

## บทความวิจัย

ผลกระทบของความละเอียดของผงแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติเชิงกล  
ของคอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเองผสมเถ้าลอยตกเกรดEFFECT OF FINENESS OF CALCIUM CARBONATE POWDER  
ON MECHANICAL PROPERTIES OF SELF-COMPACTING CONCRETE  
MIXED WITH OFF-SPECIFICATION PULVERIZED FUEL ASH

ประกาศิต ไส้ไกร\* กิตติคุณ มั่งคั่ง สถาพร ปกป้อง จุฬาลักษณ์ ชาญกุล และ ณัฐฐ์ มากุล  
Prakasit Sokrai<sup>1</sup>, Kittikun Mungkung, Sataporn pokpong, Chulakal changul and Natt Makul

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาคาร คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร กรุงเทพมหานคร 10220  
Building Technology, Faculty of Industrial Technology, Phranakhon Rajabhat University, Bangkok, 10220

\*E-mail : prakasit.s@pnru.ac.th

## บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลกระทบของความละเอียดของผงแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเองผสมเถ้าลอยตกเกรดและผงแคลเซียมคาร์บอเนต โดยศึกษาผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาดอนุภาค ( $D_{[v,50]}$ ) เท่ากับ 2, 8 และ 15 ไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10 และ 20 ร่วมกับเถ้าลอยตกเกรดที่อัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 25 และ 30 โดยน้ำหนัก สมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เถ้าลอยตกเกรดและผงแคลเซียมคาร์บอเนตประกอบด้วย องค์ประกอบเคมีและสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล ได้แก่ กำลังอัด กำลังดึงแบบผ่าซีก และโมดูลัสยืดหยุ่น จากผลการทดสอบพบว่า กำลังอัดที่อายุช่วงต้นของคอนกรีตผสมผงแคลเซียมคาร์บอเนตมีแนวโน้มมากกว่าคอนกรีตปกติ ในขณะที่คอนกรีตผสมผงแคลเซียมคาร์บอเนตและเถ้าลอยตกเกรดมีค่ากำลังอัดที่ระยะยาวมีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตปกติ ส่วนกำลังดึงแบบผ่าซีกและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยตกเกรดและผงแคลเซียมคาร์บอเนตมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกำลังอัด นอกจากนี้ความละเอียดของผงแคลเซียมคาร์บอเนตมีผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติเชิงกล โดยผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาดอนุภาคเล็กมีผลทำให้สมบัติเชิงกลสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาดอนุภาคใหญ่

**คำสำคัญ:** คอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง ผงแคลเซียมคาร์บอเนต เถ้าลอยตกเกรด ความละเอียด สมบัติเชิงกล

## ABSTRACT

This paper presented the results of the effect of the fineness of calcium carbonate powder (CCP) on the mechanical properties of self-compacting concrete (SCC) mixed with off-specification pulverized fuel ash (OsPFA) and calcium carbonate powder (CCP). CCP with having fineness by representing as mean particle sizes ( $D_{[v,50]}$ ) equal to 2, 8 and 15 micrometers ( $\mu\text{m}$ ) was taking into account by replacing in Type 1 Portland cement (OPC) of the percentages replacement of 0%, 5%, 10% and 20% by weight blended with the OsPFA replacement ratios of 10%, 20%, 25% and 30% by weight of OPC. The basic properties of the materials consisted of chemical composition and physical properties. Mechanical properties included the compressive and splitting tensile strengths and modulus of elasticity. Results showed that of the compressive strengths of early age SCC containing CCP are higher tendency than those of conventional SCC. In addition the calcium carbonate powder-OsPFA SCC are also higher long-term compressive strength than that of the conventional SCC. Further splitting tensile strength and the modulus of elasticity of SCC containing OsPFA and CCP had a similar tendency to theirs compressive strength. In summary the particle size of CCP directly affected on mechanical properties, which high CCP particle size was higher mechanical properties than that of low CCP particle size.

**Keywords:** Self-compacting concrete (SCC), calcium carbonate powder (CCP), Off-specification pulverized fuel ash (OsPFA), Fineness, Mechanical properties

## บทนำ

จากปัญหาก๊าซเรือนกระจกในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ส่งผลให้มีการพัฒนาแนวทางการใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีตอย่างต่อเนื่อง เพราะไม่เพียงแต่ช่วยลดต้นทุนวัสดุแล้ว ยังสามารถช่วยลดการใช้พลังงานในการผลิตได้อีกทางหนึ่งด้วย โดยปัจจุบันประเทศไทยมีการประยุกต์ใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตหลายประเภท อาทิ เช่น ถ้ำลอย (pulverized fuel ash) ผงหินปูน (limestone powder) ซิลิกาฟุ้ง (silica fume) เป็นต้น ทั้งนี้การพัฒนาคำความรู้ในการพัฒนาวัสดุทางเลือกเพื่อนำมาใช้งานร่วมกับแทนที่ปูนซีเมนต์นี้ควรมีสัมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน (pozzolanic materials) ซึ่งตามมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM C 618 (ASTM C618-16 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, 2016))

ได้ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า วัสดุที่มีองค์ประกอบเป็นซิลิคอน (siliceous) หรือ มีทั้งซิลิคอนและอะลูมินา (siliceous and aluminous) ซึ่งที่อุณหภูมิปกติจะไม่ทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่เมื่อทำการบดให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ได้

จากกระบวนการผลิตไฟฟ้าในประเทศไทยส่วนใหญ่ยังคงพึ่งพาการใช้ถ่านหินเป็น เชื้อเพลิงส่งผลให้เกิด ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) ซึ่งเป็นปัญหาทางด้านมลพิษ ถึงแม้ว่าจะมี มาตรการควบคุมที่เข้มงวด แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีของเสียที่เกิดขึ้นในรูปของแข็งประเภทเถ้า ซึ่งคิดเป็นปริมาณสูงถึงร้อยละ 30 ของปริมาณลิกไนต์ที่ใช้ในการเผาไหม้ตัวอย่าง โรงไฟฟ้า พลังความร้อนแม่เมาะมีการใช้ถ่านหินลิกไนต์ประมาณวันละ 50,000 ตัน ซึ่งก่อให้เกิดเถ้า เป็นปริมาณ 15,000 ตัน/วัน ในจำนวนนี้สามารถแบ่งได้เป็นเถ้าลอย (pulverized fuel ash) ร้อยละ 80 ซึ่งพบว่ามีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานเนื่องจากเมื่อเถ้าลอยสัมผัสกับน้ำภายใต้อุณหภูมิ ปกติจะเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้มีสมบัติเชื่อมประสาน จึงมีการนำเถ้าลอยมาใช้ในอุตสาหกรรม ซีเมนต์และคอนกรีตกันอย่างกว้างขวาง ในขณะที่ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 10 หรือมากกว่าคือ เถ้าหนัก (pulverized bottom ash) ซึ่งมีคุณภาพต่ำ ทำให้ไม่เป็นที่นิยมในการนำมาใช้ในอุตสาหกรรม ซีเมนต์และคอนกรีต ดังนั้นการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) จำเป็นต้องใช้พื้นที่ ขนาดใหญ่มากในการฝังกลบจึงเกิดแนวคิดในการนำเถ้าคุณภาพต่ำซึ่งเป็นผลผลิตพลอยได้ จากกระบวนการผลิตไฟฟ้าซึ่งนับวันจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นและเป็นปัญหากับสภาพแวดล้อม และการกำจัดกลับมาสร้างมูลค่าเพิ่ม โดยใช้อุตสาหกรรมคอนกรีตซึ่งเป็นตัวกลางในการนำ ผลพลอยได้ดังกล่าวกลับมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ซึ่งนอกจากจะเป็นการจัดการของเสียที่ ครบวงจรแล้ว สำหรับอุตสาหกรรมคอนกรีตยังได้รับผลในระยะสั้นและยาวที่สามารถพัฒนาสมบัติ ของปูนซีเมนต์ผสมผลผลิตพลอยได้คุณภาพต่ำจากโรงไฟฟ้าถ่านหินและคอนกรีตที่ดีขึ้นและ ลดการผลิตปูนซีเมนต์ได้อีกทางหนึ่ง

ในปัจจุบันได้มีการนำเถ้าลอยมาใช้ในงานคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กและมีทรงกลมของเถ้าลอยที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ (Felekoğlu, et al., 2006) และลดการแยกตัวของคอนกรีต (Ravindrarajah, et al., 2003) โดยความสามารถในการทำงานได้เพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ (Sahmaran & Yaman, 2007) และความละเอียดของเถ้าลอยที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มความหนืดของคอนกรีตสด โดยไม่ทำให้ความสามารถในการไหลลดลง รวมถึงใช้ในงานคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ ด้วยตัวเองประเภทกำลังอัดสูงได้ โดยเถ้าลอยที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 500-600 ตารางเมตร ต่อกิโลกรัม อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยน้ำหนักร้อยละ 30-40 ปริมาณ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไม่น้อยกว่า 500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ปริมาณน้ำอยู่ในช่วง 175-185 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และสารลดน้ำพิเศษร้อยละ 1.0-1.6 สามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงถึง

