

การประยุกต์ใช้ผลผลิตพลอยได้จากเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม ในคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง

กฤษฎา เสือเอี่ยม¹ และ ณิชฐ์ มากุล²

มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร เลขที่ 9 ถนนแจ้งวัฒนะ แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพฯ 10220

บทคัดย่อ

คอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง (Self-compacting Concrete) ถือได้ว่าเป็นนวัตกรรมหนึ่งของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่สามารถไหลเข้าแบบและอัดแน่นได้ด้วยน้ำหนักตัวเอง โดยปราศจากการแยกตัวและการเยิ้ม โดยไม่ต้องการพลังงานในการจี้เขย่ามาก และยังส่งผลในการปรับปรุงทั้งประสิทธิภาพของการทำงานและสมรรถนะของโครงสร้างคอนกรีตอีกด้วย บทความนี้นำเสนอความหลากหลายขององค์ความรู้ที่เกี่ยวกับคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง ซึ่งครอบคลุมประวัติความเป็นมา คุณลักษณะที่สำคัญของกระบวนการทางคอนกรีต แนวทางการออกแบบส่วนผสม และการอภิปรายในประเด็นของการประยุกต์ใช้ผลผลิตพลอยได้เป็นวัสดุร่วมในการผลิตคอนกรีต เช่น เถ้าลอย เถ้าแกลบ เถ้าชานอ้อย และฝุ่นหินปูน เนื่องด้วยผลผลิตพลอยได้ทั้งจากภาคการเกษตรกรรมและภาคอุตสาหกรรมที่เกิดขึ้นกำลังส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมอยู่ในปัจจุบัน และการใช้ผลผลิตพลอยได้ดังกล่าวในงานคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองถือได้ว่าเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่และมีความยั่งยืน โดยวัสดุดังกล่าวทำหน้าที่เป็นทั้งวัสดุเติมแทรก (Filler Material) และทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction) ร่วมกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นการปรับปรุงสมรรถนะของคอนกรีตให้ดียิ่งขึ้น

คำสำคัญ : คอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง / ผลผลิตพลอยได้ / ความสามารถในการทำงานได้ / เกษตรกรรม / อุตสาหกรรม

* Corresponding author : E-mail : shinomomo7@hotmail.com

¹ นักศึกษาปริญญาเอก, สาขาการจัดการเทคโนโลยี โครงการพนักำลังการสอนหลักสูตรปริญญาเอก

² ผู้วิจัยหลัก, อาจารย์, สาขาเทคโนโลยีอาคาร คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

Incorporation of Agricultural and Industrial By-products in Self-compacting Concrete: A Review

Gritsada Sua-Iam¹ and Natt Makul^{2*}

Phranakhon Rajabhat University, 9 Changwattana Road, Bangkhen Bangkok 10220

Abstract

Self-compacting concrete is an innovative high-performance concrete that flows and compacts under its own weight without segregation or bleeding. Eliminating the need for tamping and vibratory compaction improves productivity and performance of concrete structures. This article presents several aspects of self-compacting concrete technology, including the history, concrete processing characteristics, and mix design, as well as discussing the incorporation of by-products such as fly ash, rice husk ash, bagasse ash, and limestone powder during concrete production. Due to the rapid expansion of industrial and agricultural operations, disposal of by-products such as these has been the subject of increasing environmental concern, and their use in self-compacting concrete production is a novel example of material recycling and sustainability. The by-products act as filler materials and can participate in pozzolanic reaction associated with cement hydration, often resulting in improved concrete performance.

Keywords : Agriculture / By-products / Industry / Self-compacting Concrete / Workability

* Corresponding author : E-mail : shinomomo7@hotmail.com

¹ Doctoral Candidate, The Doctor of Philosophy Program in Technology Management, The Project for Consortium on Doctoral Programs.

² Principal investigator, Lecturer, Department of Building Technology, Faculty of Industrial Technology.

1. บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่า กระบวนการที่มีความสำคัญภายหลังจากการเทคอนกรีตเข้าแบบหล่อคือการทำให้คอนกรีตมีความอัดแน่น (Compaction) เพื่อลดช่องว่างและกำจัดฟองอากาศส่วนเกินที่เกิดขึ้นภายในเนื้อคอนกรีตออกซึ่งจะส่งผลให้คอนกรีตมีสมบัติทั้งในระยะต้นและระยะยาวที่ดี ทั้งนี้หากคอนกรีตได้รับการอัดแน่นที่ไม่เพียงพอจะส่งผลต่อความสามารถในการรับแรง (Strength) และความทนทาน (Durability) ของโครงสร้างคอนกรีตด้วยเช่นกัน [1] โดยในปัจจุบันการอัดแน่นคอนกรีตจะใช้เครื่องสั่น (Vibrator) หรือเครื่องจี้เขย่า ซึ่งโดยกลไกของการสั่น เครื่องสั่นจะสร้างคลื่นแรงดันเพื่อบังคับให้อนุภาคมวลรวมทรุดตัวเอาชนะแรงเสียดทาน (Friction) ที่เกิดขึ้นระหว่างเนื้อซีเมนต์เพสต์และมวลรวม ทั้งนี้การใช้เครื่องสั่นที่มีประสิทธิภาพจะต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจและประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงานเป็นหลัก การขาดประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงานจะส่งผลอย่างมากต่อสมบัติของคอนกรีตยกตัวอย่างเช่น การจี้เขย่าน้อยเกินไปเนื่องจากการตัดสินใจและการปฏิบัติงานที่ไม่ถูกต้อง [2] ตลอดจนการขาดความรู้ความเข้าใจเรื่องการไหลตัวของคอนกรีตกับพื้นที่ในการจี้เขย่า [3] นอกจากนี้จากข้อจำกัดของรูปแบบโครงสร้างที่ซับซ้อนมากขึ้นในปัจจุบันทำให้ยากต่อการใช้เครื่องสั่น ถึงแม้การแก้ไขปัญหาก็จะทำให้คอนกรีตอัดแน่นมากขึ้นสามารถทำได้โดยวิธีการสั่นซ้ำ (Re-vibration) ที่มากขึ้น หรือการใช้แท่งเหล็กกระทุ้งแทนในตำแหน่งที่เครื่องสั่นไม่สามารถเข้าถึงได้กลับพบข้อเสียต่อสมบัติโดยรวมของคอนกรีตเนื่องจากเนื้อคอนกรีตขาดความสม่ำเสมอและเกิดการแยกตัว (Segregation) [1] ทั้งยังส่งผลกระทบต่อสุขภาพและความปลอดภัยของผู้ควบคุมเครื่องสั่น ซึ่งมีรายงานว่าพบโรคที่เกิดจากการใช้งานเครื่องสั่นในลักษณะดังกล่าวว่าเป็นโรค White Finger Syndrome นอกจากนี้ยังมีผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมในเรื่องของเสียงอีกด้วย [4] ดังนั้นนวัตกรรมหนึ่งของคอนกรีตที่สามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้คือ การใช้คอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง (Self-compacting/consolidating Concrete) ซึ่งถือได้ว่าเป็นคอนกรีตสมรรถนะสูงที่มีคุณลักษณะอันโดดเด่นอย่างยิ่งที่สามารถไหลเข้าแบบและอัดแน่นได้ด้วยน้ำหนักตัวเองโดยไม่เกิด

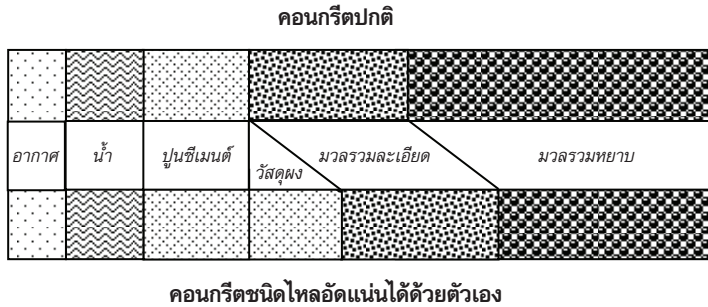
การแยกตัวและการเอี่ยม (Bleeding) ทำให้ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องอาศัยพลังงานในการจี้เขย่ามากจนเกินไป บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นการทบทวนองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับคอนกรีตประเภทนี้ โดยครอบคลุมเนื้อหาในส่วนของประวัติความเป็นมา คุณลักษณะที่สำคัญของคอนกรีตแนวทางการออกแบบส่วนผสม รวมทั้งการประยุกต์ใช้ผลผลิตพลอยได้ที่มีในประเทศไทยซึ่งได้แก่ เถ้าลอย เถ้าแกลบ เถ้าขาน้อย และฝุ่นหินปูน เพื่อใช้เป็นวัสดุติบร่วมในการผลิตคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง โดยวัสดุดังกล่าวจะทำหน้าที่เป็นวัสดุเติมแทรก (Filler Material) และหรือทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction) ร่วมกับปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ของปูนซีเมนต์ในการปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ดังนั้นการใช้ผลผลิตพลอยได้ดังกล่าวในงานคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองถือได้ว่าเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำกลับมาใช้ใหม่และมีความยั่งยืนสำหรับการผลิตคอนกรีตของประเทศไทย

2. ประวัติความเป็นมาของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง

จากปัญหาด้านความทนทานของโครงสร้างคอนกรีตซึ่งเป็นประเด็นหลักที่เกิดขึ้นในประเทศญี่ปุ่นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1983 (พ.ศ. 2526) เนื่องจากการขาดแคลนแรงงานก่อสร้างที่มีคุณภาพเพิ่มขึ้นส่งผลต่อคุณภาพของงานก่อสร้างลดลง ทำให้เกิดแนวคิดการผลิตคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองที่สามารถไหลเข้าแบบได้ด้วยน้ำหนักตัวเอง โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยการสั่นเพื่อทำให้คอนกรีตมีความอัดแน่นที่เพิ่มขึ้น โดยต้นแบบแรกของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองถูกพัฒนาจนสำเร็จลงในปี ค.ศ. 1988 (พ.ศ. 2531) [5-8] ซึ่งเป็นการปรับปรุงสัดส่วนผสมของคอนกรีตจากที่ใช้งานกันอยู่ปกติ ดังแสดงการเปรียบเทียบสัดส่วนของคอนกรีตปกติและคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองในรูปแบบที่ 1 ด้วยเหตุผลที่ต้องคำนึงถึงการใช้วัสดุที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดทั่วไปเป็นสำคัญ โดยคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองที่พัฒนาขึ้นจะถูกกำหนดตามคุณลักษณะของคอนกรีตกล่าวคือในสภาพสดคอนกรีตต้องมีความสามารถในการอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง (Self-compactable) ไม่เกิดการแยกตัว (Segregation)

และในสภาพแข็งตัวโครงสร้างต้องไม่เกิดการแตกร้าวและมีความทนทาน ในส่วนความหมายที่สอง Khayat [9] ได้นิยามไว้คือ คอนกรีตที่มีความสามารถสูงในการไหลแผ่เข้าแบบภายใต้น้ำหนักของตัวเอง มีความอัดแน่นที่ดีแม้ไม่ได้ทำการจี้เขย่า โดยไม่เกิดการแยกตัวและการเยิ้ม สามารถเติมเต็มในแบบหล่อได้อย่างสมบูรณ์ถึงแม้จะมีเหล็กเสริมอยู่อย่างหนาแน่นก็ตาม [10] ทั้งนี้คอนกรีตชนิดไหล

อัดแน่นได้ด้วยตัวเองต้องมีความสามารถในการเปลี่ยนรูปร่าง (Deformability) ของเพสต์หรือมอร์ตาร์ได้โดยไม่เกิดการแยกตัวระหว่างมวลรวมหยาบและมอร์ตาร์ในระหว่างที่คอนกรีตไหลผ่านเหล็กเสริม ดังนั้นการออกแบบส่วนผสมนี้จึงต้องคำนึงถึงปริมาณของมวลรวม และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงต้องอยู่ในระดับต่ำร่วมกับการใช้สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) [7,11]



รูปที่ 1 การเปรียบเทียบสัดส่วนผสมระหว่างคอนกรีตปกติกับคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง [7]

จากผลของการพัฒนาคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองอย่างต่อเนื่องทำให้วัฏกรรมคอนกรีตชนิดนี้ได้รับความนิยมมากขึ้น ดังจะดูได้จากการนำมาใช้กับการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในโครงการสำคัญๆ หลายโครงการ เนื่องจากทำให้ระยะเวลาในการก่อสร้างลดลง เนื้อคอนกรีตภายในมีการอัดแน่นเพียงพอแม้ว่าจะเป็นบริเวณที่ยากต่อการจี้เขย่า และตัดปัญหาเรื่องเสียงที่เกิดจากการจี้เขย่า [12] ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Zhu [13] ที่พบว่า การใช้งานคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื้อคอนกรีตที่ได้มีความสม่ำเสมอ (Uniformity) มากกว่าคอนกรีตปกติที่ผ่านการจี้เขย่า จากนั้นในปี ค.ศ.1996 (พ.ศ. 2539) หลายๆ ประเทศในแถบทวีปยุโรปได้ให้ความสนใจและร่วมกันจัดตั้งกลุ่มเพื่อวางเป้าหมายในการพัฒนาข้อกำหนด (Specifications) และมาตรฐาน (Standards) ของการใช้งานคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองสำหรับประเทศในแถบทวีปยุโรป พร้อมกันนั้นประเทศสหรัฐอเมริกาก็ได้เริ่มสนใจคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองมากขึ้นโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมคอนกรีตผลิตชิ้นส่วนสำเร็จรูป (Precast Concrete) [14]

3. คุณลักษณะเฉพาะของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง

คอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองต้องมี 3 องค์ประกอบที่สำคัญคือ (ก) มีความสามารถในการไหลเข้าแบบหล่อที่มีความสลับซับซ้อนได้อย่างสมบูรณ์ด้วยน้ำหนักของตัวเอง (ข) มีความสามารถในการไหลผ่านและยึดเกาะกับเหล็กเสริมภายใต้น้ำหนักของตัวเอง และ (ค) มีความต้านทานต่อการแยกตัวของมวลรวมในระดับสูง โดยความแตกต่างระหว่างคอนกรีตปกติกับคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองคือ สมบัติของการไหลตัวได้ที่สูงมาก ซึ่งคอนกรีตปกติที่มีค่าการไหลแผ่ที่ดีจะมีความการยุบตัว (Slump) ตามมาตรฐาน ASTM C143 [15] มากกว่า 200 มิลลิเมตร ในขณะที่คอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองมีค่าการไหลแผ่ (Slump Flow) ตามมาตรฐาน ASTM C1611 [16] มากกว่า 600 มิลลิเมตร จึงจะถือได้ว่ามีแรงยึดเหนี่ยวสูงและสามารถทะลุเข้าแบบได้โดยไม่ต้องอาศัยการจี้เขย่า นอกจากนั้นยังต้องมีความหนืดที่เหมาะสมในการเอาชนะแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคมวลรวมหยาบเพื่อไม่ก่อให้เกิดการติดขัดกันเองในกรณีไหล

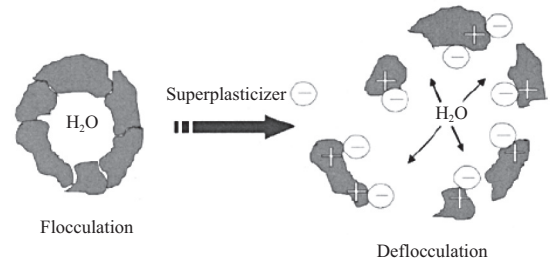
ผ่านสิ่งกีดขวางและไม่มี การแยกตัวระหว่างมวลรวมหยาบกับมอร์ตาร์ด้วยเช่นกัน

3.1 ความสามารถในการเติมแทรก (Filling Ability)

ความสามารถในการเติมแทรก (Filling Ability) ตามนิยามของ European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete (EFNARC) [10] และ American Concrete Institute (ACI) [17] หมายถึง ความสามารถของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองในการไหลและเติมแทรกที่ว่างทั้งหมดภายในแบบหล่อได้อย่างสมบูรณ์ภายใต้น้ำหนักของตัวเองและยึดเหล็กเสริมให้เป็นเนื้อเดียวกับคอนกรีต [18] โดยสมบัติของคอนกรีตสดจะมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการเคลื่อนที่ได้ของคอนกรีตซึ่งหมายถึงความสามารถเปลี่ยนรูปร่างได้ภายใต้ น้ำหนักของตัวเองและไหลเข้าแบบหล่อได้อย่างทั่วถึง ความสามารถนี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อแรงเสียดทานภายใน (Internal Friction) ของอนุภาคลดลงโดยการลดแรงตึงผิว (Surface Tension) ด้วยการใช้สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) ร่วมด้วยหรือการใช้สารควบคุมการแยกตัวเพื่อสร้างจุดที่เหมาะสมของการอัดแน่นอนุภาคที่มีขนาดเล็ก การควบคุมปริมาณของมวลรวมหยาบ การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์และ/หรือวัสดุประสาน [4,9,19-20]

ในส่วนของการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) ซึ่งจะช่วยให้ความสามารถในการไหลตัวได้ดีขึ้น อันเนื่องมาจากแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของมวลรวมลดลง แต่ในขณะเดียวกันกลับทำให้ความหนืดของเนื้อเพสต์ลดลงด้วยซึ่งเป็นผลต่อเนื่องไปสู่การเกิดการแยกตัว [19] และการเยิ้ม น้ำที่ผิวคอนกรีต [21] เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างการแยกตัวของมวลรวมหยาบที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าเนื้อเพสต์ทำให้มวลรวมจมตัวลงสู่ด้านล่างอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ส่วนของของเหลวจะแยกตัวออกจากเนื้อคอนกรีตขึ้นสู่ผิวด้านบน ผลของการเยิ้มทำให้เกิดการยุบตัวที่ผิวคอนกรีตตลอดจนการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มากเกินไปยังส่งผลต่อกำลังอัดและความคงทนของคอนกรีตด้วยเช่นกัน [22] ดังนั้นการทำให้คอนกรีตมีความคงตัวที่เพียงพอโดยเฉพาะอย่างยิ่งในโครงสร้างที่มีสัดส่วนของความลึกเทียบกับความกว้างและความยาวที่สูงมาก เช่น ผนังหรือกำแพง เป็นต้น

