยาวนานขึ้น สำหรับคอนกรีต CB50 และ CB 70 มีแนวโน้มการสูญเสียกำลังอัดของคอนกรีตที่มากกว่ากลุ่มคอนกรีต CT, CB10, CB20 และ CB30 อาจเนื่องมาจากคอนกรีต CB50 และ CB 70 มีกำลังอัดต่ำเมื่อเทียบกับคอนกรีตกลุ่มดังกล่าว จากงานวิจัยของ Jaturapitakkul และคณะ [21] รายงานว่า เมื่อคอนกรีตใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีอนุภาคขนาดใหญ่เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำ (99 กก./ตร.ซม.) ทำให้คอนกรีตมีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้น ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่ามากกว่าส่วนผสมอื่น ๆ ที่ทำการศึกษา



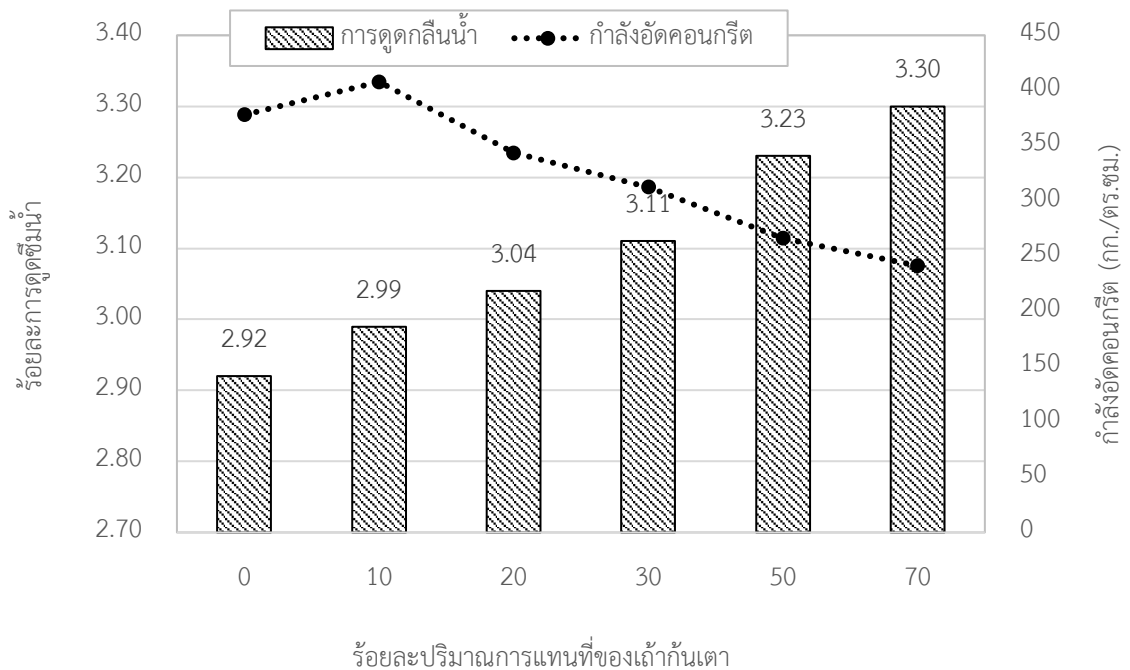
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเมื่อเทียบกับกรณีที่แช่ในน้ำประปา และอายุของคอนกรีต