60-80 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน รวมถึงสมบัติในการต้านทานการซึมผ่านของน้ำได้เป็นอย่างดี (Xie, et al., 2002) อย่างไรก็ตามคุณลักษณะของถ้ำลอยและอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมมีผลกระทบต่อตรงต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง (Mohamed, 2011) ในขณะที่โมดูลัสยืดหยุ่นมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ถ้ำลอยและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเพิ่มขึ้น (Ulucan, et al., 2008) ส่วนการพัฒนากำลังอัดในระยะยาวเมื่อปริมาณวัสดุผงรวมในส่วนผสมคอนกรีตเท่ากับ 550 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยถ้ำลอยร้อยละ 15, 20, 25, 30 และ 35 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.41-0.44 และสารลดน้ำพิเศษร้อยละ 1.8-2.0 พบว่าคอนกรีตยังคงพัฒนากำลังอัดอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะที่อายุ 90 วัน อัตราส่วนการแทนที่ด้วยถ้ำลอยร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก กำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้ยังสามารถนำถ้ำหนักมาใช้งานร่วมกับถ้ำลอยในการผลิตคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง โดยในส่วนผสมคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองใช้ถ้ำลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในขณะที่ถ้ำหนักถูกนำมาใช้แทนที่มวลรวมละเอียด โดยกำหนดปริมาณวัสดุผงรวมในส่วนผสมคอนกรีตเท่ากับ 550 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงแปรผันอยู่ในช่วง 0.51-0.58 และสารลดน้ำพิเศษร้อยละ 1.2-2.0 เพื่อให้ได้ค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงระหว่าง 50-70 เซนติเมตร พบว่าการนำถ้ำหนักแทนที่มวลรวมละเอียดคงที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ถ้ำลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 15-35 โดยน้ำหนัก คอนกรีตมีกำลังอัดถึง 40-32 เมกะปาสคาล ที่อายุ 90 วัน (Siddique, et al., 2012) ในทางกลับกันเมื่อกำหนดปริมาณถ้ำลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คงที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ถ้ำหนักแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก กำหนดปริมาณวัสดุผงรวมในส่วนผสมคอนกรีตเท่ากับ 550 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงคงที่เท่ากับ 0.31 และสารลดน้ำพิเศษร้อยละ 5.8-8.0 โดยกำหนดค่าการไหลแผ่ของคอนกรีตควบคุมเท่ากับ 70 เซนติเมตร พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยถ้ำหนักร้อยละ 10 คอนกรีตมีกำลังอัดสูงถึง 80 เมกะปาสคาลที่อายุ 56 วัน (Kasemchaisiri & Tangtermsirikul, 2008) ทั้งหากมีการพัฒนาให้สามารถนำถ้ำหนักใช้แทนที่ซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงได้ย่อมส่งผลต่อต้นทุนในการผลิตคอนกรีตที่ลดลง และยังเป็นการช่วยแก้ปัญหาสภาวะแวดล้อมที่เกิดขึ้นในปัจจุบันอีกด้วย

จากที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ได้ข้อสรุปที่ตรงกันคือ การใช้ถ้ำลอยแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ในซีเมนต์เฟสลดลงและยังช่วยเพิ่มความตึงน้ำให้กับคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความทนทานมากขึ้น อาทิเช่น ถ้ำลอยทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารซัลเฟตได้ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามข้อด้อยประการหนึ่งของถ้ำลอยที่มีต่อคอนกรีตคือ อัตราการทำปฏิกิริยาปอซโซลานที่ช้าในช่วงต้น

ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นและทำให้อัตราการพัฒนากำลังรับแรงลดลงตามไปด้วย ดังนั้นในงานคอนกรีตที่ต้องการการพัฒนากำลังในช่วงต้นที่สูงหรือคอนกรีตกำลังสูงจึงไม่นิยมใช้เถ้าลอยเป็นส่วนประกอบ ทางแก้ปัญหาดังกล่าวจึงควรมีการเพิ่มศักยภาพในช่วงต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยโดยอาศัยหลักการทางเลือกสองประการได้แก่ ประการแรกคือ ใช้เถ้าลอยร่วมกับวัสดุที่มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานระดับสูงอาทิเช่น การใช้เถ้าลอยร่วมกับซิลิกาฟูม แต่เนื่องจากข้อด้อยในเรื่องของราคาที่สูงจึงยังไม่เป็นนิยมใช้กับงานคอนกรีตปกติในประเทศไทย ประการที่สองคือ การคัดเลือกวัสดุทางเลือกใหม่ที่เกิดขึ้นในประเทศและมีความสามารถในการเติมแทรกเข้าไปสู่ภายในช่องว่างระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ได้ดีซึ่งจะมีผงแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate powder) ที่เกิดจากกระบวนการย่อยหินเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์และมวลรวมที่ใช้ในงานคอนกรีตที่สมบัติดังกล่าว ด้วยสาเหตุที่ผงแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็น วัสดุเฉื่อย (inert material) สามารถช่วยเติมเต็มช่องว่างได้ดีทำให้กำลังรับแรงในตอนต้นสามารถพัฒนาได้ดียิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการใช้ผงแคลเซียมคาร์บอเนตยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนักถึงแม้ว่าจะมีราคาต่ำกว่าปูนซีเมนต์อยู่ก็ตาม เนื่องจากยังขาดองค์ความรู้ทั้งในตัววัสดุและการประยุกต์ใช้ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงกำหนดเป้าหมายที่การพัฒนาการใช้ผงแคลเซียมคาร์บอเนตร่วมกับปูนซีเมนต์และเถ้าลอย โดยเป็นการนำข้อดีของวัสดุแต่ละชนิดมาใช้ร่วมกันเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีสมบัติบางประการที่ดีกว่าการเลือกใช้เถ้าลอยหรือผงแคลเซียมคาร์บอเนตเพียงอย่างเดียวโดยวิธีใดอย่างหนึ่ง ดังนั้นในการศึกษานี้จึงกำหนดวัตถุประสงค์เฉพาะที่ต้องการศึกษาผลกระทบของความละเอียดของผงแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตเถ้าลอย โดยเน้นผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่ขนาด 2, 8 และ 15 ไมโครเมตรซึ่งมีการผลิตและใช้งานในอุตสาหกรรมอื่น ๆ ของในประเทศไทยอยู่ในปัจจุบัน และสมบัติที่ศึกษาประกอบด้วยทางกายภาพและทางเคมีของปูนซีเมนต์ เถ้าลอยตกเกรดและผงแคลเซียมคาร์บอเนต และสมบัติทางด้านคอนกรีตได้แก่ กำลังอัด กำลังดึงแบบผ่าซีกและโมดูลัสยืดหยุ่น

## วิธีการ

### วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษามีดังต่อไปนี้

1. ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150 (ASTM C150 / C150M - 17 Standard specification for Portland cement)
2. เถ้าลอยตกเกรด ใช้เถ้าลอยตกเกรดจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าจากความร้อนจังหวัดราชบุรี โดยจะถูกดักจับด้วยกลไกทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator (EP)) เพื่อรวบรวมเก็บไว้ในไซโล โดยเถ้าลอยตกเกรดที่ใช้จัดอยู่ในประเภทตามชนิดของถ่านหินซึ่งได้แก่ ซับบิทูมินัส (subbituminous) มีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) อยู่ในช่วงร้อยละ 15-40

ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกช้าลงแต่ยังถือว่ามีสมบัติในการเป็นวัสดุประสานที่ดีถึงแม้จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูงก็ตาม (Mehta & Monteiro, 2006)

เมื่อพิจารณาที่องค์ประกอบเคมีของเถ้าลอยตกเกรดจากโรงงานดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบกับข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM 618 (Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, 2016)) ประกอบไปด้วย ผลรวมของซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) แต่มีปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) อยู่ที่ร้อยละ 6.23 (มาตรฐานกำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 5) และยังมีปริมาณคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมดในรูปของร้อยละการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ (loss on ignition, LOI) อยู่ที่ ร้อยละ 5.22 (มาตรฐานกำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 3 (ASTM 618 Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, 2016) นอกจากนั้นเมื่อทดสอบและประเมินร่วมกับปูนซีเมนต์พบว่า ดัชนีกำลังของเถ้าลอยตกเกรดที่ได้ยังมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 75 ที่อายุ 7 และ 28 วัน โดยมีค่าร้อยละ 68.34 และ 70.24 ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าเถ้าลอยตกเกรดที่นำมาทำการศึกษานี้ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานประเภทของ เถ้าลอยตกเกรด (off-specification pulverized ash, OsPFA)

