



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การนำน้ำเสาะจากโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จมาใช้ผสมคอนกรีต”

โดย รองศาสตราจารย์ ดร. บุรฉัตร ฉัตรวีระ และคณะ

พฤษภาคม พ.ศ. 2547

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การนำน้ำเสียจากโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จมาใช้ผสมคอนกรีต”

คณะผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. บุรฉัตร ฉัตรวีระ

ประกาศิต โสไกร

ณรงค์ศักดิ์ มากุล

สังกัด

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ชุดโครงการ สนับสนุนผู้ปฏิบัติการวิจัยในภาคอุตสาหกรรม (IRAS)

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานผลการวิจัยเป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

Executive Summary

ในอดีตรววิธีการกำจัดกากคอนกรีต (Concrete Waste) และน้ำสลัดจ์ (Sludge Water) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการล้างโม้ของรถขนส่งคอนกรีตของโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จจะใช้วิธีการขนออกไปกำจัดทิ้งภายนอกโรงงาน โดยผ่านบริษัทที่รับดำเนินการกำจัดทั่วไปและนำไปใช้ถมที่ซึ่งไม่ก่อให้เกิดประโยชน์เท่าที่ควร แต่กลับจะก่อให้เกิดปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคต อันเนื่องมาจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีในปูนซีเมนต์ที่เกิดขึ้นและสะสมอยู่ในผลของเสียดังกล่าว แต่กระนั้นสำหรับของเสียในหลายๆ ชนิด สามารถนำกลับมาใช้งานได้หากมีวิธีการจัดการที่เหมาะสม อาทิเช่น ถ้าวางจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง เป็นต้น ดังนั้นจึงได้เกิดทางเลือกใหม่ในการนำน้ำสลัดจ์ที่เหลือทิ้งในบ่อกลับมาสร้างมูลค่าเพิ่ม (Value Added) มากกว่าการกำจัดทิ้ง โดยนำมาใช้ในการผสมคอนกรีตใหม่ ประกอบกฎหมายที่เกี่ยวกับการจัดการของเสียจากโรงงานและราคาน้ำประปาที่เพิ่มขึ้น (โดยเฉลี่ยมีราคา 16 บาทต่อลูกบาศก์เมตร) จึงยังเป็นการส่งเสริมให้มีการใช้ของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตในโรงงานอย่างคุ้มค่า ทั้งแต่ในปัจจุบันยังขาดการศึกษาวิจัยอย่างชัดเจนในการนำน้ำดังกล่าวมาใช้งาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาถึงผลที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตเมื่อนำน้ำสลัดจ์จากโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จมาผสมคอนกรีตโดยการแทนที่ในน้ำผสมคอนกรีตปกติ อันจะเป็นแนวทางในการใช้น้ำสลัดจ์ในงานคอนกรีตต่อไป โดยจากผลการศึกษาเมื่อพิจารณาจากมาตรฐานของน้ำที่สามารถนำมาใช้ผสมคอนกรีต พบว่าสามารถนำน้ำสลัดจ์จากโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จมาใช้แทนที่ในน้ำประปาโดยน้ำหนักได้ถึงร้อยละ 30 โดยน้ำที่ใช้ผสม (น้ำสลัดจ์และน้ำประปา) จะต้องมีปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solids) ไม่เกิน 15,900 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l)

จากผลการศึกษาดังกล่าวทำให้ทางบริษัทผู้ผลิตคอนกรีตผสมเสร็จสามารถนำน้ำสลัดจ์กลับมาใช้ผสมคอนกรีตได้ นอกเหนือจากการใช้น้ำประปาเพียงอย่างเดียวและสามารถกำจัดน้ำสลัดจ์ที่เกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นการลดค่ากำจัดลงได้อีกทางหนึ่ง นอกจากนั้นยังเป็นแรงผลักดันให้มีการนำของเสียประเภทอื่นที่เกิดขึ้นในโรงงานผลิตให้หันกลับมาใช้ผสมคอนกรีตและเป็นแรงจูงใจให้โรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จอื่นๆ ที่เกิดปัญหาในลักษณะเดียวกันให้หันกลับมาใช้วิธีการกำจัดดังกล่าวซึ่งเป็นการส่งเสริมให้เกิดการแก้ปัญหาที่ยั่งยืนต่อไป

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์จากโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยคุณสมบัติที่ศึกษาได้แก่ คุณสมบัติพื้นฐานของผงตะกอนสลัดจ์ซึ่งผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส และน้ำสลัดจ์ คุณสมบัติของคอนกรีตในสภาพสดประกอบด้วย หน่วยน้ำหนัก ค่าการยุบตัวเริ่มต้นและการสูญเสียค่าการยุบตัว ระยะเวลาการก่อตัว อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น คุณสมบัติเชิงกลได้แก่ กำลังรับแรงอัด แรงดึงแบบผ่าซีก แรงดัด และโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน นอกจากนี้คุณสมบัติด้านความทนทานได้แก่ การหดตัวแบบแห้งและความทนทานต่อการกระทำจากกรดซัลฟูริกและไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบคือ ปริมาณการแทนที่น้ำสลัดจ์ในน้ำประปาที่ร้อยละ 0 (น้ำประปา), 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5, 0.6 และ 0.7 และอัตราส่วนปริมาตรเปสต์ต่อปริมาตรระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.2, 1.4 และ 1.6 ตามลำดับ

จากการทดสอบ พบว่าน้ำสลัดจ์มีค่าเป็นกรดต่ำสูงถึง 12.2 และมีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 73,250 มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งสูงกว่ามาตรฐานของน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต (ASTM C 94) และมีปริมาณคลอไรด์และซัลเฟตต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนด สำหรับตะกอนสลัดจ์จะประกอบด้วยปูนซีเมนต์ทั้งที่ไม่ทำปฏิกิริยาและทำปฏิกิริยาแล้ว และเอ็ทพริงไคท์เป็นส่วนใหญ่แต่ไม่สามารถจัดอยู่ในประเภทของสารปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618 สำหรับคอนกรีตในสภาพสดพบว่า หน่วยน้ำหนักสดและความร้อนจากปฏิกิริยาของคอนกรีตไม่ได้รับผลกระทบจากน้ำสลัดจ์ นอกจากนี้ค่าการยุบตัวเริ่มต้นมีค่าลดลงและมีการสูญเสียค่าการยุบตัวเร็วขึ้นกว่าคอนกรีตปกติเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ของน้ำสลัดจ์ในน้ำประปาที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์มีค่าลดลง ในกรณีของคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์ประกอบด้วย กำลังรับแรงอัด แรงดึงแบบผ่าซีก แรงดัดและโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ของน้ำสลัดจ์ในน้ำประปา ส่วนการหดตัวแบบแห้งและสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการดซัลฟูริกและไฮโดรคลอริกของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น และจากข้อกำหนดมาตรฐานของน้ำที่สามารถนำมาใช้ผสมคอนกรีต สรุปว่าสามารถนำน้ำสลัดจ์จากโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จมาใช้แทนที่ในน้ำประปาโดยน้ำหนักได้ถึงร้อยละ 30 โดยน้ำที่ใช้ผสม (น้ำสลัดจ์และน้ำประปา) มีปริมาณของแข็งทั้งหมดไม่เกิน 15,900 มิลลิกรัมต่อลิตร

Abstract

The objective of this research was to study the properties of concrete containing sludge water from ready-mixed concrete plant. The properties tested were basic properties of sludge powder, which was dried at 110 ± 5 °C, and sludge water. Fresh concrete properties included unit weight, initial slump and slump loss, setting time, and temperature rise. Compressive, splitting tensile and flexural strengths, and modulus of elasticity at 28 days were investigated on mechanical properties. Furthermore, durability properties tested were drying shrinkage and sulfuric and hydrochloric acids attacks. Sulfuric and Hydrochloric acids solution were kept constantly at a concentration of 5 wt.%. The main parameters varied in this test were the percentage replacements of sludge water in tap water (0 (tap water), 10, 20, and 30 %) by weight, water to cement ratios (0.5, 0.6, and 0.7), and the ratios of paste volume to minimum void volume of compacted aggregate in dry state (γ) (1.2, 1.4, and 1.6).

The test results showed that sludge water has a high alkalinity up to 12.2 (pH) and total solids content equal to 73,250 mg/l, which higher than the minimum specified value according to ASTM C 94 standards. Chloride and sulfate contents in sludge water have lower than the maximum specified quantity could be used mixed ready-mixed concrete whereas sludge powder consist of unhydrated and hydrated cement and ettringite ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) and could not be used as pozzolanic as specified by ASTM C 618 standards. Fresh concrete, unit weights and temperature rise, did not be affect by sludge water replacement. Furthermore, initial slump was decreased while slump loss was faster than the conventional concrete when the percentage replacements of sludge water in tap water were increased whereas setting time decreased. Compressive, splitting tensile and flexural strengths and modulus of elasticity at 28 days were decreased when the percentage replacements of sludge water increased whereas drying shrinkage and the weight loss due to sulfuric and hydrochloric acids attacks were increased. And, from the specification of water for mixing concrete, can be concluded that, sludge water can be used to replace in tap water up to 30 wt.%, which the total solids content of water (sludge water and tap water) has not more than 15,900 mg/l.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงด้วยดี คณะผู้วิจัยซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. บุรฉัตร นัตรวีระ และนายประกาศิต โสไกร ไคร์ขอขอบพระคุณผู้ให้การสนับสนุนดังรายนามต่อไปนี้ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยภายใต้สัญญาเลขที่ RGD4650032 โดยเฉพาะศาสตราจารย์ ดร. ปิยะวัติ บุญหลง (ผู้อำนวยการ สกว.) รองศาสตราจารย์ ดร. สุธีระ ประเสริฐสรรพ (ผู้อำนวยการสกว. ฝ่าย 5) คุณวิชากร จามิกร และคุณชนพงศ์ กลั่นอุทัย ผู้ประสานงานชุดโครงการสนับสนุนผู้ปฏิบัติการวิจัยในภาคอุตสาหกรรม (IRAS) และเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องทุกท่าน นอกจากนี้มีฝ่ายอุตสาหกรรมที่เข้าร่วมโครงการและให้การสนับสนุนเป็นอย่างดีตั้งแต่บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบหาค่าประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของตะกอนสลัดจ์และปูนซีเมนต์ในการวิจัย รวมทั้งภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดสอบ

ท้ายสุดทางคณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้มีส่วนช่วยอื่นๆ ที่ทำให้งานวิจัยครั้งนี้เดินเข้ามาโดยตลอดจนประสบความสำเร็จทุกท่าน หากมีท่านใดที่ไม่ได้เอ่ยนามไว้ ณ ที่นี้ ต้องกราบขออภัยเป็นอย่างสูง

บุรฉัตร นัตรวีระ
ประกาศิต โสไกร
ณรงค์ศักดิ์ มากุล
พฤษภาคม 2547

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

สรุปโครงการวิจัยฝ่ายอุตสาหกรรม (ฝ่าย 5)

สัญญาเลขที่ RDG4650032

ชื่อโครงการ การนำน้ำสลัดจ๊ากโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จมาใช้ผสมคอนกรีต

หัวหน้าโครงการ รองศาสตราจารย์ ดร. บุรฉัตร ฉัตรวิระ **สถาบัน** มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

โทรศัพท์ : 0-25643001-9 ต่อ 3105 **โทรสาร** : 0-2564-3010

E-mail address: cburacha@engr.tu.ac.th

ความสำคัญ / ความเป็นมา

คอนกรีตผสมเสร็จ (Ready-mixed Concrete) เป็นวัสดุที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างกันอย่างมากแต่ในอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จนั้นจะมีของเสียประเภทน้ำทิ้งที่เกิดจากการล้างวัสดุและล้างไม้ของรถบรรทุกคอนกรีต ซึ่งน้ำทิ้งดังกล่าวเมื่อมีปริมาณมากขึ้นโรงงานจะต้องกำจัดออกด้วยการขนไปทิ้งซึ่งปกติจะนำไปถมที่ (Landfill) ซึ่งไม่ก่อให้เกิดประโยชน์เท่าที่ควร แต่กลับจะก่อให้เกิดปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก เนื่องจากสารเคมีที่สะสมอยู่ในของเสียเหล่านั้น ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดเรื่องของการนำน้ำสลัดจ๊ากที่เหลือทิ้งในปอกกลับมาใช้ให้เกิดมูลค่ามากกว่านอกจากการกำจัดทิ้งโดยนำมาใช้ในการผสมคอนกรีตใหม่อีกครั้ง ประกอบกฎหมายที่เกี่ยวกับการจัดการของเสียจากโรงงานได้เพิ่มบทบาทขึ้น จึงยังเป็นการส่งเสริมให้มีการใช้ของเสียที่เกิดขึ้นในโรงงานอย่างคุ้มค่า แต่ปัญหาที่พบคือปัจจุบันยังขาดการศึกษาวิจัยอย่างชัดเจนในการนำน้ำดังกล่าวมาใช้งาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาถึงผลที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตเมื่อนำน้ำสลัดจ๊ากจากโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จมาผสมคอนกรีตโดยการแทนที่ในน้ำผสมคอนกรีตปกติ อันจะเป็นแนวทางในการใช้น้ำสลัดจ๊ากในการผสมคอนกรีตปกติ สำหรับแนวคิดเบื้องต้นของการนำน้ำสลัดจ๊ากมาใช้งานจะต้องเป็นไปตามมาตรฐานของน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตซึ่งได้แก่ มาตรฐาน ว.ส.ท., ASTM C 94, BS 3148 และ AASHTO M 157 ผลที่ได้รับนอกเหนือที่สามารถลดต้นทุนในส่วนของการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จที่ใช้น้ำ

วัตถุประสงค์โครงการ

1. เพื่อนำน้ำสลัดซึ่งเป็นน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จกลับมาใช้ผสมคอนกรีต
2. พัฒนาบุคลากรวิจัยซึ่งเป็นนักศึกษาปริญญาโทให้มีทักษะและเข้าใจในการปฏิบัติงานงานวิจัยจริงในโรงงานอุตสาหกรรม

