ผลกระทบของน้ำสลัดจ์จากโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จที่มีต่อคอนกรีตผสมสารผสมเพิ่ม

บุรฉัตร ฉัตรวีระ[1] และ สุรพงษ์ ดาราม[2]

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต คลองหลวง ปทุมธานี 12121

รับเมื่อ 7 เมษายน 2548 ตอบรับเมื่อ 5 ตุลาคม 2548

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงผลกระทบต่อคอนกรีตผสมสารผสมเพิ่มจากการใช้น้ำสลัดจ์ (sludge water) จากโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ โดยสารผสมเพิ่มที่ศึกษาคือเถ้าลอยและสารลดน้ำอย่างแรง การศึกษาประกอบด้วยการศึกษาถึงสมบัติเบื้องต้นของน้ำสลัดจ์ การหาปริมาณค่าของแข็งทั้งหมดที่เหมาะสมโดยใช้ซีเมนต์เพสต์ โดยมีตัวแปรคือค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ร้อยละ 0.5, 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5 และ 15 และการศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตที่ผสมโดยใช้น้ำสลัดจ์ที่ความเข้มข้นดังกล่าว ผลการทดสอบพบว่าผงสลัดจ์ประกอบไปด้วยผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและอนุภาคเล็กๆ มีค่าสูญเสียการเผาไหม้ที่สูงกว่าปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1 และเถ้าลอย ค่าปริมาณค่าของแข็งทั้งหมดของน้ำสลัดจ์มีผลต่อค่ากำลังอัดและค่าระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ โดยค่าที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C94 อยู่ในช่วง 54,100 ถึง 61,300 มก./ล. การใช้น้ำสลัดจ์ผสมคอนกรีตทำให้สมบัติของสารผสมเพิ่มที่ใช้ทดสอบด้อยลง คอนกรีตที่ผสมโดยใช้น้ำสลัดจ์ร่วมกับสารผสมเพิ่มมีสมบัติทางกลและความทนทานดีกว่าคอนกรีตที่ผสมโดยใช้น้ำสลัดจ์อย่างเดียว

คำสำคัญ : โรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ / นำกลับมาใช้ใหม่ / น้ำสลัดจ์

---

[1] *รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา*

[2] *นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา*

Effects of Sludge Water from Ready-Mixed Concrete Plant on Concrete Containing Admixtures

Burachat Chatveera[1] and Surapong Daram[2]
Thammasat University, Rangsit Campus, Klong Luang, Pathum Thani 12121

Received 7 April 2005 ; accepted 5 October 2005

Abstract

This research was aimed to study the effect of sludge water from ready-mixed concrete plant to replace mixing water in concrete containing admixtures. The admixtures used in this study were fly ash and superplasticizer. The experimental procedures were performed to study the characteristic of sludge water as concrete mixing water and to determine the optimum total solid content of sludge water in cement paste by varying the percentage of total solid content in sludge water between 0.5%, 2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 12.5% and 15%. The selected sludge water was used for mixing and studying the behavior of concrete. Test results showed that sludge powder, consisting of hydration products and small particles, has more loss of ignition value than cement type I and fly ash. Total solid content of sludge water, found in the range of 54,100-61,300 mg/l. for the criteria of ASTM C94, had an influence on the compressive strength and setting time of cement paste. The sludge water decreased an efficiency of concrete admixtures. Concrete mixed with sludge water and admixtures has better mechanical and durability properties than concrete mixed with sludge water only.

Keywords : Ready-mixed Concrete Plant / Recycle / Sludge Water

---

[1] *Associate Professor, Department of Civil Engineering.*

[2] *Graduate Students, Department of Civil Engineering.*

1. บทนำ

น้ำสลัดจ์เป็นน้ำที่เกิดจากการล้างคอนกรีตที่ค้างอยู่ในเครื่องผสมและที่เหลือในรถขนส่งคอนกรีต [1] ซึ่งจากการศึกษาของต่างประเทศ [2] พบว่าปริมาณน้ำสลัดจ์ที่เกิดขึ้นในโรงงานผลิตคอนกรีตมีปริมาณประมาณ 500 ลิตรต่อคันต่อวันหรือประมาณ 12-20 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน เนื่องจากมีส่วนของปูนซีเมนต์ผสมอยู่ทำให้น้ำสลัดจ์มีค่าความเป็นด่างสูงเกินกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ จึงจำเป็นต้องมีระบบจัดการน้ำเสียก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ระบบการจัดการน้ำเสียของโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จในประเทศไทย ปัจจุบันพบว่าส่วนใหญ่จะใช้วิธีปล่อยให้ตกตะกอนในบ่อ แสดงได้ดังรูปที่ 1 โดยปกติจะประกอบด้วยบ่อ 2 บ่อคือ บ่อแรกจะเป็นที่รองรับคอนกรีตส่วนที่ค้างในรถขนส่งคอนกรีตและบ่อที่สองเป็นบ่อรับน้ำล้นจากบ่อแรก น้ำที่ผ่านการตกตะกอนของบ่อที่สองมักจะนำไปใช้ในการทำความสะอาดรถขนส่ง ตลอดจนใช้ในกิจกรรมภายในของโรงงานหรือปล่อยออกไปนอกโรงงาน ส่วนกากตะกอนคอนกรีตเมื่อสะสมจนเต็มบ่อก็จะทำการขุดนำไปถมที่หรือฝังกลบ การจัดการในรูปแบบนี้ใช้ค่าลงทุนที่ไม่สูงแต่ก็มีข้อจำกัดเนื่องจากประสิทธิภาพของการกำจัดที่ยังไม่ชัดเจนขึ้น จึงทำให้เกิดแนวคิดในการนำน้ำสลัดจ์กลับมาใช้ในการผลิตคอนกรีต ซึ่งจะได้ประโยชน์ทั้งการเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนในการจัดการน้ำเสียที่เกิดจากงานคอนกรีตของโรงงาน ตลอดจนเป็นการใช้ทรัพยากรที่มีให้คุ้มค่าและรักษาสิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่ง

รูปที่ 1 ลักษณะทั่วไปของบ่อคายกากคอนกรีตของโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ

2. วัตถุประสงค์

1. ศึกษาถึงคุณสมบัติของน้ำสลัดจ์จากโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จเพื่อนำมาใช้ผสมคอนกรีต
2. ศึกษาถึงผลกระทบของน้ำสลัดจ์ที่มีต่อคอนกรีตผสมสารผสมเพิ่ม

3. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

3.1.2 มวลรวมหยาบใช้หินขนาดโตสุด 25 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C33 [3]

3.1.3 มวลรวมละเอียด ตามมาตรฐาน ASTM C33

3.1.4 น้ำสลัดจ์ซึ่งทำการเก็บตัวอย่างจากโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จของศูนย์อุตสาหกรรมอิตาเลียน-ไทย บริษัท อิตาเลียน-ไทย ดีเวล๊อปเมนต์ จำกัด (มหาชน)

3.1.5 สารผสมเพิ่มที่ใช้คือสารลดน้ำอย่างแรง ตามมาตรฐาน ASTM C494 ชนิด F [4] และเถ้าลอย

3.2 ขั้นตอนการทดสอบสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนคือ

3.2.1 การทดสอบสมบัติเบื้องต้นของน้ำสลัดจ์

การทดสอบจะประกอบด้วย การทดสอบสมบัติและปริมาณสารเคมีในน้ำสลัดจ์ การทดสอบสมบัติของผงสลัดจ์ ได้แก่การหาปริมาณสารประกอบออกไซด์ การกระจายตัวของอนุภาค (particle size distribution) และถ่ายภาพขยายโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)

3.2.2 การทดสอบน้ำสลัดจ์โดยใช้ซีเมนต์เพสต์

การทดสอบสมบัติของน้ำสลัดจ์โดยใช้ซีเมนต์เพสต์ทดสอบเพื่อเลือกหาค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่เหมาะสมในการนำไปใช้ทดสอบคอนกรีต ที่กำหนดไว้ในตารางที่ 1 มาตรฐาน ASTM C94 [5] ประกอบด้วย

- ค่ากำลังอัดเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 ที่อายุ 7 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109 [6]
- ค่าระยะเวลาการก่อตัวเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมอยู่ในช่วงก่อนหน้า 1 ชั่วโมงถึงภายหลัง 1:30 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM C191 [7]