3. แคลเซียมคาร์บอเนต ใช้ผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้รับการควบคุมคุณภาพในการผลิต มีสิ่งเจือปนน้อย และผลิตเพื่อจำหน่ายเป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมหลาย ๆ ประเภท โดยมีขนาดอนุภาค ( $D_{[v,50]}$ ) เท่ากับ 2, 8 และ 15 ไมโครเมตร

4. ทราายใช้ทราายน้ำจืดนำมาล้างด้วยน้ำเอาส่วนที่เป็นดินและสิ่งเจือปนออกจนสะอาดนำไปทำการอบและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) และปรับทราายให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated-surface Dry) มีการกระจายขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 (ASTM C33 / C33M - 16e1 Standard specification for concrete aggregates)

5. หินปูนบดมีขนาดโตสุด 19 มิลลิเมตร นำมาล้างด้วยน้ำเอาส่วนที่เป็นดินและสิ่งเจือปนต่าง ๆ ออกจนสะอาด นำไปทำการอบ และปรับหินให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง มีการกระจายขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 (ASTM C33 / C33M - 16e1 Standard specification for concrete aggregates)

6. น้ำ ใช้ น้ำประปามีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ในช่วง 7 ถึง 8 มีสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C1602 (ASTM C1602 / C1602M - 12 Standard specification for mixing water used in the production of hydraulic cement concrete)

### รายละเอียดวิธีการทดสอบ

สำหรับกำลังอัด กำลังดึงแบบผ่าซีก และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร โดยทำการหล่อ 9 ตัวอย่างต่อหนึ่งสัดส่วนผสม หลังจากถอดแบบที่อายุ 1 วัน ทำการบ่มในน้ำจนถึงเวลาทดสอบที่ 3, 14, 28, 56 และ 91 วัน ตามลำดับ ขั้นตอนการทดสอบกำลังอัดและแรงดึงใช้วิธีทดสอบแบบผ่าซีกเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C39 (ASTM C39/C39M-17b Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, 2017) และ ASTM C496 (ASTM C496 / C496M - 11 Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, 2011) ตามลำดับ และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C469 (ASTM C469 / C469M - 14 Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression, 2014)

### สัดส่วนผสมของคอนกรีต

สัดส่วนผสมของคอนกรีตมีรายละเอียดแสดงในตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** อัตราส่วนผสมของคอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเองต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ ทราย ตกเกรด และแคลเซียมคาร์บอเนต) (w/c) เท่ากับ 0.40 โดยน้ำหนัก

สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (C)	ผงแคลเซียมคาร์บอเนต (CCP) (ขนาดไมโครเมตร)			ถั่วลอย ตกเกรด (OsPFA)	ทราย	หิน	น้ำ
		2	8	15				
		C <sup>[1]</sup>	550	-				
C-5CCP2 <sup>[**]</sup>	522.5	27.5	-	-	-	989	890	275
C-5CCP8	522.5	-	27.5	-	-	989	890	275
C-5CCP15	522.5	-	-	27.5	-	989	890	275
C-10CCP2	495	55	-	-	-	989	890	275
C-10CCP8	495	-	55	-	-	989	890	275
C-10CCP15	495	-	-	5	-	989	890	275
C-20CCP2	440	110	-	-	-	989	890	275
C-20CCP8	440	-	110	-	-	989	890	275
C-20CCP15	440	-	-	100	-	989	890	275
C-30OsPFA <sup>[***]</sup>	385	-	-	-	165	989	890	275
C-5CCP2-25OsPFA <sup>[****]</sup>	385	27.5	-	-	137.5	989	890	275
C-5CCP8-25OsPFA	385	-	27.5	-	137.5	989	890	275
C-5CCP15-25OsPFA	385	-	-	27.5	137.5	989	890	275
C-10CCP2-20OsPFA	385	55	-	-	110	989	890	275
C-10CCP8-20OsPFA	385	-	55	-	110	989	890	275
C-10CCP15-20OsPFA	385	-	-	55	110	989	890	275
C-20CCP2-10OsPFA	385	110	-	-	55	989	890	275
C-20CCP8-10OsPFA	385	-	110	-	55	989	890	275
C-20CCP15-10OsPFA	385	-	-	100	55	989	890	275



- หมายเหตุ** <sup>[1]</sup>C หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน
- <sup>[1']</sup>C-xCCPy หมายถึง คอนกรีตที่ผสมขึ้นจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงแคลเซียมคาร์บอเนต โดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ x โดยน้ำหนัก และแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาด y ไมโครเมตร
- <sup>[1'']</sup>C-30OsPFA หมายถึง คอนกรีตที่ผสมขึ้นจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยตกเกรด โดยมีเถ้าลอยตกเกรดตกเกรดแทนที่ในปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ 30,
- <sup>[1''']</sup>C-xCCPy-zOsPFA หมายถึง คอนกรีตที่ผสมขึ้นจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แคลเซียมคาร์บอเนต และเถ้าลอยตกเกรดตกเกรด โดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ x โดยน้ำหนัก และแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาด y ไมโครเมตร และมีเถ้าลอยตกเกรดตกเกรดแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ z โดยน้ำหนัก

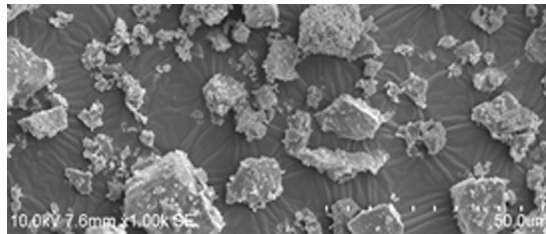
## ผลการทดลองและวิจารณ์

### สมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ เถ้าลอยตกเกรด และแคลเซียมคาร์บอเนต

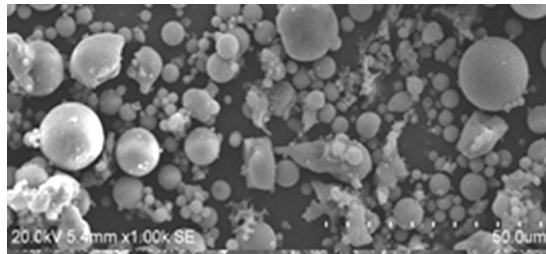
ตารางที่ 2 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยตกเกรด และแคลเซียมคาร์บอเนตขนาดต่างๆ พบว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าเท่ากับ 3.14 ในขณะที่ความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยตกเกรดมีค่าเท่ากับ 2.37 ส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ขนาด 2, 8 และ 15 ไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) มีค่าใกล้เคียงกันคือ 2.66, 2.64 และ 2.63 ตามลำดับ สำหรับความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (3,350 ซม.<sup>2</sup>/ก.) ส่วนความละเอียดของเถ้าลอยตกเกรดนั้นมีค่าใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับ 3,305 ซม.<sup>2</sup>/ก. ในขณะที่แคลเซียมคาร์บอเนตที่ขนาด 2, 8 และ 15 ไมโครเมตร มีค่าความละเอียดคือ 11,040, 10,320 และ 9,275 ซม.<sup>2</sup>/ก. ตามลำดับ

### ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ เถ้าลอยตกเกรด และแคลเซียมคาร์บอเนต

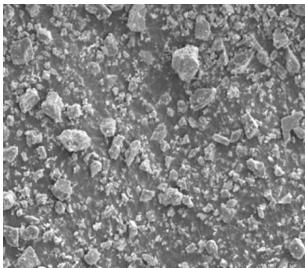
สมบัติทางกายภาพ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าลอยตกเกรด	แคลเซียมคาร์บอเนต ขนาด (ไมโครเมตร)		
			2	8	15
ความถ่วงจำเพาะ	3.14	2.37	2.66	2.64	2.63
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ซม. <sup>2</sup> /ก.)	3,350	3,305	11,140	10,320	9,275



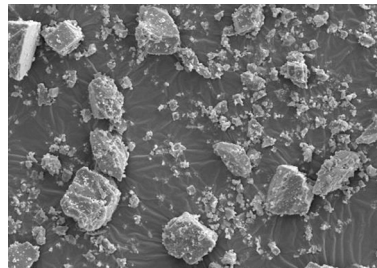
(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