3.3 การดูดซึมน้ำของคอนกรีต

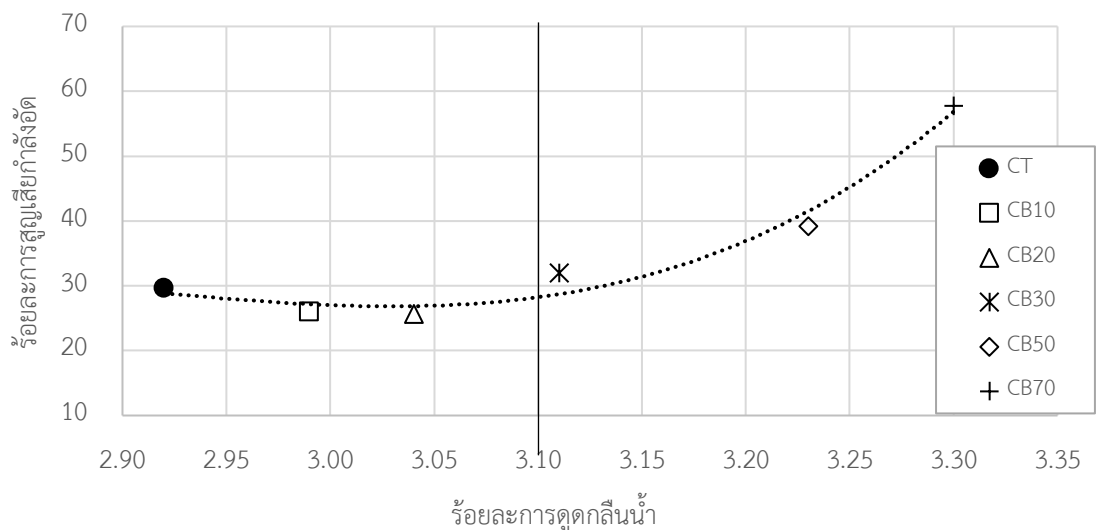
ในงานวิจัยครั้งนี้ ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตทดสอบที่อายุ 28 วัน โดยมีผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5 การดูดซึมน้ำของคอนกรีต CT มีค่าเท่ากับร้อยละ 2.92 ในขณะที่คอนกรีต CB10 มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 2.99 และมีค่าสูงขึ้นเท่ากับร้อยละ 3.04, 3.11, 3.23 และ 3.30 สำหรับคอนกรีต CB20, CB30, CB50 และ CB70 ตามลำดับ เป็นที่สังเกตว่าการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อคอนกรีตมีการแทนที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของเถ้าก้นเตามีรูพรุนสูง ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 1 ควบคู่กับค่าความถ่วงจำเพาะ ซึ่งเถ้าก้นเตาแต่ละชนิดมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.66 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ที่มีค่าเท่ากับ 3.14 นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้ค้นพบอีกว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาเป็นวัสดุปอซโซลานมีค่าการดูดซึมน้ำแปรผกผันกับกำลังอัดของคอนกรีต กล่าวคือเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น แต่ร้อยละการดูดซึมน้ำมีค่าลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าหากคอนกรีตเป็นชนิดเดียวกันปริมาณช่องว่างที่น้ำซึมผ่านได้ จะมีค่าลดลงเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดที่มีค่าสูงขึ้น [6] อย่างไรก็ตามหากพิจารณาคอนกรีต CT ที่มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีต CB10 แต่กลับพบว่าคอนกรีต CT มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำต่ำกว่าคอนกรีต CB10 จะเห็นได้ว่าอิทธิพลของการใช้เถ้าก้นเตา (ซึ่งมีรูพรุน) มีผลต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีตค่อนข้างมาก

เมื่อพิจารณาการสูญเสียกำลังอัดของคอนกรีตควบคู่กับการดูดซึมน้ำของคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 6 จะพบว่าเมื่อคอนกรีตมีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำมาก ส่งผลให้คอนกรีตมีการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมากขึ้นไปด้วย การที่คอนกรีตมีการดูดซึมน้ำมากขึ้น หมายถึงปริมาณช่องว่างที่น้ำซึมผ่านได้ของคอนกรีตมีอยู่มากดังที่กล่าวมาข้างต้น ด้วยเหตุนี้ทำให้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตสามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ง่ายขึ้นและทำให้คอนกรีตมีการสูญเสียกำลังอัดที่มากขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยในครั้งนี้ยังค้นพบอีกว่า หากคอนกรีตมีค่าการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 3.10 การสูญเสียกำลังอัดของคอนกรีตเนื่องจากการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อคอนกรีตมีค่าการดูดซึมน้ำมากกว่าร้อยละ 3.10