การเก็บตัวอย่างน้ำสลัดจ์เพื่อนำมาทดสอบทำอย่างต่อเนื่องเป็นรายสัปดาห์เป็นเวลาประมาณ 1 เดือน รายละเอียดการทดสอบมีขั้นตอนดังนี้ ทำการร่อนแยกน้ำสลัดจ์ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 (0.30 มม.) เพื่อควบคุมไม่ให้ขนาดอนุภาคในน้ำสลัดจ์มีขนาดใหญ่จนเกินไป ซึ่งจะมีผลต่อความเป็นเนื้อเดียวกันและการแยกชั้นของตะกอนสลัดจ์ จากนั้นวัดค่าความถ่วงจำเพาะและค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดของน้ำสลัดจ์โดยใช้ตาชั่งที่ความละเอียด 0.01 กรัม เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองค่านี้ จากข้อมูลที่ได้จะใช้ในการผสมตัวอย่างน้ำสลัดจ์ให้มีค่าร้อยละของปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 0.5, 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5 และ 15 โดยมีตัวอย่างที่มีค่าร้อยละของปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 0 หรือใช้น้ำประปาในการผสมเป็นตัวอย่างควบคุม น้ำสลัดจ์ที่เตรียมเสร็จจะถูกนำไปผสมกับปูนซีเมนต์ โดยอัตราส่วนของน้ำสลัดจ์ต่อปูนซีเมนต์ควบคุมที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเสร็จจะใช้ในการทดสอบค่ากำลังอัดและค่าระยะเวลาการก่อตัวต่อไป

3.2.3 การทดสอบสมบัติของคอนกรีตที่ใช้น้ำสลัดจ์

น้ำสลัดจ์ที่ใช้ผสมคอนกรีตจะเป็นน้ำสลัดจ์ที่มีค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่เลือกจากการผ่านเกณฑ์ทดสอบโดยใช้ซีเมนต์เพสต์ ช่วงการทดสอบผสมคอนกรีตจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วงเพื่อทดสอบตัวอย่างน้ำสลัดจ์ที่เวลาเปลี่ยนไป รายละเอียดชุดทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 1 โดยเกณฑ์ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตมีรายละเอียดดังนี้คือ

- ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ 350 กก./ลบ.ม. และค่าการยุบตัวที่ 10 $\pm$ 2.5 ซม.
- อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น (γ) เท่ากับ 1.3
- อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบเท่ากับ 0.425
- สารผสมเพิ่มชนิดเถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 20
- ปริมาณการใช้สารเคมีผสมคอนกรีตชนิดสารลดน้ำอย่างแรงที่ร้อยละ 1

รายละเอียดการทดสอบคอนกรีตผสมโดยใช้น้ำสลัดจ์จะมีทั้งการทดสอบในช่วงคอนกรีตสดและแข็งตัวแล้ว ซึ่งจะมีทั้งด้านทางกลและความทนทานประกอบด้วย

- ค่าการยุบตัวและค่าสูญเสียการยุบตัว ตามมาตรฐาน ASTM C143 [8]
- ค่าระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C403 [9]
- ค่ากำลังอัดที่อายุ 1, 3, 7, 28, 56 และ 91 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C39 [10]
- ค่าความสามารถในการซึมน้ำของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ตามมาตรฐาน JIS A1404 [11]
- ค่าสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากสภาพที่เป็นกรด โดยใช้สารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่อายุ 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน

ตารางที่ 1 รายละเอียดของชุดตัวอย่างคอนกรีตโดยใช้น้ำสลัดจ์

รายการ	ชุดการทดสอบ									
	ช่วงที่ 1						ช่วงที่ 2		ช่วงที่ 3	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ปูนซีเมนต์ (กก.)	350	280	350	350	280	350	280	350	280	350
มวลรวมละเอียด (กก.)	764	764	764	764	764	764	764	764	764	764
มวลรวมหยาบ (กก.)	1,046	1,046	1,046	1,046	1,046	1,046	1,046	1,046	1,046	1,046
น้ำประปา (กก.)	198	187	163	-	-	-	-	-	-	-
น้ำสลัดจ์ (กก.)	-	-	-	210	198	173	202	173	197	178
เถ้าลอย (กก.)	-	70	-	-	70	-	70	-	70	-
สารลดน้ำอย่างแรง (มล.)	-	-	3,500	-	-	3,500	-	3,500	-	3,500

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 สมบัติของน้ำสลัดจ์และผงสลัดจ์

ผลการทดสอบน้ำสลัดจ์ที่ผ่านการร่อนแยกโดยตะแกรงเบอร์ 50 เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่กำหนดของมาตรฐานที่เกี่ยวข้องคือ ASTM C94 และผลการทดสอบของน้ำประปา แสดงได้ดังตารางที่ 2 โดยจะแสดงผลการทดสอบค่าปริมาณ อัลคาลินิตี้ใน 2 รูปแบบ แบบแรกเป็นค่าที่มาตรฐาน ASTM C94 กำหนด ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในรูปสารอัลคาไลเทียบเท่า (equivalent alkalies) โดยคำนวณตามสมการ Na_2O + $0.658K_2O$ ปริมาณอัลคาลินิตี้ในรูปแบบนี้ไม่เป็นที่นิยมทดสอบเนื่องจากต้องใช้เครื่องมือพิเศษและทดสอบในรูปวัสดุผง ส่วนค่าปริมาณอัลคาลินิตี้ในรูปแบบที่ 2 อยู่ในรูปสารอัลคาไลทั้งหมด (total alkalies) โดยรายงานผลค่าปริมาณอัลคาลินิตี้ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ซึ่งรูปแบบหลังนี้เป็นค่าที่ใช้นิยมทดสอบหาสมบัติน้ำที่ใช้บริโภคทั่วไป

จากผลทดสอบพบว่าเมื่อเทียบกับเกณฑ์ของมาตรฐาน ASTM C94 น้ำสลัดจ์มีค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ เมื่อเทียบกับน้ำประปาที่ใช้ในโรงงานพบว่าค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ค่าความถ่วงจำเพาะ และค่าปริมาณอัลคาลินิตี้ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) มีค่าสูงกว่าน้ำประปา การเปรียบเทียบปริมาณสารประกอบออกไซด์ในผงสลัดจ์เทียบกับปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1 และเถ้าลอยแสดงได้ดังตารางที่ 3 พบว่าค่าองค์ประกอบทางเคมีของผงสลัดจ์มีลักษณะอยู่ระหว่างปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1 และเถ้าลอย โดยที่ผงสลัดจ์มีค่าสูญเสียการเผาไหม้ที่สูงกว่ามาก ค่าที่สูงดังกล่าวมาจากสาเหตุผงสลัดจ์มีส่วนที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น [12] สอดคล้องกับผลที่ได้จากรูปขยายของผงสลัดจ์ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 2 จากรูปพบว่าผงสลัดจ์ประกอบไปด้วยผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและอนุภาคเล็กๆ เช่น เถ้าลอยและมวลรวมละเอียด อนุภาคเหล่านี้มีความพรุนและสภาพผิวที่ขรุขระจากการทำปฏิกิริยาและการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น อนึ่ง ผงสลัดจ์ที่แสดงในรูปได้จากการทำให้น้ำสลัดจ์แห้งด้วยเตาอบ ส่วนที่เป็นของแข็งบางส่วนจึงมาจากส่วนที่เป็นสารละลายเช่น CaOH เมื่ออยู่ในรูปน้ำสลัดจ์ อนุภาคในน้ำสลัดจ์โดยเฉพาะส่วนที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะสามารถ ทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ทำปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น ละลายน้ำ ตกตะกอน ตลอดจนเกาะกันเป็นก้อนที่ใหญ่ขึ้นตามสภาพแวดล้อม

เมื่อพิจารณาถึงขนาดของอนุภาคของผงสลัดจ์ ผลการเปรียบเทียบแสดงได้ในรูปที่ 3 พบว่าขนาดอนุภาคของผงสลัดจ์กระจายอยู่ระหว่างขนาดของปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1 และขนาดของเถ้าลอย อนุภาคที่มีขนาดเฉลี่ยใหญ่ไปเล็กที่สุดตามลำดับคือ ผงสลัดจ์ เถ้าลอย และปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1 โดยมีค่าเท่ากับ 50.32, 49.29 และ 28.58 ไมโครเมตร ตามลำดับ

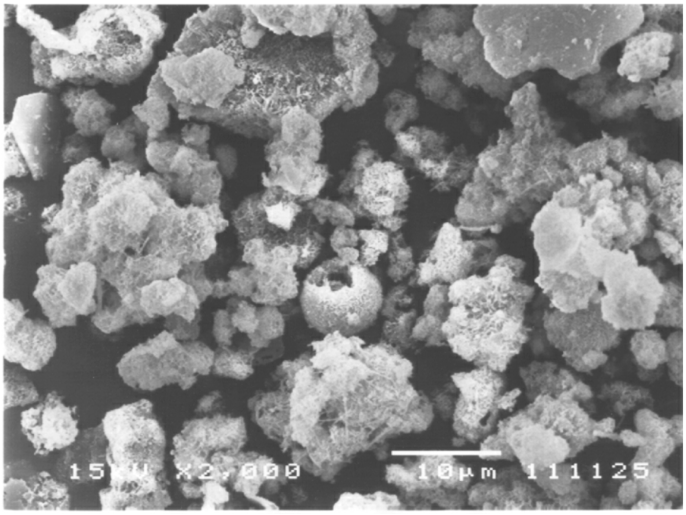
ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบสมบัติของน้ำสลัดจ์