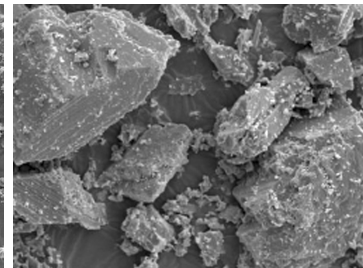
(ข) ใ้ลลอยตทกเกรด



(ค) แคลเซียมคาร์บอนเต  
ขนาด 2 ไมโครเมตร



(ง) แคลเซียมคาร์บอนเต  
ขนาด 8 ไมโครเมตร



(จ) แคลเซียมคาร์บอนเต  
ขนาด 15 ไมโครเมตร

**รูปที่ 1** ภาพถ่ายขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1  
ใ้ลลอยตทกเกรดและแคลเซียมคาร์บอนเต

รูปที่ 1 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคด้วยเครื่อง Scanning Electronic Microscope (SEM) ซึ่งขยาย 1,000 เท่า พบว่า ลักษณะรูปร่างของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะเป็นเหลี่ยมคม ผิวขรุขระ ขนาดไม่แน่นอนแตกต่างกันไป (รูปที่ 1 (ก)) ส่วนกรณีของอนุภาคของใ้ลลอยตทกเกรด (รูปที่ 1 (ข)) พบว่ามีลักษณะที่แตกต่างจากกรณีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยมีลักษณะที่กลม ผิวเรียบ ในขณะที่กรณีของแคลเซียมคาร์บอนเต (รูปที่ 1 (ค)) มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่อนุภาคมีขนาดค่อนข้างเล็ก

ตารางที่ 3 แสดงองค์ประกอบเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แก้วลอย ตกเกรดและแคลเซียมคาร์บอเนต วัสดุดังกล่าวได้แก่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แก้วลอย ตกเกรด และแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ของแก้วลอยตกเกรดมีค่าสูง เท่ากับร้อยละ 40.83 เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งเท่ากับร้อยละ 19.14 ในขณะที่ของแคลเซียมคาร์บอเนตมี  $\text{SiO}_2$  น้อยมาก (ร้อยละ 0.41) ในกรณีของอะลูมิเนียม ออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) แก้วลอยตกเกรดเท่ากับร้อยละ 21.16 ในขณะที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท ที่ 1 และแคลเซียมคาร์บอเนตเท่ากับร้อยละ 4.87 และ 0.05 ตามลำดับ ส่วนในกรณีแคลเซียม ออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) นั้นพบว่าแก้วลอยตกเกรด (ร้อยละ 11.59) ซึ่งมีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ร้อยละ 63.77) และแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่า ( $\text{CaO}$ ) ประมาณร้อยละ 56.04

**ตารางที่ 3** องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แก้วลอยตกเกรด และ แคลเซียมคาร์บอเนต

ออกไซด์ (ร้อยละโดยมวล)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	แก้วลอย ตกเกรด	ผงแคลเซียมคาร์บอเนต ขนาด (ไมโครเมตร)		
			2	8	15
ซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ )	19.14	40.83	0.41	0.43	0.42
อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	4.87	21.16	0.05	0.06	0.05
ไอรอนออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	3.78	14.64	0.02	0.02	0.01
แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ )	63.77	11.59	56.04	56.01	55.99
แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ )	1.14	3.03	0.34	0.36	0.35
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ )	2.03	1.82	< 0.01	< 0.01	< 0.01
โซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ )	< 0.01	0.29	< 0.01	< 0.01	< 0.01
โปตัสเซียมออกไซด์ ( $\text{K}_2\text{O}$ )	0.52	2.41	0.02	0.01	0.01
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจาก การเผา (LOI)	2.27	0.46	43.39	43.14	43.26
แคลเซียมออกไซด์อิสระ (fCaO)	1.00				
Insoluble Residue	0.28	0.22	-	-	-

### สมบัติเชิงกลของคอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง

#### กำลังอัด

รูปที่ 2 และ 3 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง โดยกำลังอัดของ ตัวอย่างคอนกรีต (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม.) ซึ่งมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และแคลเซียมคาร์บอเนต เปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (C1) (รูปที่ 2) และผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับแคลเซียมคาร์บอเนต และเถ้าลอยตกเกรด เปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีเถ้าลอยตกเกรดร้อยละ 30 (C1-30OsPFA) (รูปที่ 3) โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ เถ้าลอยตกเกรด และแคลเซียมคาร์บอเนต) (w/c) เท่ากับ 0.40 โดยน้ำหนัก

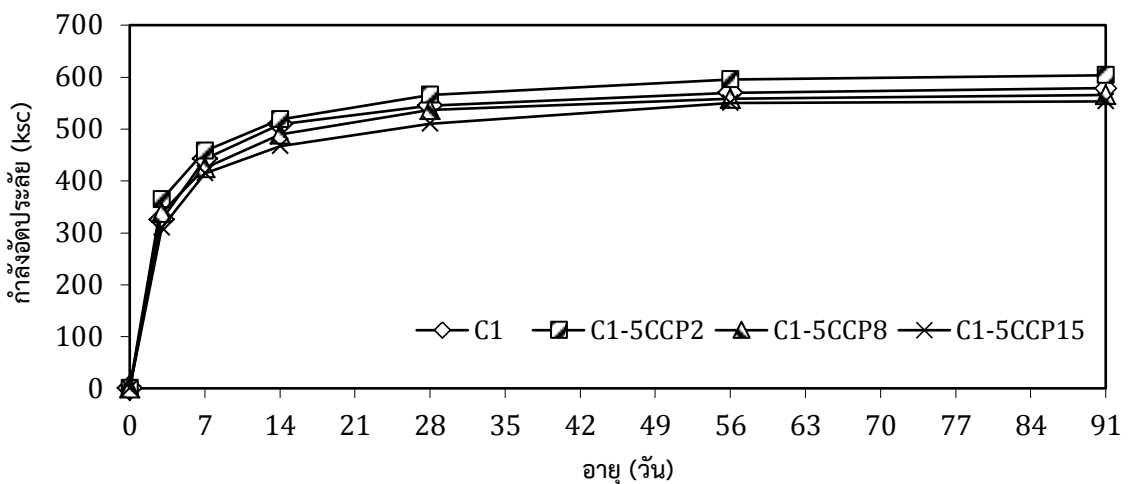
จากรูปที่ 2 พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 และ 91 วัน ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (C1) มีค่าเท่ากับ 545.26 และ 578.49 กก./ซม.<sup>2</sup> ตามลำดับ ในขณะที่กำลังอัดของคอนกรีตปูนซีเมนต์ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 ส่วนที่สำคัญตามปริมาณการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุผสม ในส่วนที่ 1 ที่อัตราส่วนการที่ร้อยละ 5 มีประเด็นในการเปรียบเทียบ 3 ส่วนด้วยกัน กล่าวคือ ในกรณีของผงแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2 ไมโครเมตร คอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดตลอดช่วงอายุ 91 วัน สูงกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ยกตัวอย่างเช่นที่อายุ 28 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 566.12 กก./ซม.<sup>2</sup> สูงกว่าร้อยละ 3.82 ในขณะที่อายุ 91 วันที่มีค่าสูงกว่าร้อยละ 4.37 ส่วนคอนกรีตผสมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 8 ไมโครเมตร มีกำลังอัดเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ร้อยละ 96 และ 100 ที่อายุดังกล่าว นอกจากนี้คอนกรีตผสมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 15 ไมโครเมตร (รูปที่ 2 (ค)) มีกำลังอัดคิดเป็นร้อยละ 98.96 และ 93.54 ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เนื่องจากพฤติกรรมแคลเซียมคาร์บอเนตในปูนซีเมนต์จะไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีร่วมกับปฏิกิริยาไฮเดรชันหรือต่อเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน แต่จะกลไกทางด้านขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เข้าไปเติมแทรก ดังนั้นแนวโน้มที่สำคัญคือ ยิ่งอนุภาคมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์จะช่วยให้การเติมเต็มช่องว่างในเนื้อคอนกรีตได้ดีขึ้น ซึ่งหมายถึงเนื้อภายในคอนกรีตมีความอัดแน่นหรือหนาแน่นเพิ่มขึ้นและส่งผลกระทบต่อกำลังอัดที่เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

เมื่อพิจารณาในส่วนของคอนกรีตที่ทำการแทนที่ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นพบว่า แนวโน้มของการเพิ่มขึ้นมีลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ ผงแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2 ไมโครเมตร มีผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (C1) ส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 8 และ 15 ไมโครเมตร มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใกล้เคียงและต่ำกว่าคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามลำดับ

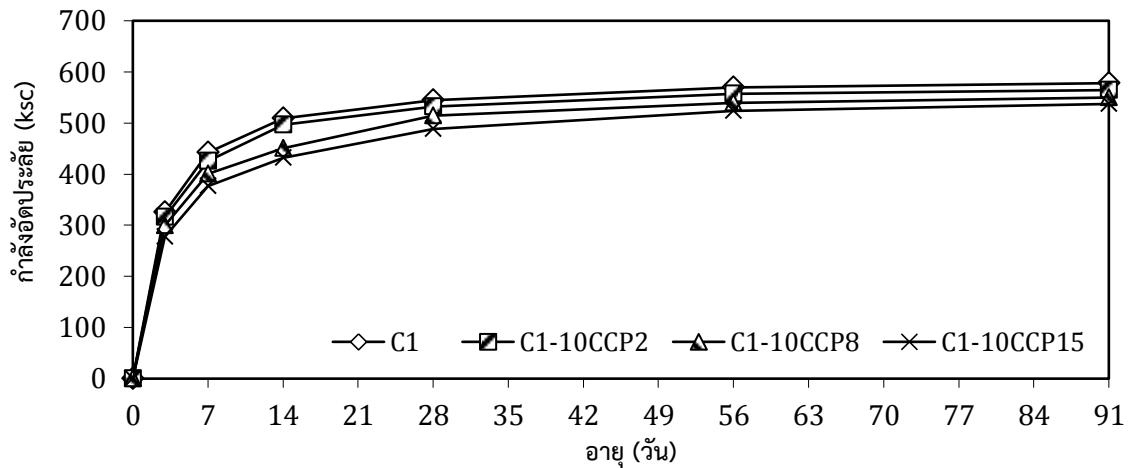
เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดที่อายุช่วงต้น (28 วันแรก) พบว่าที่อัตราส่วนการแทนที่ของแคลเซียมคาร์บอเนตเท่ากับร้อยละ 5 ให้ค่าอัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตสูงที่สุด ตามมาด้วยร้อยละ 10 และ 20 ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะการแทนที่ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สร้างกำลังให้กับคอนกรีตผ่านปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ปริมาณผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ลดลง ทำให้กำลังอัดมีอัตราการพัฒนาที่ลดลงตามไปด้วย

ในส่วนของการกำลังอัดของคอนกรีตที่ระยะยาวพบว่า แคลเซียมคาร์บอเนตไม่ส่งผลกระทบบ้าง ดังจะเห็นตัวอย่างได้จากคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงแคลเซียมคาร์บอเนตโดยทำการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2, 8 และ 15 ไมโครเมตร ที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุผง (รูปที่ 2 (ค)) กำลังอัดที่อายุ 91 วัน ไม่มีความแตกต่างไปจากที่อายุ 56 วัน มาก ทั้งนี้ด้วยผลของแคลเซียมคาร์บอเนตไม่ได้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องร่วมกับปูนซีเมนต์จึงเป็นเพียงการเติมแทรกช่องว่างทางกายภาพเท่านั้น

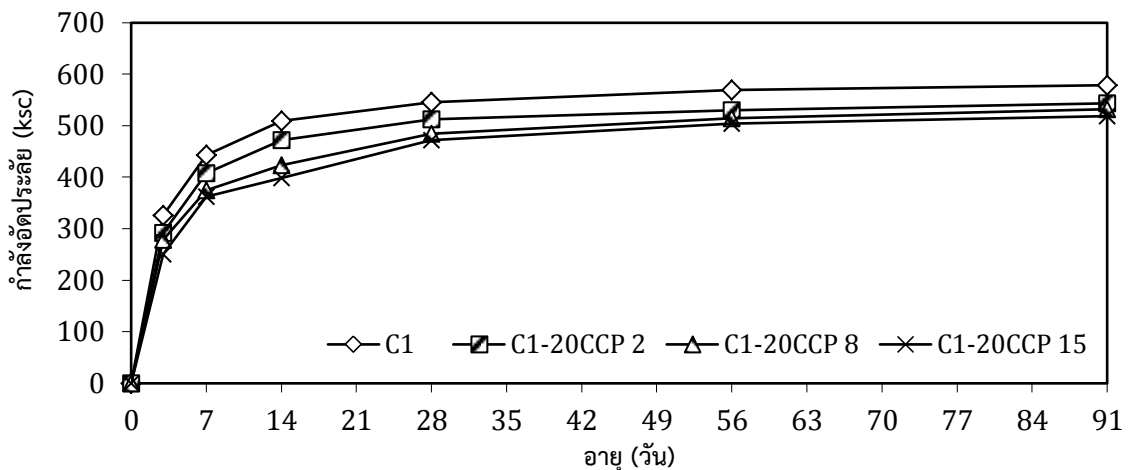
จากรูปที่ 3 (ก) คอนกรีตผสมผงแคลเซียมคาร์บอเนตต่อแฉะลดตกเกรดที่อัตราส่วนเท่ากับ 5 : 25 โดยผงแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาด 2 ไมโครเมตร มีการพัฒนากำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตผสมแฉะลดตกเกรดตกเกรดล้วนร้อยละ 30 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตผสมแฉะลดตกเกรดอย่างเดียว สาเหตุสำคัญของการพัฒนาดังกล่าวมาจากผลของความละเอียดของผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาดเล็กกว่าอนุภาคปูนซีเมนต์ทำให้กลไกการเติมแทรกเป็นไปได้เป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตามเมื่ออายุของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น ผลของความละเอียดของผงแคลเซียมคาร์บอเนตมีน้อยลงซึ่งจะดูได้จากในช่วงหลังจากคอนกรีตมีอายุ 14 วัน ถึง 28 วัน อัตราการพัฒนา กำลังอัดมีค่าลดลงมาก แต่ในคอนกรีตที่มีส่วนผสมของแฉะลดตกเกรด แฉะลดตกเกรดจะทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานต่อเนื่องหลังจากอายุคอนกรีตที่ 14 วัน ภายใต้สภาวะความชื้นภายในเพียงพอ จึงส่งผลให้ในช่วง 14 วัน ถึง 56 วัน คอนกรีตมีอัตราการพัฒนา กำลังอัดที่สูง เนื่องจากคอนกรีตมีปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (C-S-H) เพิ่มขึ้น แต่จะลดลงเมื่อผ่านช่วง 56 วัน ไปจนถึงอายุ 91 วัน



(ก) คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และแคลเซียมคาร์บอเนตโดยทำการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2, 8 และ 15 ไมโครเมตร ที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักวัสดุผง



(ข) คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และแคลเซียมคาร์บอเนตโดยทำการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2, 8 และ 15 ไมโครเมตร ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุผง

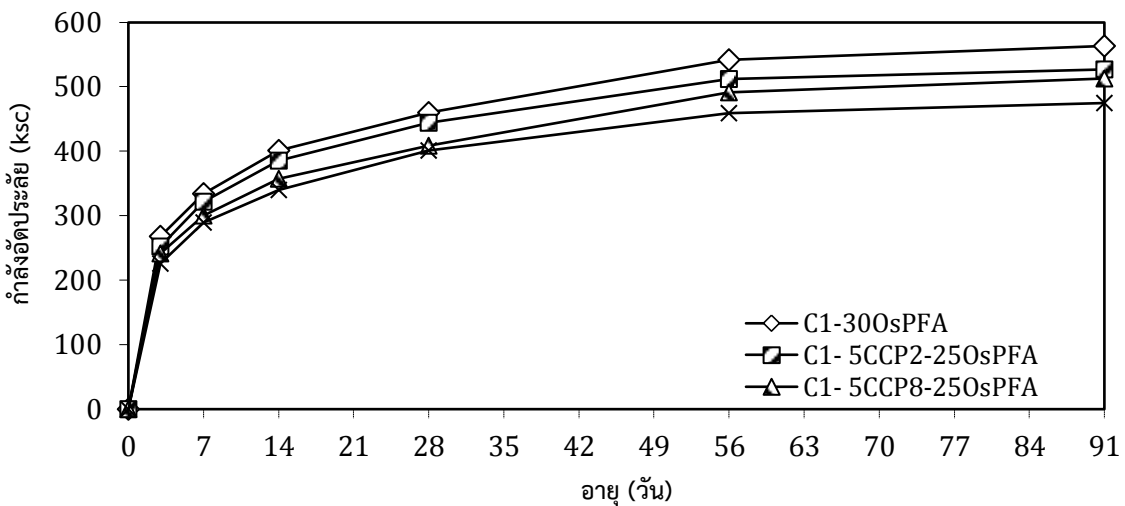


(ค) คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และแคลเซียมคาร์บอเนตโดยทำการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2, 8 และ 15 ไมโครเมตร ที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุผง

**รูปที่ 2** กำลังอัดของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และแคลเซียมคาร์บอเนตเปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (C1)