เนื่องจากถือว่าเป็นจุดวิกฤติที่คอนกรีตต้องมีความสามารถในการไหลได้เป็นอย่างดีโดยไม่เกิดการแยกตัวหรือเยิ้ม โดยสรุปทั้งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่สูงหรือต่ำเกินไปล้วนมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการเติมแทรกได้ทั้งสิ้น ดังนั้นแนวทางในการลดปัญหาดังกล่าวคือ การใช้สารลดน้ำพิเศษผสมร่วมซึ่งไม่เพียงแต่เป็นการช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคภายในโดยการกระจายอนุภาคของปูนซีเมนต์ได้ดีแต่ยังคงรักษาความสามารถในการเปลี่ยนรูปร่างและความหนืดไว้ด้วย [23-26] ดังแสดงกลไกการทำงานของสารลดน้ำพิเศษในรูปที่ 2 ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วน้อยกว่ากรณีการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว



รูปที่ 2 กระจายอนุภาคปูนซีเมนต์ออกจากกันด้วยสารลดน้ำพิเศษ [25]

การกระจายขนาดอนุภาค (Particle Size Distribution, PSD) ของวัสดุผงยังมีผลต่อความสามารถในการเติมแทรกด้วยเช่นเดียวกัน เนื่องจากแรงเสียดทานที่เกิดจากอนุภาคภายในสามารถลดลงได้ด้วยการผสมร่วมกันของปูนซีเมนต์และวัสดุผงที่มีขนาดสม่ำเสมอใกล้เคียงกันหรือเล็กกว่า โดยหากมีการใส่วัสดุผงขนาดเล็กในปริมาณที่มากจนเกินไปจะส่งผลให้วัสดุมีพื้นที่ผิวมากย่อมกระทบถึงความต้องการปริมาณน้ำมากขึ้นตามไปด้วย [27-28] ดังนั้นการเลือกวัสดุผงที่เหมาะสมในการผสมร่วมกันไม่ว่าการผสมวัสดุผงร่วมกันตั้งแต่สองหรือสามชนิดขึ้นจึงเป็นสิ่งสำคัญ ทั้งนี้เพื่อที่จะนำข้อดีของวัสดุผงอีกชนิดมาช่วยลดข้อบกพร่องของวัสดุผงอีกชนิดหนึ่งลงได้ อาทิเช่น วัสดุบางชนิดดูดซึมน้ำสูงส่งผลให้ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตลดลง แต่ในทางตรงข้ามกลับช่วยในการพัฒนากำลังอัดและความคงทนของคอนกรีตในสภาวะที่แข็งตัวแล้วได้ [29] โดยสรุปแนวทางในการเพิ่มความสามารถในการเติมแทรกสามารถแสดงได้ในตารางที่ 1

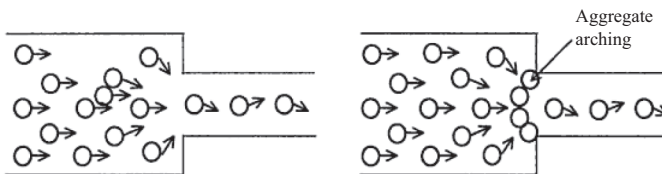
ตารางที่ 1 แนวทางในการเพิ่มความสามารถในการเดิมแทรก [30]

เพิ่ม	ลด
ความสามารถในการเปลี่ยนรูปได้ซีเมนต์เพสต์	แรงเสียดทานภายในอนุภาค
ใช้สารลดน้ำพิเศษ	ลดปริมาตรมวลรวมหยาบ (ปริมาณซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้น)
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงต่ำ	วัสดุผงต้องมีขนาดลึ้มพันรักับมวลรวมและ ปูนซีเมนต์ที่ใช้

3.2 ความสามารถในการไหลผ่าน (Passing Ability)

ความสามารถของคอนกรีตในการไหลผ่านเหล็กเสริมภายในแบบหล่อขึ้นอยู่กับระดับความสามารถของคอนกรีตในการไหลผ่านเหล็กเสริมที่มีรูปแบบของการจัดเรียงและความซับซ้อนของเหล็กเสริมที่แตกต่างกัน [4] ปัจจัยที่สำคัญคือ ช่องว่างระหว่างเหล็กเสริมที่จะต้องนำมาพิจารณาในการเลือกใช้ขนาดและรูปร่างของมวลรวมหยาบ รวมถึงปริมาณของมอร์ตาร์ในคอนกรีตด้วย [12] โดยเฉพาะโครงสร้างที่มีการเรียงตัวของเหล็กเสริมอย่างหนาแน่นที่จะต้องใช้ปริมาณของเพสต์ในส่วนผสมคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเป็นสัดส่วนของมวลรวมหยาบ โดยความสามารถในการไหลผ่านตามนิยาม

ของ Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Materiaux, Systemes de Construction et Ouvrages (RILEM) Technical committee [18], EFNARC [10] และ ACI [17] หมายถึง ความสามารถของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองในการไหลผ่านช่องเปิดที่มีความหนาแน่น ซึ่งได้แก่ ช่องว่างระหว่างเหล็กเสริมโดยไม่มีการแยกตัวหรือติดขัด ดังนั้นเมื่อทำการเทคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองลงในโครงสร้างที่มีเหล็กเสริมหนาแน่น คอนกรีตต้องสามารถผ่านระหว่างเหล็กเสริมไปได้อย่างรวดเร็วโดยไม่เกิดการติดขัด ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 กลไกการติดขัดของมวลรวมในระหว่างการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง [30]

รูปที่ 3 แสดงกลไกการติดขัดของมวลรวมซึ่งเป็นผลมาจากการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคของมวลรวม และระหว่างของมวลรวมกับเหล็กเสริม เมื่อคอนกรีตต้องไหลผ่านช่องขนาดเล็กทำให้เกิดผลต่างของความเร็วในการไหลของมอร์ตาร์กับมวลรวมหยาบเป็นผลให้เกิดการสะสมตัวในบริเวณนั้นเพิ่มขึ้น มวลรวมหยาบบางก้อนอาจติดขัดจนนำไปสู่การติดขัดในส่วนที่เหลือของคอนกรีต การติดขัดเกิดได้ง่ายหากมวลรวมหยาบมีขนาดใหญ่และปริมาณมาก ดังนั้นถึงว่าแม้คอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองจะมีความสามารถในการเดิมแทรก และการต้านทานการแยกตัวที่ดีแล้วก็ตาม แต่ก็ยังสามารถเกิดการติดขัดได้

หากมีขนาดและปริมาณมวลรวมหยาบขนาดใหญ่ในปริมาณมาก โดยสรุปปัจจัยสำคัญของการติดขัดขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างเหล็กเสริม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูปทรงและปริมาณของมวลรวมหยาบ [31-32] ดังนั้นการลดปริมาณและขนาดของมวลรวมหยาบลงช่วยแก้ปัญหาการติดขัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ปริมาตรที่เพิ่มขึ้นของซีเมนต์เพสต์ในส่วนผสมคอนกรีตยังมีผลต่อปริมาตรมวลรวมที่ลดลงและยังลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของมวลรวม [33-34] ส่วนความหนืดพลาสติก (Plastic Viscosity) มีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของมวลรวมหยาบที่ใช้ [35] ดังนั้นซีเมนต์เพสต์ที่มีความหนืดเพียงพอ

จะช่วยป้องกันการสะสมตัวของมวลรวมหยาบเพื่อหลีกเลี่ยงการติดขัดได้ อีกทั้งยังสามารถนำวัสดุผงอื่นมาผสมรวมเพื่อช่วยเพิ่มความหนืดได้ อาทิเช่น ถ้ำลอย ฝุ่นหินปูน

เป็นต้น เนื่องจากการกระจายตัวและอัดแน่นระหว่างของอนุภาคของปูนซีเมนต์ที่ดีขึ้นส่งผลให้ความต้องการน้ำลดลงดังสรุปตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แนวทางในการเพิ่มความสามารถในการไหลผ่าน [30]

เพิ่ม	ความสอดคล้อง
ความหนืดในการลดการแยกตัวของมวลรวมหยาบ	ขนาดช่องว่างและลักษณะของมวลรวมหยาบ
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงต่ำ	ลดปริมาตรมวลรวมหยาบ
ใช้สารเพิ่มความหนืด	ลดขนาดใหญ่สุดของมวลรวม

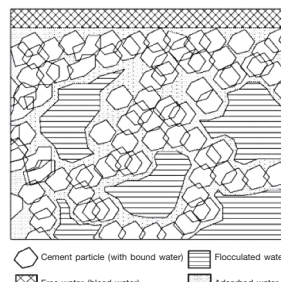
3.3 ความต้านทานการแยกตัว (Segregation Resistance)

คอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองต้องสามารถรักษาสภาพความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) [10,18] โดยปกติการแยกตัวของคอนกรีตในสภาวะสดคือ การไม่เป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุในส่วนผสมคอนกรีตซึ่งจะเกิดขึ้นระหว่างการขนส่งและการเทเข้าแบบหล่อซึ่งเรียกว่า การแยกตัวแบบเคลื่อนที่ (Dynamic Segregation) แต่ภายหลังจากการเทคอนกรีตแล้วมวลรวมหยาบทรุดตัวลงสัมผัสกับน้ำอิสระเคลื่อนขึ้นสู่ด้านบนของแบบหล่อแยกตัวออกเป็นเหตุให้เกิดการเยิ้มลักษณะนี้เรียกว่า การแยกตัวแบบคงที่ (Static Segregation) [36-37] โดยลักษณะของการแยกตัวที่สำคัญ คือ (ก) การเยิ้ม

(ข) ซีเมนต์เฟสและมวลรวมแยกตัว (ค) มวลรวมหยาบแยกตัวจนเกิดการติดขัด และ (ง) การกระจายตัวของอากาศในโพรงไม่สม่ำเสมอ [30] ดังนั้นเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาการแยกตัวระหว่างน้ำกับมวลรวมจึงต้องทำการลดปริมาณน้ำส่วนที่ผสมเป็นซีเมนต์เฟสหรือการใช้วัสดุผงที่มีพื้นที่ผิวสูงผสมร่วมด้วย [38-40] โดยปริมาณของน้ำอิสระ (Free Water) ที่ผิวของมวลรวมต้องมีปริมาณน้อยลงด้วยเพื่อป้องกันการเยิ้ม ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งการเยิ้มโดยการที่น้ำขึ้นสู่ผิวบนหรือถูกขังอยู่บริเวณใต้มวลรวมหยาบที่ขัดกันอยู่กับเหล็กเสริมทำให้คอนกรีตบริเวณผิวสัมผัสกับเหล็กเสริมไม่แข็งแรงจนส่งผลกระทบต่อกำลังอัดและความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตได้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 การเยิ้ม (ก) ภายถ่ายลักษณะการเยิ้ม (ข) การกระจายอนุภาคของน้ำในซีเมนต์เฟส [39]

ความต้านทานการแยกตัวของคอนกรีตที่ดีเกิดขึ้นจากการกระจายขนาดของมวลรวมในเนื้อคอนกรีตต้องสัมพันธ์กันในทุกตำแหน่งทั้งในแนวตั้งและแนวนอน การต้านทานการแยกตัวถือได้ว่าเป็นส่วนสำคัญของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองเนื่องจากการต้านทานการแยกตัวที่ไม่ดีทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการเปลี่ยนรูปร่างไม่ดี เกิดการติดขัดรอบเหล็กเสริม มีการหดตัวแบบแห้งที่สูง และความไม่สม่ำเสมอของกำลังอัดของคอนกรีต [41] โดยความต้านทานการแยกตัวที่ดีต้องอาศัยส่วนประกอบที่สำคัญเพื่อให้ส่วนผสมของคอนกรีตมีความเหนียวเพิ่มขึ้นซึ่งสามารถทำได้ 3 วิธีขึ้นอยู่กับวัสดุ ได้แก่ (ก) การใช้ปริมาณวัสดุผงในส่วนผสมระดับสูง (ข)

การใช้สารเพิ่มความเหนียว (Viscosity Modifying Agent) หรือ (ค) การใช้ร่วมกันทั้งสองอย่าง [42] โดยการใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อเพิ่มความสามารถของการไหลอาจส่งผลต่อความคงตัวของคอนกรีตได้ เนื่องจากการไหลตัวที่ดีทำให้ความเหนียวลดลง ในขณะที่ความเหนียวถือว่าเป็นตัวแปรสำคัญในการช่วยต้านทานการแยกตัวของมวลรวมหยาบ ทั้งนี้เพราะความเหนียวสามารถช่วยยึดอนุภาคของมวลไว้ไม่ให้เกิดการแยกตัว รวมถึงช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของมวลรวมหยาบในระหว่างการไหลได้ [43] สำหรับแนวทางในการป้องกันการแยกตัวของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองสรุปได้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แนวทางในการเพิ่มความสามารถในการต้านทานการแยกตัว [30]

ลดการแยกตัวของมวลรวมหยาบ	ลดการเยิ้ม
จำกัดปริมาณของมวลรวม	ปริมาณน้ำต่ำ
ลดขนาดใหญ่สุดของมวลรวม	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงต่ำ
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงต่ำ	ผสมวัสดุผงที่มีพื้นที่ผิวสูง
ใช้สารเพิ่มความเหนียว	ใช้สารเพิ่มความเหนียว

4. วิธีการออกแบบส่วนผสม (Mix Design Methods)

การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองต้องพิจารณาสมบัติของคอนกรีตสดที่มีสมรรถนะสูงกว่ากับคอนกรีตปกติ โดยสัดส่วนวัสดุที่ใช้ถือเป็นเรื่องสำคัญ ซึ่งปกติการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองและคอนกรีตปกติกำหนดโดยปริมาตรและพิจารณาจากวัสดุที่มีในแต่ท้องถิ่นเพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่าย [44] การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตปกติเริ่มจากการกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เพื่อให้สอดคล้องกับกำลังอัดที่ต้องการ จากนั้นจึงคำนวณปริมาณของมวลรวม [45] ในขณะที่คอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองโดยทั่วไปการออกแบบส่วนผสมเริ่มจากสมบัติของคอนกรีตสด โดยมีหลักการที่สำคัญคือ การใช้สารลดน้ำพิเศษและ/หรือสารเพิ่มความเหนียว การจำกัดปริมาณของมวลรวมและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่เหมาะสมเพื่อให้ได้สมบัติของคอนกรีตสดที่ต้องการ ทั้งนี้จากการ

กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงในระดับต่ำส่งผลให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดที่สูงขึ้น ดังนั้นจากสมบัติของคอนกรีตสดและคุณลักษณะของวัสดุที่หลากหลายทำให้มีขอบเขตและแนวทางการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตที่แตกต่างกันตามไปด้วย โดยวิธีการที่ใช้อยู่ในปัจจุบันเกิดจากการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยสมาคมวิศวกรโยธาแห่งประเทศไทยญี่ปุ่น (Japanese Society of Civil Engineer (JSCE)) ได้กำหนดประเภทของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองไว้ 3 ชนิดคือ

(ก) คอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองประเภทวัสดุผง (Powder-Type Self-Compacting Concrete) โดยการกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงอยู่ในช่วง 0.28-0.37 (155-175 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) จากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ต่ำส่งผลให้ได้กำลังอัดที่สูง แต่การหดตัวแบบออโตจีเนียส (Autogenous Shrinkage) จะมีค่าสูงด้วยเช่นกัน ในขณะที่ความแปรผันของความชื้นที่พื้นผิวและโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียดส่งผลต่อสมบัติของคอนกรีตสด

(ข) คอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองประเภทสารเพิ่มความหนืด (Viscosity Agent-Type Self-Compacting Concrete) เป็นการปรับความหนืดในช่วงพลาสติกโดยการเติมปริมาณของสารเพิ่มความหนืด (มากกว่า 180 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ความหนืดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการไหลลดลงในขณะที่ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น ส่วนใหญ่ใช้ร่วมกับการออกแบบส่วนผสมที่ใช้วัสดุผงเพียงชนิดเดียว

(ค) คอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองประเภทผสมรวมทั้งสองประเภทเข้าด้วยกัน (Combination-Type Self-Compacting Concrete) วิธีการนี้กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงต่ำส่งผลให้ได้กำลังอัดที่สูง แต่มีการหดตัวแบบอโตจีเนียสสูงเช่นกัน ส่วนการผสมสารเพิ่มความหนืดเข้าไปช่วยเพิ่มความสามารถในการเปลี่ยนรูปร่างและลดการแยกตัวให้น้อยลง ส่งผลให้คอนกรีตมีความสามารถในการอัดแน่นได้สูง โดยได้สรุปปริมาณวัสดุส่วนผสมในแต่ละประเภทดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ปริมาณวัสดุผงตามชนิดของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองตามข้อกำหนดของ Japan Society of Civil Engineers (JSCE) [46]

ประเภทของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง	ปริมาณวัสดุผงโดยปริมาตรของคอนกรีต	
	ร้อยละ	น้ำหนัก* (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
วัสดุผง	16-19	500-600
สารเพิ่มความหนืด	9.5-16	300-500
ผสมรวม	>13	>410

*เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ในส่วนของสมาคม EFNARC ซึ่งก่อตั้งขึ้นในปี ค.ศ. 1989 (พ.ศ. 2532) ภายหลังจากพัฒนาคอนกรีต

ชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองในประเทศญี่ปุ่นได้กำหนดสัดส่วนผสมของคอนกรีตดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ปริมาณสัดส่วนผสมตามข้อกำหนดของ EFNARC [10, 47]

วัสดุผสม	สัดส่วนปริมาณวัสดุโดยปริมาตรของคอนกรีต	
	EFNARC2002	EFNARC2005
ปริมาณวัสดุผง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	400-600	380-600
ปริมาณน้ำ (ลิตรต่อลูกบาศก์เมตร)	< 200	150 - 210
ปริมาณมวลรวมหยาบ (ร้อยละ)	28 - 35	27 - 36
ปริมาณมวลรวมละเอียด	ปรับตามปริมาตร	ร้อยละ 48 - 55*
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง โดยปริมาตร	0.80 - 1.00	0.85 - 1.10

* ร้อยละต่อน้ำหนักของมวลรวมทั้งหมด

นอกจากนั้น Domone [48] ได้ทำการเก็บรวบรวมและวิเคราะห์การใช้งานคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองในช่วงระยะเวลา 11 ปี ค.ศ. 1993-2003 (พ.ศ. 2536 - 2546) จำนวน 68 กรณีศึกษาพบว่า ความแตกต่างระหว่างสัดส่วนผสมของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่น

ได้ด้วยตัวเองเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติได้แก่ การใช้ปริมาณมวลรวมหยาบที่ต่ำกว่าทำให้ปริมาณซีเมนต์เฟสดีเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณวัสดุผงสูงกว่า อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อวัสดุผงต่ำ ปริมาณสารลดน้ำพิเศษสูง และใช้สารเพิ่มความหนืดในบางกรณี สรุปสัดส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ปริมาณสัดส่วนผสมของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง [48]

วัสดุผสม	สัดส่วนปริมาณวัสดุโดยปริมาตรของคอนกรีต
ปริมาณวัสดุผง	
(กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	445 - 605
ปริมาณซีเมนต์เฟสดี	
(ร้อยละ)	32.3 - 39
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง	0.28 - 0.42
ปริมาณมวลรวมหยาบ (ร้อยละ)	29.1 - 34.8
ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ	
(มิลลิเมตร)	16 - 20
ปริมาณมวลรวมละเอียดต่อมอร์ตาร์ (ร้อยละ)	41.0 - 51.5

เมื่อพิจารณาจากผลของการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ในระดับที่สูงส่งผลให้คอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองมีราคาสูงกว่าคอนกรีตทั่วไป [12] และโครงสร้างเกิดการแตกร้าว (Thermal Cracking) ขึ้นได้ [49] ดังนั้นการนำผลผลิตพลอยได้ (By-product) ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานมาใช้ร่วมกับคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองนอกจากช่วยเพิ่มสมบัติบางประการของคอนกรีตแล้ว ราคาของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองยังลดลงอีกด้วย จากการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงและราคาของผลผลิตพลอยได้ที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับราคาของปูนซีเมนต์

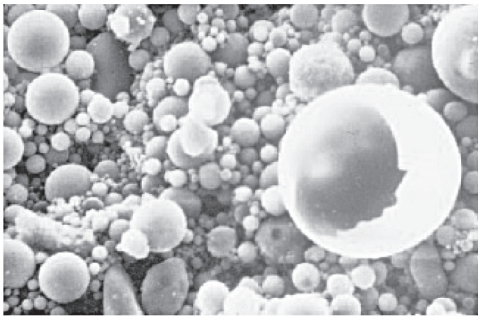
5. การใช้ผลผลิตพลอยได้ในงานคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง

5.1 เถ้าลอย (Fly Ash)

เถ้าลอย (Fly Ash) จากนิยามของ American Society for Testing and Materials (ASTM) ASTM C618 [50] หมายถึง ส่วนละเอียดที่เหลือจากการเผาถ่านหินที่บดหรือเป็นผงละเอียดและถูกพัดออกมาตาม

ปล่อง จากนั้นจะถูกดักจับด้วยกลไกทางไฟฟ้าสถิตของระบบ Electrostatic Precipitator เพื่อรวบรวมเก็บไว้ในไซโล โดยเถ้าลอยจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามชนิดของถ่านหินได้แก่ แอนทราไซต์ (Anthracite) หรือ บิทูมินัส (Bituminous) เถ้าที่ได้จะมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ในระดับสูง โดยมีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ไม่เกินร้อยละ 10 ถ่านหินคุณภาพรองลงมาได้แก่ ซับบิทูมินัส (Subbituminous) หรือ ลิกไนต์ (Lignite) มีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) อยู่ในช่วงร้อยละ 15-40 ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกซาลงแต่ยังถือว่าเป็นวัสดุประสานที่ดี ถึงแม้จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูงก็ตาม [51-52] นอกจากนี้ในมาตรฐานดังกล่าวยังกำหนดว่าเถ้าที่มีปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และไอรอนไดออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันมากกว่าร้อยละ 70 ถูกจัดอยู่ในประเภท F ส่วนเถ้าที่มีปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และไอรอนไดออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันมากกว่าร้อยละ 50 จะถูกจัดอยู่ในประเภท C

สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย โดยทั่วไปมีลักษณะทรงกลมและผิวเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 5 ขนาดอนุภาคของเถ้าลอยอยู่ในช่วงเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จนถึงขนาดใหญ่กว่า 100 ไมโครเมตร ซึ่งส่วนใหญ่เถ้าลอยจะมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 20 ไมโครเมตร เพียงร้อยละ 10-30 เท่านั้น ที่เหลือขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 45 ไมโครเมตร พื้นที่ผิวทั่วไปอยู่ระหว่าง 300-500 ตารางเมตรต่อกิโลกรัม หน่วยน้ำหนักแบบหลวมอยู่ในช่วง 540-860 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนหน่วยน้ำหนักแบบอัดแน่นอยู่ในช่วง 1120-1500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [51,53]



รูปที่ 5 ภาพถ่ายขยายอนุภาคเถ้าลอยที่กำลังขยาย 1000 เท่า [53]

องค์ประกอบเคมีของเถ้าลอยโดยทั่วไปประกอบไปด้วย ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ไอร์อนไดรอกไซด์

(Fe_2O_3) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) ซัลเฟอร์ไดรอกไซด์ (SO_3) โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) และโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) รวมถึงปริมาณคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมดในรูปของร้อยละการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ (Loss on Ignition, LOI) โดยเถ้าลอยประเภท C มีสัดส่วนของ CaO และ MgO สูง ในขณะที่สัดส่วนของ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอยประเภท F ส่วนปริมาณคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด (LOI) อยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 3.6-9.34 โดยน้ำหนัก หากปริมาณ LOI อยู่ในระดับสูงส่งผลให้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นต่ำ ความต้องการน้ำสูงและกำลังอัดลดลง [54] ดังแสดงในตารางที่ 7 องค์ประกอบทางสายแร่ของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับปัจจัยทางธรณีวิทยาที่เกี่ยวข้องกับการเกิดขึ้นและสะสมตัวของถ่านหิน เมื่อถ่านหินผ่านกระบวนการเผาไหม้จากการวิเคราะห์โดยวิธีการ X-ray diffraction (XRD) พบว่า ส่วนใหญ่แร่อยู่ในสถานะควอตซ์ (Quartz) คาโอลินท์ (Kaolinite) อีไลท์ (Illite) และซิเดอเรท (Sideraete) ส่วนที่เหลืออีกเล็กน้อย ได้แก่ แคลไซต์ (Calcite) ไพไรท์ (Pyrite) และเฮมาไทต์ (Hematite) โดย Quartz และ Mullite เป็นองค์ประกอบหลักในสถานะผลึกของเถ้าลอยประเภท F ส่วนเถ้าลอยประเภท C ประกอบไปด้วย Quartz, C_3A , CS และ C_4AS [55]

ตารางที่ 7 องค์ประกอบเคมีของเถ้าลอย [56]

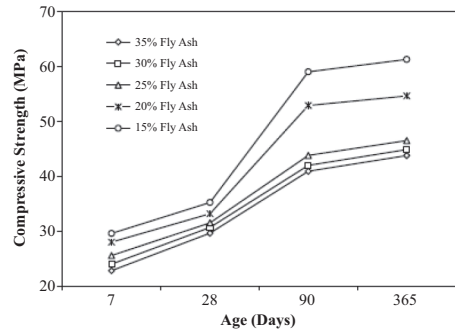
องค์ประกอบเคมี (ร้อยละ)	เถ้าลอยประเภท F	เถ้าลอยประเภท C
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)	45.0-64.4	23.1-50.5
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	0.7-7.5	11.6-29.0
อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3)	19.6-30.1	13.3-21.3
ไอร์อนออกไซด์ (Fe_2O_3)	3.8-23.9	3.7-22.5
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.3-2.8	0.5-7.3
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.7-1.7	1.5-7.5
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.7-2.9	0.4-19
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ (Loss on Ignition, LOI)	0.4-7.2	0.3-1.9

การศึกษาระดับต้นกำลังอัดพบว่า ปริมาณแคลเซียมออกไซด์เทียบเท่าในวัสดุผงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย โดยมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูงมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ต่ำกว่า [57] นอกจากนี้ผลกระทบของขนาดอนุภาคของเถ้าลอย พบว่าค่าดัชนีกำลังที่เปลี่ยนแปลงไปของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยระหว่าง 2.7 ถึง 160 ไมโครเมตร ที่อายุ 3 ถึง 28 วัน เกิดจากการเติมแทรกของอนุภาคเถ้าลอยมากกว่าการเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก ในขณะที่ดัชนีกำลังจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะมีผลอย่างมากหลังจากมอร์ตาร์มีอายุมากขึ้น (90 วัน) [58] หากทำการคัดแยกขนาดเถ้าลอยให้มีขนาดเล็ก เมื่อแทนที่ในซีเมนต์เพสต์พบว่าขนาดโพรงคาพิลลารีและปริมาตรโพรงทั้งหมดของเพสต์ต่ำลง มีผลทำให้กำลังอัดสูงขึ้น และเนื่องจากผลของการกระจายตัวที่ดีในเพสต์ยังทำให้เพสต์มีความสม่ำเสมอและแน่นขึ้น ช่วยกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน มีการเติมแทรกช่องว่างในเพสต์ได้ดี และทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับเพสต์ผสมเถ้าลอยที่มีขนาดหยาบกว่า [59] ส่วนสมบัติด้านความทนทานของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย พบว่าการเพิ่มปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยสามารถลดทั้งการหดตัวแบบแห้ง และการหดตัวแบบออโตจีเนียสลงได้ ในขณะที่ความทนทานต่อการเกิดคาร์บอนขึ้นลดลง [57] ในขณะที่คอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุผงรวม 300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงร้อยละ 0.7 เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก สามารถทนทานการกัดกร่อนจากกรดซัลฟูริกที่มีค่า pH 0.5 ได้มากที่สุด แต่ส่งผลต่อกำลังอัดที่ลดลงเช่นกัน ดังนั้นต้องพิจารณาเลือกใช้ปริมาณวัสดุผง และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วนที่เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน [60] นอกจากนี้การทดสอบค่าความทนทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อปริมาณวัสดุผงรวมในส่วนผสมคอนกรีตเท่ากับ 328 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.44-0.54 และอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ได้แก่เถ้าลอยไม่คัดขนาด เถ้าลอยคัดขนาด

ละเอียดสุดร้อยละ 45 และเถ้าลอย คัดขนาดละเอียดสุดร้อยละ 10 โดยทำการวัดการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM C1202 และการแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3 พบว่าค่าความทนทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเถ้าลอยมีความละเอียดมากขึ้น ซึ่งวิธีการทดสอบทั้งสองวิธีให้ผลที่สอดคล้องกัน [61] ในกรณีคอนกรีตแช่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 1 ปี พบว่าการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์และซัลเฟตในน้ำทะเล มีผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ที่ผสมเถ้าลอยน้อยมาก และเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยในส่วนผสมไม่เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุผง (ปริมาณวัสดุผงรวมในส่วนผสมคอนกรีตเท่ากับ 295 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.65) ให้สามารถทนทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดียิ่งขึ้น รวมถึงสามารถช่วยป้องกันการเกิดสนิมเหล็กเสริมได้ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย [62] และเมื่อนำคอนกรีตแช่ในน้ำทะเลนานถึง 4 ปี จากคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 ปริมาณวัสดุผงรวมในส่วนผสมคอนกรีตเท่ากับ 478 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.65 พบว่าทุกส่วนผสมมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นจาก 28 วันต่อเนื่องจนถึง 4 ปี ในขณะที่คอนกรีตควบคุมจากทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 กำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย และผลของความละเอียดของเถ้าลอยที่มากกว่าสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์เนื่องจากน้ำทะเลได้ดีกว่า ทั้งนี้อัตราส่วนการแทนที่เถ้าลอยที่ผ่านการแยกขนาด (ขนาดเฉลี่ยอนุภาค 9.7 ไมโครเมตร) ในส่วนผสมคอนกรีตที่เหมาะสมในสภาวะแวดล้อมทะเลอยู่ที่ร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุผง [63]

ในปัจจุบันได้มีการนำเถ้าลอยมาใช้ในงานคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง เนื่องจากการมีขนาดอนุภาคที่เล็กและทรงกลมของเถ้าลอยที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ [64-65] และลดการแยกตัวของคอนกรีต [66] โดยความสามารถในการทำงานได้เพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ [67] และความละเอียดของเถ้าลอยที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มความหนืดของคอนกรีตสดโดย

ไม่ทำให้ความสามารถในการไหลลดลง รวมถึงใช้ในงานคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองประเภทกำลังอัดสูงได้ โดยแก้าลอยที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 500-600 ตารางเมตรตอกิโลกรัม อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยน้ำหนักร้อยละ 30-40 ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไม่น้อยกว่า 500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ปริมาณน้ำอยู่ในช่วง 175-185 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และสารลดน้ำพิเศษประเภทซิลิโพนเตตเนพธาซีนฟอรัลด์ไฮดร็อกไซด์ร้อยละ 1.0-1.6 สามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงถึง 60-80 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน รวมถึงสมบัติในการต้านทานการซึมผ่านของน้ำได้เป็นอย่างดี [68] อย่างไรก็ตามก็ตามคุณลักษณะของแก้าลอยและอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมมีผลกระทบต่อตรงต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง [69] ในขณะที่โมดูลัสยืดหยุ่นมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนการแทนที่แก้าลอยและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเพิ่มขึ้น [70-72] การปรับปรุงการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองในช่วงเริ่มต้น เมื่อปริมาณวัสดุผงรวมในส่วนผสมคอนกรีตเท่ากับ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยแก้าลอยร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.22 และสารลดน้ำพิเศษประเภทโพลีคาร์บอกซีเลตร้อยละ 2.0 พบว่าการใช้พลังงานไมโครเวพระดับพลังงาน 100 วัตต์ บ่มที่ระยะเวลา 15 นาที ในช่วงเริ่มต้นที่อายุ 1 วัน สามารถพัฒนากำลังอัดได้มากกว่าคอนกรีตที่ผ่านการบ่มน้ำถึงร้อยละ 40 [73] ส่วนการพัฒนากำลังอัดในระยะยาวเมื่อปริมาณวัสดุผงรวมในส่วนผสมคอนกรีตเท่ากับ 550 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยแก้าลอยร้อยละ 15, 20, 25, 30 และ 35 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.41-0.44 และสารลดน้ำพิเศษประเภทโพลีคาร์บอกซีเลตไฮดร็อกไซด์ร้อยละ 1.8-2.0 พบว่าคอนกรีตยังคงพัฒนากำลังอัดอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะที่อายุ 90 วัน อัตราส่วนการแทนที่ด้วยแก้าลอยร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก กำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ไม่ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม (กรณีไม่ได้แทนที่) [74] ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 กำลังอัดของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยแก้าลอยที่อัตราส่วนแตกต่างกัน [74]

นอกจากนี้ยังสามารถนำแก้าหนัก (Bottom Ash) มาใช้งานร่วมกับแก้าลอยในการผลิตคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง โดยในส่วนผสมคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองใช้แก้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในขณะที่แก้าหนักถูกนำมาใช้แทนที่มวลรวมละเอียด โดยกำหนดปริมาณวัสดุผงรวมในส่วนผสมคอนกรีตเท่ากับ 550 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงแปรผันในช่วง 0.51-0.58 และสารลดน้ำพิเศษประเภทโพลีคาร์บอกซีเลตไฮดร็อกไซด์ร้อยละ 1.2-2.0 เพื่อให้ได้ค่าการไหลแผ่ (Slump flow) อยู่ในช่วงระหว่าง 50 – 70 เซนติเมตร พบว่าการนำแก้าหนักแทนที่มวลรวมละเอียดคงที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก แก้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 15-35 โดยน้ำหนัก คอนกรีตมีกำลังอัดถึง 40-32 เมกะปาสคาล ที่อายุ 90 วัน [75] ในทางกลับกันเมื่อกำหนดปริมาณแก้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คงที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก แก้าหนักแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก กำหนดปริมาณวัสดุผงรวมในส่วนผสมคอนกรีตเท่ากับ 550 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงคงที่เท่ากับ 0.31 และสารลดน้ำพิเศษประเภทเนพธาซีนร้อยละ 5.8-8.0 โดยกำหนดค่าการไหลแผ่ (Slump flow) ของคอนกรีตควบคุมเท่ากับ 70 เซนติเมตร พบว่า

อัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนักร้อยละ 10 คอนกรีตมีกำลังอัดสูงถึง 80 เมกะปาสคาลที่อายุ 56 วัน [76]