สมบัติ	น้ำสลัดจ์	น้ำประปา	ASTM C94
ปริมาณคลอไรด์ (มก./ล.)	10.50-26.50	16.53-33.90	1,000
ปริมาณซัลเฟต (มก./ล.)	5.60-22.35	12.45-32.65	1,000
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (มก./ล.)	56,325-96,564	50.12-50.38	50,000
ปริมาณอัลคาลินิตี้ (Na_2O + 0.658K_2O) (มก./ล.)	470-560 *	-	600
ปริมาณอัลคาลินิตี้ ($CaCO_3$) (มก./ล.)	1,593-2,154	15.60-68.61	-
ความถ่วงจำเพาะ	1.051-1.071	0.993-0.995	-
ความเป็นกรดด่าง (pH)	12.51-13.01	7.20-7.78	-

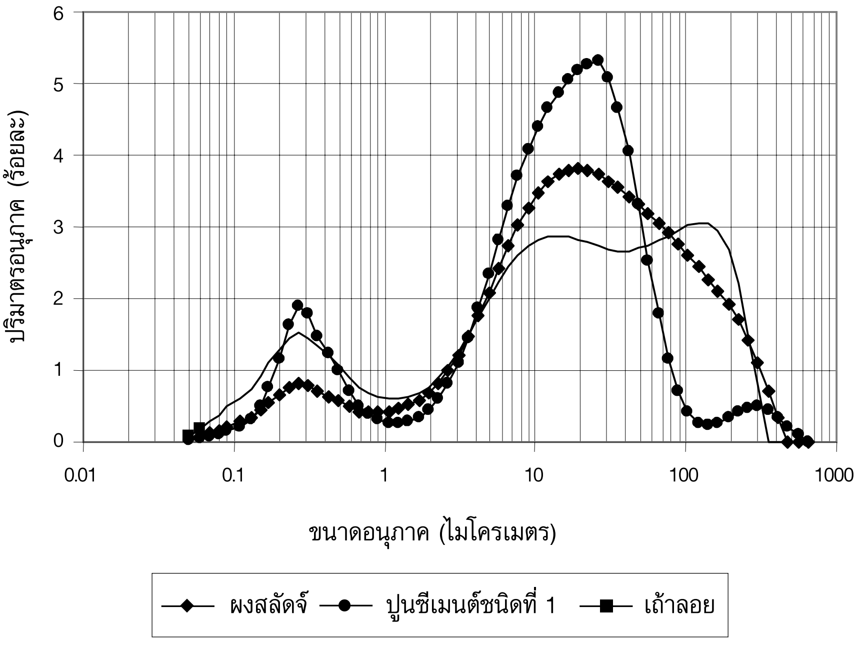
* ทดสอบโดยใช้ผงสลัดจ์

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของผงสลัดจ์

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ผงสลัดจ์	ปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1 [13]	เถ้าลอย [14]
SiO_2	25.05	17 - 25	32.50 - 57.13
Al_2O_3	7.39	3 - 8	17.08 - 25.97
Fe_2O_3	3.99	0.5 - 0.6	10.53 - 16.92
CaO	31.33	60 - 67	22.51 - 27.97
MgO	1.59	0.1 - 5.5	1.90 - 3.65
K_2O	0.85	0.3 - 1.5	0.85 - 3.15
Na_2O	0.00		0.71 - 1.56
SO_3	0.03	1 - 3	0.70 - 5.08
Free CaO	0.00	0.00	0.00
LOI	21.07	< 3	< 1



รูปที่ 2 อนุภาคผงสลัดจ์ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า



รูปที่ 3 การเปรียบเทียบการกระจายขนาดอนุภาคของผงสลัดจ์

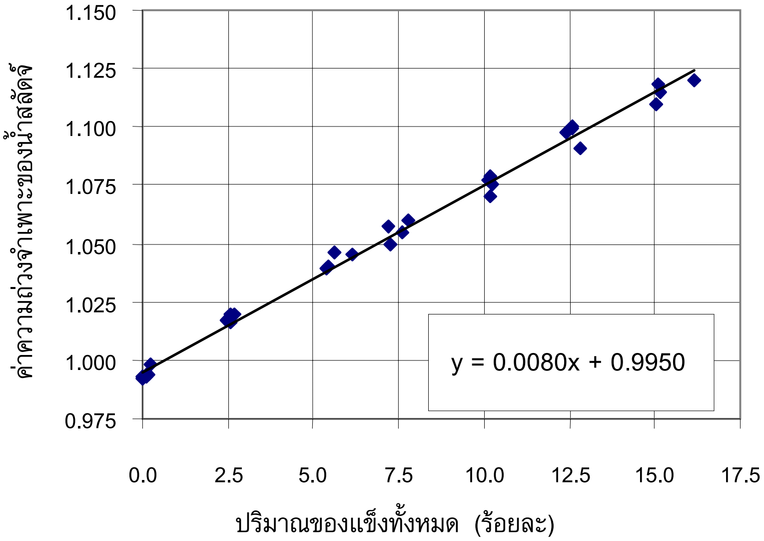
4.2 ผลการทดสอบน้ำสลัดจ์โดยใช้ซีเมนต์เพสต์

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะและค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดของน้ำสลัดจ์แสดงได้ดังรูปที่ 4 พบว่าทั้งสองค่ามีความสัมพันธ์ในรูปแบบเป็นเส้นตรงตามสมการที่ (1) จากข้อมูลที่ได้สามารถใช้ในการประเมินถึงความเข้มข้นของปริมาณของแข็งในน้ำสลัดจ์ตลอดจนใช้ในการคำนวณหาปริมาตรน้ำสลัดจ์ที่ใช้ผสมคอนกรีตได้

$$Y = 0.008X + 0.995 \quad (1)$$

โดยที่ X คือ ค่าร้อยละของปริมาณของแข็งทั้งหมด

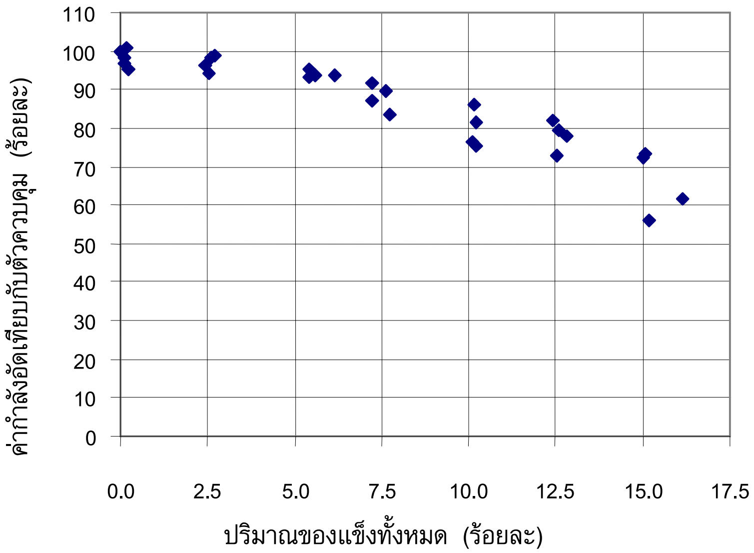
Y คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำสลัดจ์



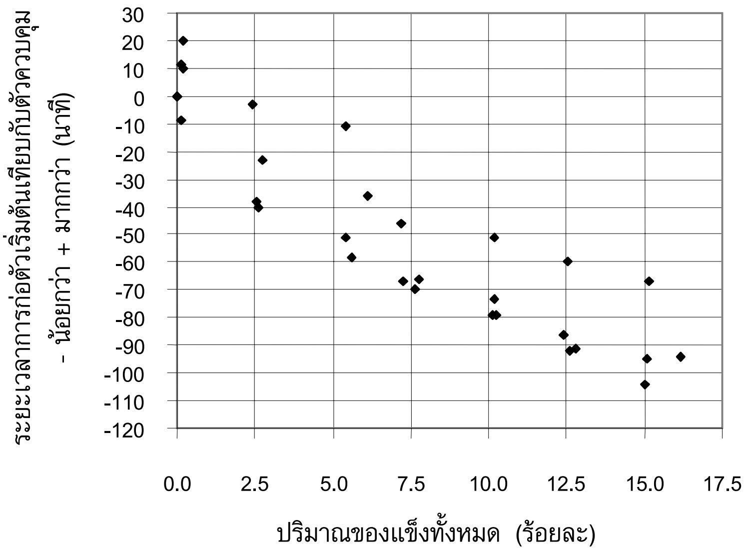
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด และค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำสลัดจ์