การสูญเสียกำลังอัดของคอนกรีตเนื่องจากการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งชี้ให้เห็นว่าหากต้องการทำให้คอนกรีตมีความทนทานต่อสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ควรทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำและมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่าร้อยละ 3.10



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซึมน้ำ กำลังอัด และร้อยละปริมาณการแทนที่ของเถ้าก้นเตาในคอนกรีต



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่แช่ในน้ำประปา และร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน

4. สรุปผลการทดสอบ

บทความนี้นำเสนอการศึกษากำลังอัด การสูญเสียกำลังอัด เนื่องจากการบ่มคอนกรีตในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาปริมาณสูงเป็นวัสดุปอซโซลาน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาเป็นวัสดุปอซโซลานในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (CB10) จะให้ค่ากำลังอัดสูงสุด โดยคอนกรีต CB10 มีค่ากำลังอัดสูงถึง 408 และ 485 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ

4.2 คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าก้นเตาในปริมาณสูงร้อยละ 50 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน แม้ว่าคอนกรีตมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอายุการทดสอบ อย่างไรก็ตามคอนกรีต CB50 สามารถจัดให้อยู่ในชั้นคุณภาพของคอนกรีตทนซัลเฟตประเภท S0 ยิ่งไปกว่านั้นคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาในปริมาณร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานสามารถผลิตเป็นคอนกรีตทนซัลเฟตได้ถึงระดับชั้นคุณภาพ S3 ตามมาตรฐาน ACI 318-14

4.3 สำหรับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนเป็นวัสดุประสาน และคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าก้นเตาร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เมื่อนำไปแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ส่งผลให้การพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงอายุปลายมีปัญหา กล่าวคือ คอนกรีตมีกำลังลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาของสารประกอบในคอนกรีตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต นอกจากนี้ยังพบอีกว่า การสูญเสียกำลังอัดของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตถูกแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในน้ำประปาทุกส่วนผสม มีค่าประมาณร้อยละ 50-70 ที่อายุ 90 วัน และอิทธิพลของปริมาณเถ้าก้นเตาในช่วงร้อยละ 10-30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ต่อร้อยละการสูญเสียกำลังอัด ยังไม่สามารถสรุปแนวโน้มได้อย่างมีนัยสำคัญในช่วงอายุ 90 วัน

4.4 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้น เมื่อคอนกรีตมีการใช้เถ้าก้นเตาในปริมาณที่สูงขึ้น และการทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น สามารถปรับปรุงค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตให้ลดลงได้ นอกจากนี้ยังพบว่าการดูดซึมน้ำสูงขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีค่าร้อยละการสูญเสียกำลังอัด เนื่องจากการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในน้ำประปาสูงขึ้นอีกด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล ที่ได้สนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ ภายใต้สัญญาทุนเลขที่ A-8/2562

6. เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2563, รายงานภาพรวมเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมไทย ปี 2563 และแนวโน้ม ปี 2564, หน้า 26.

[2] P. Chindaprasit, C. Jaturapitakkul, W. Chalee and U. Rattanasak, "Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers," *Waste Manage.*, vol. 29, no. 2, pp. 539-543, 2009.