ผลที่ได้รับ	บรรลุมิตถุประสงค์ข้อที่	โดยทำให้
1. ทราบศักยภาพในการนำน้ำสลัดซึ่งเป็นน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จมาใช้ผสมคอนกรีต	1	1. สามารถหาปริมาณที่เหมาะสมของน้ำสลัดเพื่อนำมาใช้ในการผลิตคอนกรีต
2. ทราบคุณสมบัติทางกลและความคงทนของคอนกรีตผสมเสร็จที่ผสมด้วยน้ำสลัด	1	2. สามารถใช้น้ำสลัดเป็นวัตถุดิบในการผลิตคอนกรีตในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้คอนกรีตมีคุณสมบัติตามข้อกำหนด
3.สร้างบุคลากรวิจัยระดับปริญญาโทให้มีทักษะและเข้าใจในการปฏิบัติงานวิจัยจริง	2	3. มีบุคลากรวิจัยระดับปริญญาโท

การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

1. สามารถนำน้ำสลัด ซึ่งเป็นน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จกลับมาใช้ผสมคอนกรีต
2. สามารถลดปริมาณการใช้น้ำประปาโดยการแทนที่ด้วยน้ำสลัด
3. เป็นการรักษาสภาพสิ่งแวดล้อมโดยการนำน้ำสลัด ไปใช้ให้เกิดประโยชน์อื่นมากกว่าการนำไปถมที่ซึ่งอาจก่อให้เกิดสภาพแวดล้อมเป็นพิษเนื่องมาจากสารที่ตกค้าง
4. เพื่อเป็นการเผยแพร่และกระตุ้นให้โรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จอีกเป็นจำนวนมากหันกลับมาใช้ของเหลือทิ้งภายในโรงงานให้เกิดประโยชน์สูงสุด

การประชาสัมพันธ์

การประชาสัมพันธ์จะกระทำดังต่อไปนี้

1. จัดทำบทความเพื่อเผยแพร่การนำเสนอในการประชุมระดับประเทศอาทิเช่น การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ การประชุมคอนกรีตแห่งชาติ ซึ่งโดยปกติผู้เข้าร่วมประชุมส่วนใหญ่จะเป็นนักวิชาการ โดยเฉพาะกับบริษัทผลิตคอนกรีตผสมเสร็จที่สามารถกระตุ้นให้เกิดการนำน้ำสลัดจี้กลับมาใช้ผลิตคอนกรีต
2. จัดทำบทความเพื่อเผยแพร่ลงในวารสารทางด้านวิศวกรรมต่างๆ ไปเช่น วิศวกรรมสาร โยธาสาร เป็นต้น ซึ่งโดยปกติวารสารประเภทดังกล่าวจะมีผู้อ่านที่ เป็นผู้ประกอบการ วิศวกร นักศึกษา ช่างเทคนิคและผู้สนใจ จากหลายๆ สาขาวิชาที่อาจเกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์จากงานวิจัยนี้ อันอาจจะทำให้เกิดการทำวิจัยต่อยอดจากโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จที่กำลังมีปัญหาในขณะนี้

หมายเหตุ การเผยแพร่และประชาสัมพันธ์ใดๆ ของงานวิจัย จะอยู่ภายใต้ข้อกำหนดในสัญญาเลขที่ RDG4650032 ในส่วนของผลประโยชน์ที่ผู้ร่วมทุนทุกฝ่ายจะได้รับทุกกรณี

ตารางเปรียบเทียบกิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการ
ชื่อโครงการ “การนำน้ำสลัดจากโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จมาใช้ผสมคอนกรีต”

กิจกรรม (ตามแผน)	ผลที่คาดว่าจะได้รับ (ตามแผน)	ผลการดำเนินงาน	หมายเหตุ
ในช่วง 6 เดือน แรก (1 มิถุนายน พ.ศ. 2546 ถึง 30 พฤศจิกายน พ.ศ. 2546)			
1. จัดเตรียมวัสดุและศึกษากระบวนการผลิต 2. ส่งน้ำสลัดไปวิเคราะห์คุณสมบัติ 3. ทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตเบื้องต้น 4. ทดสอบคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต 5. ทดสอบคุณสมบัติด้านความทนทาน 6. วิเคราะห์ข้อมูล 7. ทำรายงานความก้าวหน้า	1. ผลการศึกษากระบวนการผลิต 2. ผลการทดสอบทางเคมีและทางกายภาพของน้ำสลัด 3. ได้คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตเบื้องต้น 4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลในระยะต้น 5. รายงานความก้าวหน้า	1. เตรียมน้ำสลัดและได้ผลการศึกษากระบวนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ 2. ได้ผลการทดสอบทางเคมีและทางกายภาพของน้ำสลัดและตะกอนสลัดจ์ 3. ได้คุณสมบัติเบื้องต้นและคุณสมบัติทางกลได้แก่กำลังรับแรงอัด แรงดึงและแรงดัดของคอนกรีตที่อายุ 180 วัน 4.หล่อตัวอย่างสำหรับทดสอบคุณสมบัติด้านความทนทานเรียบร้อยแล้วจะดำเนินการทดสอบในช่วง 6 เดือนหลัง 5. ได้วิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของคุณสมบัติของน้ำสลัดและตะกอนสลัดจ์ คุณสมบัติเบื้องต้นและคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต 6. เสนอรายงานความก้าวหน้า	

ตารางเปรียบเทียบกิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการ (ต่อ)
ชื่อโครงการ “การนำน้ำเสียจากโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จมาใช้ผสมคอนกรีต”

กิจกรรม (ตามแผน)	ผลที่คาดว่าจะได้รับ (ตามแผน)	ผลการดำเนินงาน	หมายเหตุ
ในช่วง 6 เดือนหลัง (1 ธันวาคม พ.ศ. 2546 ถึง 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2547)			
1. ทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต (ต่อ) 2. วิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบคอนกรีต 3. ทดสอบเพิ่มเติมเพื่อยืนยันผลการทดสอบที่ปรากฏ 4. ทดสอบคุณสมบัติที่ระยะยาว 5. รวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ผลเพื่อสรุปรายละเอียดทั้งหมด 6. ทำรายงานฉบับสมบูรณ์	1. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลและความทนทาน(ต่อเนื่อง) 2. ผลการวิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ(ต่อเนื่อง) 3. ผลการทดสอบทั้งหมด 4. ผลการวิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบทั้งหมด 5. รายงานฉบับสมบูรณ์	1. ได้ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านความทนทานได้แก่ การหดตัวแบบแห้ง ความทนทานต่อการดัดฟริกและไฮโดรคลอริกของคอนกรีตที่อายุ 120 วัน 2. ได้ผลการทดสอบทั้งหมด 3. ได้วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบทั้งหมด 4. สรุปรายละเอียดทั้งหมด 5. เสนอรายงานฉบับสมบูรณ์	

สารบัญ

หน้า

Executive Summary.....	(ก)
บทคัดย่อ.....	(ข)
Abstract.....	(ค)
กิตติกรรมประกาศ.....	(ง)
สรุปโครงการวิจัยฝ่ายอุตสาหกรรม (ฝ่าย 5).....	(จ)
ตารางเปรียบเทียบกิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการ.....	(ช)
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง.....	(6)
สารบัญภาพประกอบ.....	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(22)

บทที่

1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
2. ข้อมูลพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ข้อมูลพื้นฐาน	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
3. ทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา	9
3.1 ปฏิริยาไฮดรชั่น.....	9

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2 คุณสมบัติของคอนกรีต.....	11
3.2.1 คุณสมบัติทางกลของคอนกรีต.....	11
3.2.2 คุณสมบัติทางด้านความทนทานของคอนกรีต.....	17
4. วิธีการศึกษาวิจัย	21
4.1 แผนการทดสอบ.....	21
4.1.1 การทดสอบคุณสมบัติของน้ำสลัดจ์และตะกอนสลัดจ์.....	21
4.1.2 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์.....	21
4.2 วัสดุทดสอบ.....	21
4.3 อุปกรณ์ในการทดสอบ	24
4.3.1 อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม.....	24
4.3.2 อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต.....	24
4.4 รายละเอียดวิธีการทดสอบ.....	25
4.4.1 การทดสอบคุณสมบัติของน้ำสลัดจ์.....	25
4.4.2 การทดสอบคุณสมบัติของตะกอนสลัดจ์.....	25
4.4.3 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต.....	26
4.4.4 การทดสอบคุณสมบัติด้านความทนทานของคอนกรีต.....	27
4.5 สัดส่วนผสมคอนกรีต.....	27
4.6 จำนวนตัวอย่างทดสอบ	29
5. ผลการทดสอบและวิจารณ์	34
5.1 คุณสมบัติของน้ำสลัดจ์ ตะกอนสลัดจ์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1.....	34
5.1.1 คุณสมบัติของน้ำสลัดจ์.....	34

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1.2 การตรวจสอบคุณสมบัติของน้ำสลัดที่ได้จากการสุมเก็บตัวอย่าง ระหว่างการทำวิจัย.....	37
5.1.3 คุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และตะกอนสลัดจ์	38
5.1.4 การกระจายขนาดของอนุภาค.....	42
5.1.5 การทดสอบภาพถ่ายทางกายภาพ.....	42
5.1.6 การวิเคราะห์ระดับออสซิลของตะกอนสลัดจ์.....	43
5.2 คุณสมบัติของคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์ในสภาพสด.....	45
5.2.1 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตในสภาพสด	45
5.2.2 ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต	47
5.2.3 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต.....	53
5.2.4 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีต.....	56
5.3 คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์.....	62
5.3.1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต	62
5.3.2 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต.....	68
5.3.3 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีต.....	74
5.3.4 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตกับมาตรฐาน ACI 318.....	80
5.3.5 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตกับมาตรฐาน ACI 318.....	81
5.3.6 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน	82
5.4 คุณสมบัติทางด้านความทนทานของคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์.....	84
5.4.1 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต.....	84
5.4.2 ความทนทานต่อสารละลายกรด.....	89
1) ความทนทานต่อสารละลายกรดซัลฟูริก.....	89
2) ความทนทานต่อสารละลายกรดไฮโดรคลอริก.....	93
6. สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	96

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.1 สรุปผลการศึกษา.....	97
6.1.1 คุณสมบัติของน้ำสลัดจ์และตะกอนสลัดจ์.....	97
6.1.2 คุณสมบัติของคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์ในสภาพสด.....	97
6.1.3 คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์.....	98
6.1.4 คุณสมบัติทางด้านความทนทานของคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์.....	98
6.2 ปริมาณน้ำสลัดจ์ที่เหมาะสม	99
6.3 การประเมินทางเศรษฐศาสตร์.....	100
6.4 ข้อเสนอแนะ.....	101
 บรรณานุกรม.....	 102
 ภาคผนวก.....	 106
 ก. คุณสมบัติของมวลรวมและตะกอนสลัดจ์	 107
ก.1 คุณสมบัติของมวลรวม.....	107
ก.2 การกระจายของขนาดอนุภาคตะกอนสลัดจ์.....	111
ก.3 การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์.....	114
ก.4 การคำนวณค่าความเป็นกรดต่างของน้ำผสมระหว่างน้ำประปาและน้ำสลัดจ์.....	118
 ข. คุณสมบัติของคอนกรีตสด.....	 121
ข.1 หน่วยน้ำหนักในสภาพสดของคอนกรีต.....	121
ข.2 ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัว.....	122
ข.3 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต.....	124
ข.4 อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน.....	126
 ค. คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต.....	 216
ค.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต.....	216

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ค.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต.....	252
ค.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต.....	287
ค.4 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต.....	324
ง. คุณสมบัติทางด้านความทนทานของคอนกรีต.....	275
ง.1 ผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง.....	325
ง.2 ผลการทดสอบกรดซัลฟูริก.....	330
ง.3 ผลการทดสอบกรดไฮโดรคลอริก.....	331
จ. ภาพประกอบการทำวิจัย.....	333
จ.1 แหล่งที่มาของน้ำสลัดจ์.....	333
จ.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้การทดสอบ.....	334
จ.3 การเตรียมน้ำสลัดจ์.....	337
จ.4 การทดสอบค่าการยุบตัว.....	338
จ.5 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว.....	339
จ.6 การทดสอบอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน.....	339
จ.7 การทดสอบกำลังรับแรงของคอนกรีต.....	341
จ.8 การทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่น.....	342
จ.9 การทดสอบการหดตัวแบบแห้ง.....	343
จ.10 การทดสอบการกัดกร่อนเนื่องจากกรด.....	344

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณสารที่ยอมให้น้ำสำหรับผสมคอนกรีต.....	5
3.1 ความร้อนที่เกิดขึ้นของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์	15
4.1 สัดส่วนผสมคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมน้ำสัจ.....	28
4.2 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต.....	30
5.1 คุณสมบัติทางเคมีของน้ำประปาและน้ำสัจ	36
5.2 คุณสมบัติทางเคมีของตะกอนสัจที่ผ่านกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	39
5.3 คุณสมบัติตะกอนสัจทดสอบเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C 618	41
ก.1 ความถ่วงจำเพาะและร้อยละการดูดซับน้ำของมวลรวม.....	107
ก.2 ผลการทดสอบขนาดผลของมวลรวมละเอียด.....	107
ก.3 ขนาดผลของมวลรวมหยาบ.....	108
ก.4 ปริมาณช่องว่างและหน่วยน้ำหนักมวลรวมที่อัตราส่วนระหว่างปริมาตรมวลรวม ละเอียดต่อมวลรวมต่างกัน.....	109
ก.5 การกระจายของขนาดอนุภาคตะกอนสัจ	111
ก.6 ส่วนผสมคอนกรีตต่อหนึ่งหน่วยลูกบาศก์เมตร	116
ข.1 หน่วยน้ำหนักในสภาพสดของคอนกรีต.....	121
ข.2 ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัว.....	122
ข.3 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต	124
ข.4 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน สำหรับ γ เท่ากับ 1.2 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.5.....	126
ข.5 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน สำหรับ γ เท่ากับ 1.2 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.6.....	136
ข.6 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน สำหรับ γ เท่ากับ 1.2 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.7.....	146

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.7 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน สำหรับ γ เท่ากับ 1.4 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.5.....	156
ข.8 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน สำหรับ γ เท่ากับ 1.4 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.6.....	166
ข.9 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน สำหรับ γ เท่ากับ 1.4 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.7.....	176
ข.10 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน สำหรับ γ เท่ากับ 1.6 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.5.....	186
ข.11 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน สำหรับ γ เท่ากับ 1.6 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.6.....	196
ข.12 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน สำหรับ γ เท่ากับ 1.6 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.7.....	206
ค.1.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตธรรมดา.....	216
ค.1.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมน้ำสไลด์ (SW) ร้อยละ 10.....	225
ค.1.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมน้ำสไลด์ (SW) ร้อยละ 20.....	234
ค.1.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมน้ำสไลด์ (SW) ร้อยละ 30.....	243
ค.2.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตธรรมดา.....	252
ค.2.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมน้ำสไลด์ (SW) ร้อยละ 10.....	261
ค.2.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมน้ำสไลด์ (SW) ร้อยละ 20.....	270
ค.2.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมน้ำสไลด์ (SW) ร้อยละ 30.....	279