ผลการทดสอบค่ากำลังอัดที่อายุ 7 วัน และค่าระยะเวลาการก่อตัวของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ผสมโดยใช้น้ำสลัดจ์ที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดต่างๆ เทียบกับตัวอย่างควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 5 ถึง 7 จากผลการทดสอบพบว่าในตัวอย่างที่ใช้น้ำสลัดจ์ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดต่ำที่ประมาณร้อยละ 0.5 มีค่าระยะเวลาการก่อตัวที่ใช้ระยะเวลานานกว่าตัวอย่างควบคุม เนื่องมาจากผลของความเป็นด่างที่สูงของน้ำสลัดจ์ [15] ซึ่งพบว่าไม่มีผลต่อค่ากำลังอัด ส่วนในตัวอย่างอื่นๆ ที่มีปริมาณค่าของแข็งทั้งหมดเพิ่มขึ้นพบว่า ผลของการทดสอบทั้งสองชนิดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือ เมื่อปริมาณค่าของแข็งทั้งหมดเพิ่มขึ้นทำให้ค่ากำลังอัดและค่าระยะเวลาการก่อตัวเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมลดลง โดยในช่วงค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดตั้งแต่น้อยกว่าประมาณร้อยละ 6 ลงมามีผลการทดสอบค่ากำลังอัดของตัวอย่างเกินกว่าร้อยละ 90 เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมและค่าระยะเวลาการก่อตัวน้อยกว่าตัวอย่างควบคุมไม่เกิน 90 นาที ซึ่งจากเกณฑ์การทดสอบค่าสูงสุดของค่าร้อยละของปริมาณของแข็งทั้งหมดของตัวอย่างน้ำสลัดจ์ที่ผ่านเกณฑ์การทดสอบทั้ง 4 สัปดาห์อยู่ในช่วงร้อยละ 5.41 ถึง 6.13 โดยค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 5.64 หรือ 56,400 มก./ล.

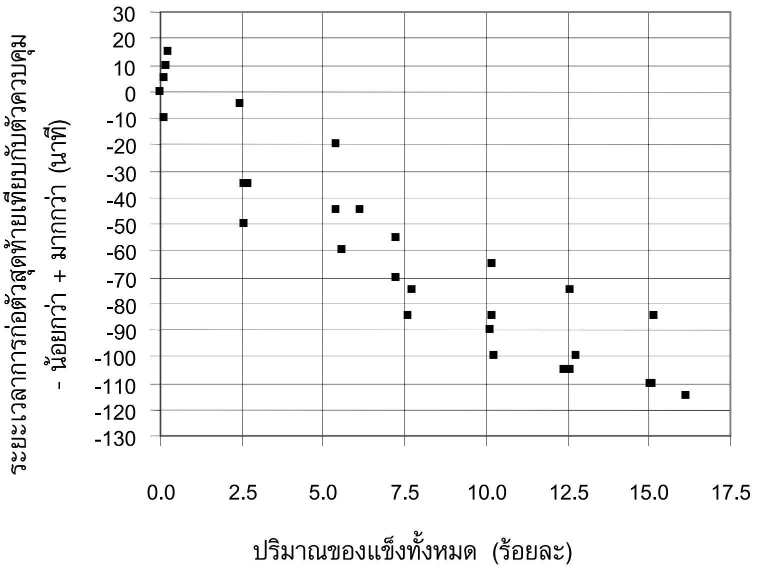
จากการศึกษาสามารถแบ่งผลที่เกิดจากการเพิ่มปริมาณค่าของแข็งทั้งหมดในน้ำสลัดจ์ได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกจากการมีค่าปริมาณคาอัลคาลินิตี้ที่สูง ซึ่งพบว่าปริมาณอัลคาลินิตี้ที่สูงมีผลกระทบต่อปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ทำให้มีผลต่อค่าเวลาในการก่อตัวและค่ากำลังอัด [16 - 18] มีผลต่อการแตกตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต [19] ตลอดจนทำให้เกิดการแตกตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต [18] ส่วนที่สองคือจากลักษณะของอนุภาคในน้ำสลัดจ์ที่มีขนาดเล็ก มีลักษณะที่พรุนทำให้สามารถดูดซับน้ำไว้มีผลต่อปริมาณการใช้น้ำ [13] และจากการที่อนุภาคบางส่วนยังสามารถทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้ ทำให้ปริมาณน้ำสำหรับทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ลดลง



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดกับค่ากำลังอัดเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดกับค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด
กับค่าระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม

4.3 ผลการทดสอบคอนกรีตผสมโดยใช้น้ำสลัดจ์

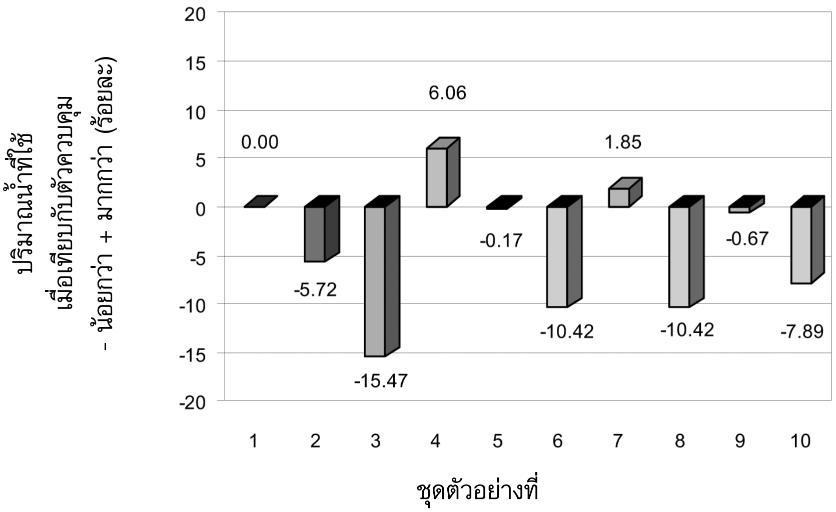
อนุภาคที่มีขนาดเล็กและปริมาณอัลคาลินิตี้ที่สูงในน้ำสลัดจ์ย่อมมีผลต่อพฤติกรรมคอนกรีตที่ผสม ค่าความเข้มข้นของน้ำสลัดจ์ในรูปปริมาณค่าของแข็งทั้งหมดที่เลือกจากการทดสอบในหัวข้อที่ผ่านมาก็เป็นค่าที่มีผลกระทบต่อตัวอย่างทดสอบในระดับหนึ่งที่มีข้อกำหนดแนะนำว่าพอยอมรับได้ หัวข้อนี้จะอธิบายถึงผลจากการใช้น้ำสลัดจ์ที่ความเข้มข้นดังกล่าวเป็นน้ำผสมคอนกรีต โดยเฉพาะผลกระทบต่อประสิทธิภาพของสารผสมเพิ่ม

หลังจากน้ำสลัดจ์ถูกผสมให้ได้ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่เลือกไว้คือช่วงค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 5 ถึง 6 มีการควบคุมคุณภาพโดยการทดสอบหาค่าเวลาในการก่อตัวและค่ากำลังอัดที่อายุ 1 วัน ก่อนนำไปผสมคอนกรีต การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตใช้เงื่อนไขตามข้อมูลที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.2.3 จำนวนชุดการทดสอบคอนกรีตมีทั้งหมด 10 ชุด หมายเลขของชุดทดสอบใช้ตามตารางที่ 1 โดยมีชุดที่ 1 เป็นชุดตัวอย่างควบคุม ซึ่งเป็นชุดตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้น้ำประปาไม่มีสารผสมเพิ่ม ชุดที่ 2 และ 3 เป็นชุดตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้น้ำประปาและสารผสมเพิ่มคือ เถ้าลอยและสารลดน้ำอย่างแรง ตามลำดับ ชุดที่ 4 เป็นชุดตัวอย่างที่ผสมโดยน้ำสลัดจ์ ชุดที่ 5 ถึง 10 เป็นชุดตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้น้ำสลัดจ์และสารผสมเพิ่มที่ซ้ำกัน 3 ชุด โดยแต่ละชุดมีระยะเวลาการผสมห่างกัน 1 เดือน ผลการทดสอบมีดังนี้

4.4 ปริมาณน้ำที่ต้องการของคอนกรีต

ส่วนผสมคอนกรีตของชุดตัวอย่างทดสอบถูกควบคุมให้มีระดับค่าการยุบตัวที่ใกล้เคียงกันคือที่ 10 ± 2.5 ซม. ผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างทั้ง 10 ชุดมีค่าการยุบตัวอยู่ในช่วง 8.0 ถึง 9.3 ซม. ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมในแต่ละชุดทดสอบถูกนำมาเปรียบเทียบกับชุดตัวอย่างควบคุมเพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการลดปริมาณการใช้น้ำ ว่ามีผลเปลี่ยนแปลงอย่างไรเมื่อมีการใช้น้ำสลัดจ์มาผสมแทนน้ำประปา จากรูปที่ 8 แสดงถึงปริมาณน้ำ