- [3] P. Krammart and S. Tangtermsirikul, "Properties of cement made by partially replacing cement raw materials with municipal solid waste ashes and calcium carbide waste", *Constr. Build. Mat.*, vol. 18, no. 8, pp. 579-583, 2004.
- [4] H. Kurama and M. Kaya, "Usage of coal combustion bottom ash in concrete mix-ture," *Constr. Build. Mat.*, vol. 22, no. 9, pp. 1922-1928, 2008.
- [5] W. Wongkeo, P. Thongsanitgarn, K. Pimraksa and A. Chaipanich, "Compressive strength, flexural strength and thermal conductivity of autoclaved concrete block made using bottom ash as cement replacement materials," *Mat. Des.*, vol. 35, pp. 434-439, 2012.
- [6] P. Khongpermgoson, A. Abdulmatin, W. Tangchirapat and C. Jaturapitakkul, "Evaluation of compressive strength and resistance of chloride ingress of concrete using a novel binder from ground coal bottom ash and ground calcium carbide residue," *Constr. Build. Mat.*, vol. 214, pp. 631-640, 2019.
- [7] กมล ตรีผอง, วีรพันธุ์ เจียมมีปรีชา และ อรรคเดช อับดุลมาติน. "การใช้ประโยชน์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านเป็นวัสดุประสานสำหรับคอนกรีตบล็อก," *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, ปีที่ 15 (ฉบับที่ 2), หน้า 1-11, 2563.
- [8] C. Jaturapitakkul and R. Cheererot, "Development of bottom ash as pozzolanic material," *J. Mat. Civ. Eng., ASCE*, vol. 15, no. 1, pp. 48-53, 2003.
- [9] R. Siddique, "Compressive strength, water absorption, sorptivity, abrasion resistance and permeability of self-compacting concrete containing coal bottom ash", *Constr. Build. Mat.*, vol. 47, pp. 1444-1450, 2013.
- [10] A. Abdulmatin, W. Tangchirapat and C. Jaturapitakkul, "An investigation of bottom ash as a pozzolanic material," *Constr. Build. Mat.*, vol. 186, pp. 155-162, 2018.
- [11] อรรคเดช อับดุลมาติน, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. "ผลกระทบของชนิดของสารลดน้ำพิเศษต่อสมบัติของเพสต์และมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าถ่านร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสาน," *วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย*, ปีที่ 3 (ฉบับที่ 1), หน้า 31-41, 2558.
- [12] ASTM C618, "Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete," *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2019.
- [13] ASTM C188-15, "Standard test method for density of hydraulic cement," *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2015.
- [14] ASTM C39 / C39M-16, "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens," *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2016.

- [15] Kurama, H. and Kaya, M., 2008, "Usage of Coal Combustion Bottom Ash in Concrete Mixture," *Construction and Building Materials*, 22 (9) pp. 1922- 1928
- [16] อรรถเดช อับดุลมาติน, ปกป้อง รัตนชู, เพ็ญพิชชา คงเพิ่มโกศล, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. “การศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้ากันเตาที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์และถ่านหินบิทูมินัส” *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, ปีที่ 43 (ฉบับที่ 1) หน้าที่ 49-65, 2563.
- [17] Bouzoubaa, N., Min-Hong Zhang, and V. M. Malhotra. "Mechanical properties and durability of concrete made with high-volume fly ash blended cements using a coarse fly ash." *Cement and Concrete Research* Vol 31, no. 10 : 1393-1402., 2001.
- [18] ACI Committee 318. “Building code requirements for structural concrete (ACI 318-11) and commentary. American Concrete Institute, Michigan. 519p (2015).
- [19] Baghabra Al-Amoudi, O.S., "Attack on Plain and Blended Cements Exposed to Aggressive Sulfate Environments", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 24, No. 3–4, pp. 305-316. 2002.
- [20] Rasheeduzzafar, Al-Amoudi, O.S.B., Abduljawwad, S.N. and Maslehuddin, M., "Magnesium-Sodium Sulfate Attack in Plain and Blended Cements", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 201-222, 1994.
- [21] Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Tangchirapat, W. and Saeting, T., "Evaluation of the Sulfate Resistance of Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash", *Construction and Building Materials*, Vol. 21, No. 7, pp. 1399-1405, 2007.