ผลกระทบของการใช้เถ้าลอยต่อสมบัติด้านความทนทานของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองพบว่า คอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองผสมเถ้าลอยสามารถทนทานการซึมผ่านของคลอไรด์ และการกัดกร่อนเนื่องจากกรดไฮโดรคลอริกได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อปริมาณของเถ้าลอยเพิ่มขึ้น [77-79] ในทางตรงกันข้ามการเกิดคาร์บอนชั่นกลับสูงขึ้นเมื่อการแทนที่เถ้าลอยเพิ่มขึ้น รวมถึงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่ออายุของคอนกรีตเพิ่มขึ้นด้วย Siddique [74] พบว่าคอนกรีตชนิดไหลทำการอัดแน่นได้ด้วยตัวเองแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก กำหนดปริมาณวัสดุผงรวมในส่วนผสมคอนกรีตเท่ากับ 550 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.41 และสารลดน้ำพิเศษประเภทโพลีคาร์บอกซิลิกอีเทอร์ร้อยละ 2.0 พบว่าความลึกคาร์บอนชั่นเพิ่มขึ้นสูงสุดจาก 1.67 เป็น 1.85 มิลลิเมตร ที่อายุ 90 และ 365 วันตามลำดับ และการเกิดคาร์บอนชั่นจะหยุดลงเมื่อค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของคอนกรีตมากกว่า 11 ในขณะที่เมื่อพิจารณาการใช้งานในประเทศที่มีสภาวะภูมิอากาศหนาวเย็น การใช้เถ้าลอยในคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองช่วยปรับปรุงสมบัติทนทานการกัดกร่อนจากสารเคมีที่ใช้ในการละลายหิมะ (Deicing Chemicals) ตามมาตรฐาน ASTM C672 [80] รวมถึงทนต่อสภาวะการแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกันไป (Freezing and Thawing) ได้ด้วย [77]

ผลของสภาวะความร้อนที่เพิ่มขึ้นต่อสมบัติของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองที่อายุ 91 วัน เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่อัตราส่วนร้อยละ 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตเท่ากับ 500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงในช่วง 0.38-0.42 และสารลดน้ำพิเศษประเภทโพลีคาร์บอกซิลิกอีเทอร์ร้อยละ 1.72-2.0 ระดับการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นที่ 1 องศาเซลเซียสต่อหน้าที่จนกระทั่งถึงระดับอุณหภูมิ 100, 200 และ 300 องศาเซลเซียส จากนั้นให้ความร้อนคงที่ต่อไปอีก 1 ชั่วโมง พบ

ว่าสมบัติของคอนกรีตด้านกำลังอัด แรงดึงผ่าซีก และโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นตามอายุคอนกรีต และลดลงเมื่ออัตราส่วนการแทนที่เถ้าลอยเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อกำลังอัด จะเห็นได้ว่ากำลังอัดลดลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 200 องศาเซลเซียส เนื่องจากการสูญเสียไอน้ำภายในทำให้มีปริมาตรโพรงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากนั้นในช่วงอุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียส คอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำที่ออกมาจากโพรงทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันซ้ำอีกครั้ง (Rehydration) ทั้งนี้ปริมาตรโพรงเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการแทนที่และอุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้นส่งผลให้การซึมผ่านได้ของน้ำเพิ่มขึ้นตามไปด้วย [78-79] ในขณะที่เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นในช่วง 200, 400, 600 และ 800 องศาเซลเซียส ลดปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยเหลือที่ร้อยละ 15, 25 และ 35 ปริมาณวัสดุผงรวมในส่วนผสมคอนกรีตเท่ากับ 550 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงคงที่เท่ากับ 0.33 และสารลดน้ำพิเศษประเภทโพลีคาร์บอกซิลิตรี้อยละ 1.60 โดยระยะเวลาการให้ความร้อนคงที่นานถึง 3 ชั่วโมง พบว่าสมบัติของคอนกรีตที่อายุ 56 วัน มีกำลังอัดลดลง และการสูญเสียไอน้ำหนักจากการเผาเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่เถ้าลอยและระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่วนผลของอุณหภูมิต่อรอยแตกร้าวที่ผิวคอนกรีตในช่วงอุณหภูมิ 200-400 องศาเซลเซียส ไม่พบรอยแตกร้าวที่ผิวคอนกรีต ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเริ่มมีรอยแตกร้าวขนาดเส้นผม (Hairline Cracks) และรอยแตกร้าวยังคงมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึง 800 องศาเซลเซียส [81]

ในปัจจุบันแนวโน้มการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้เถ้าลอยในปริมาณที่สูงขึ้นในการผลิตคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากสามารถลดการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ลงได้อย่างมีนัยสำคัญ ผลของการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสัดส่วนที่สูงช่วยให้ความสามารถในการเชื่อมประสานระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวมในระหว่างการไหลเข้าแบบเป็นไปได้อย่างสม่ำเสมอ [82] นอกจากนั้นผลจากการแทนที่ในสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.35, 0.40 และ 0.45 ตามลำดับ และสารลดน้ำพิเศษประเภทซิลิโพนเตดเนพทาลีนฟอรั

มัลดีไฮด์ 0-3.8 ลิตรต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 5-10 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น 3-4 ชั่วโมง ในขณะที่กำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นโดยอัตราส่วนที่เหมาะสมเมื่อพิจารณาทั้งด้านสมบัติและราคาของคอนกรีตการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์สัดส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง 0.45 ให้กำลังอัดมากกว่า 33 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน [83] โดยผลการวิจัยของ Naik และคณะ [84] พบว่าเมื่อทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยที่ร้อยละ 55, 45 และ 35 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.31, 0.33 และ 0.35 สารลดน้ำพิเศษประเภทโพลีคาร์บอกซีเลต 3-8.1 ลิตรต่อลูกบาศก์เมตรและสารเพิ่มความเหนียว 1.8-3.7 ลิตรต่อลูกบาศก์เมตร คอนกรีตมีกำลังอัดสูงถึง 48, 60 และ 62 เมกะปาสคาลตามลำดับที่อายุ 28 วัน ที่สำคัญยังลดการใช้ลดสารลดน้ำพิเศษและสารเพิ่มความเหนียวได้ ส่งผลให้ราคาคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ นอกจากนี้การแทนที่ในปริมาณที่สูงขึ้นยังช่วยลดความต้องการน้ำ และเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ให้สูงขึ้น การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) และการดูดซึมน้ำลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม ทั้งนี้การดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่เถ้าลอยเพิ่มสูงขึ้น และมีแนวโน้มลดลงเมื่อคอนกรีตมีการพัฒนาตามช่วงอายุที่เพิ่มขึ้น การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยสูงถึงร้อยละ 80 ที่อายุ 56 วัน พบว่ามีอัตราการดูดซึมน้อยกว่าร้อยละ 2 [85-86] Liu และคณะ [87] ทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยสัดส่วนสูงสุดถึงร้อยละ 100 เพื่อคงความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตให้ได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน 65-80 เซนติเมตร อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงต้องเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราการแทนที่ที่เพิ่มสูงขึ้นในขณะที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำพิเศษลดลง ซึ่งผลจากปริมาณน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีการแยกตัวสูงขึ้นทำให้ความสามารถในการไหลผ่านลดลง หากพิจารณาความสามารถในการพัฒนากำลังอัด และความทนทานของคอนกรีตที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานไม่ควรแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยมากกว่าร้อยละ 40 เนื่องจากผลของกำลังอัด

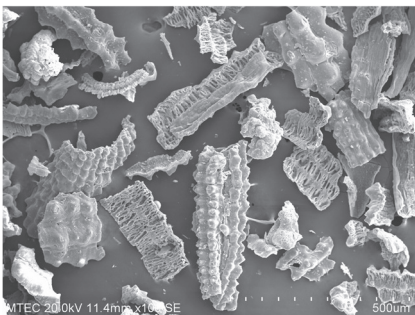
และความทนทานของคอนกรีตที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ เมื่อพิจารณาสมบัติของคอนกรีตที่อายุ 90 วัน กำลังอัดยังคงพัฒนาอย่างต่อเนื่องแม้การแทนที่สูงถึงร้อยละ 85 ปริมาณวัสดุผงรวมในส่วนผสมคอนกรีตเท่ากับ 550 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.41 และสารลดน้ำพิเศษประเภทซิลิโพนเตตแนพทาลีนฟอร์มัลดีไฮด์ร้อยละ 2.0 ให้กำลังอัดสูงถึง 27.74 เมกะปาสคาล และผลจากปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยเพิ่มสูงขึ้นทำให้โพรงมีปริมาตรสูงขึ้น คอนกรีตมีการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) และการซึมผ่านได้ของน้ำ (Water Permeability) เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่การซึมผ่านจากคลอไรด์และการกัดกร่อนเนื่องจากกรดไฮโดรคลอริกกลับลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อการแทนที่เถ้าลอยเพิ่มขึ้น และจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงส่งผลให้กระบวนการกัดกร่อนซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกรดกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ลดลงตามไปด้วย [88-89]

5.2 เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash)

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมซึ่งมีอัตราการใช้ที่ดินเพื่อการเกษตรทั้งประเทศในระดับสูง โดยเฉพาะการทำนาเนื่องจากข้าวเป็นพืชที่คนไทยบริโภคมาอย่างยาวนาน ในปัจจุบันประเทศไทยถือได้ว่าเป็นประเทศที่ส่งออกข้าวเป็นอันดับต้นๆ ของโลก ในปี พ.ศ. 2554 ประมาณการผลิตข้าวเปลือกที่ผลิตได้ในประเทศไทยถึง 31.6 ล้านตัน [90] แกลบเป็นผลพลอยได้จากการแปรรูปข้าวเปลือกให้เป็นข้าวสาร โดยแกลบที่ได้จากการกระบวนการสีข้าวประมาณร้อยละ 20 ของปริมาณข้าวเปลือก โดยในแต่ละปีมีปริมาณแกลบเป็นจำนวนมากซึ่งส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้าชีวมวล จากการเผาแกลบจะได้เถ้าแกลบออกมาในปริมาณร้อยละ 20-25 โดยน้ำหนัก หรือคิดเป็นปริมาณมากกว่า 1.26 ล้านตัน ซึ่งถือว่าปริมาณเพียงพอสำหรับใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์

สำหรับสมบัติทางด้านซีเมนต์ของเถ้าแกลบที่ได้จากการเผาขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการเผา ระยะเวลาในการเผา อุณหภูมิในการเผา และกระบวนการบดซึ่งมีผลต่อโครงสร้างภายในของเถ้าแกลบโดยความสามารถในการ

ทำปฏิกิริยาของเถ้าแกลบร่วมกับปูนซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับปริมาณของซิลิกา สถานะความเป็นผลึกของซิลิกา ขนาดและพื้นที่ผิวของอนุภาคเถ้าแกลบ [91] จากการศึกษาของ Mehta [92] พบว่าการเผาเถ้าแกลบในช่วงอุณหภูมิ 500-680 องศาเซลเซียส เถ้าแกลบมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยารวมถึงมีปริมาณซิลิกาเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าร้อยละ 90 ทั้งนี้หากเผาเถ้าแกลบที่อุณหภูมิสูงขึ้นถึง 700 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง ปริมาณซิลิกาที่ได้จะเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 95 [93] หรือหากการเผาที่อุณหภูมิต่ำลงที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลานานขึ้นถึง 12 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เถ้าแกลบเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว พบว่าเถ้าแกลบที่ได้มีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาเช่นกัน [94] เมื่อพิจารณาโครงสร้างสถานะของเถ้าแกลบจากช่วงอุณหภูมิของการเผาพบว่าในช่วงอุณหภูมิ 500-600 องศาเซลเซียส แกลบยังคงสถานะเป็นซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous Silica) ในช่วงอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พบว่ามีความเป็นผลึกมากขึ้นอยู่ในสถานะของคริสโตบาไลต์ (Cristobalite) และหากอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นถึง 1150 องศาเซลเซียส จะพบทั้งสถานะของคริสโตบาไลต์ (Cristobalite) และทริไดไมท์ (Tridymite) [95] โดยโครงสร้างภายในมีลักษณะเชื่อมโยงเป็นเส้นใย มีความพรุนสูง [51] มีรูปร่างไม่แน่นอน และพื้นที่ผิวถูกกักร่อนเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 7 ทั้งนี้หากเผาเถ้าแกลบที่อุณหภูมิมากกว่า 600 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคจะเล็กลง ส่วนสีของเถ้าแกลบเปลี่ยนไปตามช่วงอุณหภูมิในการเผา พบว่าช่วงอุณหภูมิ 350-500 องศาเซลเซียส เถ้าแกลบจะมีสีขาว ช่วงอุณหภูมิ 600-800 องศาเซลเซียส



รูปที่ 7 ภาพถ่ายขยายอนุภาคเถ้าแกลบที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ผู้เขียน)

เถ้าจะมีสีเทา หากอุณหภูมิมากกว่า 800 องศาเซลเซียส เฝานานกว่า 5 ชั่วโมง เถ้าที่ได้จะมีสีชมพู [96]

โดยปกติขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบส่วนใหญ่มีขนาดอยู่ในช่วง 4-75 ไมโครเมตร [97] ทั้งนี้ผลของความละเอียดของอนุภาคเถ้าแกลบมีความสำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและการพัฒนากำลังของคอนกรีตด้วยเช่นกัน เถ้าแกลบที่มีขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้นส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ลดลง [98] ในทางกลับกันขนาดอนุภาคที่เล็กลงช่วยเติมแทรกช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตทำให้มีกำลังอัดสูงที่เพิ่มขึ้น [99-100] ในปัจจุบันเทคนิคที่สำคัญของการเพิ่มความละเอียดของเถ้าแกลบคือ การบดเถ้าแกลบให้มีขนาดอนุภาคที่เหมาะสม นอกจากส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกแล้วยังช่วยลดผลความต้องการน้ำที่เกิดจากปริมาณคาร์บอนที่คงค้างในเถ้าแกลบซึ่งมีอยู่ในปริมาณสูง [101-102] รวมถึงช่วยเพิ่มความเป็นเนื้อเดียวกันของเถ้าแกลบอีกด้วย [103] นอกจากนั้นงานวิจัยของ Makul และคณะ [104] ได้นำเสนอวิธีการใช้พลังงานไมโครเวฟในช่วงอุณหภูมิ 800-1200 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลาสั้นๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติของเถ้าแกลบให้มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 30

สำหรับองค์ประกอบเคมีของเถ้าแกลบจะมีซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลักโดยทั่วไปมากกว่าร้อยละ 80 องค์ประกอบที่เหลือ ได้แก่ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ไอรอนไดรอกไซด์ (Fe_2O_3) แมงกานีสออกไซด์ (MnO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ซัลเฟอร์ไดรอกไซด์ (SO_3) ฟอสฟอรัสเพนตะ ออกไซด์ (P_2O_5) และร้อยละการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาไหม้ (LOI) ปริมาณองค์ประกอบเคมีของเถ้าแกลบจะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิและระยะเวลาในการเผาทั้งนี้ความแตกต่างที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยไม่มีนัยสำคัญ [105] และพบว่าปริมาณซิลิกาสูงขึ้นตามอุณหภูมิในการเผา [106] ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของสภาพภูมิประเทศในแต่ละท้องถิ่นส่งผลต่อองค์ประกอบเคมีของดิน ชนิดของพันธุ์ข้าว รวมถึงปุ๋ยที่ใช้ [107] ซึ่งในระหว่างที่ข้าวเจริญ

ตารางที่ 8 องค์ประกอบเคมีของเถ้าแกลบจากสถานที่ต่างๆ

องค์ประกอบเคมี (ร้อยละ)	ประเทศไทย [108]	อินเดีย [109]	บราซิล [102]	อเมริกา [110]	เซเนกัล [111]
SiO ₂	92.5	87.32	82.6	88.0	79.2
Al ₂ O ₃	1.2	0.22	0.4	-	1.6
Fe ₂ O ₃	2.1	0.28	0.5	0.1	2.6
CaO	0.9	0.48	0.8	0.8	6
MgO	0.4	0.28	0.7	0.2	-
SO ₃	0.1	-	-	-	-
LOI	0.9	2.1	11.9	8.1	0.5
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	95.8	87.82	83.5	88.1	83.4

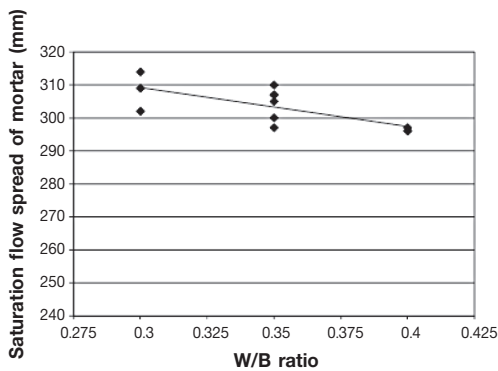
เติบโตมีการดูดซึมซิลิกาจากดินและสะสมไว้ในโครงสร้างทำให้เถ้าแกลบซึ่งมาจากสถานที่แตกต่างกันย่อมมีองค์ประกอบเคมีที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 8

การใช้เถ้าแกลบในงานคอนกรีต พบว่าที่ส่วนผสมเดียวกันคอนกรีตผสมเถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูง (ขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่ำกว่าปูนซีเมนต์) มีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันสูงกว่าคอนกรีตควบคุม ในขณะที่หน่วยน้ำหนักในสภาพสด ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น และอุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม และความละเอียดที่เพิ่มขึ้นของเถ้าแกลบยังส่งผลให้ความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตเพิ่มขึ้นด้วย [112] ส่วนความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบพบว่ามีการหดตัวแบบแห้งและความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันสูงกว่าคอนกรีตปกติ ทั้งนี้ความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันจะแปรค่าตามกับอัตราส่วนผลรวมของซิลิคอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และไอรอนออกไซด์ต่อแคลเซียมออกไซด์ (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃)/CaO ส่วนการหดตัวแบบออโตจีเนียสและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากสารละลายกรดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบจะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม [113] ส่วนความทนทานต่อสารละลายซัลเฟต ได้แก่ โซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄) และแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบว่ามอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบมีค่าการขยายตัวเนื่องจากการบ่มในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมากกว่าการบ่มในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ในขณะที่มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบมีค่าอัตราการสูญเสียกำลังอัดเพิ่มขึ้นจากการ