ที่ใช้ในการผสมคอนกรีตให้อยู่ในช่วงค่าการยุบตัวที่กำหนดเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม พบว่าคอนกรีตชุดตัวอย่างที่ 4 ที่ไม่ใช้สารผสมเพิ่มและใช้น้ำสลัดจ์ผสมต้องใช้ปริมาณน้ำที่มากขึ้นร้อยละ 6.06 เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม ส่วนในชุดตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมพบว่า ชุดตัวอย่างที่ 2 ที่ผสมโดยใช้น้ำประปาใช้ปริมาณน้ำในส่วนผสมน้อยกว่าร้อยละ 5.72 แต่เมื่อผสมโดยใช้น้ำสลัดจ์ในชุดตัวอย่างที่ 5, 7 และ 9 พบว่าใช้ปริมาณน้ำในส่วนผสมใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม โดยมีตัวอย่างที่ 7 ใช้ปริมาณน้ำที่มากกว่าตัวอย่างควบคุมร้อยละ 1.85



รูปที่ 8 ร้อยละของปริมาณน้ำที่ใช้เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม

สำหรับชุดตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำอย่างแรงเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมพบว่า ชุดตัวอย่างที่ 3 ที่ผสมโดยใช้น้ำประปา ใช้ปริมาณน้ำผสมลดลงไปถึงร้อยละ 15.47 ซึ่งผ่านเกณฑ์ของมาตรฐาน ASTM C494 ชนิด F ที่กำหนดไว้ แต่เมื่อผสมโดยใช้น้ำสลัดจ์ในชุดตัวอย่างที่ 6, 8 และ 10 พบว่าปริมาณน้ำในส่วนผสมน้อยกว่าตัวอย่างควบคุมอยู่ในช่วงร้อยละ 7.89 ถึง 10.42 จากผลทดสอบที่ได้แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการช่วยให้คอนกรีตไหลลื่นของเถ้าลอยและประสิทธิภาพของสารลดน้ำอย่างแรงลดลงเมื่อใช้น้ำสลัดจ์ผสมคอนกรีต แต่พบว่าการใช้สารผสมเพิ่มช่วยให้คอนกรีตที่ผสมโดยใช้น้ำสลัดจ์ใช้ปริมาณน้ำในการผสมใกล้เคียงหรือน้อยกว่าตัวอย่างควบคุมและน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้น้ำสลัดจ์ผสมอย่างเดียว

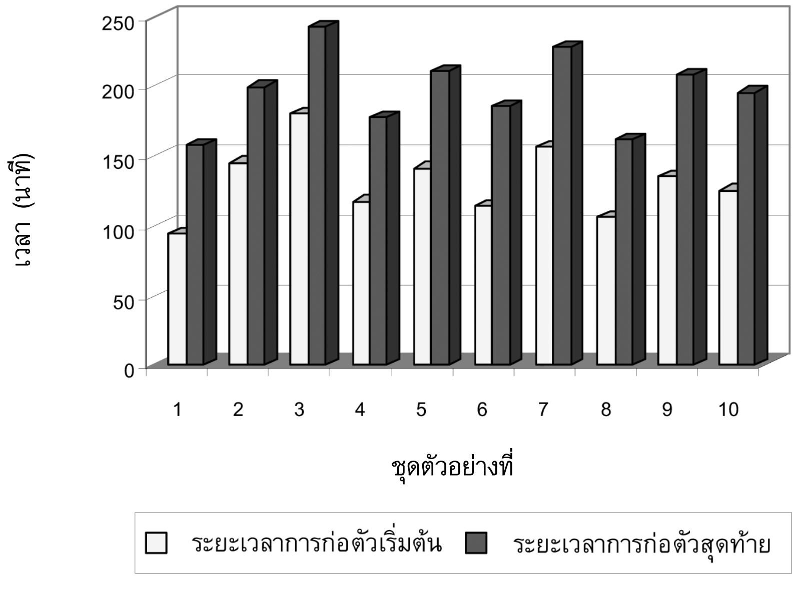
4.5 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

รายละเอียดของระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตทั้ง 10 ชุด แสดงได้ดังรูปที่ 9 พบว่าชุดตัวอย่างที่ 4 ที่ผสมโดยใช้น้ำสลัดจ์มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายที่มากกว่าตัวอย่างควบคุมประมาณ 20 นาที ส่วนในชุดตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยพบว่า ชุดตัวอย่างที่ 2 ที่ผสมโดยใช้น้ำประปามีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นมากกว่า 51 นาที และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายที่มากกว่า 42 นาที เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม ส่วนชุดตัวอย่างที่ 5, 7 และ 9 ที่ผสมโดยใช้น้ำสลัดจ์พบว่ามีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นมากกว่าอยู่

ในช่วง 41 ถึง 62 นาที ส่วนระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายมากกว่าอยู่ในช่วง 51 ถึง 71 นาที เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม โดยตัวอย่างที่ 7 ที่ใช้ปริมาณน้ำมากกว่าตัวอย่างควบคุมร้อยละ 1.85 มีระยะเวลาการก่อตัวที่มากที่สุด

สำหรับชุดตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำอย่างแรงเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมพบว่า ชุดตัวอย่างที่ 3 ที่ผสมโดยใช้น้ำประปามีค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นมากกว่า 86 นาที และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายที่มากกว่า 85 นาที ซึ่งผ่านเกณฑ์ของมาตรฐาน ASTM C494 ชนิด F ที่กำหนดไว้ แต่เมื่อผสมโดยใช้น้ำสลัดจ์ในชุดตัวอย่างที่ 6, 8 และ 10 พบว่าค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นมากกว่าอยู่ในช่วง 12 ถึง 31 นาที และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายมากกว่าอยู่ในช่วง 4 ถึง 38 นาที จากผลทดสอบพบว่าปริมาณน้ำในส่วนผสมมีผลต่อค่าระยะเวลาการก่อตัวในชุดตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่ใช้สารผสมเพิ่มและชุดตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย โดยในชุดตัวอย่างที่ใช้น้ำสลัดจ์ผสมใช้ปริมาณน้ำมากกว่าที่ผสมโดยใช้น้ำประปาทำให้มีระยะเวลาการก่อตัวนานขึ้น

ผลการทดสอบของชุดตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำอย่างแรงแตกต่างไปจากคอนกรีต 2 ชุดแรก ระยะเวลาการก่อตัวที่มากกว่าตัวอย่างควบคุมเป็นผลจากการใช้สารลดน้ำอย่างแรง ซึ่งเมื่อมีการใช้น้ำสลัดจ์ผสมคอนกรีต ผลการทดสอบที่ได้คล้ายกับการศึกษาถึงประสิทธิภาพในการลดปริมาณน้ำในหัวข้อที่ 4.4 คือประสิทธิภาพของสารลดน้ำอย่างแรงลดลงทำให้ระยะเวลาในการก่อตัวลดลง แต่พบว่าค่าเวลาที่ลดลงก็ยังไม่น้อยกว่าตัวอย่างคอนกรีตควบคุม



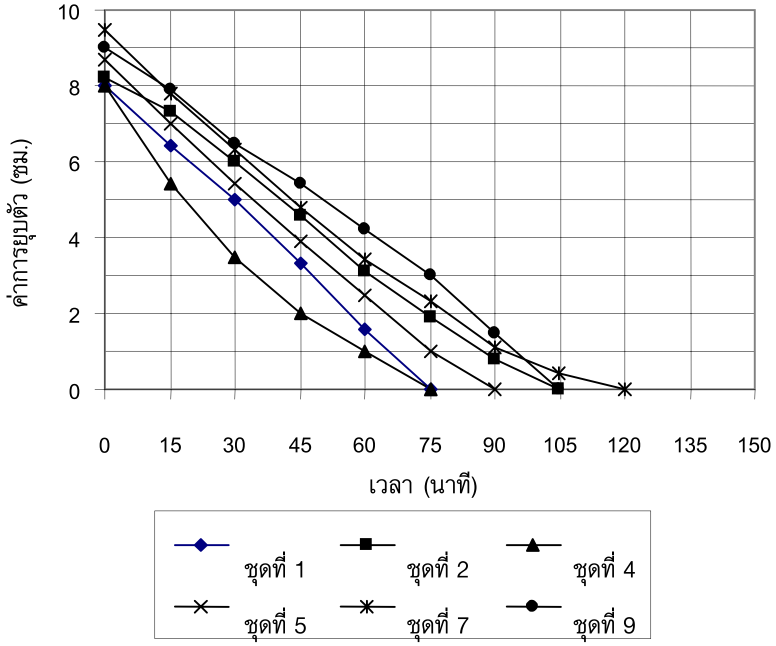
รูปที่ 9 ระยะเวลาการก่อตัวของชุดตัวอย่างคอนกรีต