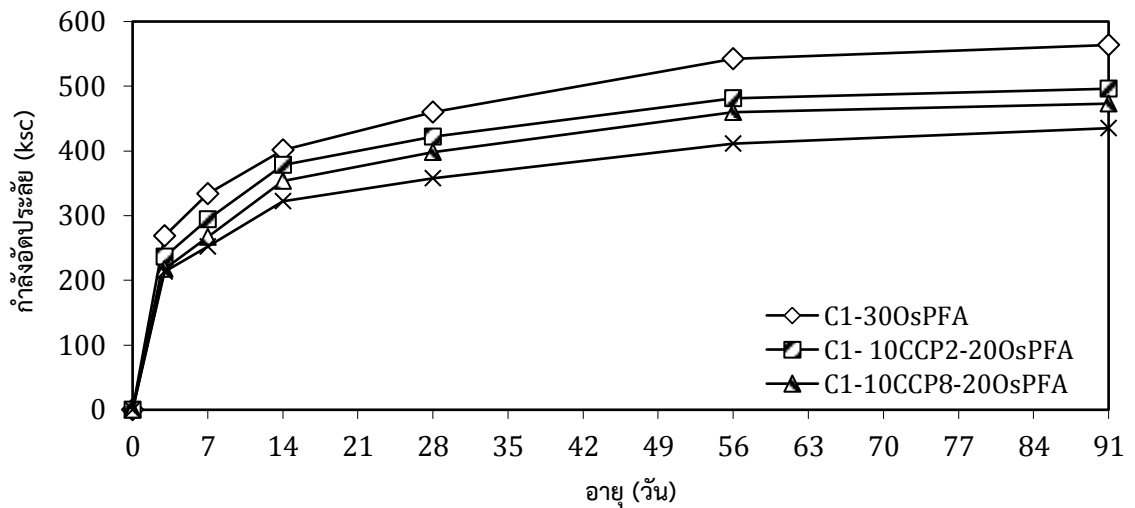
ในรูปที่ 3 (ก) เช่นเดียวกัน เมื่อขนาดของผงแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นเป็น 8 และ 15 ไมโครเมตร การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มค่อนข้างออกไปทางใกล้เคียงหรือต่ำกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยตกเกรดร้อยละ 30 เล็กน้อย ทั้งนี้ด้วยผลของเติมแทรกที่ลดลงเนื่องจากขนาดของผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น แต่ที่ระยะยาวเถ้าลอยตกเกรดกลับมีส่วนช่วยในการพัฒนากำลังอัดได้เป็นอย่างดี

ในส่วนของคอนกรีตผสมผงแคลเซียมคาร์บอเนตต่อเถ้าลอยตกเกรดที่อัตราส่วนเท่ากับ 10:20 (รูปที่ 3 (ข)) และ 20:10 (รูปที่ 3 (ค)) มีแนวโน้มของการพัฒนากำลังประลัยที่มีลักษณะเดียวกับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงแคลเซียมคาร์บอเนตต่อเถ้าลอยตกเกรดเท่ากับ 5:25 แต่จะเห็นได้ว่าในช่วงคอนกรีตที่อายุ 14 วัน ถึง 28 วัน อัตราการพัฒนากำลังอัดกลับมีค่าที่สูงกว่าเนื่องจากมีความเป็นไปได้ที่จะมีการเสริมกันของกลไกการเติมแทรกของผงแคลเซียมคาร์บอเนตร่วมกับปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยตกเกรดขึ้น ส่วนในช่วงอายุ 28 วัน ถึง 91 วัน คอนกรีตผสมเถ้าลอยตกเกรดและผงแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถพัฒนากำลังอัดได้ใกล้เคียงกัน

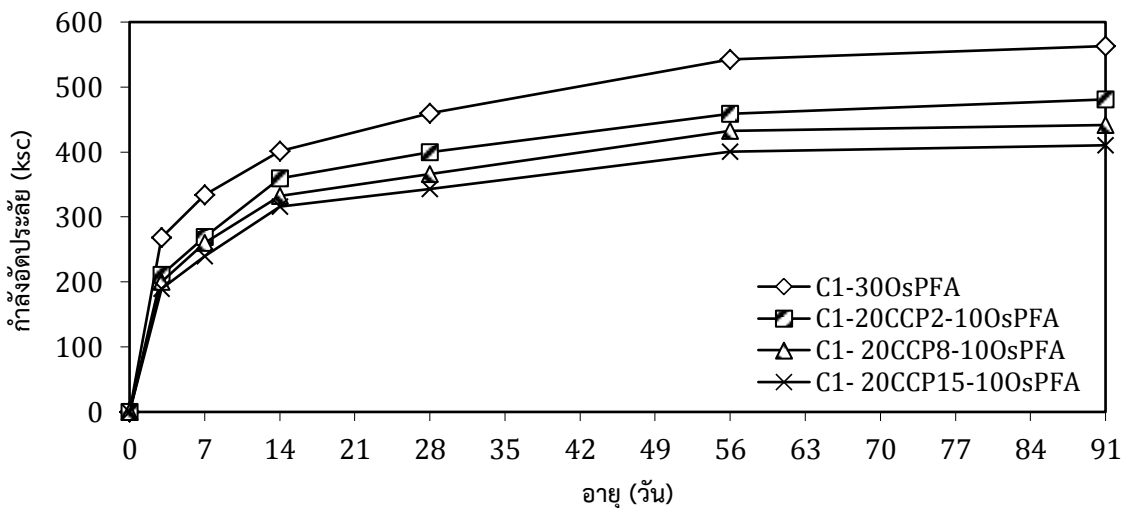


(ก) คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แคลเซียมคาร์บอเนต และเถ้าลอยตกเกรด โดยทำการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2, 8 และ 15 ไมโครเมตรที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักวัสดุผง และเถ้าลอยตกเกรดร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุผง

**รูปที่ 3** กำลังอัดของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แคลเซียมคาร์บอเนต และเถ้าลอย ตกเกรด เปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีเถ้าลอยตกเกรด ร้อยละ 30 (C1-30OSPFA)



(ข) คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แคลเซียมคาร์บอเนต และเถ้าลอยตกเกรด โดยทำการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2, 8 และ 15 ไมโครเมตร ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุผง และเถ้าลอยตกเกรดร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุผง



(ค) คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แคลเซียมคาร์บอเนต และเถ้าลอยตกเกรด โดยทำการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2, 8 และ 15 ไมโครเมตร ที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุผง และเถ้าลอยตกเกรดร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุผง

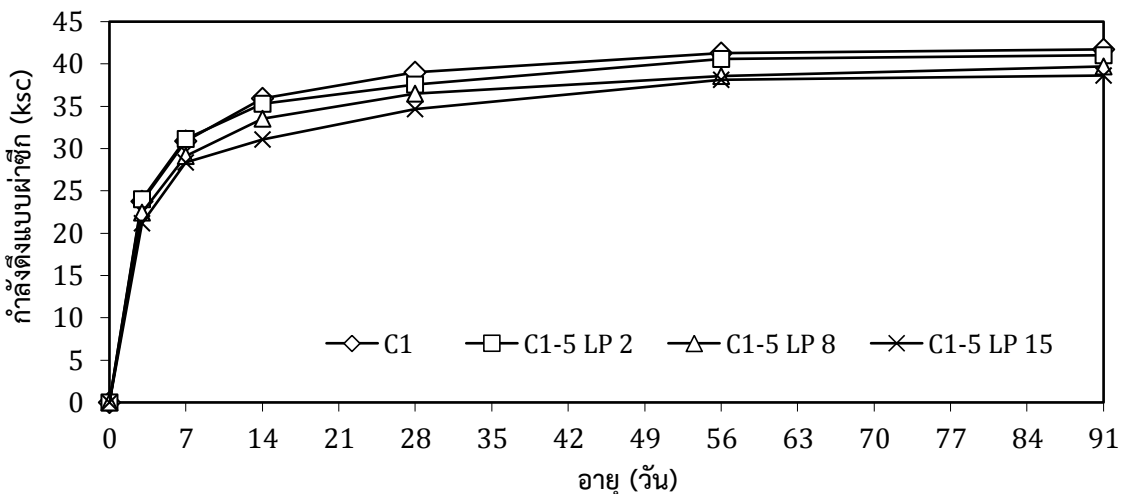
**รูปที่ 3 (ต่อ)** กำลังอัดของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แคลเซียมคาร์บอเนต และเถ้าลอยตกเกรด เปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีเถ้าลอยตกเกรด ร้อยละ 30 (C1-300sPFA)