บ่มในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมากกว่าการบ่มในสารละลายโซเดียมซัลเฟต [114] นอกจากนี้อุณหภูมิในการบ่มยังมีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์เฟสในช่วงต้น (3 วัน) ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 20 อุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มเท่ากับ 25, 50 และ 75 องศาเซลเซียส การพัฒนากำลังอัดมีค่าสูงกว่าซีเมนต์เฟสที่ควบคุม ในขณะที่กำลังรับแรงอัดในช่วงปลาย (90 วัน) ของอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มที่ 75 องศาเซลเซียส มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มที่ 25 องศาเซลเซียส [115]

สำหรับการนำเถ้าแกลบมาใช้ในการงานคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองมีความเป็นไปได้ในการใช้เถ้าแกลบมาทดแทนการใช้สารเพิ่มความหนืดด้วยการผสมเพิ่มในคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง โดยหากต้องปรับอัตราส่วนผสมให้เหมาะสมเนื่องจากการใช้ปริมาณเถ้าแกลบที่สูงขึ้น ความต้องการปริมาณสารลดน้ำพิเศษต้องเพิ่มมากขึ้นด้วยเพื่อรักษาความสามารถในการไหลตัวได้ของคอนกรีต จากการศึกษาเปรียบเทียบราคาของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองที่นำเถ้าแกลบมาทดแทนการใช้สารเพิ่มความหนืดซึ่งมีราคาสูงมากในต่างประเทศ (ปากีสถาน) พบว่าคอนกรีตมีราคาลดลงถึงร้อยละ 42.47 [116-117] เมื่อพิจารณาความสามารถในการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบ โดยกำหนดอัตราส่วนผสมมอร์ตาร์โดยปริมาตร (ทราย ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ เถ้าแกลบ และน้ำ) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.30, 0.35 และ 0.40 และสารลดน้ำพิเศษประเภทโพลีคาร์บอเนต ร้อยละ 0.75-3.0 พบว่า

อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบที่เหมาะสมไม่เกินร้อยละ 15 เนื่องจากผลของพื้นที่ผิวที่สูงของเถ้าแกลบทำการดูดซับน้ำเข้าไปในอนุภาคของเถ้าแกลบทำให้ปริมาณน้ำอิสระของมอร์ตาร์ลดลง ในทางตรงกันข้าม ณ จุดอิ่มตัวของการใช้สารลดน้ำพิเศษ หากเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงในส่วนผสมกลับส่งผลให้ความสามารถในการไหลตัวได้ลดลง เนื่องจากผลของปริมาตรเฟสที่ลดลงจากการเพิ่มขึ้นของปริมาตรน้ำในส่วนผสมที่ไม่สามารถพาปริมาตรมวลรวมที่เพิ่มขึ้นจากสัดส่วนผสมไหลไปด้วยกันอย่างเป็นเนื้อเดียวกันได้ ดังรูปที่ 8 ส่วนปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของการไหลของมอร์ตาร์ แต่หากใช้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษสูงกว่าจุดอิ่มตัวจะส่งผลให้มอร์ตาร์เกิดการเยิ้ม [118]



รูปที่ 8 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) ที่มีต่อการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ [118]

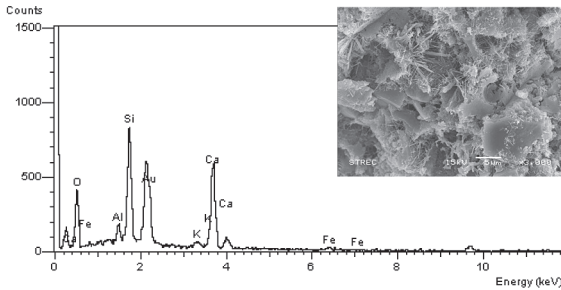
ในลักษณะเช่นเดียวกันเมื่อนำมาใช้ในงานคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.30, 0.35 และ 0.40 สารลดน้ำพิเศษประเภทโพลีคาร์บอกซีเลตร้อยละ 0.60-2.45 พบว่าความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงลดลง และสัดส่วนร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบสูงขึ้น เนื่องจากพิจารณาส่วนผสมโดยปริมาตรของคอนกรีตพบว่าเฟสที่มีปริมาตรที่สูงขึ้น ในขณะที่มวลรวมในส่วนผสมคอนกรีตมีปริมาตรลดลง อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่เหมาะสมอยู่ในช่วงร้อยละ 10-15 เนื่องจากคอนกรีตมีความสามารถในการเติมแทรกการไหลผ่าน และการต้านทานการแยกตัวที่ดี [119] หากพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่สัมพันธ์กับการไหลตัว

ของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้านำมาทำการบดจนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 24.32 ไมโครเมตร เมื่อกำหนดความสามารถในการไหลตัวได้ที่ระยะ 50 และ 60 เซนติเมตร เพื่อหาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง หรือกรณีกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเพื่อหาสมบัติของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองที่สัดส่วนการแทนที่ต่างกัน พบว่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตลดลงในขณะที่ความต้องการน้ำเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบสูงขึ้น [120-121] นอกจากนี้คอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองผสมเถ้าแกลบยังสามารถนำมาใช้งานในประเทศที่มีสภาวะอากาศหนาวเย็นและมีหิมะได้อีกด้วย เนื่องจากในสภาวะอากาศหนาวเย็นและมีหิมะโครงสร้างของคอนกรีตต้องมีโพรงอากาศ (Air-void) ที่เหมาะสมเพื่อช่วยต้านทานการแข็งตัวของน้ำในโพรงคอนกรีต และโครงข่ายของโพรงอากาศยังช่วยลดแรงดันที่เกิดจากน้ำที่แข็งตัวเพื่อทำให้โครงสร้างมีความทนทานมากขึ้นซึ่งการใช้เถ้าแกลบในงานคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองพบว่าไม่ส่งผลกระทบต่อการคงตัวของโพรงอากาศ (Air-void Stability) ในสภาวะคอนกรีตสดปริมาณโพรงอากาศลดลงสูงสุดเพียงร้อยละ 5 ทั้งนี้ผลของการใช้เถ้าแกลบทำให้ความต้องการปริมาณสารลดน้ำพิเศษและสารกักกระจายฟองอากาศสูงขึ้น โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการคงตัวของโพรงอากาศโดยรวม [122]

เมื่อพิจารณาสมบัติของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองในสภาวะที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว จากผลการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าแกลบซึ่งพัฒนาได้ช้าในช่วงต้นทำให้คอนกรีตซึ่งยังคงทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องแม้คอนกรีตมีอายุถึง 180 วัน พบว่าอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบที่เหมาะสมคือ สัดส่วนร้อยละ 20 คอนกรีตมีกำลังอัดและกำลังคดเพิ่มสูงขึ้นในขณะที่โมดูลัสความยืดหยุ่นต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม [123] สอดคล้องกับ Gritsada และคณะ [120-121] พบว่าอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบที่เหมาะสมร้อยละ 20 มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงหรือสูงกว่าคอนกรีตควบคุม ในขณะที่การแทนที่ในปริมาณที่สูงมากถึงร้อยละ 40 ปริมาณวัสดุผงรวมในส่วนผสมคอนกรีตเท่ากับ 525 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อ

วัสดุผงเท่ากับ 0.32 และสารลดน้ำพิเศษประเภทโพลีคาร์บอกซีเลตร้อยละ 2.0 พบว่ากำลังอัดสูงถึง 40 เมกะปาสคาลที่อายุ 28 วัน เนื่องจากการเติมแทรกของอนุภาคและผลของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิคทำให้โครงสร้างภายในแน่นตัวมากขึ้น ดังรูปที่ 9

ทั้งนี้จากผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ลดลงและปริมาณเถ้าแกลบที่สูงขึ้นมีผลต่อสมบัติของคอนกรีต



รูปที่ 9 สเปกตรัมของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบเท่ากับร้อยละ 40 [124]

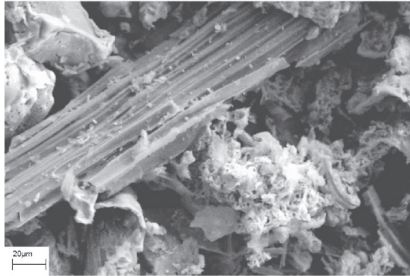
ในสภาวะแข็งตัวที่สูงขึ้นด้วย เนื่องจากการเติมแทรกของขนาดอนุภาคที่เล็กแทรกกระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ รวมถึงผลของปฏิกิริยาปอซโซลานิคของเถ้าแกลบทำให้คอนกรีตมีความพรุน (Porosity) ลดลงส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัด ความเหนียว และความทึบน้ำเพิ่มสูงขึ้น การผสมร่วมกับวัสดุประสานอื่นช่วยเพิ่มสมบัติของของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองให้สูงขึ้น [125] การนำคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองผสมเถ้าแกลบ ผสมรวมกับวัสดุประสานอื่น ได้แก่ เถ้าลอยหรือฝุ่นหินปูน เนื่องจากข้อดีของเถ้าลอย และฝุ่นหินปูนในการช่วยปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตสดเพิ่มความสามารถในการเติมแทรกและการไหลผ่านที่ดี ส่วนคอนกรีตผสมเถ้าแกลบช่วยเพิ่มความเหนียวไม่ให้เกิดการแยกตัว ดังนั้นเมื่อนำมาผสมรวมกันส่งผลให้ความสามารถในการทำงานได้เพิ่มขึ้น แต่หากเพิ่มสัดส่วนเถ้าแกลบในส่วนผสมมากขึ้นย่อมส่งผลต่อกำลังอัดที่ลดลงเนื่องจากความ

ต้องการน้ำในส่วนผสมมากขึ้นเพื่อคงระดับความสามารถในการไหลแผ่ โดยสัดส่วนผสมคอนกรีตปริมาณวัสดุผงรวม 475 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สารลดน้ำพิเศษประเภทโพลีคาร์บอกซีเลต 5.60-11.25 ลิตรต่อลูกบาศก์เมตร ทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบและเถ้าลอยที่สัดส่วนร้อยละ 70-15-15 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.51 ให้กำลังอัดสูงสุด 43.4 เมกะปาสคาล ที่อายุ 90 วัน ในขณะที่การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบและผงฝุ่นหินที่สัดส่วนร้อยละ 70-15-15 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.54 ให้กำลังอัดสูงสุด 6.2 เมกะปาสคาล ที่อายุ 90 วัน [126-127]

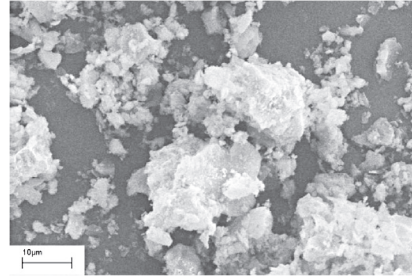
5.3 เถ้าชานอ้อย (Bagasse Ash)

เถ้าชานอ้อยเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล โดยการนำชานอ้อยมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตน้ำตาลของโรงงาน โดยทั่วไปเถ้าชานอ้อยที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตถูกนำไปทิ้งโดยการถมที่หรือเพื่อการปรับสภาพดินทางการเกษตรกรรม หากทำการเปรียบเทียบปริมาณที่ผลิตกับสัดส่วนในการนำไปใช้ประโยชน์ยังถือได้ว่ามีน้อยมากส่งผลต่อปัญหาแวดล้อมโดยตรงเนื่องจากปริมาณการผลิตเถ้าชานอ้อยยังคงเพิ่มสูงขึ้นทุกปี แต่ในปัจจุบันได้มีทางเลือกในการนำเถ้าดังกล่าวกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ เนื่องจากการนำเถ้าชานอ้อยที่ได้จากกระบวนการเผาเฉพาะส่วนที่มีขนาดเล็กและลอยฟุ้งขึ้นด้านบนมาใช้เป็นทางเลือกสำหรับวัสดุประสานในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้ [128] โดยการใช้เถ้าชานอ้อยเป็นแร่ผสมเพิ่มในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 สามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศได้ถึง 519.3 กิโลตันต่อปี [129]

จากรูปที่ 10(ก) เถ้าชานอ้อยมีลักษณะคล้ายท่อหรือหลอดขนาดใหญ่ เหลี่ยมมุม ไม่แน่นอนและมีความ



(ก) ก่อนบด



(ข) หลังบด

รูปที่ 10 ภาพถ่ายขยายอนุภาคเก้าชานอ้อย [130]

พูนสูง หากทำการบดเพื่อให้ขนาดอนุภาคเล็กลงจะได้ อนุภาคที่มีลักษณะเหลี่ยมมุมและความพูนลดลงดังแสดง ในรูปที่ 10(ข) [130] โดยความละเอียดของเก้าชานอ้อย มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก [131-132] ผลการศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพของเก้าชานอ้อยโดย Cordeiro และคณะ [133] พบว่าการเผาเก้าชานอ้อยที่ ระดับอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง ซิลิกา อยู่ในสถานะอสัณฐาน ปริมาณคาร์บอนต่ำ และพื้นที่ผิว จำเพาะสูง มีความไวในการทำปฏิกิริยาสูงสุด สำหรับ องค์ประกอบเคมีเก้าชานอ้อยมีซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลักทั้งนี้ปริมาณของซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) แปรผกผันตามค่าร้อยละการสูญเสียระหว่างการ

เผาไหม้ (LOI) กล่าวคือมีปริมาณซิลิกาสูงขึ้นเมื่อค่าร้อยละ การสูญเสียระหว่างการเผาไหม้ลดลงดังแสดงในตารางที่ 9 นอกจากนี้ผลของร้อยละการสูญเสียจากการเผาไหม้ต่อ สมบัติของคอนกรีต พบว่าเก้าชานอ้อยที่มีค่าการสูญเสีย จากการเผาไหม้น้อยกว่าร้อยละ 10 มีความสามารถในการ ทำปฏิกิริยาที่ดี สามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในงาน คอนกรีตได้ ในขณะที่การนำเก้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนมากกว่าร้อยละ 20 มีผลทำให้ความสามารถ ในการทนทานการกัดกร่อนจากซัลเฟตลดลง [130]

เก้าชานอ้อยมีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน เมื่อนำ มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในซีเมนต์เพสต์ร้อยละ

ตารางที่ 9 องค์ประกอบเคมีของเก้าชานอ้อย [130]

องค์ประกอบเคมี	เก้าชานอ้อย (ร้อยละ)	เก้าชานอ้อยบด (ร้อยละ)			
		L05	L10	L15	L20
SiO_2	54.10	77.37	70.64	60.67	54.45
Al_2O_3	5.69	3.59	3.68	4.30	6.06
Fe_2O_3	3.54	4.66	4.06	4.02	3.23
CaO	15.37	7.81	10.68	15.85	15.41
MgO	1.41	1.32	1.41	1.46	1.37
SO_3	0.03	0.15	0.15	0.09	0.04
LOI	19.36	5.08	9.29	13.59	19.39
$\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$	63.33	85.62	78.38	68.99	63.74

10 ให้กำลังอัดที่สูง และสามารถทนทานการกัดกร่อน ทางเคมีได้สูงกว่าคอนกรีตควบคุม [134] ทั้งนี้ต้องทำการ ปรับปรุงลักษณะทางกายภาพ เช่น การบด เนื่องจาก

ขนาดอนุภาคและความละเอียดของเก้าชานอ้อย ทำให้มี การอัดแน่นระหว่างอนุภาคในส่วนผสมมากขึ้น ส่งผลให้ มีกำลังอัดสูงขึ้นและการทำปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นได้

อย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้น [131] นอกจากนี้ความละเอียดของเก้าชานอ้อยช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ในสภาวะคอนกรีตสดและเพิ่มความทนทานการกัดกร่อนจากคลอไรด์ [132] ส่วนระยะการก่อตัวที่เพิ่มขึ้น และความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงเมื่ออัตราการแทนที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเก้าชานอ้อยร้อยละ 20 เมื่อกำหนดปริมาณวัสดุผงรวม 350 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.50 สารลดน้ำพิเศษ 5.25 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ผลที่ได้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นที่ดี คอนกรีตมีกำลังอัดสูงถึง 40.5 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน การซึมผ่านได้ของน้ำลดลง และมีความทนทานการซึมผ่านของคลอไรด์ไม่ให้เข้าไปทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมกำลังในโครงสร้างส่งผลต่อความทนทานของคอนกรีต [135-136] และเก้าชานอ้อยที่มีความละเอียดสูงสามารถนำมาใช้ในการผลิตคอนกรีตกำลังอัดสูงได้อีกด้วย จากการนำเก้าชานอ้อยมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, และ 30 เมื่อกำหนดปริมาณวัสดุผงรวม 560 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.30 สารลดน้ำพิเศษ 19.50 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเก้าชานอ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 30 มีค่ากำลังอัดมากกว่า 65 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน และสมบัติความทนทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้สูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มขึ้น [137]

นอกจากนี้การผสมเก้าชานอ้อยและเถ้าลอยในลักษณะบดรวมอัตราส่วน 60:40 โดยน้ำหนัก ความละเอียดของวัสดุข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 1 เมื่อกำหนดปริมาณวัสดุผงรวมและน้ำเท่ากับ 320 และ 200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ พบว่าสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตได้ถึงร้อยละ 30 โดยยังมีสมบัติทางกายภาพและเชิงกลที่อายุ 28 วัน เทียบเท่ากับคอนกรีตควบคุมที่ทำจากปูนซีเมนต์ล้วน [138] หรือนำเก้าชานอ้อยบดละเอียดมาประยุกต์ร่วมกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า (Recycled Aggregate Concrete) ในอัตราร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนัก เมื่อกำหนดปริมาณวัสดุ