4.6 ค่าสูญเสียการยุบตัวของคอนกรีต

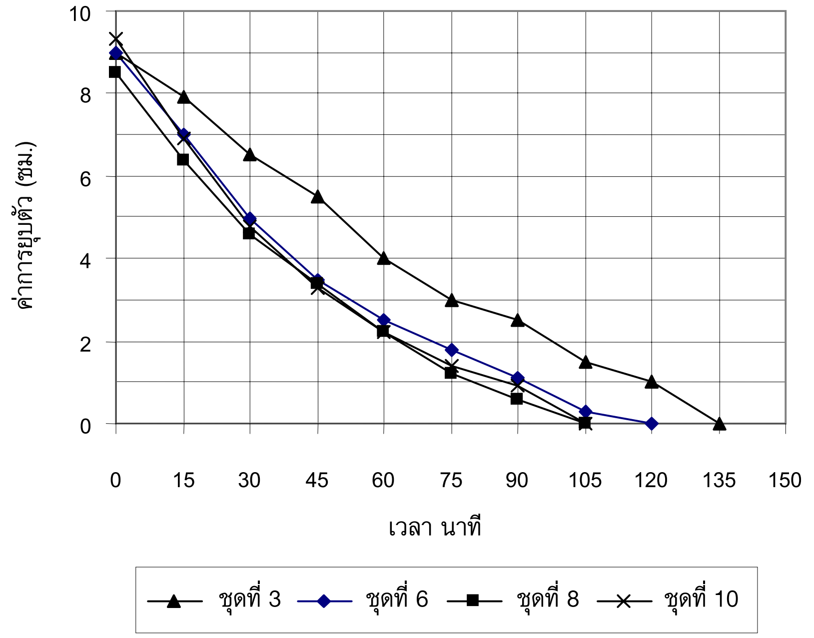
จากข้อมูลที่แสดงในรูปที่ 10 เมื่อเปรียบเทียบในส่วนของคอนกรีตที่ไม่ใช้สารผสมเพิ่มระหว่างตัวอย่างควบคุมชุดที่ 1 ที่ใช้น้ำประปาผสมกับชุดตัวอย่างที่ 4 ที่ผสมโดยใช้น้ำสลัดจ์ พบว่ามีค่าสูญเสียการยุบตัวเร็วขึ้น ส่วนชุดตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม พบว่าชุดตัวอย่างที่ 2 ที่ใช้

น้ำประปาผสมและชุดตัวอย่างที่ 5, 7 และ 9 ที่ใช้น้ำสลัดจ์ผสมมีค่าระยะเวลาการสูญเสียการยุบตัวที่นานกว่าตัวอย่างควบคุม โดยเมื่อเทียบในกลุ่มของชุดตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยพบว่าการใช้น้ำสลัดจ์ผสมคอนกรีตมีผลกระทบต่อค่าสูญเสียการยุบตัวไม่มากนัก สังเกตได้จากลักษณะความชันของค่าสูญเสียการยุบตัวที่ใกล้เคียงกันและระยะเวลาที่ค่าการยุบตัวมีค่าเท่ากับศูนย์ก็อยู่ในช่วงเวลาที่ใกล้เคียงกัน

สำหรับผลการทดสอบของชุดตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำอย่างแรงแสดงได้ดังรูปที่ 11 พบว่าชุดตัวอย่างที่ 3 ที่ผสมโดยใช้น้ำประปามีระยะเวลาสูญเสียการยุบตัวของคอนกรีตที่นานกว่าตัวอย่างควบคุมถึง 60 นาที ส่วนชุดตัวอย่างที่ 6, 8 และ 10 ที่ผสมโดยใช้น้ำสลัดจ์มีระยะเวลาสูญเสียการยุบตัวที่นานกว่าตัวอย่างควบคุมอยู่ในช่วง 30 ถึง 45 นาที เมื่อเปรียบเทียบในกลุ่มของชุดตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำอย่างแรงด้วยกัน พบว่าการใช้น้ำสลัดจ์ผสมคอนกรีตมีผลกระทบต่อค่าสูญเสียการยุบตัวอย่างชัดเจน สังเกตจากลักษณะความชันของค่าสูญเสียการยุบตัวที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะช่วงเวลาเริ่มต้น 30 นาทีแรก โดยที่ค่าระยะเวลาที่ค่าการยุบตัวมีค่าเท่ากับศูนย์น้อยกว่าอยู่ในช่วง 15 ถึง 30 นาที



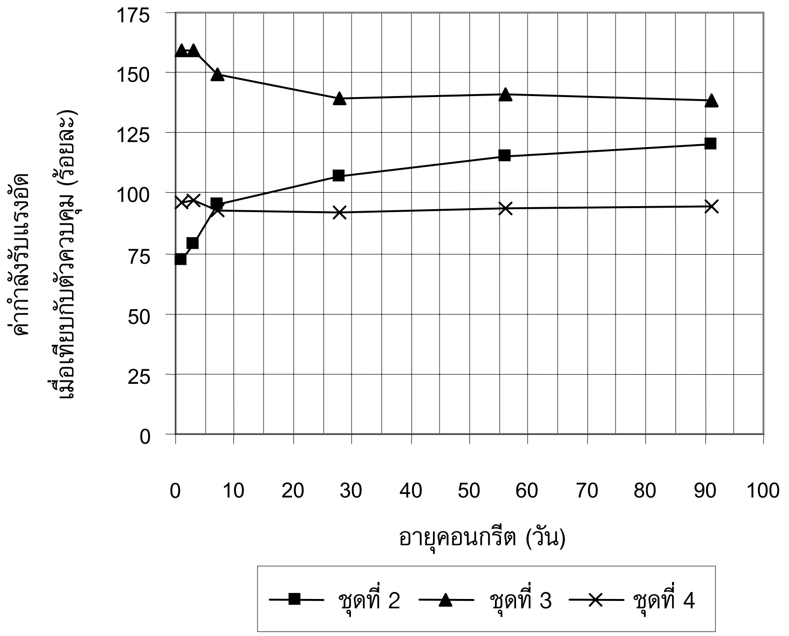
รูปที่ 10 ค่าสูญเสียการยุบตัวของตัวอย่างคอนกรีต (1)



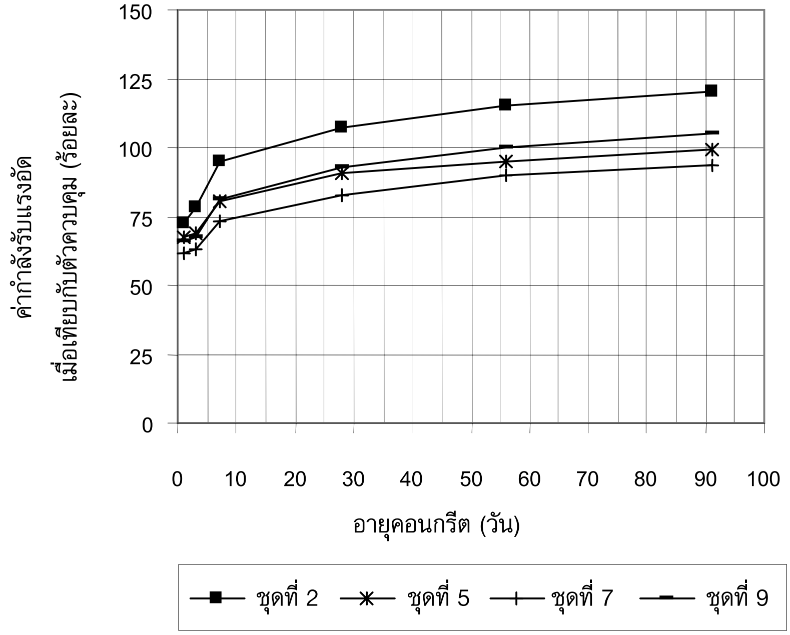
รูปที่ 11 ค่าสูญเสียการยุบตัวของตัวอย่างคอนกรีต (2)