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.3.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตธรรมดา.....	288
ค.3.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตผสมน้ำสัจ (SW) ร้อยละ 10.....	297
ค.3.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตผสมน้ำสัจ (SW) ร้อยละ 20.....	306
ค.3.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตผสมน้ำสัจ (SW) ร้อยละ 30.....	315
ค.4.1 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต.....	324
ง.1 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยของการหดตัวแบบแห้ง.....	325
ง.2 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟริกของคอนกรีต...	329
ง.3 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดไฮโดรคลอริกของ คอนกรีต.....	331

ภาพที่

3.1 ปฏิกริยาของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S และ C_2S).....	9
3.2 ลักษณะของเอ็ททริงไท์ (Ettringite) มีรูปทรงอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับเข็มผลึก.....	10
3.3 ขบวนการก่อตัวและการแข็งตัวของคอนกรีต.....	14
3.4 อัตราพลังงานที่เกิดขึ้นของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์.....	15
3.5 การหาโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต.....	16
3.6 ลักษณะของการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตและความสัมพันธ์กับเวลา.....	18
3.7 ความเสียหายของคอนกรีตที่เกิดจากกรด.....	20
4.1 ป่อกายกาคอนกรีต.....	22
4.2 ป่อดกตะกอน.....	22
4.3 การวัดความลึกของตะกอนและน้ำในป่อดกตะกอน.....	22
4.4 ป่อกักน้ำสลัดจ์.....	23
4.5 การกวนน้ำสลัดจ์ในป่อกัก.....	23
4.6 อย่างจำลองย่อส่วนขนาด 1 ต่อ 10.....	23
4.7 การเทน้ำสลัดจ์ในอย่างจำลอง.....	23
4.8 น้ำสลัดจ์ที่ปรับสัดส่วนในอย่างจำลองเสร็จแล้ว.....	23
4.9 การเก็บน้ำสลัดจ์ใส่ถังเพื่อเตรียมนำผสมคอนกรีต.....	23
4.10 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป.....	26
5.1 ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำประปาและน้ำสลัดจ์.....	36
5.2 ปริมาณของแข็งทั้งหมดในสารผสมระหว่างน้ำประปาและน้ำสลัดจ์.....	37
5.3 ปริมาณของแข็งทั้งหมดและค่าความเป็นกรดต่างของน้ำสลัดจ์ในช่วงระหว่างการทำวิจัย	38
5.4 การกระจายขนาดผลึกของอนุภาคตะกอนสลัดจ์เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	42
5.5 ภาพขยายอนุภาคตะกอนสลัดจ์ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า	43
5.6 ภาพขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า	43
5.7 ผลการทดสอบความเป็นผลึกของตะกอนสลัดจ์ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่

5.16 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเฟสต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุด ระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.6 และมีอัตราส่วน น้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.6.....	51
5.17 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเฟสต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุด ระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.2 และมีอัตราส่วน น้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.7.....	52
5.18 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเฟสต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุด ระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.4 และมีอัตราส่วน น้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.7.....	52
5.19 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเฟสต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุด ระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.6 และมีอัตราส่วน น้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.7.....	53
5.20 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5	54
5.21 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.6	55
5.22 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.7	55
5.23 อุณหภูมิของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเฟสต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุด ระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.2 และมีอัตราส่วน น้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5.....	57
5.24 อุณหภูมิของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเฟสต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุด ระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.4 และมีอัตราส่วน น้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5.....	57
5.25 อุณหภูมิของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเฟสต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุด ระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.6 และมีอัตราส่วน น้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5.....	58

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่

5.26 อุณหภูมิของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุด ระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.2 และมีอัตราส่วน น้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.6.....	59
5.27 อุณหภูมิของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุด ระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.4 และมีอัตราส่วน น้ำ ต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.6.....	59
5.28 อุณหภูมิของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุด ระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.6 และมีอัตราส่วน น้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.6.....	60
5.29 อุณหภูมิของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุด ระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.2 และมีอัตราส่วน น้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.7.....	60
5.30 อุณหภูมิของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุด ระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.4 และมีอัตราส่วน น้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.7.....	61
5.31 อุณหภูมิของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุด ระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.6 และมีอัตราส่วน น้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.7.....	61
5.32 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุด ระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.2 และมีอัตราส่วน น้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5.....	63
5.33 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่าง ต่ำสุด ระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.4 และมีอัตราส่วน น้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5.....	63

หน้า

ภาพที่

[illegible]

หน้า

[illegible]

หน้า

[illegible]

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่

5.59 กำลังรับแรงคดของคอนกรีตเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ACI 318	81
5.60 กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ACI 318	81
5.61 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน.....	83
5.62 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน เปรียบเทียบกับมาตรฐาน ACI 318	83
5.63 การหดตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพศต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุด ระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (Y) เท่ากับ 1.2 และมีอัตราส่วน น้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5.....	85
5.64 การหดตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพศต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุด ระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (Y) เท่ากับ 1.4 และมีอัตราส่วน น้ำ ต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5.....	85
5.65 การหดตัวของคอนกรีตที่มีค่า อัตราส่วนปริมาตรเพศต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุด ระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (Y) เท่ากับ 1.6 และมีอัตราส่วน น้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5.....	86
5.66 การหดตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพศต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุด ระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (Y) เท่ากับ 1.2 และมีอัตราส่วน น้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.6.....	86
5.67 การหดตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพศต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุด ระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (Y) เท่ากับ 1.4 และมีอัตราส่วน น้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.6.....	87
5.68 การหดตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพศต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุด ระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (Y) เท่ากับ 1.6 และมีอัตราส่วน น้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.6.....	87
5.69 การหดตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพศต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุด ระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (Y) เท่ากับ 1.2 และมีอัตราส่วน น้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.7.....	88

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่

5.70 การหัดตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุด ระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสภาวะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.4 และมีอัตราส่วน น้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.7.....	88
5.71 การหัดตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุด ระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสภาวะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.6 และมีอัตราส่วน น้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.7.....	89
5.72 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟริกที่ γ เท่ากับ 1.2 และ w/c เท่ากับ 0.5.....	90
5.73 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟริกที่ γ เท่ากับ 1.4 และ w/c เท่ากับ 0.5.....	90
5.74 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟริกที่ γ เท่ากับ 1.6 และ w/c เท่ากับ 0.5.....	91
5.75 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟริกที่ γ เท่ากับ 1.2 และ w/c เท่ากับ 0.6.....	91
5.76 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟริกที่ γ เท่ากับ 1.4 และ w/c เท่ากับ 0.6.....	91
5.77 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟริกที่ γ เท่ากับ 1.6 และ w/c เท่ากับ 0.6.....	92
5.78 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟริกที่ γ เท่ากับ 1.2 และ w/c เท่ากับ 0.7.....	92
5.79 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟริกที่ γ เท่ากับ 1.4 และ w/c เท่ากับ 0.7.....	92
5.80 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟริกที่ γ เท่ากับ 1.6 และ w/c เท่ากับ 0.7.....	93
5.81 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดไฮโดรคลอริกที่ γ เท่ากับ 1.2 และ w/c เท่ากับ 0.5.....	94

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่

5.82 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดไฮโดรคลอริกที่ γ เท่ากับ 1.4 และ w/c เท่ากับ 0.5.....	94
5.83 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดไฮโดรคลอริกที่ γ เท่ากับ 1.6 และ w/c เท่ากับ 0.5.....	94
5.84 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดไฮโดรคลอริกที่ γ เท่ากับ 1.2 และ w/c เท่ากับ 0.6.....	95
5.85 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดไฮโดรคลอริกที่ γ เท่ากับ 1.4 และ w/c เท่ากับ 0.6.....	95
5.86 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดไฮโดรคลอริกที่ γ เท่ากับ 1.6 และ w/c เท่ากับ 0.6.....	95
5.87 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดไฮโดรคลอริกที่ γ เท่ากับ 1.2 และ w/c เท่ากับ 0.7.....	96
5.88 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดไฮโดรคลอริกที่ γ เท่ากับ 1.4 และ w/c เท่ากับ 0.7.....	96
5.89 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดไฮโดรคลอริกที่ γ เท่ากับ 1.6 และ w/c เท่ากับ 0.7.....	96
6.1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 7 วัน.....	99
6.2 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของคอนกรีต.....	100
6.3 ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีต.....	100

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ก.1 ขนาดคละของมวลรวมละเอียด	108
ก.2 ขนาดคละของมวลรวมหยาบ	109
ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างปริมาตรมวลรวมละเอียดต่อมวลรวม (s/a) และร้อยละของปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวม	110
จ.1 โรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จของบริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุดิบก่อสร้าง จำกัด.....	333
จ.2 การล้างไม้ของรถคอนกรีตผสมเสร็จ.....	383
จ.3 บ่อทิ้งกากคอนกรีต.....	383
จ.4 บ่อดักตะกอนที่นำน้ำสลัดจ์มาใช้ในการศึกษา.....	333
จ.5 เครื่องวัดค่าความเป็นกรดด่าง (pH Meter).....	334
จ.6 เครื่องสูบน้ำ.....	334
จ.7 ตู้อบไฟฟ้า.....	334
จ.8 ตู้ดูดความชื้น.....	334
จ.9 เครื่องวัดปริมาณซัลเฟต.....	334
จ.10 อุปกรณ์วัดค่าความถ่วงจำเพาะ.....	334
จ.11 เครื่องถ่ายภาพขยายทางกายภาพ (SEM).....	335
จ.12 เครื่องวิเคราะห์ความเป็นผลึก (XRD).....	335
จ.13 เครื่องวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค.....	335
จ.14 เครื่องผสมคอนกรีต.....	335
จ.15 ใบพายของเครื่องผสมคอนกรีต.....	335
จ.16 ตู้บ่มที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น.....	336
จ.17 เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine.....	336
จ.18 เครื่องทดสอบ Digital Length Comparator.....	336
จ.19 บ่อบ่มคอนกรีต.....	336
จ.20 บ่อพักน้ำสลัดจ์.....	337
จ.21 อ่างจำลองย่อยส่วน (มาตราส่วน 1: 10).....	337
จ.22 การเตรียมน้ำสลัดจ์.....	337

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
จ.23 น้ำสลัดจืดที่เตรียมเสร็จแล้ว.....	337
จ.24 การผสมคอนกรีต	338
จ.25 การกระทุ้งคอนกรีต.....	338
จ.26 การปาดผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบ.....	338
จ.27 การวัดค่าการยุบตัวของคอนกรีต.....	338
จ.28 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต.....	339
จ.29 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบ.....	339
จ.30 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิ.....	339
จ.31 การเทคอนกรีตลงในกล่องโฟม.....	340
จ.32 การจี้คอนกรีตในกล่องโฟม.....	340
จ.33 การปิดฝากล่องโฟม	340
จ.34 การยาแนวรอยต่อด้วยดินน้ำมัน.....	340
จ.35 การต่อสายเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับเครื่อง Data Logger.....	340
จ.36 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัด	341
จ.37 ตัวอย่างหลังการทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	341
จ.38 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบแรงดึงแบบผ่าซีก	341
จ.39 ตัวอย่างหลังการทดสอบแรงดึงแบบผ่าซีก	341
จ.40 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบแรงดัด.....	341
จ.41 ตัวอย่างหลังการทดสอบแรงดัด.....	341
จ.42 การแปะหัวคอนกรีตด้วยกัมมะถัน.....	342
จ.43 การติดตั้ง Strain Guage.....	342
จ.44 การติดตั้งตัวอย่างเข้ากับเครื่องทดสอบ	342
จ.45 ตัวอย่างคอนกรีตหลังการทดสอบจนวิบัติ.....	342
จ.46 แบบหล่อตัวอย่างการทดสอบ	343
จ.47 ตัวอย่างคอนกรีตที่ปัมในคูปัม.....	343
จ.48 การเปรียบเทียบความยาวกับแท่งทดสอบ	343

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
จ.49 การวัดตัวแท่งอย่างคอนกรีต.....	343
จ.50 การชั่งกรดที่ใช้ในการทดสอบ.....	344
จ.51 การคนสารละลายกรด.....	344
จ.52 การเทสารละลายกรดในถังแช่คอนกรีต.....	344
จ.53 การวางถังทดสอบการกัดกร่อนจากกรด.....	344
จ.54 ตัวอย่างคอนกรีตที่ถูกกัดกร่อนจากกรดซัลฟูริก.....	345
จ.55 ตัวอย่างคอนกรีตที่ถูกกัดกร่อนจากกรดไฮโดรคลอริก.....	345

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

C	แคลเซียมออกไซด์ (CaO)
S	ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂)
H	น้ำ (H ₂ O)
CH	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH) ₂)
A	อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃)
F	ไอรอนออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)
C ₃ S	ไตรแคลเซียมซิลิเกต
C ₂ S	ไบแคลเซียมซิลิเกต
C ₃ A	ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต
C ₄ AF	เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์
C ₃ S ₂ H ₃	แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต
C ₄ ASH ₁₂	แคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต
w/c	อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์
s/a	อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมดโดยปริมาตร
γ	อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นในสถานะแห้ง
OPC	คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
SW10	คอนกรีตที่ทำการแทนที่น้ำสลัดจ์ในน้ำประปาที่อัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก
SW20	คอนกรีตที่ทำการแทนที่น้ำสลัดจ์ในน้ำประปาที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก
SW30	คอนกรีตที่ทำการแทนที่น้ำสลัดจ์ในน้ำประปาที่อัตราส่วนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก
V _p	ปริมาตรของเพสต์
V _v	ปริมาตรของช่องว่างต่ำสุด
V _c	ปริมาตรของปูนซีเมนต์
V _w	ปริมาตรของน้ำ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