ผงรวม 350 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.55 พบว่าอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนที่ดีที่สุดคือร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังอัดในระยะยาว (มากกว่า 90 วัน) ความทึบหน้า และความต้านทานการกัดกร่อนของคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เก้าชานอ้อยบดละเอียด [139] และจากข้อจำกัดของการใช้ในงานคอนกรีตซึ่งต้องนำเก้าชานอ้อยมาทำการบดให้มีขนาดอนุภาคที่เล็กลง ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการนำเก้าชานอ้อยที่ไม่ทำการบดมาใช้แทนที่ทรายในงานคอนกรีตสัดส่วนร้อยละ 50 ใช้งานร่วมกับปูนซีเมนต์ประเภท Slag-Modified Portland Cement อัตราส่วนคงที่เท่ากับ 425 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.54 พบว่าคอนกรีตมีกำลังอัดสูงถึง 28.72 เมกะปาสคาลที่อายุ 28 วัน [140] นอกจากนี้การใช้เก้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 15-20 สัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 สามารถใช้ยึดตรึงสารโครเมียมที่เข้มข้นร้อยละ 5 ($5\%K_2CrO$) มีพิษได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งยังช่วยลดระยะการก่อตัวและเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแสดงให้เห็นถึงการก่อตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) จากปฏิกิริยาปอซโซลานของเก้าชานอ้อยสามารถยึดตรึงไอออนของโครเมียมได้ [141] นอกเหนือจากงานซีเมนต์และคอนกรีตพบว่า ยังสามารถนำเก้าชานอ้อยมาใช้ในงานอิฐบล็อก [142] ซึ่งจะช่วยให้อิฐบล็อกมีความหนาแน่นสูงขึ้นและเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ส่งผลต่อกำลังอัดและการความทนทานการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้น และยังสามารถนำเก้าชานอ้อยมาใช้แทนที่ดินในอัตราส่วนที่เหมาะสมไม่เกินร้อยละ 10 เพื่อเป็นวัสดุเติมในการผลิตอิฐมวล [143]

สำหรับการนำเก้าชานอ้อยมาใช้ในงานคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองพบว่ามีความเป็นไปได้ในการนำเก้าชานอ้อยมาใช้ในงานคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง โดยการนำเก้าชานอ้อยมาผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยกำหนดปริมาณปูนซีเมนต์และน้ำคงที่เท่ากับ 500 และ 225 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับ และสารลดน้ำพิเศษประเภทโมดิไฟเออร์เพธาไลน์พอร์มัลดีไฮด์ซิลิโพนีต ร้อยละ 2.0-4.0 พบว่าความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองเพิ่มขึ้นตามปริมาณ

สารลดน้ำพิเศษที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสามารถในการทำงานได้ลดลงตามปริมาณการใช้เถ้าชานอ้อยที่เพิ่มขึ้น ในสภาวะคอนกรีตที่แข็งตัว คอนกรีตที่นำเถ้าชานอ้อยมาผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 15 มีกำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 39.59 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับราคาของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองผสมเถ้าชานอ้อยพบว่า มีราคาถูกกว่าถึงร้อยละ 35.63 ของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองแบบปกติ [144]

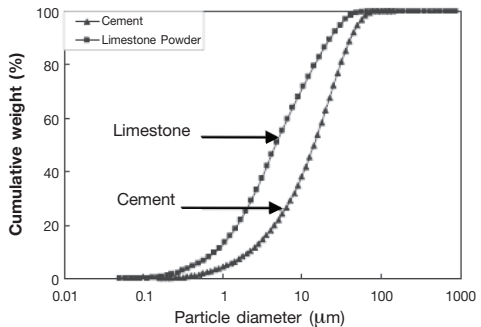
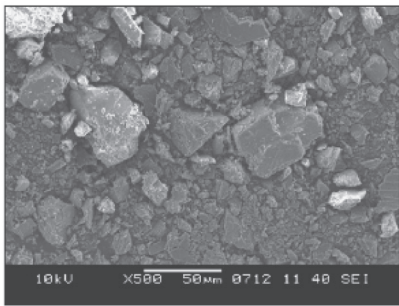
5.4 ผุ่นหินปูน (Limestone Powder)

ผุ่นหินปูนเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการย่อยหินเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ วัตถุประสงค์หลักของการใช้วัสดุดังกล่าวเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์อันเป็นลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์และได้มีความพยายามในการเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ให้มากยิ่งขึ้น ปัจจุบันตามมาตรฐาน ASTM C150 [145] ได้อนุญาตให้ใช้ผุ่นหินปูนผสมร่วมในการผลิตปูนซีเมนต์ผงโดยน้ำหนักได้ไม่เกิน

ร้อยละ 5 ส่วนมาตรฐาน EN 197-1 [146] การผลิต Portland Limestone Cement สามารถใช้ผุ่นหินปูนแทนที่ปูนเม็ด (Clinker) ได้ถึงร้อยละ 6-35 จากการศึกษพบว่าส่วนผสมที่สามารถนำมาใช้งานคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือ ปริมาณของผุ่นหินปูนร้อยละ 15-20 ที่ความละเอียด 4,500-5,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม [147] ผุ่นหินปูนถือว่าเป็นวัสดุเฉื่อย (Inert Material) เนื่องจากไม่สามารถเปลี่ยนรูปแบบขององค์ประกอบเคมีได้ตลอดอายุการใช้งานของคอนกรีต แต่ก็ยอมรับว่ามีส่วนทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เล็กน้อยจากการ พอร์มตัวโมโนคาร์โบอะลูมินเนต ($C_3A \cdot CaCO_3 \cdot 11H_2O$) [148]

คุณลักษณะทางกายภาพของผุ่นหินปูนมีรูปทรงไม่แน่นอน พื้นผิวเรียบ ที่สำคัญขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ซึ่งช่วยทำหน้าที่อัดแน่น (Packing) และช่วยลดช่องว่างขนาดเล็กระหว่างอนุภาคของวัสดุผงทำให้ลดการใช้น้ำในส่วนผสมลง [149-150] ดังรูปที่ 11

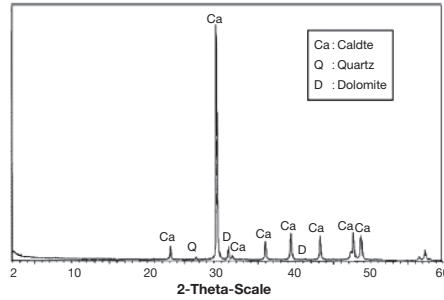
ผุ่นหินปูนอยู่ในรูปโครงสร้างผลึกแคลไซต์ (Calcite) ดังรูปที่ 12 ส่วนองค์ประกอบเคมีส่วนใหญ่ของผุ่นหินปูน



รูปที่ 11 ภาพถ่ายขยายอนุภาคผุ่นหินปูนที่กำลังขยาย 500 เท่า [151] และการกระจายขนาดอนุภาคของผุ่นหินปูนเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 [152]

มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการย่อยหินไม่ได้มาจากกระบวนการเผาทำให้มีการสูญเสียจากการเผาไหม้

(LOI) มีค่าสูงมาก ดังตารางที่ 10
อิทธิพลของผุ่นหินปูนที่มีต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่สำคัญ คือ ขนาดอนุภาคที่ละเอียดของผุ่นหินปูนช่วย



รูปที่ 12 สเปกตรัมของฝุ่นหินปูนที่ได้ทดสอบ
ด้วยเทคนิค X-ray diffraction [153]

ตารางที่ 10 องค์ประกอบเคมีของฝุ่นหินปูน

องค์ประกอบเคมี (ร้อยละ)	Ghrici, M., et al.,[153]	Lee, S.T., et al.,[154]	Georgiadis, et al.,[155]	Weerd, K.D. et al.,[156]	Rizwan, S.A. et al., [157]
SiO ₂	0.55	0.51	1.8	12.9	7.07
Al ₂ O ₃	0.40	0.22	0.45	2.7	2.53
Fe ₂ O ₃	0.17	0.09	0.08	2.0	0.88
CaO	53.47	54.4	54.8	42.3	48.57
MgO	1.02	0.62	0.68	2.8	1.13
SO ₃	1.50	-	0.05	-	0.28
LOI	43.14	43.44	40.5	37.7	38.72

ทำหน้าที่เติมแทรก (Filling Effect) สามารถแทรกและกระจายได้ดีระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตและสามารถช่วยลดปริมาณน้ำที่อยู่ระหว่างช่องว่างของอนุภาคปูนซีเมนต์ลงทำให้มีสัดส่วนของน้ำที่เหมาะสม ทั้งนี้ความสามารถแยกกระจายอนุภาคปูนซีเมนต์ออกจากกันและปริมาณน้ำที่เหมาะสมนี้ส่งผลให้ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำในส่วนผสมได้อย่างทั่วถึงและรวดเร็วยิ่งขึ้นทำให้มีเสถียรภาพเชิงปริมาตรภายในเพิ่มขึ้น ทำให้โพรงลดลงและกำลังอัดเพิ่มขึ้น นอกเหนือจากการทำหน้าที่เติมแทรกแล้วฝุ่นหินปูนยังสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีได้อีกด้วย เนื่องจากสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) ในฝุ่นหินปูนสามารถทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ [156,158] ฝุ่นหินปูนถูกนำมาใช้ในงานคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองมากที่สุด [159] เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถึง

ร้อยละ 30 สารลดน้ำพิเศษประเภทโพลีคาร์บอกซิลิกเอทเธอร์ 9.75 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ปริมาณวัสดุผงและน้ำในส่วนผสมมอร์ตาร์เท่ากับ 650 และ 260 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ พบว่าฝุ่นหินปูนช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ของมอร์ตาร์ชนิดไหลตัวได้อย่างมีนัยสำคัญ [160] ทั้งนี้สมบัติของฝุ่นหินปูนที่มีผลต่อความสามารถในการไหลตัวของคอนกรีตยังขึ้นอยู่กับความละเอียด การกระจายขนาดอนุภาค ธรรมชาติและสิ่งเจือปน ซึ่งได้แก่ ดิน [161] อย่างไรก็ตามชนิดและปริมาณของดินส่งผลกระทบน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลของความละเอียดของอนุภาคฝุ่นหินปูนเอง [155,162] เมื่อกำหนดอัตราส่วนผสมคอนกรีตคงที่เห็นได้ว่าฝุ่นหินปูนที่มีขนาดใหญ่ส่งผลให้ความสามารถในการไหลตัวได้ลดลง การหดตัวเองโดยอัตโนมัติเพิ่มขึ้น การระเหยตัวและการหดตัวในช่วงพลาสติกลดลง ในขณะที่กำลังอัดยังคงสูงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม ทั้งนี้หาก

เพิ่มปริมาณน้ำเพื่อคงความสามารถในการไหลผลที่ได้กลับตรงกันข้าม อาทิเช่น การระเหยตัวและการหดตัวในช่วงพลาสติกเพิ่มขึ้น ส่วนกำลังอัดลดลงเนื่องจากผลของปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น [163] ปัจจัยที่สำคัญของฝุ่นหินปูนนอกจากมีขนาดที่เล็กแล้วยังต้องมีการกระจายระหว่างอนุภาคที่ดี ส่งผลต่อความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปได้ (Deformability) ของซีเมนต์เพสต์อย่างมีนัยสำคัญ Bosiljkov [164] พบว่าการแทนที่ขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า (12.7 ไมโครเมตร) ของฝุ่นหินปูนด้วยขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า (6.3 ไมโครเมตร) ในส่วนผสมคอนกรีตโดยปริมาตรระหว่างปูนซีเมนต์กับฝุ่นหินปูนร้อยละ 50 ปริมาณปูนซีเมนต์อยู่ระหว่าง 380-390 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สารลดน้ำพิเศษประเภทโพลีคาร์บอกซีเลตร้อยละ 0.60 ส่งผลให้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ลดลงจาก 0.48 เหลือ 0.45 (อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงลดลงจาก 0.25 เหลือ 0.24) ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้นจาก 50.3 เป็น 64.9 เมกะปาสคาลที่อายุ 28 วัน เนื่องจากผลของขนาดเฉลี่ยอนุภาคของฝุ่นหินปูนที่มีขนาดเล็กช่วยเข้าไปเติมแทรกระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ทำให้ช่องว่างภายในโครงสร้างคอนกรีตเล็กลง ส่งผลให้ความต้องการน้ำในส่วนผสมคอนกรีตลดลง คอนกรีตแน่นตัวเพิ่มขึ้น และการซึมผ่านได้ของน้ำลดลง [155,165-166] นอกจากนี้ขนาดที่เล็กของฝุ่นหินปูนยังทำหน้าที่เป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้การพัฒนาความร้อนที่เกิดขึ้นภายในคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้น [152,165,167] ที่อัตราส่วนผสมคอนกรีตปริมาณปูนซีเมนต์คงที่ 350 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ผลรวมฝุ่นหินปูน 90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.60 สารลดน้ำพิเศษประเภทโพลีคาร์บอกซีเลต 3.60-5.60 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าการก่อตัวระยะต้นและระยะสุดท้ายเร็วขึ้น ในขณะที่การหดตัวของคอนกรีตในภาพรวมสูงกว่าคอนกรีตปกติถึงร้อยละ 9.2 [165]

นอกจากนี้การใช้ฝุ่นหินปูนที่ความละเอียดต่างกัน 5, 15 และ 25 ไมโครเมตร แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 25,

44 และ 55 ที่อัตราส่วนผสมคอนกรีตปริมาณวัสดุผงรวม 540 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.42, 0.57 และ 0.69 (อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงกำหนดคงที่เท่ากับ 0.31) และสารลดน้ำพิเศษประเภทโพลีคาร์บอกซีเลตร้อยละ 6.48 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อกำหนดระดับการไหลเดียวกัน พบว่าปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นของฝุ่นหินปูนทำให้ความต้องการสารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมลดลงเนื่องจากความละเอียดของอนุภาค [168] ส่งผลให้ราคาคอนกรีตลดลง พิจารณาการใช้งานฝุ่นหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 42 (ปริมาณปูนซีเมนต์ และฝุ่นหินปูน 318 และ 228 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ) สารลดน้ำพิเศษประเภทโพลีคาร์บอกซีเลต 11.80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.58 ให้กำลังอัดถึง 33.7 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน หากปรับสัดส่วนผสมให้ปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น (ปริมาณปูนซีเมนต์ และฝุ่นหินปูน 470 และ 241 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ) สารลดน้ำพิเศษประเภทโพลีคาร์บอกซีเลต 10.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.38 พบว่ากำลังอัดที่ได้สูงมากถึง 47.4 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายต่อหนึ่งหน่วยกำลังอัดที่ลดลงเมื่อแทนที่ฝุ่นหินปูนมากขึ้น พบว่าสามารถลดลงได้ถึง 1.6-6.4 บาทต่อเมกะปาสคาลต่อลูกบาศก์เมตร [151] ทั้งนี้ปัจจัยสำคัญของการใช้ฝุ่นหินปูนในคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง คืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง [149] เนื่องจากหากปริมาณอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง อยู่ในระดับไม่เหมาะสมจะทำให้ฝุ่นหินปูนมีความหนืดเพิ่มขึ้น รวมถึงปริมาณฝุ่นหินปูนที่ใช้ในสัดส่วนมากเกินไปทำให้ความหนืดเพิ่มตามไปด้วยส่งผลต่อความสามารถในการไหลลดลง แสดงในตารางที่ 11

ส่วนกำลังอัดของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองผสมฝุ่นหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 25, 44

ตารางที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงและปริมาณวัสดุผง [149]

อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์	ปริมาณวัสดุผง (ร้อยละ)	คิดเป็นปริมาตรในมอร์ตาร์ (ร้อยละ)
0.35	23	29
0.40	25	35
0.45	23	38

และ 55 ที่อัตราส่วนผสมคอนกรีตปริมาณวัสดุผงรวม 540 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.42, 0.57 และ 0.69 (อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุกำหนดคงที่เท่ากับ 0.31) และสารลดน้ำพิเศษประเภทโมดิไฟด์โพลีคาร์บอกซีลิกเอทอร์ 6.48 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่ากำลังอัดของทุกส่วนผสมสูงกว่าคอนกรีตควบคุมถึงร้อยละ 53-82 ที่อายุ 7 วัน ร้อยละ 29-42 ที่อายุ 28 วัน และร้อยละ 21-39 ที่อายุ 91 วัน [168] เห็นได้ชัดว่าฝุ่นหินปูนเป็นวัสดุเติมแทรกที่มีการใช้ทั่วไปในงานคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองเนื่องจากผลของการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดในช่วงต้นอย่างมีนัยสำคัญ [169] Mňahončáková และคณะ [170] พบว่าคอนกรีตผสมฝุ่นหินปูนที่มีสัดส่วนความละเอียดมากกว่า (ขนาดน้อยกว่า 20 ไมโครเมตรมากกว่าร้อยละ 62.6) อัตราส่วนผสมคอนกรีตปริมาณปูนซีเมนต์ และผงฝุ่นหิน

379 และ 253 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.28 และสารลดน้ำพิเศษร้อยละ 2.4 สามารถพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นได้เร็วกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีสัดส่วนความละเอียดน้อยกว่า (ขนาดน้อยกว่า 20 ไมโครเมตร มากกว่าร้อยละ 31.2) ที่อัตราส่วนผสมคอนกรีตปริมาณปูนซีเมนต์และเถ้าลอยเท่ากับ 394 และ 263 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.24 และสารลดน้ำพิเศษร้อยละ 2.0 แต่หลังจากคอนกรีตอายุ 90 วัน กำลังอัดมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงในตารางที่ 12 ส่วนการนำพาของเหลว (Liquid Water Transport) และการนำพาความร้อน (Heat Transport) ที่เกิดขึ้นในคอนกรีตผสมฝุ่นหินปูนสูงกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอย

ส่วนผลของอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นต่อสมบัติการทนทานความร้อนของฝุ่นหินปูนในคอนกรีตชนิดไหล

ตารางที่ 12 กำลังอัดของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองจากวัสดุต่างชนิด

(เมกะปาสคาล) [170]

ชนิดของวัสดุในส่วนผสมคอนกรีต	อายุคอนกรีต (วัน)				
	1	3	7	28	90
ฝุ่นหินปูน	13.2	36.6	44.4	54.2	63.8
เถ้าลอย	8.1	21.3	33.4	43.2	63.0

อัดแน่นได้ด้วยตัวเอง เมื่อทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนผสมคอนกรีตปริมาณวัสดุผงรวมเท่ากับ 550 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงคงที่เท่ากับ 0.33 สารลดน้ำพิเศษประเภทโพลีคาร์บอกซีเลตร้อยละ 1.60 เก็บไว้จนกระทั่งคอนกรีตมีอายุ 56 วัน (บ่มในน้ำ 28 วัน จากนั้นยกขึ้นมาเก็บไว้ในสภาวะปกติอีก 28 วัน) ทำการเผาที่อุณหภูมิเท่ากับ 200, 400, 600 และ 800 พบว่าคอนกรีตผสมฝุ่นหินปูนสูญเสียน้ำหนักจากการเผาเพิ่มขึ้น

กำลังอัดลดลง และรอยแตกกว้างที่ผิวเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนการแทนที่และอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้ในช่วงอุณหภูมิ 200-400 องศาเซลเซียสไม่พบรอยแตกกว้าง ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เริ่มมีรอยแตกกว้างขนาดเส้นผม (Hairline Cracks) และรอยแตกกว้างเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเผาจนสูงถึง 800 องศาเซลเซียส [171]

6. สรุป

การประยุกต์ใช้ผลผลิตพลอยได้ซึ่งได้แก่ เถ้าลอย

เก้าแกลบ เถ้าขานอ้อย และฝุ่นหินปูน ที่มีปริมาณสูงมากในแต่ละปี ถือได้ว่ามีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัสดุร่วมที่สำคัญในการผลิตคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง เนื่องจากความต้องการปริมาณวัสดุผงที่สูง และการใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีราคาที่สูงมากเมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ ข้อจำกัดเหล่านี้สามารถแทนที่ได้ด้วยการนำข้อดีของผลผลิตพลอยได้มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง หรือการผสมรวมของผลผลิตพลอยได้หลายชนิดเป็นการนำข้อดีของวัสดุประเภทหนึ่งมาหักล้างกับข้อด้อยของวัสดุอีกประเภทหนึ่ง ถือได้ว่าเป็นแนวทางการนำผลผลิตพลอยได้มาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพส่งผลในการปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น ลดการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ให้น้อยลง คอนกรีตมีราคาถูกลง และส่งผลต่อภาพลักษณ์ของประเทศในการให้ความใส่ใจต่อการผลิตของภาคอุตสาหกรรมที่ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

7. เอกสารอ้างอิง

- Hoffmann, C., and Leemann, A., 2003, "Homogeneity of structures made with self-compacting concrete and conventional concrete", *PRO 33: 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, RILEM Publications, pp. 619-627.
- Suprenant, B.A., 1988, "Concrete vibration: The why and how of consolidating concrete", *Concrete Construction*, June, pp. 563-568.
- Banfill, P.F.G., Teixeira, M.A.O.M., and Craik, R.J.M., 2011, "Rheology and vibration of fresh concrete: Predicting the radius of action of poker vibrators from wave propagation", *Cement and Concrete Research*, Vol.41, pp. 932-941.
- Gaimster, R., and Dixon, N., 2003, *Advance Concrete Technology: Processes*, Butterworth – Heinemann, Elsevier Ltd.
- Ouchi, M., 1999, "Self-compacting concrete-development, applications and investigations",

Proceedings of the 17th Nordic Concrete Research Symposium, Reykjavik, pp. 29-34.

- Okamura, H., and Ouchi, M., 1999, "Self-compacting concrete. Development, present use and future", *PRO 7: 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, RILEM Publications, pp. 3-14.

- Okamura, H., and Ouchi, M., 2003, "Self-compacting concrete", *Journal of advance of concrete technology*, Vol.1, pp. 5-15.

- Ouchi, M., 2005, "Self-compacting concrete", *Proceeding of JSCE-CICHE Joint Seminar on Concrete Engineering*, Ulan Bator, Mongolia, pp. 26-40.

- Khayat, K.H., 1999, "Workability, Testing, and Performance of Self-Consolidating Concrete", *ACI Materials Journal*, Vol. 96, pp. 346-354.

- European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete (EFNARC), 2002, *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*, Farnham, Surrey, UK, 32pp.

- Ouchi, M., 2005, "Self-compactability of fresh concrete", *PRO 42: 1st International RILEM Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete - SCC'2005*, China, RILEM Publications, pp. 65-73.

- Okamura, H., and Ouchi, M., 2003, "Application of self-compacting concrete in Japan", *PRO 33: 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, RILEM Publications, pp. 3-5.

- Zhu, W., Gibbs, J.C., and Bartos, P.J.M., 2001, "Uniformity of in situ properties of self-compacting concrete in full-scale structural elements", *Cement and concrete composites*, Vol.23, pp. 57-64.

- Ouchi, M., Nakamura, S.A., Osterberg, T., Hallberg, S.E., and Lwin, M., 2003, "Applications

of self-compacting concrete in Japan, Europe and The united states”, *5th International Symposium High Performance Computing-ISHPC 2003, Tokyo-Odaiba*, Japan, pp. 1-20.

15. American Society for Testing and Material, 2011, “ASTM C 143 Standard Test method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete”, *Annual Book of ASTM Standards Vol.4.02*, Philadelphia, PA, USA.

16. American Society for Testing and Material, 2011, “ASTM C 1611 Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete”, *Annual Book of ASTM Standards Vol.4.02*, Philadelphia, PA, USA.

17. American Concrete Institute, 2007, ACI 237R-07 Self-consolidating concrete”, *ACI Manual of Concrete Practice*, Part 1, Farmington Hills, Michigan, USA.

18. Skarendahl, A., 2000, “Definitions”, *Report 23: Self-Compacting Concrete – State-of-the-Art report of RILEM Technical Committee 174-SCC*, RILEM Publications, pp. 3-6.

19. Sonebi, M., and Bartos, P.J.M., 2002, “Filling ability and plastic settlement of self-compacting concrete”, *Materials and Structures*, Vol.35, pp. 462-469.

20. Koehler, E.P., and Fowler, D.W., 2007, ICAR Project 108: Aggregates in Self-Consolidating Concrete, International Center for Aggregates Research (ICAR), The University of Texas at Austin, USA.

21. Beaupré, D., Lacombe, P., and Khayat, K.H., 1999, “Laboratory investigation of rheological properties and scaling resistance of air entrained self-consolidating concrete”, *Materials and Structures*, Vol.32, pp. 235-240.

22. Bartos, P., 1992, *Fresh concrete properties and tests*, Elsevier science publishers BV.

23. Agulló, L., Toralles-Carbonari, B., Gettu, R., and Aguado, A., 1999. “Fluidity of cement pastes with mineral admixtures and superplasticizer- A study based on the Marsh cone test” *Materials and Structures*, Vol.32, pp. 479-485.

24. Chandra, S., and Björnström, J., 2002, “Influence of cement and superplasticizers type and dosage on the fluidity of cement mortars— Part I”, *Cement and Concrete Research*. Vol.32, pp. 1605-1611.

25. Björnström, J., and Chandra, S., 2003, “Effect of superplasticizers on the rheological properties of cements”, *Materials and Structures*, Vol.36, pp. 685-692.

26. Hallal, A., Kadri, E.H., Ezziane, K., Kadri, A., and Khelafi, H., 2010, “Combined effect of mineral admixtures with superplasticizers on the fluidity of the blended cement paste”, *Construction and Building Materials*, vol.24, pp. 1418-1423.

27. Yahia, A., Tanimura, M., and Shimoyama, Y., 2005, “Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio”, *Cement and Concrete Research*, Vol.35, pp. 532-539.

28. Jau, W.C., and Yang, C.T., 2010, “Development of a modified concrete rheometer to measure the rheological behavior of conventional and self-consolidating concretes”, *Cement and Concrete Composites*. Vol.32, pp. 450-460.

29. Belaidi, A.S.E., Azzouz, L., Kadri, E., and Kenai, S., 2012, “Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete”, *Construction and Building Materials*, vol.31, pp. 251-257.

30. Tangtermsirikul, S., and Khayat, K.H., 2000, “Fresh concrete properties”, *Report 23: Self-Compacting Concrete – State-of-the-Art report of RILEM Technical Committee 174-SCC*, RILEM

Publications, pp. 17-22.

31. Roussel, N., Nguyen, T.L.H., Yazoghli, O., and Coussot, P., 2009, "Passing ability of fresh concrete: A probabilistic approach", *Cement and Concrete Research*, Vol.39, pp 227-232.

32. Koehler, E.P., and Fowler, D.W., 2010, "Comparison of Workability Test Methods for Self-Consolidating Concrete", *Journal of ASTM International*, Vol.7, pp. 1-19.

33. Koehler, E.P., 2009, "Use of Rheology to Specify, Design, and Manage Self-Consolidating Concrete", *The Proceedings of the Tenth ACI International Symposium on Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues, Sevilla, Spain*

34. Girish, S., Ranganath, R.V., and Vengala, J., 2010, "Influence of powder and paste on flow properties of SCC", *Construction and Building Materials*, Vol.24, pp. 2481-2488.

35. Zerbino, R., Barragán, B., Garcia, T., Agulló, L., and Gettu, R., 2009, "Workability tests and rheological parameters in self-compacting concrete", *Materials and Structures*, Vol.42, pp. 947-960.

36. Libre, N.A., Khoshnazar, R., Shekarchi, M., 2010, "Relationship between fluidity and stability of self-consolidating mortar incorporating chemical and mineral admixtures", *Construction and Building Materials*, Vol.24, pp. 1262-1271.

37. Tregger, N., Gregori, A., Ferrara, L., and Shah, S., 2012, "Correlating dynamic segregation of self-consolidating concrete to the slump-flow test", *Construction and Building Materials*. Vol.28, pp. 499-505.

38. Chongzhi, L., Dongmin, W., Shaomin, S., and Jialong, C., 2005, "The Compatibility of Polycarboxylate-Type Superplasticizers with Cement", *Journal of Wuhan University of Technology – Material Science Edition*. Vol.20, pp. 95-98.

39. Han, S., Yan, P.Y., and Kong, X.M., 2011, "Study on the compatibility of cement-superplasticizer system based on the amount of free solution", *Science China Technological Sciences*, Vol.54, pp. 183-189.

40. Kismi, M., Saint-Arroman, J.C., Mounanga, P., 2012, "Minimizing water dosage of superplasticized mortars and concretes for a given consistency", *Construction and Building Materials*. Vol.28, pp. 747-758.

41. Bui, V.K., Montgomery, D., Hinczak, I., and Turner, K., 2002, "Rapid testing method for segregation resistance of self-compacting concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.32, pp. 1489-1496.

42. Heirman, G., Vandewalle, L., Gemert, D.V., Boel, V., Audenaert, K., Schutter, G.D., Desmet, B., and Vantomme, J., 2008, "Time-dependent deformations of limestone powder type self-compacting concrete", *Engineering Structures*. Vol.30, pp. 2945-2956.

43. Safawi, M.I., Iwaki, I., and Miura, T., 2004, "The segregation tendency in the vibration of high fluidity concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.34 pp. 219-226.

44. Skarendahl, A., 2003, "The present - The future", *PRO 33: 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, RILEM Publications, pp. 6-14.

45. American Concrete Institute, 1991, *ACI Committee 211.1 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*, Farmington Hills, MI, USA.

46. *Japanese Society of Civil Engineers (JSCE), 1999, Recommendations for Self-Compacting Concrete, Concrete Engineering Series 31, Tokyo, Japan.*

47. European Federation of National Associations Representing producers and applicators

of specialist building products for Concrete (EFNARC), 2005, *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete*, Farnham, Surrey, UK: 63pp.

48. Domone, P.L., 2006, "Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies", *Cement and Concrete Composites*, Vol.28, pp 197-208.

49. Mehta, P.K., 1999, "Advanced cements in concrete technology", *Concrete International*, Vol.21, pp. 69-76.

50. American Society for Testing and Material, 2011, "ASTM C 618 Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete", *Annual Book of ASTM Standards*, Vol.4.02, Philadelphia, PA, USA.

51. Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M., 2006, *Concrete Microstructure, Properties, and Materials*, Third Edition, McGraw-Hill.

52. Pedersen, K.H., Jensen, A.D., Skjoth-Rasmussen, M.S., and Dam-Johansen, K., 2008, "A review of the interference of carbon containing fly ash with air entrainment in concrete", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol.34, pp. 135-154.

53. Kosmatka, S.H., Kerkhoff, B., and Panarese, W.C., 2003, *Design and Control of Concrete Mixtures*, 14th edition, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA.

54. Wesche, K., 1991, *Fly ash in concrete : Properties and Performance*, Chapman & Hall, London.

55. Ahmaruzzaman, M., 2010, "A review on the utilization of fly ash", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol.36, pp. 327-363.

56. Siddique, R., and Khan, M.I., 2011, *Supplementary Cementing Materials*, Springer-Verlag

Berlin Heidelberg

57. Chatveera, B., 2000, "Durability and compressive strength of mae moh -fly ash mortar". *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 23, No. 2, pp. 17-29.

58. Cheerarot, R., Tangpagasit, J., Jaturapitakkul, C., and Kiattikomol, K., 2003, "Effect of particle size of mae moh fly ash on strength activity index of mortar". *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 26, No. 3, pp. 295-310. (In Thai)

59. Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C., and Chinsaprasirt, P., 2005, "Effect of fly ash fineness on compressive strength, total pore volume and pore size of blended cement paste". *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 28, No. 1, pp. 17-28. (In Thai)

60. Jirasit, F., Jaturapitakkul, C., Siripanichgorn, A., and Kiattikomol, K., 1999, "Effect of cement and fly ash contents in concrete against sulfuric acid attack". *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 22, No. 2, pp. 27-45. (In Thai)

61. Chotetanorm, C., Bubphachot, B., and Chinsaprasirt, P., 2006, "A study of chloride penetration of concrete containing classified fly ash". *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 29, No. 2, pp. 203-214. (In Thai)

62. Suwanmaneechot, P., Sasakul, T., Jaturapitakkul, C., and Chalee, W., 2008, "Effect of sea water on Portland cement type I and V concretes containing fly ash from fluidized bed combustion". *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 31, No. 2, pp. 357-370. (In Thai)

63. Chalee, W., Teekavanit, M., Jaturapitakkul, C., and Ausapanit, P., 2007, "Effect of sea water on compressive strength, chloride penetration and corrosion of steel in fly ash concrete for 4-year exposure in marine environment". *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 30,

No. 1, pp. 153-166. (In Thai)

64. Persson, B., 2001, "A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.31, pp. 193-198.

65. 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*, Vol.36, pp. 1719-1726.

66. Ravindrarajah, R.S., Siladyi, D., and Adamopoulos, B., 2003, "Development of high-strength self-compacting concrete with reduced segregation potential", *PRO 33: 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, RILEM Publications, pp. 530-532

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

68. Xie, Y., Liu, B., Yin, J., and Zhou, S., 2002, "Optimum mix parameters of high-strength self-compacting concrete with ultrapulverized fly ash", *Cement and Concrete Research*, Vol.32, pp. 477-480.

69. 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*, Vol.2, pp. 79-86.

70. Ulucan, Z.Ç., Türk, K. and 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*, Vol.44, pp. 367-374.

71. Turk, K., Turgut, P., Karatas, M., and Benli, A., 2010, "Mechanical Properties of Self-compacting Concrete with Silica Fume/Fly Ash", *9th International Congress on Advances in Civil Engineering*, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey, pp. 1-7.

72. Aggrawal, V., Gupta, S.M., and Sachdeva, S.N., 2010, "Concrete durability through high volume fly ash concrete (HVFC) : a literature review", *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 2, pp. 4473-4477.

73. Sua-iam, G., and Makul, N., 2012, "Study of mechanical properties of self-compacting concrete incorporating pozzolan materials when subjected to microwave curing". *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 35, No. 4, pp. 417-432.

74. Siddique, R., 2011, "Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash", *Materials and Design*, Vol.32, pp. 1501-1507.

75. Siddique, R., Aggarwal, P., and 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*, Vol.29, pp. 73-81.

76. Kasemchaisiri, R., and Tangtermsirikul, S., 2008, "Properties of self-compacting concrete in incorporating bottom ash as a partial replacement of fine aggregate", *Science Asia*, Vol.34, pp. 87-95.

77. Yazıcı, H., 2008, "The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete", *Construction and Building Materials*, Vol.22, pp. 456-462.

78. Pathak, N., and Siddique, R., 2012, "Properties of self-compacting-concrete containing fly ash subjected to elevated temperatures", *Construction and Building Materials*, Vol.30, pp. 274-280.

79. Pathak, N., and Siddique, R., 2012, "Effects

of elevated temperatures on properties of self-compacting-concrete containing fly ash and spent foundry sand”, *Construction and Building Materials*, Vol.34, pp. 512-521.

80. American Society for Testing and Material, 2011, “ASTM C 672 Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals”, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol.4.02, Philadelphia, PA, USA.

81. Uysal, M., Yilmaz, K., Ipek, M., 2012, “Properties and behavior of self-compacting concrete produced with GBFS and FA additives subjected to high temperatures”, *Construction and Building Materials*, Vol.28, pp. 321-326.