4.7 ค่ากำลังอัดของคอนกรีต

จากผลการทดสอบที่แสดงดังรูปที่ 12 พบว่าการใช้สารผสมเพิ่มทำให้สามารถลดปริมาณน้ำในส่วนผสมลงได้ มีผลให้ค่ากำลังอัดของชุดตัวอย่างที่ 2 และ 3 สูงกว่าตัวอย่างควบคุม ส่วนตัวอย่างที่ 4 ที่ไม่ได้ใช้สารผสมเพิ่มและใช้น้ำสลัดจ์ผสมพบว่า การที่ใช้ปริมาณน้ำในส่วนผสมมากขึ้นทำให้ค่ากำลังอัดที่ได้มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 92 ถึง 96 ของตัวอย่างควบคุม ผลการทดสอบเทียบกับตัวอย่างควบคุมของชุดตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยสามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 13 พบว่าชุดตัวอย่างที่ 2 ที่ใช้น้ำประปาผสมมีค่ากำลังอัดในช่วงต้นที่ต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม ซึ่งก็เป็นลักษณะปกติของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ต้องใช้ระยะเวลาในการพัฒนากำลัง โดยที่อายุคอนกรีตที่ 91 วันมีค่ากำลังอัดที่สูงกว่าตัวอย่างควบคุมประมาณร้อยละ 120 ส่วนชุดตัวอย่างที่ 5, 7 และ 9 ที่ผสมโดยใช้น้ำสลัดจ์พบว่ามีค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม โดยคอนกรีตที่อายุ 91 วันมีค่ากำลังอัดอยู่ในช่วงร้อยละ 94 ถึง 105 ของตัวอย่างควบคุม จากการเปรียบเทียบในส่วนของคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยพบว่าค่ากำลังอัดลดลงไปประมาณร้อยละ 10 ถึง 17 เมื่อใช้น้ำสลัดจ์ผสมแทนการใช้น้ำประปา

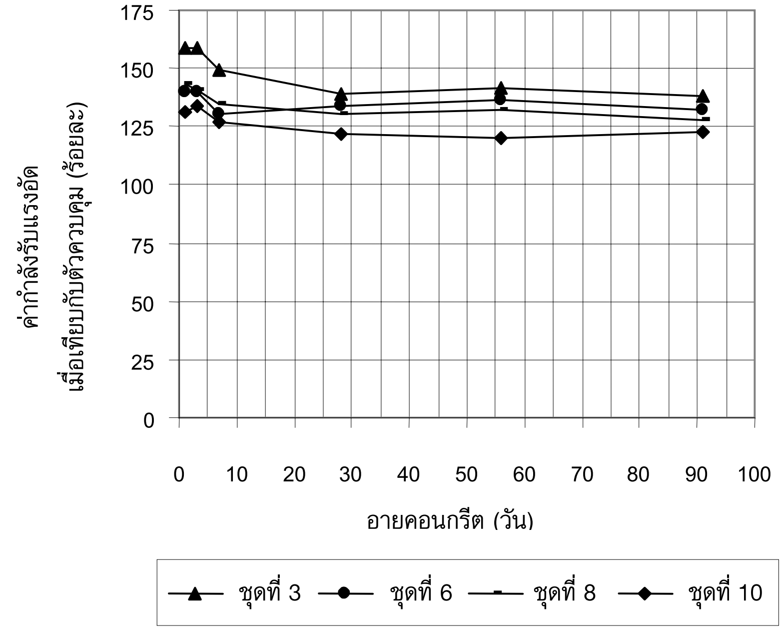


รูปที่ 12 ร้อยละของค่ากำลังอัดเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม ของตัวอย่างคอนกรีตชุดที่ 2 ถึง 4



รูปที่ 13 ร้อยละของค่ากำลังอัดเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม ของตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

ผลของการทดสอบของชุดตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำอย่างแรงเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 14 พบว่าชุดตัวอย่างที่ 3 ที่ใช้น้ำประปาผสมมีค่ากำลังอัดที่สูงกว่าตัวอย่างควบคุมและผ่านเกณฑ์กำหนดของมาตรฐาน ASTM C494 ชนิด F ส่วนชุดตัวอย่างที่ 6, 8 และ 10 ที่ผสมโดยใช้น้ำสลัดจ์มีค่ากำลังอัดที่สูงกว่าตัวอย่างควบคุม แต่เมื่อเทียบกับเกณฑ์ของมาตรฐาน ASTM C494 ชนิด F พบว่าชุดตัวอย่างที่ 10 ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ซึ่งจากการเปรียบเทียบในส่วนของคอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำอย่างแรง พบว่าค่ากำลังอัดลดลงไปประมาณร้อยละ 8 ถึง 13 เมื่อใช้น้ำสลัดจ์ผสมแทนน้ำประปา



รูปที่ 14 ร้อยละของค่ากำลังอัดเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารผสมเพิ่มชนิดสารลดน้ำอย่างแรง

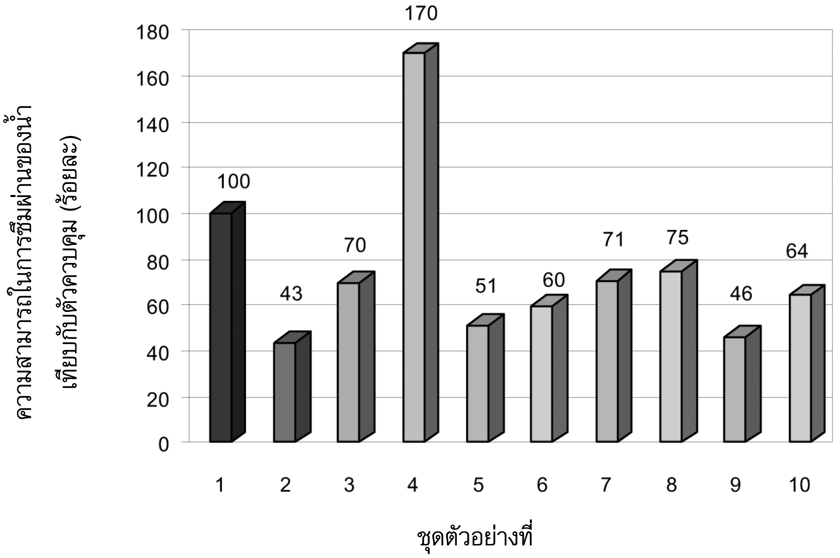
4.8 ค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ของน้ำในคอนกรีต

การทดสอบหาค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำใช้หลักการของ Darcy โดยก้อนตัวอย่างถูกทำการอัดน้ำเข้าไปภายใต้ความดันคงที่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลการทดสอบของแต่ละชุดตัวอย่างเทียบกับตัวอย่างควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 14 พบว่าชุดตัวอย่างที่ 4 ที่ไม่ใช้สารผสมเพิ่มและใช้น้ำสลัดจ์ผสมมีค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำสูงกว่าตัวอย่างควบคุม ส่วนตัวอย่างอื่นๆ มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม ในส่วนของชุดตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย พบว่าชุดตัวอย่างที่ 2 ที่ใช้น้ำประปาผสมมีค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำต่ำที่สุด ส่วนชุดตัวอย่างที่ 5, 7 และ 9 ที่ใช้น้ำสลัดจ์ผสมมีค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำที่ต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม แต่สูงกว่าชุดตัวอย่างที่ 2 อยู่ในช่วงร้อยละ 7 ถึง 65

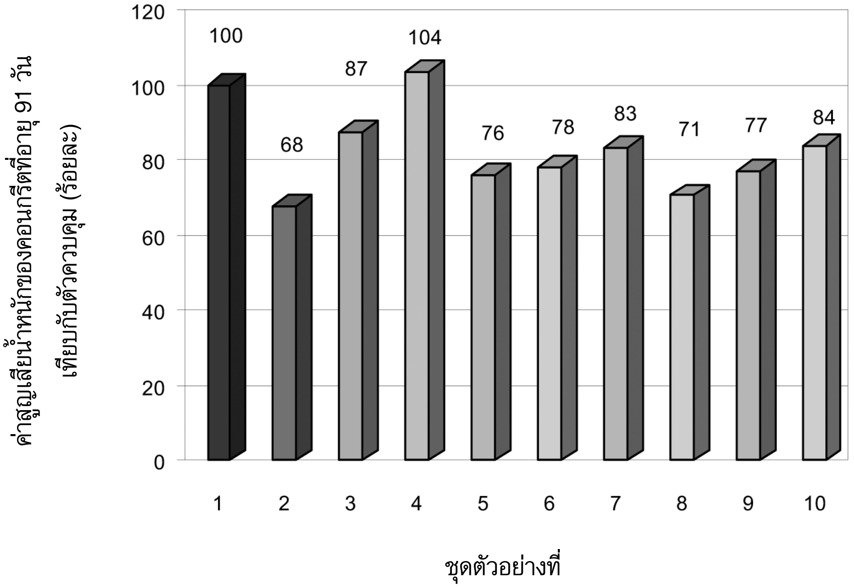
ส่วนชุดตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำอย่างแรงพบว่าทั้งชุดตัวอย่างที่ใช้น้ำประปาและน้ำสลัดจ์มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม โดยพบว่าชุดตัวอย่างที่ 6, 8 และ 10 ที่ใช้น้ำสลัดจ์ผสมมีค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำอยู่ช่วงร้อยละ 86 ถึง 106 ของตัวอย่างที่ 3 ที่ใช้น้ำประปาผสม จากผลการทดสอบที่ได้พบว่าปริมาณน้ำในส่วนผสมมีผลต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำและขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็กในน้ำสลัดจ์มีส่วนช่วยในการลดช่องว่างโพรงภายในได้ (Filler effect)