V_s	ปริมาตรของทราย
V_g	ปริมาตรของหิน
W_c	น้ำหนักของปูนซีเมนต์
W_w	น้ำหนักของน้ำ
W_s	น้ำหนักของทราย
W_g	น้ำหนักของหิน
W_{sludge}	น้ำหนักของน้ำสลัดจ์

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากผลพวงของวิกฤติเศรษฐกิจตั้งแต่ปี พ.ศ. 2540 ทำให้วงการก่อสร้างไทยอยู่ในสภาวะถดถอยอย่างหนัก แต่เมื่อพิจารณาในมุมมองของการสร้างวิกฤติเป็นโอกาสจะพบว่า ในอดีตจะมีเพียงการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่เป็นหลักแต่ขาดการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นอย่างเป็นระบบและครบวงจร โดยเฉพาะกับอุตสาหกรรมก่อสร้างที่มีใช้ทรัพยากรประเภทต่างๆ มากมาย ดังเช่น อุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ (Ready-mixed Concrete) ซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างกันอย่างมากนั้น ซึ่งปล่อยของเสียประเภทน้ำทิ้งที่เกิดจากการผสมคอนกรีต การล้างวัสดุและรถบรรทุกคอนกรีต เป็นต้น ทำให้เกิดแนวคิดเรื่องของการนำน้ำที่เหลือทิ้งและถูกกักเก็บในบ่อมาใช้นอกจากการกำจัดทิ้งมาใช้ในการผสมคอนกรีต ประกอบกฎหมายที่เกี่ยวกับการจัดการของเสียจากโรงงานได้เพิ่มบทบาทขึ้น จึงยังเป็นการส่งเสริมให้มีการใช้ของเสียที่เกิดขึ้นในโรงงานอย่างคุ้มค่า

โรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จจะมีวัสดุเหลือทิ้งเกิดขึ้น เช่น น้ำสลัดจ์ (Sludge Water คือน้ำจากการล้างรถขนส่งคอนกรีตแล้วปล่อยให้ตกตะกอนในบ่อพักน้ำ) โดยน้ำดังกล่าวจะถูกปล่อยทิ้งไว้จนเต็มแล้วจึงกำจัดออกด้วยการสูบทิ้ง แต่ปัญหาที่พบคือ ปัจจุบันยังขาดการศึกษาวิจัยอย่างชัดเจนในการนำน้ำดังกล่าวมาใช้งาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาถึงผลที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตเมื่อนำน้ำสลัดจ์จากโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จมาผสมคอนกรีตโดยการแทนที่ในน้ำผสมคอนกรีตปกติ อันจะเป็นแนวทางในการใช้น้ำสลัดจ์ในงานคอนกรีตต่อไป สำหรับแนวคิดเบื้องต้นของการนำน้ำสลัดจ์มาใช้งานจะต้องเป็นไปตามมาตรฐานของน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตซึ่งได้แก่ มาตรฐาน ว.ส.ท., ASTM C 94, BS 3148 และ AASHTO M 157 ผลที่ได้รับนอกเหนือที่สามารถลดต้นทุนในส่วนของการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จที่ใช้น้ำประปาเพียงอย่างเดียวแล้วยังเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในส่วนของการกำจัดน้ำทิ้งรวมทั้งเป็นการรักษาสสิ่งแวดล้อมด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาคูณสมบัติของคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์จากโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ

1.2.2 เพื่อหาปริมาณสัดส่วนที่เหมาะสมของน้ำสลัดจ์จากโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จมาผสมคอนกรีตจากมาตรฐานน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 แหล่งที่มาของน้ำสลัดจ์ จากโรงงานผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปของบริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุดิบก่อสร้าง จำกัด ณ โรงงานปากเกร็ด จ.นนทบุรี

1.3.2 ปริมาณการแทนที่น้ำสลัดจ์ในน้ำประปาที่ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักซึ่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 160, 4470, 10040 และ 15900 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

1.3.3 อัตราส่วนน้ำต่อนูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5, 0.6 และ 0.7 ตามลำดับ

1.3.4 อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างค่าสุทธระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.2, 1.4 และ 1.6 ตามลำดับ

1.3.5 ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของตะกอนสลัดจ์ ในข้อ 1.3.1 ดังต่อไปนี้

- ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)
- ความละเอียด (Blaine Fineness)
- การกระจายของขนาดผลของอนุภาค (Particle Size Distribution)
- ปริมาณความชื้น และการดูดซับ (Moisture and Absorption)
- องค์ประกอบทางเคมี (Chemical Composition)
- ภาพขยายทางกายภาพด้วยเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope)
- การวิเคราะห์ระดับอสัณฐาน (Amorphous Degree) ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบน

ของรังสี X-Ray (X-Ray Diffraction)

1.3.6 คุณสมบัติของคอนกรีตสด ตามขอบเขตในข้อที่ 1.3.1 ถึง 1.3.4 ดังนี้

- หน่วยน้ำหนัก (Unit Weight)
- ค่าการยุบตัว (Slump)
- การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss)
- ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้าย (Initial and Final Setting Times)
- อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Temperature Rise of Hydration Reaction)

1.3.7 คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต ตามขอบเขตในข้อที่ 1.3.1 ถึง 1.3.4 ดังนี้

- กำลังรับแรงอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ
- กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ
- กำลังรับแรงคดที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ
- โมดูลัสความยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน

1.3.8 คุณสมบัติด้านความทนทานของคอนกรีต ตามขอบเขตในข้อที่ 1.3.1 ถึง 1.3.4 ดังนี้

- ความทนทานต่อสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยมีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) เท่ากับ 0.98 และ 0.99 ตามลำดับ ในรูปของค่าการสูญเสียน้ำหนักที่อายุ 7, 28, 60, 90 และ 120 วัน ตามลำดับ
- การหดตัวแบบแห้ง

บทที่ 2

ข้อมูลพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลพื้นฐาน

โดยปกติภายหลังจากรถขนส่งคอนกรีตผสมเสร็จกลับจากการส่งสินค้าแล้ว จะต้องทำการถ่ายกากคอนกรีตที่เหลือติดค้างอยู่ในโม้ทิ้งและล้างเศษวัสดุออกให้หมดก่อนที่จะบรรจุคอนกรีตใหม่ โดยในการทำความสะอาดโม้นั้นจะมีกากคอนกรีตซึ่งประกอบด้วยหิน ทราย และปูนซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้วบางส่วนตกลงสู่บ่อรองรับกากคอนกรีตซึ่งจะอยู่ในส่วนของบ่อแรกที่ทางโรงงานได้เตรียมไว้ ส่วนน้ำที่ล้างนั้นจะไหลผ่านรางระบายมายังบ่อที่สองคือบ่อตกตะกอน โดยจะมีเนื้อปูนซีเมนต์ไหลรวมมากับน้ำด้วย และเมื่อปล่อยทิ้งไว้จะเกิดการตกตะกอนแยกตัวออกเป็น 2 ส่วนคือ น้ำที่ใสจะอยู่ส่วนบนและตะกอนปูนซีเมนต์หรือสลัดจ์จะอยู่ก้นบ่อ

จากกระบวนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จของบริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุดิบก่อสร้าง จำกัด ซึ่งมีโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จอยู่ทั่วประเทศกว่า 200 โรงงาน โดยตั้งอยู่ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลประมาณ 60 โรงงาน พบว่าปริมาณสลัดจ์ที่มีอยู่ในบ่อตกตะกอนของโรงงานในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลซึ่งมีขนาดของบ่อโดยประมาณคือ กว้าง 5.50 เมตร ยาว 12.00 เมตร และลึก 1.60 เมตรนั้น มีปริมาตรเท่ากับ 4,500 ลูกบาศก์เมตรโดยประมาณ

สำหรับแนวทางในการศึกษาเพื่อนำน้ำสลัดจ์มาใช้ผลิตคอนกรีตอยู่ที่การเลือกใช้อัตราส่วนของน้ำสลัดจ์อย่างเหมาะสมซึ่งสามารถประเมินได้จากมาตรฐานของน้ำที่สงสัยว่าสามารถใช้ในการผสมคอนกรีตได้หรือไม่ มาตรฐานดังกล่าวได้แก่ มาตรฐานคอนกรีตในประเทศไทย (EIT CODE) มาตรฐาน ASTM C 94 (Standard Specification for Ready-mixed Concrete), BS 3148:1980 (Method of Tests for Water for Making Concrete (Including Notes on the Suitability of the Water)) และ AASHTO M 157 (Standard Specification for Ready-mixed Concrete) ซึ่งได้กำหนดหลักเกณฑ์เบื้องต้นของน้ำที่ทำการทดสอบจะต้องทำให้ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นของคอนกรีตเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้น้ำสะอาด (ในที่นี้ใช้น้ำประปาเป็นเกณฑ์) ไม่เร็วเกินกว่า 1 ชั่วโมง ในขณะที่ระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายจะต้องไม่ช้าเกินกว่า 1.5 ชั่วโมง และจะต้องไม่ทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 7 วัน น้อยกว่าร้อยละ 90 นอกจากนั้นในมาตรฐานได้กำหนดปริมาณสารที่ยอมให้น้ำสำหรับการผสมคอนกรีต ดังแสดงในตารางที่ 2.1 จากข้อกำหนดดังกล่าวสามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์หาปริมาณสัดส่วนของน้ำสลัดจ์ที่เหมาะสมได้ โดยในทางปฏิบัติจะทำการแทนที่น้ำ

สลักในน้ำปกติ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้น้ำสลักแทนที่ในน้ำประปาโดยน้ำหนักที่ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ซึ่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 160, 4470, 10040 และ 15900 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

ตารางที่ 2.1
ปริมาณสารที่ยอมให้ในน้ำสำหรับผสมคอนกรีต

สารประกอบ	ปริมาณที่ยอมให้			
	EIT CODE (ppm)	ASTM C 94 (ppm)	BS 3148 (mg/l)	AASHTO M 157 (ppm)
1) คลอไรด์			500 ^{***}	
1.1) สำหรับงาน คอนกรีตอัดแรง หรืองานสะพาน	500	500		0.06 %
1.2) สำหรับงานคอนกรีตเสริม เหล็กทั่วไป	1,000	1,000		0.10 %
2) ซัลเฟต ในรูปของ SO ₄	3,000	3,000	1,000	3,000
3) อัลคาไลด์ ในรูป Na ₂ O _e (Na ₂ O + 0.658K ₂ O)	600	600	1,000 ^{****}	600
4) ของแข็ง	50,000 ^[*]	50,000 ^[**]	2,000 ^{*****}	50,000

หมายเหตุ	[*]	คือสารแขวนลอย
	[**]	คือของแข็งทั้งหมด (Total Solids)
	***]	ไม่ระบุประเภทของการใช้งาน
	[****]	คืออัลคาไลด์ ในรูปคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนต
	[*****]	คือของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total Dissolve Solid)
	ppm	คือ หนึ่งในล้านในล้าน (Part Per Million)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่มีการศึกษาการนำน้ำทิ้งและสลัดจ์จากการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จมาใช้ในการผสมคอนกรีตมีดังนี้

Kasai Y. (1979) ได้สรุปรายงานต่อคณะกรรมการซึ่งแต่งตั้งโดยสถาบันคอนกรีตแห่งประเทศไทย ญี่ปุ่น (JCI) คณะกรรมการดังกล่าวได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่และการจัดการสลัดจ์จากโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จของประเทศญี่ปุ่น ซึ่งคอนกรีตตัวอย่างถูกแบ่งออกเป็น 3 ระดับตามชนิดของน้ำที่ใช้ ได้แก่ น้ำปกติ น้ำสลัดจ์ส่วนที่ใส และน้ำสลัดจ์ส่วนที่ข้น ผลการทดสอบสรุปว่าน้ำสลัดจ์ส่วนที่ใสสามารถนำกลับมาใช้เป็นน้ำผสมคอนกรีตได้ แต่ในการใช้น้ำสลัดจ์ส่วนที่ขุ่นนั้นต้องมีการพิจารณาถึงปริมาณสารแขวนลอย อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ร้อยละของมวลรวมละเอียด และปริมาณของสารเพิ่มฟองอากาศที่ใช้

Borger et al. (1994) ได้ศึกษาถึงการใช้ประโยชน์ของการนำกลับมาใช้ใหม่ของน้ำเสียและคอนกรีตส่งกลับ มอร์ตาร์ที่ผสมด้วยน้ำเสียที่อายุต่าง ๆ ได้ถูกทดสอบซึ่งสามารถสรุปได้ว่าน้ำเสียดังกล่าวนำมาใช้ผสมคอนกรีตได้ โดยจะให้ความแข็งแรงและกำลังมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น ความทนทานต่อซัลเฟตเพิ่มขึ้น และค่าการก่อตัวเร็วขึ้น

Souwerbren (1996) ให้ภาพรวมของสถานการณ์ในประเทศเนเธอร์แลนด์เกี่ยวกับการนำกลับมาใช้ของน้ำสลัดจ์ ซึ่งตามข้อกำหนดของมาตรฐานยุโรป (CEN TC 104) ปริมาณที่เพิ่มขึ้นของส่วนละเอียดเนื่องจากการใช้น้ำสลัดจ์ต้องมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 1 ของน้ำหนักปริมาณมวลรวมทั้งหมด และน้ำสลัดจ์ที่มีความหนาแน่นมากกว่า 1,010 กก./ลบ.ม. จะต้องทำการกวนให้สม่ำเสมอเพื่อให้ส่วนของแข็งในน้ำกระจายตัวอย่างทั่วถึง ส่วนน้ำสลัดจ์ที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1,010 กก./ลบ.ม. จะถือว่ามีความหนาแน่นของแข็งน้อยมาก

ณรงค์ศักดิ์ มากุล และ บุรฉัตร ฉัตรวีระ (1999) ได้ทำการศึกษาผลของน้ำล้างโมในการแทนที่ในน้ำประปาที่มีต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ พบว่าความชื้นเหลือปกติและระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์มีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่ยกยาดัวในน้ำและการหดตัวแบบออโตจีเนียสมีค่าลดลง

Sato Y. (1999) ได้ศึกษาผลของการใช้น้ำสลัดจ์และผงสลัดจ์แห้งผสมคอนกรีต พบว่าการใช้ผงสลัดจ์ผสมคอนกรีตนั้นไม่มีผลกระทบใดๆ แต่ให้จำกัดปริมาณการใช้ที่ไม่เกินร้อยละ 10 ของปริมาณปูนซีเมนต์ เพราะถ้าใช้มากจะทำให้ความต้องการน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น