### กำลังดึงแบบผ่าซีก

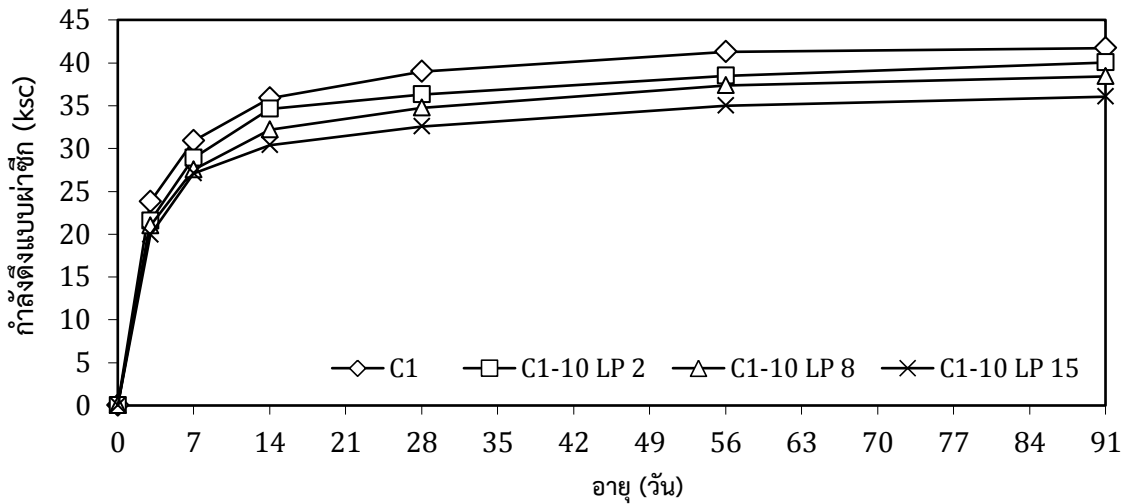
กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และแคลเซียมคาร์บอเนต เปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (C1) และคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แคลเซียมคาร์บอเนตและเถ้าลอยตกเกรด เปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีเถ้าลอยตกเกรดร้อยละ 30 (C1-30OsPFA) แสดงในรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4 การพัฒนากำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และแคลเซียมคาร์บอเนต มีแนวโน้มเดียวกับการพัฒนากำลังอัด โดยมีค่ากำลังดึงอยู่ระหว่างร้อยละ 12.35 ถึง 18.14 แต่จะเห็นได้ว่าคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาด 2 ไมโครเมตร มีการพัฒนากำลังดึงแบบผ่าซีกสูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตขนาดอื่น ยกตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 4 (ก) คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงแคลเซียมคาร์บอเนต โดยทำการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2 ไมโครเมตร ที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักวัสดุผง กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตมีค่าสูง เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

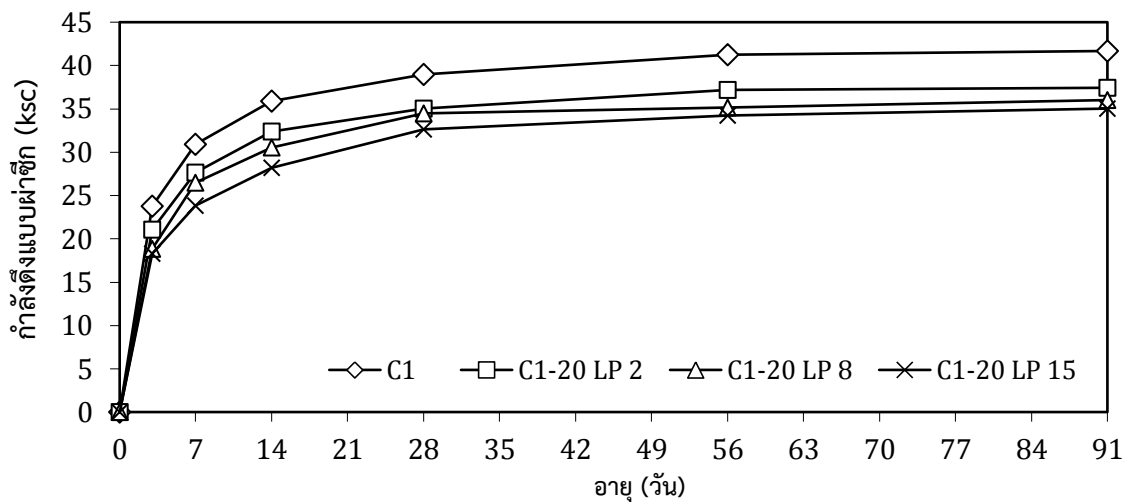


(ก) คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และแคลเซียมคาร์บอเนตโดยทำการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2, 8 และ 15 ไมโครเมตร ที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักวัสดุผง

**รูปที่ 4** กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และแคลเซียมคาร์บอเนต เปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (C1)



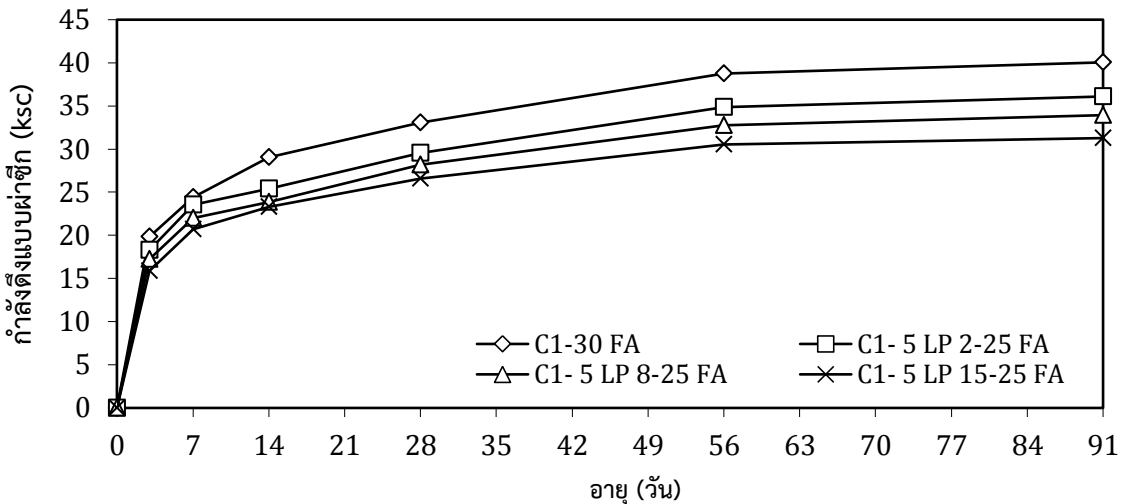
(ข) คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และแคลเซียมคาร์บอเนตโดยทำการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2, 8 และ 15 ไมโครเมตร ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุผง



(ค) คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงแคลเซียมคาร์บอเนตโดยทำการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2, 8 และ 15 ไมโครเมตร ที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุผง

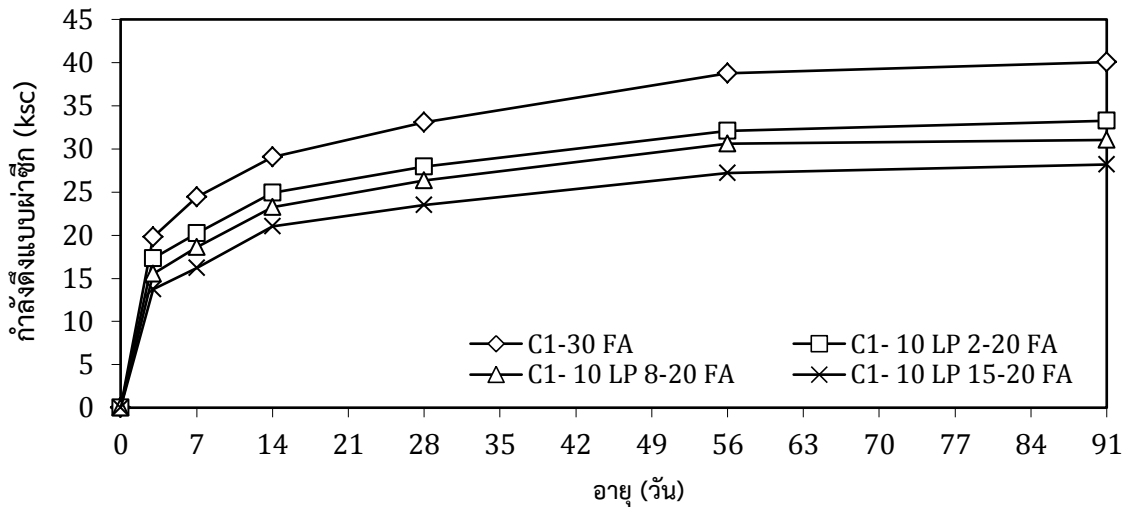
**รูปที่ 4 (ต่อ)** กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และแคลเซียมคาร์บอเนต เปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (C1)

ดังแสดงในรูปที่ 5 กำลังดึงแบบผ้าซีกของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงแคลเซียมคาร์บอเนต และเถ้าลอยตกเกรด เปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีเถ้าลอยตกเกรดร้อยละ 30 (C1-30OSPFA) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับกำลังอัด กล่าวคือ คอนกรีตผสมแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาด 2 ไมโครเมตร มีกำลังดึงสูงกว่า 8 และ 15 ไมโครเมตร ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น