4.9 ผลทดสอบค่าความทนทานต่อกรดของคอนกรีต

ผลการทดสอบค่าสูญเสียน้ำหนักเมื่อแช่ในสารละลายกรดซัลฟุริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักที่อายุ 91 วัน เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 15 จากผลการทดสอบพบว่าชุดตัวอย่างที่ 4 ที่ไม่ใช้สารผสมเพิ่มและผสมโดยใช้น้ำสลัดจ์มีค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าตัวอย่างควบคุมประมาณร้อยละ 4 ส่วนตัวอย่างอื่นๆ มีค่าการสูญเสียน้ำหนักที่ต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม ในส่วนของชุดตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยพบว่าชุดตัวอย่างที่ 2 ที่ใช้น้ำประปาผสมมีค่าการสูญเสียน้ำหนักต่ำที่สุด ส่วนชุดตัวอย่างที่ 5, 7 และ 9 ที่ผสมโดยใช้น้ำสลัดจ์มีค่าการสูญเสียน้ำหนักที่ต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม แต่สูงกว่าชุดตัวอย่างที่ 2 อยู่ในช่วงร้อยละ 12 ถึง 23 ส่วนชุดตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำอย่างแรงพบว่า ทั้งชุดตัวอย่างที่ใช้น้ำประปาและน้ำสลัดจ์มีค่าการสูญเสียน้ำหนักต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม โดยที่ตัวอย่างที่ใช้น้ำสลัดจ์ผสมคือชุดตัวอย่างที่ 6, 8 และ 10 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักอยู่ช่วงร้อยละ 81 ถึง 96 ของตัวอย่างที่ 3 ที่ใช้น้ำประปาผสม ผลการทดสอบที่ได้คล้ายกับผลการทดสอบค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ ซึ่งพบว่าการใช้น้ำสลัดจ์ผสมและใช้สารผสมเพิ่มร่วมด้วยทำให้สมบัติการทนกรดซัลฟุริกดีขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้น้ำประปาและน้ำสลัดจ์อย่างเดียว



รูปที่ 15 ร้อยละของความสามารถในการซึมผ่านของน้ำที่อายุ 28 วัน เทียบกับตัวอย่างควบคุม



รูปที่ 16 ร้อยละของค่าสูญเสียน้ำหนักเมื่อแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริก ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่อายุ 91 วัน เทียบกับตัวอย่างควบคุม

5. สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาสามารถสรุปผลการทดสอบเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

5.1 น้ำสลัดจ์มีค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณอัลคาลินิตี้ ความถ่วงจำเพาะ และค่าความเป็นกรดด่าง (pH) สูงกว่าน้ำประปา เมื่อเทียบกับเกณฑ์กำหนดของมาตรฐาน ASTM C94 พบว่าน้ำสลัดจ์มีค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดสูงกว่าเกณฑ์กำหนด

5.2 ผงสลัดจ์ประกอบไปด้วยผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและอนุภาคเล็กๆ มีค่าสูญเสียการเผาไหม้ที่สูงกว่าปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1 และเถ้าลอย

5.3 การผสมคอนกรีตโดยใช้น้ำสลัดจ์ต้องใช้ปริมาณน้ำในส่วนผสมมากขึ้น น้ำสลัดจ์มีผลทำให้ประสิทธิภาพในการช่วยให้คอนกรีตไหลลื่นของเถ้าลอยและประสิทธิภาพของสารลดน้ำอย่างแรงลดลง การใช้น้ำสลัดจ์ผสมคอนกรีตที่ไม่ใช้สารผสมเพิ่มและคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย มีผลทำให้มีระยะเวลาการก่อตัวที่นานขึ้น โดยมีผลกระทบต่อค่าสูญเสียการยุบตัวไม่มากนัก สำหรับคอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำอย่างแรง การใช้น้ำสลัดจ์ทำให้ค่าระยะเวลาการก่อตัวและค่าสูญเสียการยุบตัวลดลงอย่างชัดเจน

5.4 ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้น้ำสลัดจ์ผสมมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมโดยน้ำประปา โดยค่ากำลังอัดลดลงไปประมาณร้อยละ 4 ถึง 8 สำหรับคอนกรีตที่ไม่ได้ใช้สารผสมเพิ่ม ส่วนคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยค่ากำลังอัดลดลงไปประมาณร้อยละ 10 ถึง 17 และคอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำอย่างแรงค่ากำลังอัดลดลงไปประมาณร้อยละ 8 ถึง 13

5.5 จากผลการทดสอบค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำและค่าสูญเสียน้ำหนักเมื่อแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริกพบว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้สารผสมเพิ่มและใช้น้ำสลัดจ์ผสมมีค่าผลทดสอบด้อยกว่าตัวอย่างควบคุม ส่วนคอนกรีตที่ใช้สารผสมเพิ่มร่วมกับน้ำสลัดจ์มีค่าผลทดสอบที่ดีกว่าตัวอย่างควบคุม

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณผู้ที่ให้การสนับสนุนดังมีรายนามต่อไปนี้ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) เจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องทุกท่าน และฝ่ายอุตสาหกรรมคือ บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่เข้าร่วมโครงการและร่วมให้ทุนสนับสนุนทุนวิจัยภายใต้สัญญาเลขที่ RDG4750011 และขอขอบคุณศูนย์อุตสาหกรรมอิตาเลียน-ไทย สำหรับความช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

1. Japanese Standards Association, 1993, "JIS A5308 Raedy-Mixed Concrete", Japan.

2. Chini S.A. and Mbwambo W., 1996, "Environmentally Friendly Solutions for the Disposal of Concrete Wash Water from Ready-Mixed Concrete Operations", *CIB Beijing Conference.*

3. ASTM Committee, 1995, "ASTM C33 Standard Specification for Concrete Aggregates", *Annual Book of ASTM Standard,* Vol. 4.01, Philadelphia.

4. ASTM Committee, 1995, "ASTM C494 Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete", *Annual Book of ASTM Standard,* Vol. 4.02, Philadelphia.

5. ASTM Committee, 1995, "ASTM C94 Standard Specification for Ready-Mixed Concrete", *Annual Book of ASTM Standard,* Vol. 4.01, Philadelphia.

6. ASTM Committee, 1995, "ASTM C109 Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in or 50-mm Cube Specimens)", *Annual Book of ASTM Standard,* Vol. 4.01, Philadelphia.

7. ASTM Committee, 1995, "ASTM C191 Test Method for Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle", *Annual Book of ASTM Standard,* Vol. 4.01, Philadelphia.

8. ASTM Committee, 1995, "ASTM C143 Test Method for Slump of Standard Specification for Hydraulic Cement Concrete", *Annual Book of ASTM Standard,* Vol. 4.02, Philadelphia.

9. ASTM Committee, 1995, "ASTM C403 Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance", *Annual Book of ASTM Standard,* Vol. 4.02, Philadelphia.

10. ASTM Committee, 1995, "ASTM C39 Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens", *Annual Book of ASTM Standard,* Vol. 4.02, Philadelphia.

11. Japanese Standards Association, 1977, "JIS A1404 Method of Test for Waterproof Agent of Cement for Concrete Construction", Japan.

12. Kosmatka, S., Kerkhoff, B., and Panarese, W., 2002, *Design and Control of Concrete Mixtures,* Portland Cement Association, 14th Edition.

13. ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2544, *คอนกรีตเทคโนโลยี,* พิมพ์ครั้งที่ 9, กรุงเทพมหานคร.

14. ธนวัฒน์ นุกูลการ, 2547, การควบคุมคุณภาพของเถ้าลอยโรงไฟฟ้าแม่เมาะ, *การนำเถ้าถ่านหินในประเทศไทยมาใช้ในงานคอนกรีต ครั้งที่ 2,* มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

15. บุรฉัตร ฉัตรวีระ และคณะ, 2542, คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ผสมน้ำล้างโม่ในโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ. *การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 5,* พัทยา, จ.ชลบุรี.

16. Harold H. Steinour, 1960, “Concrete Mix Water-How Impure Can It Be?”. *Research Department Bulletin 119,* Portland Cement Association.

17. Maria C., Garci Juenger, and Hamlin M. Jennings, 2001, “Effects of High Alkalinity on Cement Pastes”. *ACI Materials Journal,* No. 98-M28, pp. 251-255.

18. Martinez-Ramirez S. and Palomo A., 2001, “OPC Hydration with Highly Alkaline Solutions”. *Advances in Cement Research,* Vol. 13, No. 3, pp. 123-129.

19. Greenberg S.A. and Copeland L.E., 1960, “The Thermodynamic Functions for the Solution of Calcium Hydroxide in Water”, *Research Department Bulletin 116,* Portland Cement Association.