Matsuyama H. (2000) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ต่อการตกผลึกของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ละลายในน้ำ พบว่าอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกอนออกไซด์ของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตนั้นมีผลกระทบอย่างมากจากค่า pH ของน้ำ แต่สามารถควบคุมอัตราส่วนดังกล่าวได้โดยการเปลี่ยนค่า pH ของน้ำ

Moon H. Y. (2001) ได้ศึกษาถึงผลของน้ำล้างโมในโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จที่มีต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์และคอนกรีต พบว่ากำลังรับแรงที่หลังจาก 7 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นที่ร้อยละการแทนที่โดยน้ำหนักเท่ากับ 10 และ 20 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าการไหลแผ่มีค่าลดลง

Chini A. R. (2001) ได้ศึกษาผลของการใช้น้ำทิ้งจากโรงงานผลิตคอนกรีต พบว่าน้ำทิ้งที่ได้จากการล้างโมของรถคอนกรีตนั้นไม่มีผลกระทบกับคุณสมบัติของคอนกรีตสดและคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วแต่น้ำทิ้งที่จะนำมาใช้นั้นจะต้องผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน AASHTO M 157

Franco Sandrolini et al. (2001) ได้ศึกษาถึงผลกระทบเนื่องจากการใช้น้ำล้าง (Wash Water) ในการผสมมอร์ตาร์และคอนกรีต ทั้งคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางกล และในระดับอนุภาค ผลการศึกษาการใช้น้ำล้างที่ปริมาณของแข็งต่าง ๆ จนถึง 40 กรัมต่อลิตร ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์และคอนกรีตไม่ต่ำกว่าร้อยละ 96 เมื่อเทียบกับที่ผสมด้วยน้ำสะอาด การใช้น้ำล้างมาผสมทำให้มีปริมาณของส่วนละเอียดในคอนกรีตเพิ่มขึ้นและปริมาณน้ำที่ใช้ผสมจริงลดลงทำให้ความสามารถในการทำงานลดลง การดูดซับน้ำ (Capillary Water Absorption) ของคอนกรีตและความพรุนของมอร์ตาร์มีค่าลดลง ซึ่งทำให้ความสามารถทางด้านความทนทานเพิ่มขึ้น

Nan Su et al. (2002) ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่ใช้น้ำผสมจากหลายแหล่ง ได้แก่ น้ำประปา น้ำบาดาล และน้ำสลัดจ์ โดยน้ำเหล่านี้ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 94 จากการทดสอบพบว่าน้ำจากส่วนล่างของบ่อดักตะกอนทำให้เวลาที่ใช้ในการก่อตัวและความสามารถในการไหลมีค่าลดลง ค่ารับกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมด้วยน้ำสลัดจ์และน้ำบาดาล ไม่

แตกต่างจากที่ผสมโดยน้ำประปา แต่มีข้อแนะนำให้ศึกษาในคุณสมบัติอื่นๆ เช่น ความทนทานหรือการหดตัวก่อนการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา

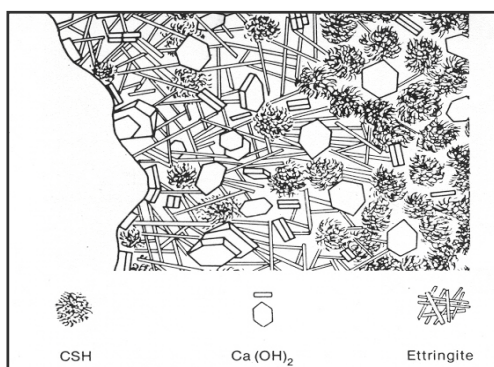
ในการศึกษาการนำน้ำสัดจมาใช้ผสมในคอนกรีตนั้นมีทฤษฎีดังต่อไปนี้

3.1 ปฏิกริยาไฮเดรชัน

ปฏิกริยาไฮเดรชันในปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีแร่ธาตุต่างๆ ประกอบอยู่ 2 ประเภท คือ สารประกอบหลักและสารประกอบรอง สารประกอบหลักที่ประกอบไปด้วย ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) มีชื่อย่อว่า C_3S ไดแคลเซียมซิลิเกต ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) มีชื่อย่อว่า C_2S ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) มีชื่อย่อว่า C_3A และเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) มีชื่อย่อว่า C_4AF สารประกอบหลักนี้มีปริมาณร้อยละ 90 สามารถแยกศึกษาปฏิกริยาไฮเดรชันของสารประกอบแต่ละตัวดังต่อไปนี้ ปฏิกริยาแคลเซียมซิลิเกต (C_3S และ C_2S) กับน้ำใช้สัญลักษณ์ย่อ H ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ (3.1) และ (3.2) คือ

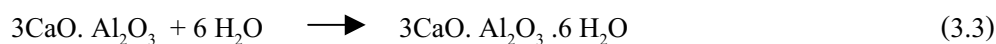


ผลจากปฏิกริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) จะได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ใช้ชื่อย่อว่า C-S-H และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ปฏิกริยาของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S และ C_2S)

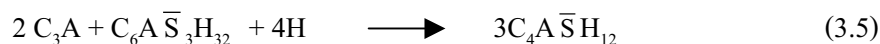
ปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) เนื่องจาก C_3A มีปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการก่อตัวอย่างฉับพลัน (Flash Set) ดังสมการที่ (3.3)



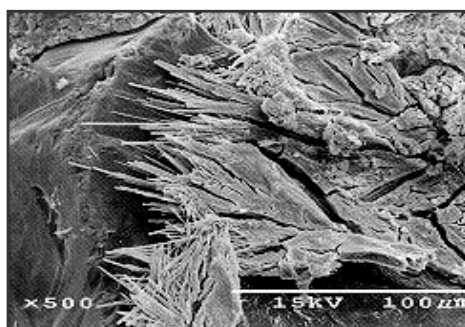
จากปฏิกิริยาดังกล่าวจึงต้องผสมยิปซัม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) มีชื่อย่อว่า $C\bar{S}H$ ลงในปูนซีเมนต์เพื่อหน่วงปฏิกิริยาของ C_3A กับน้ำซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.4)



แคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตไฮเดรต มีชื่อย่อว่า $C_6A\bar{S}_3H_{32}$ หรือเรียกว่าเอ็ททริงไกท์ (Ettringite) ซึ่งมีลักษณะยาวคล้ายเข็มเกิดขึ้นรอบ C_3A ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันยากขึ้น เมื่ออิออนของซัลเฟตหมดจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A เปลี่ยนเอ็ททริงไกท์ให้เป็นโมโนซัลเฟตหรือชื่อย่อ $3C_4A\bar{S}H_{12}$ ดังสมการที่ (3.5)

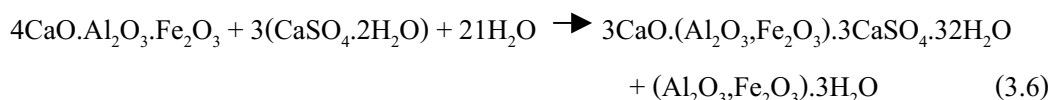


ปฏิกิริยานี้ทำลายชั้นของเอ็ททริงไกท์ที่หุ้ม C_3A ซึ่ง C_3A จะทำปฏิกิริยาได้อีกอย่างรวดเร็วถ้ามียิปซัมผสมมาก การเกิดเอ็ททริงไกท์จะเพิ่มขึ้นและเวลาในการเกิดโมโนซัลเฟตภายใน 12 ถึง 36 ชั่วโมง



ภาพที่ 3.2 ลักษณะของเอ็ททริงไกท์ (Ettringite) มีรูปทรงอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับเข็มผลึก

ปฏิกิริยาของเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF) ปฏิกิริยานี้กับยิปซัมซึ่งจะหน่วงการเกิดปฏิกิริยาให้ช้าลง ผลของปฏิกิริยาจะได้แคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต (Calcium Sulfoaluminate) เขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (3.6)



3.2 คุณสมบัติของคอนกรีต

3.2.1 คุณสมบัติทางกลของคอนกรีต

1) ความสามารถในการเทได้ (Workability) (สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, 2542, น. 6 - 7)

ความสามารถเทได้ เป็นคุณสมบัติที่ต้องการอย่างหนึ่งของคอนกรีตสด หมายถึงการที่คอนกรีตสดสามารถไหลเข้าแบบหล่อได้ดี ทำให้แน่นง่าย และคอนกรีตที่หล่อได้ปราศจากรูโพรงต่างๆ กล่าวคือ ช่องว่างระหว่างวัสดุผสมจะต้องมีซีเมนต์เพสต์บรรจุเต็ม เหล็กเสริมก็ต้องมีคอนกรีตหุ้มอยู่เป็นอย่างดี และต้องไม่มีการแยกขนาดของส่วนผสมคอนกรีต

ความสามารถเทได้ของคอนกรีต ขึ้นอยู่กับ

ก) ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต ซึ่งอยู่ในเทอมของอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ กล่าว คือ ถ้าใช้น้ำมากเกินไปคอนกรีตจะเหลวและ และเทลงในแบบหล่อได้ง่าย แต่กำลังความแข็งแรงของคอนกรีตจะลดลง ควรใช้ปริมาณน้ำให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อให้เกิดความสามารถได้ในขั้นนี้

ข) รูปร่างและส่วนขนาดคละของวัสดุผสม ถ้าใช้วัสดุผสมที่มีลักษณะเป็นก้อนกลมจะทำให้ได้ “ความสามารถเทได้” ดีกว่าวัสดุผสมที่มีรูปเป็นเหลี่ยมเป็นมุม วัสดุผสมที่มีความลดหลั่นของขนาดอยู่ในพิภคทำให้ได้คอนกรีตมีเนื้อแน่นสม่ำเสมอต้องการปริมาณน้ำผสมน้อย มีคุณภาพดีและทำงานง่าย

ค) ปริมาณปูนซีเมนต์และชนิดของปูนซีเมนต์ ปริมาณปูนซีเมนต์มีผลมาจากอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ ถ้าใช้ปูนซีเมนต์ที่ละเอียดจะมีผลทำให้ได้คอนกรีตที่เทเข้าแบบได้ง่ายกว่า

ง) ปริมาณสารกระจายกักฟองอากาศ ถ้าใช้ในปริมาณที่เหมาะสม คอนกรีตจะมีความสามารถเทได้ง่าย แต่ถ้าใช้มากเกินไปจะทำให้กำลังของคอนกรีตลดลงอีกทั้งความคงทนก็มีได้เพิ่มขึ้น

จ) สารเคมีผสมเพิ่ม สารเคมีผสมเพิ่มบางชนิด เช่น พวกปูนขาว เบนโทไนต์ และเถ้าลอย จะช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถเทได้ดีขึ้น และนอกจากนั้นจะช่วยแก้การเยิ้มที่ผิวหน้าของคอนกรีต

ฉ) เวลาและอุณหภูมิ ถ้าทั้งคอนกรีตที่เพิ่งผสมเสร็จใหม่ๆ ใช้นานเกินกว่า 15 นาที คอนกรีตจะมีความสามารถเทได้ต่ำลง หรืออาจแข็งตัวไปเลยหากใช้อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์น้อยเกินไป

การเทคอนกรีตในวันที่อากาศร้อนหรืออุณหภูมิสูง ควรเพิ่มปริมาณน้ำที่จะใช้ผสมคอนกรีตให้มากขึ้นเล็กน้อย เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำและรักษา “ความสามารถเทได้” ของคอนกรีตให้คงที่

วิธีวัดหรือทดสอบ “ความสามารถเทได้” ของคอนกรีต ไม่อาจทำได้โดยตรง แต่อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติที่พึงวัดได้ คือ ความชันเหลวของคอนกรีตซึ่งเป็นเครื่องแสดงว่าคอนกรีตที่ผสมเสร็จใหม่ๆ นั้น กระด้าง พอดี เปียก หรือละเอียด “ความสามารถเทได้” ของคอนกรีตจะเป็นที่พอใจ หากความชันเหลวของคอนกรีตที่ผสมเสร็จใหม่ๆ นั้น เหมาะสมที่จะทำให้คอนกรีตมีความแน่นตัวดีตามสภาพของแต่ละงาน

ความชันเหลวย่อมขึ้นอยู่กับการเท และโดยที่มักจะหลีกเลี่ยงการผันแปรในเรื่องวัสดุ ลมฟ้าอากาศ และสภาพแวดล้อมอื่นๆ ของงานไม่ได้ ฉะนั้น ความชันเหลวย่อมจะไม่คงที่ แม้จะพยายามรักษาปริมาณวัสดุส่วนต่างๆ ให้คงที่อยู่เสมอก็ตาม อย่างไรก็ตาม อย่างไรก็ดี ถ้าส่วนขนาดกะและปริมาณความชื้นของวัสดุผสมยังสม่ำเสมอเท่าไร การเปลี่ยนแปลงความชันเหลวก็น้อยลงเท่านั้น ในทางปฏิบัติคอนกรีตที่ใช้จะต้องมีความชันเหลวม่าเสมอที่สุดเท่าที่จะทำได้ ฉะนั้น ผู้ที่ทำการผสมควรที่จะเปลี่ยนแปลงปริมาณของน้ำที่เติมลงไปเครื่องผสมตามความจำเป็น

2) การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) (ซัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2543, น. 83)

การสูญเสียค่าการยุบตัว คือ การสูญเสียความเหลวของคอนกรีตสดเมื่อเวลาไป การสูญเสียค่าการยุบตัวถือเป็นเหตุการณ์ปกติสำหรับคอนกรีตที่จะต้องแข็งตัวขึ้นเรื่อยๆ จากผลของการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ การสูญเสียน้ำอิสระ (Free Water) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จากการดูดซึมของมวลรวมและการระเหย ดังนั้นเมื่อคอนกรีตถูกผสมขึ้นมาแล้ว ควรรีบล่ำเลียง เท และแต่งผิวให้ทันกับเวลาที่คอนกรีตยังสามารถทำงานได้เพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียค่าการยุบตัว

ปัจจัยที่มีผลต่อการสูญเสียค่าการยุบตัว

ก) อุณหภูมิ อุณหภูมิของคอนกรีตขณะที่คอนกรีตถูกผสม ถ้าเลียง ยิ่งสูงมากเท่าไร ระยะเวลาการสูญเสียค่าการยุบตัวยิ่งเร็วขึ้น ดังนั้นในสถานที่ที่อากาศร้อน มวลรวมที่ใช้ในการผสมควรทำให้มีอุณหภูมิต่ำที่สุดเท่าที่สามารถทำได้ เช่นการพรมน้ำ หรือการกองเก็บในบริเวณที่ร่ม