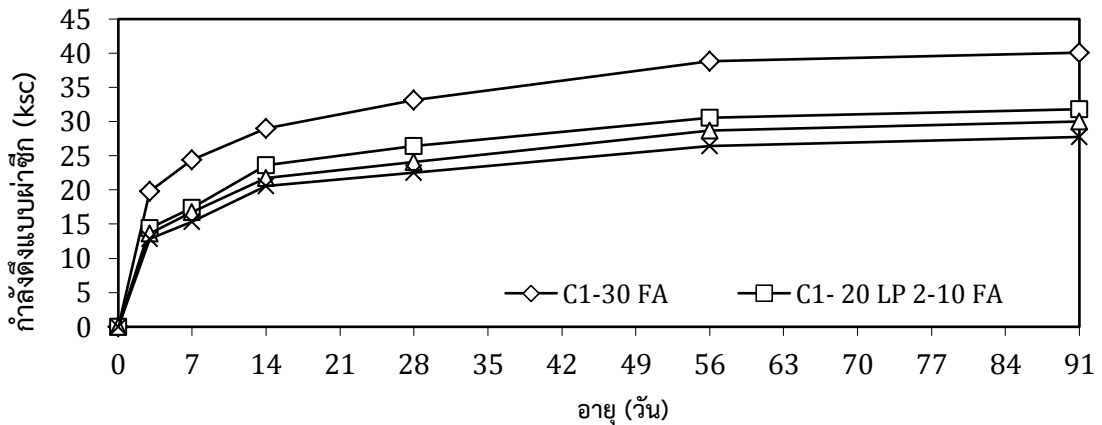


(ก) คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงแคลเซียมคาร์บอเนต และเถ้าลอยตกเกรด โดยทำการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2, 8 และ 15 ไมโครเมตร ที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักวัสดุผง และเถ้าลอยตกเกรดร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุผง

**รูปที่ 5** กำลังดึงแบบผ้าซีกของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แคลเซียมคาร์บอเนต และเถ้าลอยตกเกรด เปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีเถ้าลอยตกเกรดร้อยละ 30 (C1-30OSPFA)



(ข) คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แคลเซียมคาร์บอเนต และเถ้าลอยตกเกรด โดยทำการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2, 8 และ 15 ไมโครเมตร ที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักวัสดุผง และเถ้าลอยตกเกรดร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุผง



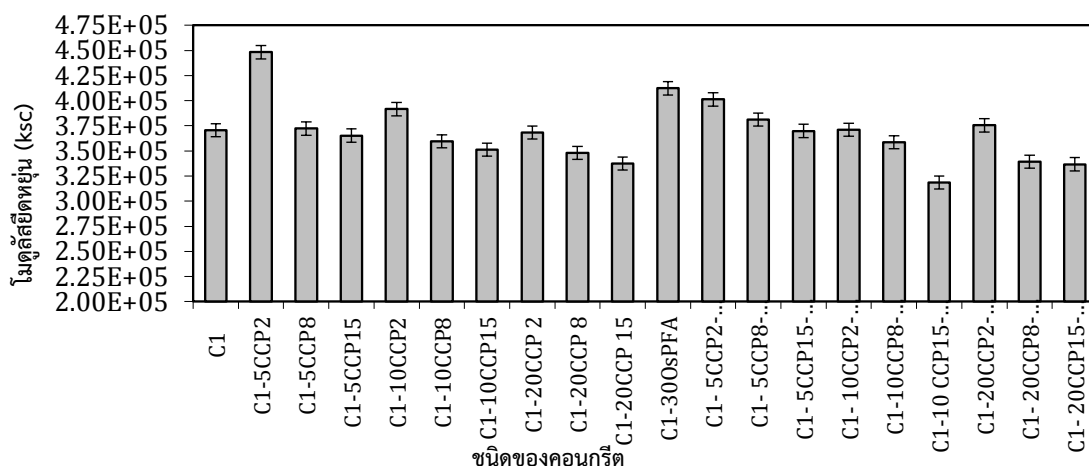
(ค) คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แคลเซียมคาร์บอเนต และเถ้าลอยตกเกรด โดยทำการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2, 8 และ 15 ไมโครเมตร ที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักวัสดุผง และเถ้าลอยตกเกรดร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุผง

**รูปที่ 5 (ต่อ)** กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แคลเซียมคาร์บอเนต และเถ้าลอยตกเกรด เปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีเถ้าลอยตกเกรดร้อยละ 30 (C1-30OSPFA)

### โมดูลัสยืดหยุ่น

โมดูลัสยืดหยุ่นคือ ความสามารถในการเสียรูปภายใต้แรงกระทำโดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แคลเซียมคาร์บอเนต และเถ้าลอยตกเกรด เปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (C1) และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีเถ้าลอยตกเกรดร้อยละ 30 (C1-30OsPFA) แสดงในรูปที่ 6 ซึ่งพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ในช่วง  $3.38 \times 10^5$  ถึง  $4.48 \times 10^5$  กก./ซม.<sup>2</sup> ในขณะที่คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยตกเกรดและผงแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าอยู่ในช่วง  $3.19 \times 10^5$  ถึง  $4.12 \times 10^5$  กก./ซม.<sup>2</sup> (โดยมีค่าอยู่ระหว่าง ร้อยละ 91.96 ถึง 94.38) ในที่นี้คอนกรีตผสมผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาด 2 ไมโครเมตร แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าสูงสุดเท่ากับ  $4.12 \times 10^5$  กก./ซม.<sup>2</sup> ในขณะที่คอนกรีตผสมผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาด 15 ไมโครเมตร แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับร้อยละ 10 และมีเถ้าลอยตกเกรดแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

โดยโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมแคลเซียมคาร์บอเนตพบว่า แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาด 2 ไมโครเมตร มีค่าสูงสุด โดยเฉพาะที่อัตราส่วนการแทนที่เท่ากับร้อยละ 5 ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างที่มีความอัดแน่นตัวมากที่สุด ในขณะที่การผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาด 8 และ 15 ไมโครเมตร กลับมีค่าลดต่ำลง และคอนกรีตผสมผงแคลเซียมคาร์บอเนตและเถ้าลอยตกเกรด มีแนวโน้มลักษณะเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามคอนกรีตผสมผงแคลเซียมคาร์บอเนตและเถ้าลอยตกเกรดมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของสูงกว่ากลุ่มคอนกรีตผสมแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยตกเกรด



**รูปที่ 6** โมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วันของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูน และเถ้าลอยตกเกรดเปรียบเทียบกับเปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (C1) และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีเถ้าลอยร้อยละ 30 (C1-30FA)

### สรุป

จากการศึกษาได้ข้อสรุปดังต่อไปนี้

1. ความละเอียดของผงแคลเซียมคาร์บอเนตมีผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลโดยผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่ามีผลทำให้สมบัติเชิงกลสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า
2. ความละเอียดของผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาด 2 ไมโครเมตร ให้ค่ากำลังอัดกำลังดึงแบบผ่าซีกและโมดูลัสยืดหยุ่นสูงที่สุด

### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครที่ได้สนับสนุนเงินทุนสำหรับการวิจัย

### เอกสารอ้างอิง

- American Society for Testing and Material. (2017). **Annual Book of ASTM Standards**. USA: Philadelphia, PA,
- Felekoğlu, B., Tosun, K., Baradan, B., Altun, A., and Uyulgan, B. (2006), The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of

self-compacting repair mortars. **Cement and Concrete Research**. 36, 1719-1726.

Kasemchaisiri, R. & Tangtermsirikul, S. (2008), Properties of self-compacting concrete in incorporating bottom ash as a partial replacement of fine aggregate. **Science Asia**. 34, 87-95.

Mehta, P.K.& Monteiro, P.J.M. (2006), **Concrete Microstructure, Properties, and Materials**, Third Edition. New York: McGraw-Hill.

Mohamed, H.A. (2011). Effect of fly ash and silica fume on compressive strength of self-compacting concrete under different curing conditions. **Ain Shams Engineering Journal**. 2, 79-86.

Ravindrarajah, R.S., Siladyi, D. & Adamopoulos, B. (2003). Development of high-strength self-compacting concrete with reduced segregation potential, **PRO 33: 3<sup>rd</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete**. RILEM Publications, 530-532.

Sahmaran, M. & Yaman, I.O. (2007). Hybrid fiber reinforced self-compacting concrete with a high-volume coarse fly ash. **Construction and Building Materials**. 21, 150-156.

Siddique, R., Aggarwal, P. & Aggarwal, Y. (2012). Influence of water/powder ratio on strength properties of self-compacting concrete containing coal fly ash and bottom ash. **Construction and Building Materials**. 29, 73-81.

Ulucan, Z.Ç., Türk, K. & Karataş, M. (2008). Effect of mineral admixtures on the correlation between ultrasonic velocity and compressive strength for self-compacting concrete. **Russian Journal of Nondestructive Testing**. 44, 367-374.

Xie, Y., Liu, B., Yin, J., & Zhou, S. (2002). Optimum mix parameters of high-strength self-compacting concrete with ultra-pulverized fly ash. **Cement and Concrete Research**. 32, 477-480.

.....