82. Maiti S.C., and Agarwal, R.K., 2009, “Concrete and its quality”, *The Indian Concrete Journal*, Vol.2009, pp. 20-27.

83. Bouzoubaâ, N., and Lachemi, M., 2001, “Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash: Preliminary results”, *Cement and Concrete Research*, Vol.31, pp. 413-420.

84. Naik, T.R., Kumar, R., Ramme, B.W., and Canpolat, F., 2012, “Development of high-strength, economical self-consolidating concrete”, *Construction and Building Materials*, Vol.30, pp. 463-469.

85. Khatib, J.M., 2008, “Performance of self-compacting concrete containing fly ash”, *Construction and Building Materials*, Vol.22, pp. 1963-1971.

86. Şahmaran, M., Yaman, İ.Ö., and Tokyay, M., 2009, “Transport and mechanical properties of self consolidating concrete with high volume fly ash”, *Cement and Concrete Composites*, Vol.31, pp. 99-106.

87. Liu, M., 2010, “Self-compacting concrete with different levels of pulverized fuel ash”,

Construction and Building Materials, Vol.24, pp. 1245-1252.

88. Dinakar, P., Babu, K.G., and Santhanam, M., 2008, “Durability properties of high volume fly ash self compacting concretes”, *Cement and Concrete Composites*, Vol.30, pp. 880-886.

89. Amrutha, Nayak, G., Narasimhan, M.C., and Rajeeva, S.V., 2011, “Chloride-ion impermeability of self-compacting high-volume fly ash concrete mixes”, *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, Vol.1, pp. 29-35.

90. Food and Agriculture Organization of the united Nations (FAO), 2012, Crop Prospects and Food Situation, *FAO Corporate Document Repository*, No.2, June, 38pp.

91. Zain, M.F.M., Islam, M.N., Mahmud, F., and Jamil, M., 2011, “Production of rice husk ash for use in concrete as a supplementary cementitious material”, *Construction and Building Materials*, Vol.25, pp. 798-805.

92. Mehta, P.K., 1978, *Siliceous ashes and hydraulic cements prepared there from*, United States Patent No. 4105459.

93. Della, V.P., Kühn, I., and Hotza, D., 2002, “Rice husk ash as an alternate source for active silica production”, *Materials Letters*, Vol.57, pp. 818-821.

94. Nair, D.G., Jagadish, K.S., and Fraaij, A., 2006, “Reactive pozzolanas from rice husk ash: An alternative to cement for rural housing”, *Cement and Concrete Research*, Vol.36, pp. 1062-1071.

95. Hamad, M.A., and Khattab, I.A., 1981, “Effect of the combustion process on the structure of rice hull silica”, *Thermochimica Acta*, Vol.48, pp. 343-349.

96. Muthadhi, A., and Kothandaraman, S., 2010, “Optimum production conditions for reactive

rice husk ash”, *Materials and Structures*, Vol.43, pp. 1303-1315.

97. Mehta, P.K., 2002, “Methods for producing a blended cementitious composition”, United States Patent No. 6451104.

98. Tuan, N.V., Ye, G., Breugel, K.V., Fraaij, A.L.A., and Dai, B.D., 2011, “The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete”, *Construction and Building Materials*, Vol.25, pp. 2030-2035.

99. Rukzon, S., Chindaprasirt, P., and Mahachai, R., 2009, “Effect of grinding on chemical and physical properties of rice husk ash”, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Vol.16, pp. 242-247.

100. Jaya, R.P., Abu Bakar, B.H., Johari, M.Z.M., Ibrahim, M.H.W., 2011, “Strength and permeability properties of concrete containing rice husk ash with different grinding time”, *Central European Journal of Engineering*, Vol.1, pp. 103-112.

101. Chao-Lung, H., Anh-Tuan, B.L., Chun-Tsun, C., 2011, “Effect of rice husk ash on the strength and durability characteristics of concrete”, *Construction and Building Materials*, Vol.25, pp. 3768-3772.

102. Cordeiro, G.C., Filho, R.D.T., Tavares, L.M., Fairbairn, E.M.R., and Hempel, S., 2011, “Influence of particle size and specific surface area on the pozzolanic activity of residual rice husk ash”, *Cement and Concrete Composites*, Vol.33, pp. 529-534.

103. Cordeiro, G.C., Filho, R.D.T., and Fairbairn, E.M.R., 2009, “Use of ultrafine rice husk ash with high-carbon content as pozzolan in high performance concrete”, *Materials and Structures*, Vol.42, pp. 983-992.

104. Makul, N., and Agrawal, D.K., 2010, “Microwave (2.45 GHz)-assisted rapid sintering of

SiO₂-rich rice husk ash”, *Materials Letters*, Vol.64, pp. 367-370.

105. Sensale, G.R., Ribeiro, A.B., and Gonçalves, A., 2008, “Effects of RHA on autogenous shrinkage of Portland cement pastes”, *Cement and Concrete Composites*, Vol.30, pp. 892-897.

106. Nehdi, M., Duquette, J., and Damatty, A.E., 2003, “Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol.33, pp. 1203-1210.

107. Bronzeoak Ltd., 2003, Report of the rice husk ash market study, Bronzeoak Ltd, UK, 62p.

108. Chatveera, B., and Lertwattanaruk, P., 2009, “Evaluation of sulfate resistance of cement mortars containing black rice husk ash”, *Journal of Environmental Management*, Vol.90, pp. 1435-1441.

109. Ganesan, K., Rajagopal, K., and Thangavel, K., 2008, Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete, *Construction and Building Materials*, Vol.22, pp. 1675-1683.

110. Sensale, G.R., 2006, “Strength development of concrete with rice-husk ash”, *Cement and Concrete Composites*, Vol.28, pp. 158-160.

111. Cisse, I.K., and Laquerbe, M., 2000, “Mechanical characterisation of filler sandcretes with rice husk ash additions study applied to Senegal”, *Cement and Concrete Research*, Vol.30, pp. 13-18.

112. Chatveera, B., and Wongkamjan, W., 2001, “Mechanical behavior of fine RHA concrete”. *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 24, No. 3, pp. 327-342. (In Thai)

113. Chatveera, B., and Kongsub, T., 2002, “Durability of concrete containing black RHA from rice mill”. *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 25, No. 4, pp. 373-389. (In Thai)

114. Chatveera, B., Makul, N., and Rodanan, A., 2006, "Durability of cement mortar containing black rice husk ash under sodium sulfate and magnesium sulfate attack". *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 29, No. 1, pp. 55-71. (In Thai)
115. Chatveera, B., and Makul, N., 2004, "Effect of curing temperature on mechanical properties of cement mixed with white rice husk ash paste". *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 27, No. 1, pp. 49-61. (In Thai)
116. Memon, S.A., Shaikh, M.A., and Akbar, H., 2008, "Production of Low Cost Self Compacting Concrete Using Rice Husk Ash", *First International Conference on Construction In Developing Countries (ICCIDC-I)*, Karachi, Pakistan, pp. 260-269.
117. Memon, S.A., Shaikh, M.A., and Akbar, H., 2011, "Utilization of Rice Husk Ash as viscosity modifying agent in Self Compacting Concrete", *Construction and Building Materials*, Vol.25, pp. 1044-1048.
118. Safiuddin, Md., West, J.S., and Soudki, K.A., 2011, "Flowing ability of the mortars formulated from self-compacting concretes incorporating rice husk ash", *Construction and Building Materials*, Vol.25, pp. 973-978.
119. Safiuddin, Md., West, J.S., and Soudki, K.A., 2012, "Properties of freshly mixed self-consolidating concretes incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material", *Construction and Building Materials*, Vol.30, pp. 833-842.
120. Sua-iam, G., and Makul, N., 2012, "Self-compacting Concrete Prepared Using Rice Husk Ash Waste from Electric Power Plants", *Advanced Materials Research*, Vol. 488-489, pp 258-262.
121. Sua-iam, G., and Makul, N., 2012, "The Use of Residual Rice Husk Ash from Thermal Power Plant as Cement Replacement Material in Producing Self-Compacting Concrete", *Advanced Materials Research*, Vol.415-417, pp. 1490-1495.
122. Safiuddin, Md., FitzGerald, G.R., West J.S., and Soudki, K.A., 2006, "Air-void stability in fresh self-consolidating concretes incorporating rice husk ash", *Advances in Engineering Structures, Mechanics & Construction*, Springer, pp. 129-138.
123. Ahmadi, M.A., Alidoust, O., Sadrinejad, I., and Nayeri, M., 2007, "Development of Mechanical Properties of Self Compacting Concrete Contain Rice Husk Ash", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol.34, pp. 168-171.
124. Sua-iam, G., and Makul, N., 2013, "Self-compacting Concrete Incorporating Various Ratios of Rice Husk Ash in Portland Cement", *Chiang Mai University Journal of Natural Sciences*, Vol.12 No. 2, pp. 111-120.
125. Safiuddin, Md., West, J.S., and Soudki, K.A., 2010, "Hardened properties of self-consolidating high performance concrete including rice husk ash", *Cement and Concrete Composites*, Vol.32, pp. 708-717.
126. Sood, H., Khitoliya, R.K., and Pathak, S.S., 2009, "Incorporating European Standards for Testing Self Compacting Concrete in Indian Conditions", *International Journal of Recent Trends in Engineering*, Vol.1, pp. 41-45.
127. Atan, M.N., and Awang, H., 2011, "The Mechanical Properties of Self-compacting Concrete Incorporating Raw Rice Husk Ash", *European Journal of Scientific Research*, Vol.60, pp. 166-176.
128. Frías, M., Villar, E., and Savastano, H., 2011, "Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture", *Cement and Concrete Composites*, Vol.33, pp. 490-496.
129. Fairbairn, E.M.R., Americano, B.B., Cordeiro, G.C., Paula, T.P., Filho, R.D.T., Silvano, M.M., 2010,

“Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO₂ emissions reduction and potential for carbon credits”, *Journal of Environmental Management*, Vol.91, pp. 1864-1871.

130. Chusilp, N., Jaturapitakkul, C., and Kiattikomol, K., 2009, “Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars”, *Construction and Building Materials*, Vol.23, pp. 3523-3531.

131. Cordeiro, G.C., Filho, R.D.T., Tavares, L.M., Fairbairn, E.M.R., 2008, “Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars”, *Cement and Concrete Composites*, Vol.30, pp. 410-418.

132. Cordeiro, G.C., Filho, R.D.T., Tavares, L.M., Fairbairn, E.M.R., 2009, “Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol.39, pp. 110-115.

133. Cordeiro, G.C., Filho, R.D.T., Fairbairn, E.M.R., 2009, “Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash”, *Construction and Building Materials*, Vol.23, pp. 3301-3303.

134. Singh, N.B., Singh, V.D., and Rai, S., 2000, “Hydration of bagasse ash-blended portland cement”, *Cement and Concrete Research*, Vol.30, pp. 1485-1488.

135. Ganesan, K., Rajagopal, K., and Thangavel, K., 2007, “Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material”, *Cement and Concrete Composites*, Vol.29, pp. 515-524.

136. Chusilp, N., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., 2009, “Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete”, *Construction and Building Materials* Vol.23, pp. 3352-3358.

137. Rukzon, S., and Chindaprasirt, P., 2012, “Utilization of bagasse ash in high-strength

concrete”, *Materials and Design*. Vol.34, pp. 45-50.

138. Dumrongsil, S., and Sujjavanich, S., 2007, “Effect of cement containing binary blended bagasse ash – fly ash on physical and mechanical properties of concrete”. *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 30, No. 3, pp. 489-499. (In Thai)

139. Somna, R., and Jaturapitakkul, C., 2011, “Use of ground bagasse ash to improve compressive strength, weater permeability, and chloride resistance of recycled aggregate concrete”. *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 34, No. 4, pp. 369-381. (In Thai)

140. Sales, A., and Lima, S.A., 2010, “Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement”, *Waste Management*, Vol.30, pp. 1114-1122.

141. Tantawy, M.A., El-Roudi, A.M., and Salem, A.A., 2012, “Immobilization of Cr(VI) in bagasse ash blended cement pastes”, *Construction and Building Materials*, Vol.30, pp. 218-223.

142. Lima, S.A., Varum, H., Sales, A., and Neto, V.F., 2012, “Analysis of the mechanical properties of compressed earth block masonry using the sugarcane bagasse ash”, *Construction and Building Materials*, Vol.35, pp. 829-837.

143. Faria, K.C.P., Gurgel, R.F., and Holanda, J.N.F., 2012, “Recycling of sugarcane bagasse ash waste in the production of clay bricks”, *Journal of Environmental Management*, Vol.101, pp. 7-12.

144. Akram, T., Memon, S.A., and Obaid, H., 2009, “Production of low cost self compacting concrete using bagasse ash”, *Construction and Building Materials*. Vol.23, pp. 703-712.

145. American Society for Testing and Material, 2011, “ASTM C 150 Standard specification for Portland cement”, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol.4.01, Philadelphia, PA, USA.

146. European Committee for Standardization, 2000, "EN 197-1 Composition, specifications and conformity criteria for common cements", *European Standard*, Brussels, 29pp.
147. Yimwan, A., and Chatveera, B., 2011, "The study of suitable limestone content in Portland limestone cement for using in reinforce concrete work comply with EN 197-1". *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 34, No. 1, pp. 45-58. (In Thai)
148. Lewis, R., Sear, L., Wainwright, P., and Ryle, R., 2003, *Advance Concrete Technology : Constituent Materials*, Butterworth- Heinemann, Elsevier Ltd.
149. Yahia, A., Tanimura, M., Shimoyama. Y., 2005, "Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio", *Cement and Concrete Research*, Vol.35, pp. 532-539.
150. Petit, J.Y., and Wirquin, E., 2010, "Effect of limestone filler content and superplasticizer dosage on rheological parameters of highly flowable mortar under light pressure conditions", *Cement and Concrete Research*. Vol.40, pp. 235-241.
151. Felekoglu, B., 2007, "Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case)", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 51, pp 770-791.
152. Ye, G., Liu, X., Schutter, G.D., Poppe, A.M., and Taerwe, L., 2007, "Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes", *Cement and Concrete Composites*, Vol.29, pp. 94-102.
153. Ghrici, M., Kenai, S., and Said-Mansour, M., 2007, "Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements", *Cement and Concrete Composites*, Vol.29, pp. 542-549.
154. Lee, S.T., Hooton, R.D., Jung, H.S., Park, D.H., and Choi, C.S., 2008, "Effect of limestone filler on the deterioration of mortars and pastes exposed to sulfate solutions at ambient temperature", *Cement and Concrete Research*, Vol.38, pp. 68-76.
155. Georgiadis, A.S., Sideris, K.K., and Anagnostopoulos, N.S., 2010, "Properties of SCC Produced with Limestone Filler or Viscosity Modifying Admixture", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.22, pp. 352-360.
156. Weerdt, K.D., Kjellsen, K.O., Sellevold, E., and Justnes, H., 2011, "Synergy between fly ash and limestone powder in ternary cements", *Cement and Concrete Composites*, Vol.33, pp. 30-38.
157. Rizwan, S.A., Bier, T.A., 2012, "Blends of limestone powder and fly-ash enhance the response of self-compacting mortars", *Construction and Building Materials*, Vol.27, pp. 398-403.
158. Péra, J., Husson, S., and Guilhot, B., 1999, "Influence of finely ground limestone on cement hydration", *Cement and Concrete Composites*, Vol.21. pp. 99-105.
159. Domone, P.L., 2006, "Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies", *Cement and Concrete Composites*, Vol.28, pp. 197-208.
160. Şahmaran, M., Christianto, H.A., and Yaman, İ.Ö., 2006, "The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars", *Cement and Concrete Composites*, Vol.28, pp. 432-440.
161. Diederich, P., Mouret, M., Ryck, A., Ponchon, F., and Escadeillas, G., 2012, "The nature of limestone filler and self-consolidating feasibility— Relationships between physical, chemical and mineralogical properties of fillers and the flow at different states, from powder to cement-based suspension", *Powder Technology*, Vol. 218, pp.

90-101.

162. Courard, L., Michel, F., and Pierard, J., 2011, "Influence of clay in limestone fillers for self-compacting cement based composites", *Construction and Building Materials*, Vol.25, pp. 1356-1361.

163. Esping, O., 2008, "Effect of limestone filler BET(H₂O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete", *Cement and Concrete Research*. Vol. 38, pp. 938-944.

164. Bosiljkov, V.B., 2003, "SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler", *Cement and Concrete Research*, Vol.33, pp. 1279-1286.

165. Valcuende, M., Marco, E., Parra, C., and Serna, P., 2012, "Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the shrinkage of self-compacting concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.42, pp. 583-592.

166. Valcuende, M., Parra, C., Marco, E., Garrido, A., Martínez, E., and Cánoves, J., 2012, "Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the porous structure of self-compacting concrete", *Construction and Building Materials*, Vol.28, pp. 122-128.

167. Craeye, B., Schutter, G.D., Desmet, B., Vantomme, J., Heirman, G., Vandewalle, L., Cizer, Ö., Aggoun, S., and Kadri, E.H., 2010, "Effect of mineral filler type on autogenous shrinkage of self-compacting concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, pp. 908-913.

168. Zhu, W., and Gibbs, J.C., 2005, "Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.35, pp. 1457-1462.

169. Domone, P.L., 2007, "A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete", *Cement and Concrete Composites*, Vol.29, pp. 1-12.

170. Mňahončáková, E., Pavlíková, M., Grzeszczyk, S., Rovnaníková, P., and Černý, R., 2008, "Hydric, thermal and mechanical properties of self-compacting concrete containing different fillers", *Construction and Building Materials*, Vol.22 pp. 1594-1600.

171. Uysal, M., 2012, "Self-compacting concrete incorporating filler additives: Performance at high temperatures", *Construction and Building Materials*, Vol.26, pp. 701-706.