ข) องค์ประกอบของปูนซีเมนต์ การสูญเสียค่าการยุบตัวจะมีค่ามากเมื่อปูนซีเมนต์ที่ใช้มีส่วนผสมของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) หรือมีส่วนประกอบที่มีอัลคาไลน์สูง

ค) สารผสมเพิ่ม คอนกรีตที่ใส่น้ำยาลดน้ำจำนวนมาก (Superplasticizer) มีแนวโน้มที่จะเกิดการสูญเสียค่าการยุบตัวมากกว่าคอนกรีตปกติ ทั้งนี้เพราะน้ำยาดังกล่าวจะทำให้ผงปูนซีเมนต์กระจายตัวอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมีมากขึ้น ดังนั้นในการใช้น้ำยาชนิดดังกล่าวควรใช้ในปริมาณที่เหมาะสมตามข้อกำหนดของผู้ผลิต

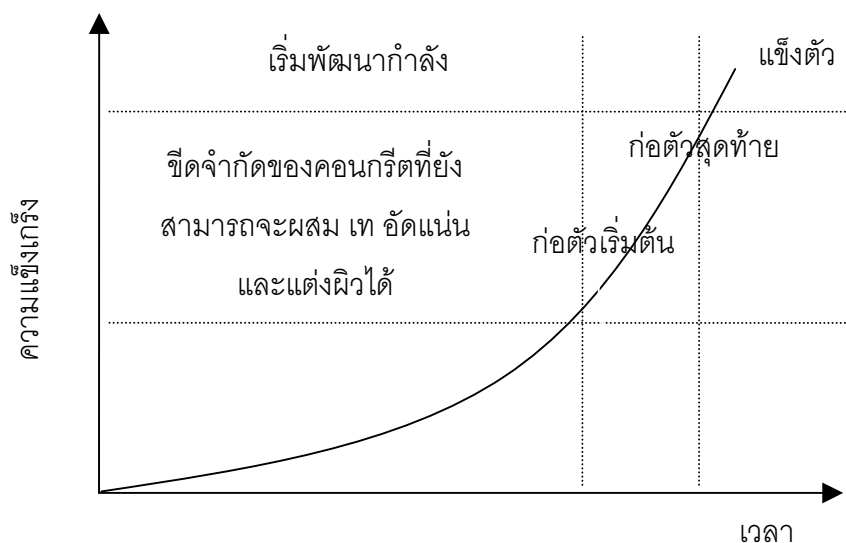
3) เวลาการก่อตัว (Time of Setting)

การก่อตัว (Setting) และการแข็งตัว (Hardening) ถือเป็นลักษณะทางกายภาพที่แสดงให้เห็นถึงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ซึ่งการก่อตัวของคอนกรีตคือ กระบวนการเริ่มแข็งตัวของคอนกรีตสดโดยมีระยะเวลาสำคัญอยู่ 2 ช่วง คือ

ก) ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) เป็นระยะเวลาที่บอกให้ทราบว่าภายในช่วงเวลาดังกล่าวคอนกรีตยังสามารถที่จะผสม เท อัดแน่น และแต่งผิวได้ (Limit of Handling)

ข) ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) เป็นระยะเวลาที่คอนกรีตเริ่มเข้าสู่สภาพการแข็งตัวและเริ่มพัฒนากำลัง (Beginning of Mechanical Strength)

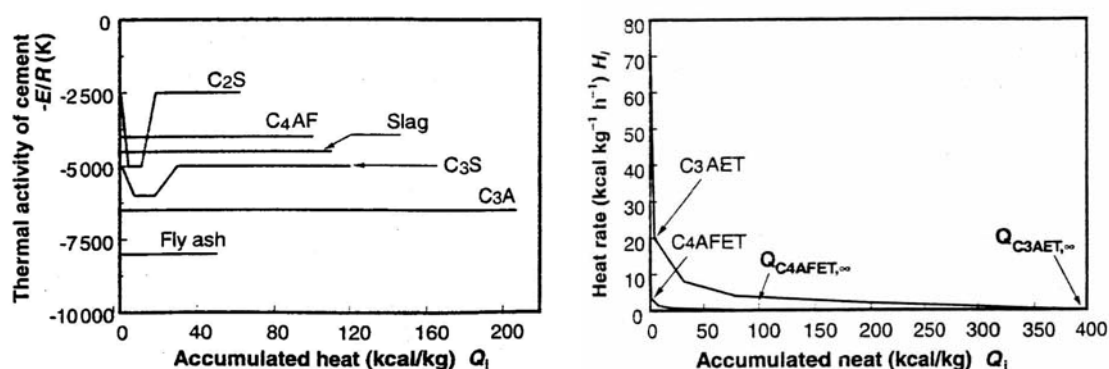
ค่าทั้งสองนี้เป็นค่าที่ถูกตั้งขึ้นโดยการทดสอบหาความต้านทานการกด (Penetration Resistance) ของมอร์ตาร์ที่ได้จากการร่อนคอนกรีตผ่านตะแกรงมาตรฐานซึ่งการทดสอบทำโดยการเทมอร์ตาร์ลงในภาชนะมาตรฐานทรงลูกบาศก์ แล้ววัดแรงที่ใช้ในการกดหัวกดให้จมลงไปในคอนกรีต 2.5 ซม. ต่อจากนั้นคำนวณหาค่าแรงกดต่อพื้นที่เพื่อนำมาเขียนกราฟระหว่างแรงต้านของเนื้อมอร์ตาร์ต่อพื้นที่กับระยะเวลาหลังผสม ดังภาพที่ 3.3 ซึ่งระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) คือระยะเวลาที่แรงต้านทานต่อพื้นที่เท่ากับ 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (3.5 เมกะปาสกาล) และ 4,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (27.6 เมกะปาสกาล) ตามลำดับ โดยค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อระยะเวลาการก่อตัว เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ระยะเวลาการก่อตัวก็จะเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ชนิดของปูนซีเมนต์ อุณหภูมิ และน้ำยาผสมคอนกรีตก็เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อระยะเวลาการก่อตัวด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 3.3 ขบวนการก่อดำเนินการและการแข็งตัวของคอนกรีต

4) ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Heat of Hydration)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นในปูนซีเมนต์มีทั้งปฏิกิริยาคูดความร้อน (Endothermic) และคายความร้อน (Exothermic) โดยปฏิกิริยาคูดความร้อนจะเกิดขึ้นทันทีทันใดเมื่อนุภาคปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำ เนื่องมาจากการแตกตัวของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (K^+) ที่เป็นส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในน้ำและปริมาณของความร้อนต่อกรัมของปูนซีเมนต์ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา (Unhydrated Cement) ที่พัฒนาจนกระทั่งปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดสมบูรณ์ที่อุณหภูมิหนึ่งคือ ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Heat of Hydration Reaction) โดยปูนซีเมนต์จะมีสารประกอบหลักที่ก่อเกิดความร้อนอยู่ 4 ชนิดด้วยกันซึ่งในแต่ละส่วนผสมจะมีปริมาณไม่เท่ากัน ในการพิจารณาความร้อนที่เกิดขึ้นจึงต้องใช้วิธีสารประกอบรวมหลายชนิด (Multicomponent) เพราะสารแต่ละชนิดจะมีอัตราการเกิดพลังงานและอัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่เท่ากัน ดังแสดงภาพที่ 3.4 และตารางที่ 3.1 ตามลำดับ



ภาพที่ 3.4 อัตราพลังงานที่เกิดขึ้นของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์

ตารางที่ 3.1

ความร้อนที่เกิดขึ้นของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์

สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์	ความร้อน (แคลอรีต่อกรัม)
$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	120
$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	62
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	207
$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	100

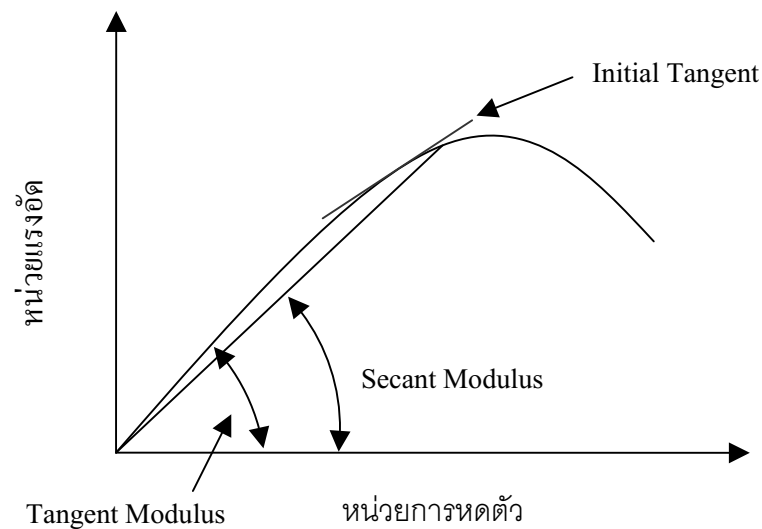
5) โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)

คุณสมบัติยืดหยุ่นของคอนกรีต มีความสำคัญต่อการเสีรูปของโครงสร้างคอนกรีตภายใต้ น้ำหนักบรรทุก เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่ไม่มีการยืดหยุ่นเมื่อรับน้ำหนักบรรทุก ดังนั้น การเสีรูป อย่างถาวรอาจเกิดขึ้นได้ภายใต้ น้ำหนักบรรทุกน้อย ๆ พบว่า เมื่อน้ำหนักหรือแรงกระทำต่อ โครงสร้างอยู่ในช่วงจำกัดยืดหยุ่น ซึ่งหน่วยการหดตัวเป็นสัดส่วนโดยตรงกับหน่วยแรงที่กระทำ คอนกรีตจะไม่เสีรูปมากนัก แต่เมื่อพ้นช่วงนี้แล้ว น้ำหนักหรือแรงที่กระทำ จะทำให้เกิดการเสีรูป เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนในที่สุดก็เกิดการแตกหัก อัตราส่วนของหน่วยแรงต่อหน่วยการหดตัวเรียกว่า โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตหาได้จากเส้นสัมพันธ์นี้มี ลักษณะเป็นรูปโค้งพาราโบลาดังแสดงในภาพที่ 3.5 การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต มีวิธีดังต่อไปนี้

ก) Initial Tangent Modulus คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นสัมผัส ซึ่งได้จากการลาก เส้นให้สัมผัสกับเส้นสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัว ณ จุดเริ่มต้น (Origin)

ข) Secant Modulus คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นที่ลากจากจุดเริ่มต้นกับจุดใด ๆ บนเส้นสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัวที่ต้องการหา

ค) Tangent Modulus คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นสัมผัสกับจุดใด ๆ บนเส้นสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการหดตัว



ภาพที่ 3.5 การหาโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

จากการทดลองพบว่า ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นขึ้นอยู่กับค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตและหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ซึ่งเขียนได้ในรูปของสมการคือ

$$E_c = w^{1.5} 4270 \sqrt{f'_c} \quad (3.7)$$

- เมื่อ E_c คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
 w คือ หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (ตันต่อลูกบาศก์เมตร)
 และ f'_c คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอก เมื่อที่อายุ 28 วัน (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

3.2.2 คุณสมบัติทางด้านการทนทานของคอนกรีต

1) การหดตัวและการขยายตัว

คอนกรีตเป็นวัสดุประเภทหนึ่งที่มีการเปลี่ยนแปลงทางปริมาตรภายในช่วงอายุของคอนกรีต ในทางวิศวกรรมการเปลี่ยนแปลงปริมาตรสามารถแสดงผลด้วยค่าความเครียด (Strain) ซึ่งเป็นค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงต่อความยาวเดิม ความเครียดที่เกิดขึ้นในคอนกรีตมีสาเหตุมาจากหลายปัจจัยที่เป็นผลจากสิ่งแวดล้อม เช่น สภาวะเปียกและแห้ง ความร้อน ความเย็น การแข็งตัวและการละลายของน้ำภายในโพรงคอนกรีต รวมทั้งการทำลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

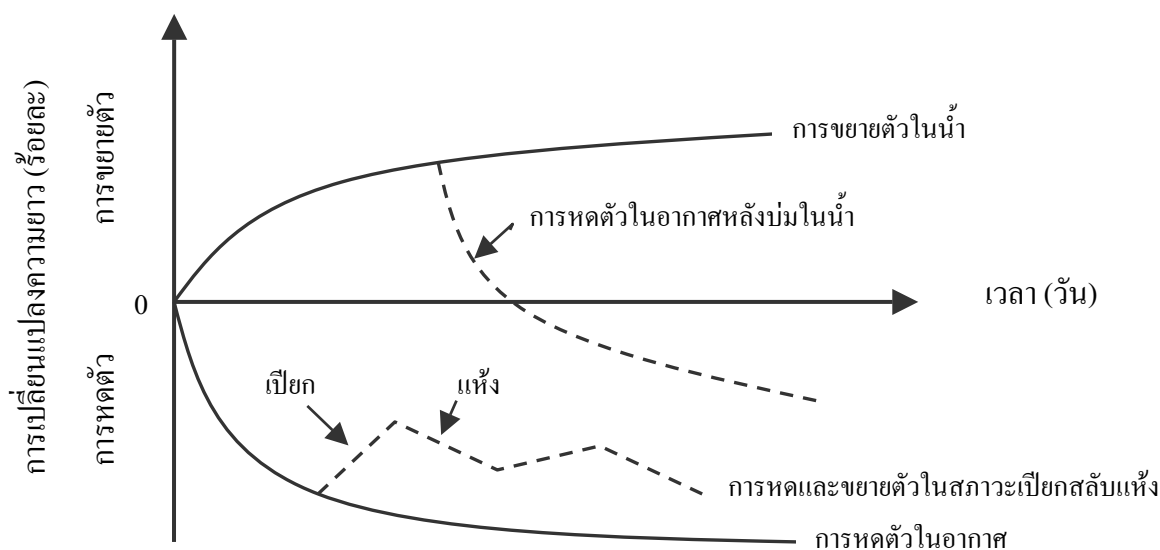
การหดตัวของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วอาจทำให้เกิดการแตกร้าวของคอนกรีตได้หากหน่วยแรงดึง (Tensile Stress) ที่เกิดขึ้นในคอนกรีตมีค่าสูงกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต (Tensile Strength) ซึ่งคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีค่าความเครียดเนื่องจากแรงดึง (Tensile Strain) ต่ำ เมื่อเกิดการแตกร้าว หน่วยแรงดึงในคอนกรีตจะหมดไป การแตกร้าวจะมากหรือน้อยขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้

- การหดตัวของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตแห้งและเย็นลง
- คอนกรีตถูกยึดรั้งไว้ไม่สามารถเคลื่อนตัวได้อิสระ
- ความยืดหยุ่นของคอนกรีต (Elasticity)
- ความคืบของคอนกรีต (Creep)
- กำลังรับแรงดึงของคอนกรีต (Tensile Strength)

การแตกร้าวที่เกิดขึ้นจะไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถรับกำลังของโครงสร้างโดยตรงแต่จะมีผลต่อความสวยงาม ดังนั้น จึงมีผลในด้านสถาปัตยกรรมมากกว่าด้านโครงสร้าง แต่มีไว้ว่าจะไม่มีผลโดยตรงกับโครงสร้าง กล่าวคือ ถ้าการแตกร้าวเกิดขึ้นที่ผิวนอกของคอนกรีตและมีขนาดใหญ่จะมีผลทำให้น้ำหรือสารเคมีจากภายนอกที่อยู่ในรูปของเหลวหรือก๊าซแทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตและทำปฏิกิริยากับสารประกอบในคอนกรีตหรือเหล็กเสริมทำให้เกิดความเสียหายได้

2) การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) เกิดจากการที่คอนกรีตบริเวณผิวที่สัมผัสกับอากาศที่มีความชื้นต่ำกว่าความชื้นในช่องว่างคาพิลลารี (Capillary Pores) มากจนทำให้น้ำอิสระ (Free Water) ระเหยไปสู่อากาศ ทำให้เกิดแรงดึงขึ้นในช่องว่างคาพิลลารีและการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคอนกรีต ถ้าการหดตัวนี้ถูกยึดรั้งไว้ด้วยโครงสร้างที่อยู่รอบข้างหรือด้วยเนื้อคอนกรีตภายในที่ไม่มีการสูญเสียความชื้น รอยแตกร้าวก็อาจเกิดขึ้นได้ถ้าการยึดรั้งนั้นก่อให้เกิดหน่วยแรงยึดรั้งที่มีค่ามากกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตในขณะนั้น โดยปกติแล้วการหดตัวแบบแห้งจะเกิดขึ้นจากคอนกรีตซึ่งในช่วงแรกการหดตัวดังกล่าวจะมีค่าสูงและไม่สามารถกลับคืนได้

ในขณะที่การหดตัวในช่วงหลังจะมีค่าน้อยกว่าและสามารถกลับคืนได้เมื่อได้รับความชื้นอีกครั้ง การแตกร้าวที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้งจะเกิดกับคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วซึ่งไม่สามารถจะตกแต่งผิวใหม่ได้ เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 3.6 จะเห็นได้ว่าการหดตัวแบบแห้งมีค่าสูงตามอัตราการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สูงในช่วงต้น หลังจากนั้นจะมีค่าคงที่



ภาพที่ 3.6 ลักษณะของการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตและความสัมพันธ์กับเวลา

ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวแบบแห้ง

ก) ปริมาณน้ำต่อลูกบาศก์เมตรของคอนกรีต คอนกรีตที่มีปริมาณน้ำต่อลูกบาศก์เมตรของคอนกรีตมากจะมีปริมาณน้ำอิสระ (Free Water) มาก ซึ่งเมื่อมีปริมาณน้ำอิสระมากก็จะทำให้ปริมาณน้ำที่สามารถระเหยสู่สิ่งแวดล้อมมากขึ้นไปด้วย

ข) อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูง จะทำให้มีช่องว่างคาพิลลารี (Capillary Pores) มากปริมาณน้ำอิสระก็มากด้วย การที่คอนกรีตมีช่องว่างคาพิลลารีมาก จะทำให้น้ำระเหยออกจากคอนกรีตได้สะดวกขึ้น

ค) ปริมาณมวลรวม เนื่องจากปกติแล้วการหดตัวจะเกิดในคอนกรีต ดังนั้นคอนกรีตที่มีปริมาณมวลรวมมากนั้นคือมีปริมาณคอนกรีตน้อยก็จะทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัวน้อยลงด้วย

ง) ชนิดและคุณภาพของมวลรวม เนื่องจากมวลรวมมักจะเป็นส่วนที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในเรื่องของปริมาตรดังนั้นมวลรวมจึงมีคุณสมบัติที่จะช่วยต่อต้านการหดตัวในคอนกรีตได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้ามวลรวมมีโมดูลัสของความยืดหยุ่นสูง การสัมผัสกันของมวลรวมจึงเป็นกลไกที่สำคัญ

อันหนึ่งของการต้านทานการหดตัวซึ่งเกิดจากคอนกรีตได้ มวลรวมที่มีการดูดซึมน้ำมาก มักจะก่อให้เกิดการหดตัวแบบแห้งในคอนกรีตมากด้วยมวลรวมที่มีการดูดซึมน้ำมาก ยกตัวอย่างเช่น มวลรวมเบา (Lightweight Aggregate) เป็นต้น ซึ่งโดยแล้วปกติมวลรวมที่มีการดูดซึมน้ำสูง ก็มักจะมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นต่ำด้วยทำให้แรงต้านทานการหดตัวต่ำตามไปด้วย ขนาดผลของมวลรวมที่ดีก็จะเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยให้การหดตัวของคอนกรีตลดลงเนื่องจากจะทำให้คอนกรีตต้องการปริมาณซีเมนต์ที่น้อยลง

จ) ชนิดและปริมาณของวัสดุผสม การใช้สารปอซโซลานหรือวัสดุผงบางชนิดก็มีผลต่อการหดตัวของคอนกรีต เช่น เถ้าลอย สามารถช่วยลดการหดตัวแบบแห้งได้ เนื่องจากช่วยลดความต้องการน้ำของคอนกรีตและเถ้าลอยบางชนิดก็ยังมีคุณสมบัติช่วยให้คอนกรีตขยายตัวเล็กน้อยทำให้ชดเชยการหดตัวได้บางส่วน การใช้ผงซิลิกาฟูมก็สามารถช่วยลดการหดตัวแบบแห้งได้เช่นกันเนื่องจากช่วยเพิ่มความแน่นให้กับคอนกรีต การใช้ผงฝุ่นหินก็อาจสามารถช่วยลดการหดตัวแบบแห้ง

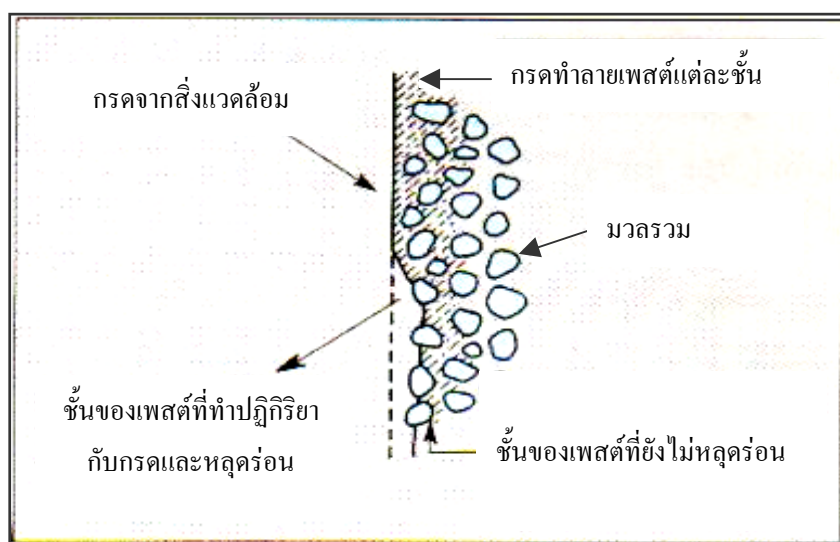
ฉ) อุณหภูมิและความชื้นของสิ่งแวดล้อม สิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะทำให้คอนกรีตสูญเสียน้ำได้เร็วขึ้น เนื่องจากการระเหยของน้ำเกิดได้มากจึงทำให้เกิดการหดตัวแบบแห้งมากขึ้น

ช) มิติและรูปร่างลักษณะของโครงสร้างคอนกรีต โครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากก็จะสูญเสียความชื้นได้เร็วจึงทำให้เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้งได้ง่าย

3) ความทนทานต่อการกัดกร่อนจากกรด (Acid Attack Resistance) (สมนึก ตั้งเต็มศิริกุล, 2543, น. 58 – 59)

คอนกรีตอาจถูกกระทำให้สึกกร่อนได้โดยกรด โดยคอนกรีตจะเกิดความเสียหายในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดจากของเหลวที่มีความเป็นกรดต่าง (pH) ต่ำกว่า 6.5 และถ้าหาก pH ต่ำกว่า 4.5 จะเกิดความเสียหายอย่างรุนแรงมาก ฝนกรดมักเกิดในบริเวณที่มีอุตสาหกรรมหรือโรงงานอยู่มาก ซึ่งอยู่ในรูปกรดซัลฟริกหรือกรดไนตริกและมีค่า pH ระหว่าง 4 ถึง 4.5 จะทำให้ผิวหน้าของคอนกรีตสึกกร่อนได้ ในที่ระบายน้ำเสียที่มีความเป็นด่างสูงจะไม่ทำอันตรายต่อคอนกรีตแต่ในที่ระบายน้ำหลาย ๆ แห่งพบว่าอาจมีสภาพเป็นกรดได้ในกรณีที่มีสารประกอบของกำมะถันอยู่ซึ่งจะถูกแบคทีเรียบางชนิดในที่ระบายน้ำทำให้กลายเป็นกรดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้และจะเปลี่ยนรูปเป็นกรดซัลฟริกหรือกรดกำมะถัน ซึ่งกรดซัลฟริกเป็นกรดที่กัดกร่อนคอนกรีตได้รุนแรง น้ำจากภูเขาหรือน้ำฝนอาจมีความเป็นกรดในระดับกลาง เนื่องจากการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำทำให้น้ำนั้นกลายเป็นกรดซึ่งจะกัดกร่อนผิวหน้าของคอนกรีต ตัวอย่างของกรดที่สามารถกัดกร่อนคอนกรีตอย่างรุนแรงคือ กรด Carbonic, Hydrochloric และ Sulfuric เป็นต้น การกัดกร่อน

โดยกรดเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงสารประกอบแคลเซียมทุกประเภทที่มีอยู่ในซีเมนต์เพสต์ เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ให้เป็นเกลือแคลเซียมของกรดที่เข้ามาปฏิกิริยา เช่น กรดเกลือ (HCl) ก็จะเปลี่ยนสารประกอบแคลเซียมในซีเมนต์เพสต์ไปเป็นแคลเซียมคลอไรด์ ($\text{Ca}(\text{Cl}_2)$) กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) จะเปลี่ยนสารประกอบของแคลเซียมในซีเมนต์เพสต์ไปเป็นแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) เป็นต้น เมื่อสารประกอบแคลเซียมในคอนกรีตถูกเปลี่ยนไปเป็นเกลือทำให้เนื้อคอนกรีตถูกทำลายหายไป ดังแสดงในภาพที่ 3.7 โดยความรุนแรงของการกัดกร่อนของกรดขึ้นอยู่กับชนิดของกรดตลอดจนความเข้มข้นของกรด



ภาพที่ 3.7 ความเสียหายของคอนกรีตที่เกิดจากกรด

บทที่ 4

วิธีการศึกษาวิจัย

4.1 แผนการทดสอบ

แผนการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังต่อไปนี้

4.1.1 การทดสอบคุณสมบัติของน้ำสลัดจ์และตะกอนสลัดจ์

ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางด้านเคมีและทางกายภาพของน้ำสลัดจ์และตะกอนสลัดจ์ โดยคุณสมบัติของน้ำสลัดจ์ที่ทำการทดสอบได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณซัลเฟต ปริมาณคลอไรด์ ปริมาณของแข็งทั้งหมด และค่าความถ่วงจำเพาะ ส่วนคุณสมบัติของตะกอนสลัดจ์ที่ทำการทดสอบได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณความชื้น ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด การกระจายของขนาดอนุภาค ภาพขยายทางกายภาพ และการวิเคราะห์ความเป็นอันตราย

4.1.2 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์

ศึกษาคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติทางด้านความทนทานของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์ ซึ่งคุณสมบัติทางกลประกอบด้วย การทดสอบค่าการยุบตัวเริ่มต้นและการสูญเสียค่าการยุบตัว ระยะเวลาการก่อตัว การทดสอบกำลังรับแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีก การทดสอบกำลังรับแรงดัด โมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน และอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่วนคุณสมบัติทางด้านความทนทานประกอบด้วย การทดสอบการหดตัวแบบแห้งและความทนทานต่อสารละลายกรด

4.2 วัสดุทดสอบ

- 1) ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- 2) น้ำสลัดจ์ ใช้น้ำสลัดจ์จากบ่อดักตะกอนในโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ ณ โรงผลิตปากเกร็ด จ.นนทบุรี ของบริษัทผลิตภัณฑ์และวัตถุดิบก่อสร้าง จำกัด

3) วิธีการเก็บตัวอย่างน้ำสลัดจ์ ภายหลังจากการล้างรผสมคอนกรีตจะมีเศษคอนกรีตปนมากับน้ำล้างซึ่งกากคอนกรีตที่หนักจะตกอยู่ที่บ่อคายกากคอนกรีตดังแสดงในภาพที่ 4.1 ส่วนที่เป็นน้ำและเศษตะกอนที่เบาจะไหลไปสู่บ่อตกตะกอนดังแสดงในภาพที่ 4.2 ซึ่งน้ำสลัดจ์ที่นำมาศึกษานั้นได้จากการเก็บตัวอย่างในบ่อตกตะกอนโดยการวัดความลึกของปริมาณน้ำในส่วนบนและตะกอนส่วนล่างดังแสดงในภาพที่ 4.3 แล้วทำการกวนน้ำและตะกอนให้ขึ้นแล้วตักใส่ถังขนใส่รถบรรทุกมาเก็บไว้ในบ่อพักที่เตรียมไว้ในภาพที่ 4.4 ในการนำมาใช้งานนั้นจะทำการกวนน้ำและตะกอนในบ่อพักเข้าด้วยกันจนกระทั่งสม่ำเสมอดังแสดงในภาพที่ 4.5 แล้วนำมาเทในอ่างพลาสติกที่จำลองขึ้นมาโดยย่อส่วนลงมาจากรูขนาดของบ่อตกตะกอนจริงซึ่งใช้อัตราส่วน 1 ต่อ 10 ดังแสดงในภาพที่ 4.6 และ 4.7 จนกระทั่งปริมาณน้ำใสและตะกอนได้สัดส่วนตามบ่อจริงดังแสดงในภาพที่ 4.8 จากนั้นกวนให้สม่ำเสมออีกครั้งแล้วนำมาเทเก็บไว้ในถังพลาสติก ดังแสดงในภาพที่ 4.9 เพื่อเตรียมนำไปผสมคอนกรีตต่อไป และก่อนที่จะผสมคอนกรีตจะทำการกวนน้ำและตะกอนในถังให้สม่ำเสมออีกครั้งแล้วจึงทำการผสม ในขณะที่ผสมตะกอนสลัดจ์ที่นำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพได้จากการนำน้ำสลัดจ์มาอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.1 บ่อคายกากคอนกรีต



ภาพที่ 4.2 บ่อตกตะกอน



ภาพที่ 4.3 การวัดความลึกของตะกอนและน้ำในบ่อตกตะกอน



ภาพที่ 4.4 บ่อพักน้ำสลัดจ์



ภาพที่ 4.5 การกวนน้ำสลัดจ์ในบ่อพัก



ภาพที่ 4.6 อ่างจำลองย่อส่วนขนาด 1 ต่อ 10



ภาพที่ 4.7 การเทน้ำสลัดจ์ในอ่างจำลอง



ภาพที่ 4.8 น้ำสลัดจ์ที่ปรับสัดส่วน
ในอ่างจำลองเสร็จแล้ว



ภาพที่ 4.9 การเก็บน้ำสลัดจ์ใส่ถังเพื่อ
เตรียมนำไปผสมคอนกรีต

- 4) ทราย ทรายที่ใช้เป็นทรายแม่น้ำ ที่มีขนาดกะได้ได้ตามมาตรฐาน ASTM C 33
- 5) หิน หินที่ใช้เป็นหินปูน มีขนาดโตสุด 25 มิลลิเมตร และมีขนาดกะได้ได้ตามมาตรฐาน ASTM C 33
- 6) น้ำ ใช้น้ำประปาที่อาคารปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต)
- 7) สารละลาย ใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และซัลฟูริก (H_2SO_4) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 ในน้ำประปา โดยน้ำหนัก

4.3 อุปกรณ์การทดสอบ

4.3.1 อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม ได้แก่

- 1) ชุดทดสอบหาความถ่วงจำเพาะและร้อยละการดูดซับน้ำ
- 2) ชุดทดสอบหาขนาดกะและโมดูลัสความละเอียด
- 3) ชุดทดสอบหาปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวม

4.3.2 อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต ได้แก่

- 1) เครื่องผสมคอนกรีต
- 2) เครื่องจี้คอนกรีต ที่กระทุ้งเหล็ก เกรียงเหล็ก
- 3) แบบหล่อทรงกระบอก ขนาด 10x20 ซม.
- 4) แบบหล่อทรงกระบอก ขนาด 15x30 ซม.
- 5) แบบหล่อคาน ขนาด 10x10x50 ซม.
- 6) แบบหล่อปริซึม ขนาด 7.5x7.5x28.5 ซม.
- 7) ชุดทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต
- 8) ชุดทดสอบหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต
- 9) ชุดทดสอบอุณหภูมิของปฏิกิริยาของคอนกรีต
- 10) เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine)
- 11) อุปกรณ์วัดการหดตัวแบบดิจิตอล (Digital Length Comparator)

4.4 รายละเอียดวิธีการทดสอบ

4.4.1 การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของน้ำสลัดจ์

การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของน้ำสลัดจ์ ทำการทดสอบโดย บริษัทปูนซิเมนต์ไทยอุตสาหกรรม จำกัด ซึ่งมีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

- 1) ความเป็นกรด-ด่าง ทดสอบตามมาตรฐาน APHA-4500B-H⁺ (Electrometric Method)
- 2) ปริมาณซัลเฟต ทดสอบตามมาตรฐาน APHA-4500E-SO₄²⁻ (Turbidimetric Method)
- 3) ปริมาณคลอไรด์ ทดสอบตามมาตรฐาน APHA-4500D-Cl⁻ (Potentiometric Method)
- 4) ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solids) ทดสอบตามมาตรฐาน APHA-2540B โดยใช้วิธีการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส
- 5) ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ทดสอบตามมาตรฐาน APHA-2710F
- 6) ปริมาณอัลคาไลน์ ทดสอบตามมาตรฐาน APHA-2310

4.4.2 การทดสอบคุณสมบัติของตะกอนสลัดจ์

การทดสอบคุณสมบัติของตะกอนสลัดจ์แบ่งการทดสอบเป็น 2 ส่วน คือ

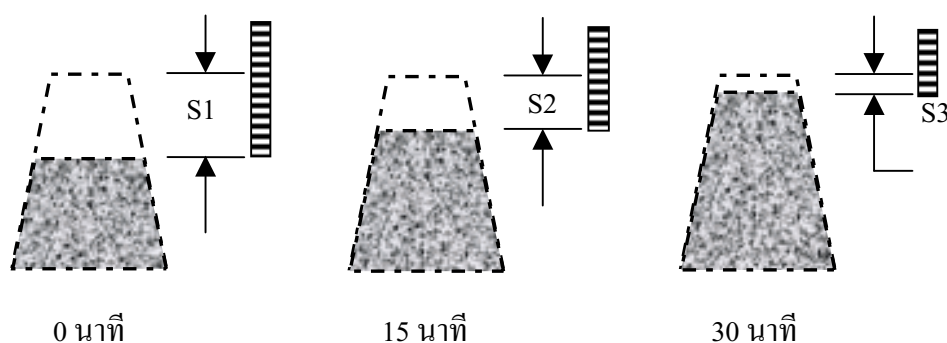
- 1) การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของตะกอนสลัดจ์ ทดสอบโดยบริษัท ปูนซิเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ตามรายละเอียดดังนี้
 - ก) องค์ประกอบทางเคมี ทดสอบโดยใช้รังสี X-ray Fluorescent
 - ข) คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C188 (Standard Test Method for Specific Gravity of Hydraulic Cement) พื้นที่ผิวจำเพาะในรูปของรายละเอียดโดยวิธีเบลม ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 204 (Standard Test Method for Fineness of Portland Cement by Air Permeability Apparatus) ความต้องการน้ำ (Water Requirement) ดัชนีกำลัง (Strength Index) ความหนาแน่นรวม และการกระจายขนาดคละ
- 2) การทดสอบคุณสมบัติกายภาพของตะกอนสลัดจ์ ทดสอบโดยศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตามรายละเอียดดังนี้
 - ก) ภาพขยายทางกายภาพ โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)
 - ข) การกระจายของขนาดอนุภาค โดยใช้เครื่อง Particle Size Distribution Analyzer

ค) การวิเคราะห์ความเป็นอสัณฐาน วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสี X-ray (X-ray Diffraction)

4.4.3 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต

1) การทดสอบหาค่าความยุบตัวเริ่มต้น ตามมาตรฐาน ASTM C 143

2) การทดสอบการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ทำโดยการนำคอนกรีตที่ผสมเรียบร้อยแล้วมาวัดอุณหภูมิและหาค่าการยุบตัวเริ่มต้นตามมาตรฐาน ASTM C 143 หลังจากนั้นจึงเทคอนกรีตกลับใส่ในโมล์ผสม ทิ้งไว้โดยปิดฝาไม่ให้ไอน้ำระเหยออก และควรเปิดเครื่องผสมเป็นระยะเวลาพอครบกำหนด 15 นาที จึงนำคอนกรีตมาหาค่าการยุบตัว (Slump, S) และบันทึกค่า กระทำเช่นนี้จนคอนกรีตไม่มีค่าการยุบตัว ดังแสดงการวัดค่าการยุบตัวที่จะมีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ($S_1 > S_2 > S_3$) ในภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป

3) การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C 403

4) การทดสอบกำลังรับแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีก ใช้ตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ขั้นตอนการทดสอบกำลังรับแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีกเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 39 และ ASTM C 496 ตามลำดับ

5) การทดสอบหาโมดูลัสของความยืดหยุ่น ตามมาตรฐาน ASTM C 469 โดยใช้ตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ถอดแบบที่อายุ 1 วัน แล้วนำตัวอย่างที่ได้มาบ่มในน้ำเมื่อครบกำหนด 28 วัน แล้วจึงเริ่มทำการทดสอบ โดยก่อนทำการทดสอบให้ทิ้งคอนกรีตที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาไม่เกิน 1 ชั่วโมง

4.4.4 การทดสอบคุณสมบัติด้านความทนทานของคอนกรีต

1) การทดสอบความทนทานต่อสภาพที่เป็นกรด ใช้ตัวอย่างขนาด $10 \times 10 \times 10$ เซนติเมตร บ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน แล้วจึงบ่มในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 ทำการทดสอบหาค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักที่อายุ 7, 28, 60, 90 และ 120 วัน ตามลำดับ

2) การทดสอบการหดตัวแบบแห้ง ตามมาตรฐาน ASTM C 596 และ ASTM C 490 โดยทำการหล่อคอนกรีตตามอัตราส่วนผสม จากนั้นเทลงแบบหล่อขนาด $7.5 \times 7.5 \times 28.5$ เซนติเมตร แล้วถอดแบบที่เวลา $23\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง ต่อจากนั้นจึงทำการบ่มในน้ำ เมื่อครบกำหนด 28 วัน ให้นำขึ้นจากน้ำมาทำการบ่มในตู้อบซึ่งควบคุมอุณหภูมิที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 60 ± 5 ทำการวัดเก็บความยาวของแท่งตัวอย่างเป็นประจำจนกระทั่งค่าการหดตัวมีแนวโน้มคงที่ และคำนวณความยาวที่เปลี่ยนไปของแท่งตัวอย่างตามสมการที่ (4.1)

$$\text{Strain} = \frac{L_0 - L_i}{L_0} \quad (4.1)$$

เมื่อ L_0 คือ ความยาวเริ่มต้นของแท่งตัวอย่าง

L_i คือ ความยาวของแท่งตัวอย่าง ณ วันที่ทำการวัด

4.5 สัดส่วนผสมคอนกรีต

สัดส่วนผสมของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมน้ำสัจจ์ที่ใช้ในการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1

สัดส่วนผสมคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมน้ำสัจ

ประเภท คอนกรีต	γ	w/c	ปริมาณปูน ซีเมนต์ (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณมวล รวมละเอียด (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณมวล รวมหยาบ (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณน้ำ (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณ น้ำสัจ (กก./ลบ.ม.)
OPC	1.2	0.5	347	896	956	173	0
OPC	1.2	0.6	309	896	956	185	0
OPC	1.2	0.7	279	896	956	195	0
OPC	1.4	0.5	406	833	889	203	0
OPC	1.4	0.6	362	833	889	217	0
OPC	1.4	0.7	327	833	889	229	0
OPC	1.6	0.5	466	771	823	233	0
OPC	1.6	0.6	416	771	823	249	0
OPC	1.6	0.7	375	771	823	262	0
SW10	1.2	0.5	347	896	956	156	17
SW10	1.2	0.6	309	896	956	167	18
SW10	1.2	0.7	279	896	956	176	19
SW10	1.4	0.5	406	833	889	183	20
SW10	1.4	0.6	362	833	889	195	22
SW10	1.4	0.7	327	833	889	206	23
SW10	1.6	0.5	466	771	823	210	23
SW10	1.6	0.6	416	771	823	224	25
SW10	1.6	0.7	375	771	823	236	26

หมายเหตุ : OPC คือ คอนกรีตธรรมดา, w/c คือ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก

SW(X) คือ คอนกรีตผสมน้ำสัจที่แทนที่น้ำประปาด้วยน้ำสัจร้อยละ (X) โดยน้ำหนัก

 γ คือ อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

สัดส่วนผสมคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตผสมน้ำสัจ

ประเภท คอนกรีต	γ	w/c	ปริมาณปูน ซีเมนต์ (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณมวล รวมละเอียด (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณมวล รวมหยาบ (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณน้ำ (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณ น้ำสัจ (กก./ลบ.ม.)
SW20	1.2	0.5	347	896	956	138	35
SW20	1.2	0.6	309	896	956	148	37
SW20	1.2	0.7	279	896	956	156	39
SW20	1.4	0.5	406	833	889	162	41
SW20	1.4	0.6	362	833	889	174	43
SW20	1.4	0.7	327	833	889	183	46
SW20	1.6	0.5	466	771	823	186	47
SW20	1.6	0.6	416	771	823	199	50
SW20	1.6	0.7	375	771	823	210	52
SW30	1.2	0.5	347	896	956	121	52
SW30	1.2	0.6	309	896	956	130	55
SW30	1.2	0.7	279	896	956	137	58
SW30	1.4	0.5	406	833	889	142	61
SW30	1.4	0.6	362	833	889	152	65
SW30	1.4	0.7	327	833	889	160	69
SW30	1.6	0.5	466	771	823	163	70
SW30	1.6	0.6	416	771	823	174	75
SW30	1.6	0.7	375	771	823	183	79

หมายเหตุ : OPC คือ คอนกรีตธรรมดา, w/c คือ อัตราส่วนน้ำต่อน้ำปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก

SW(X) คือ คอนกรีตผสมน้ำสัจที่แทนที่น้ำประปาด้วยน้ำสัจร้อยละ (X) โดยน้ำหนัก

γ คือ อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น

4.6 จำนวนตัวอย่างทดสอบ

จำนวนตัวอย่างทดสอบคอนกรีตธรรมดาและผสมน้ำสัจแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2

จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมน้ำเสลดที่อัตราส่วนปริมาตรเสลดต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสภาวะที่แห้ง (γ) เท่ากับ 1.2, 1.4 และ 1.6

ร้อยละการแทนที่ของน้ำเสลดในน้ำประปา	สัญลักษณ์	รายการทดสอบ	จำนวนตัวอย่างทดสอบ			รวม
			อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์			
			0.50	0.60	0.70	
			0.50	0.60	0.70	
0	น้ำประปา	ระยะเวลาการก่อตัว	3	3	3	9
		โมดูลัสยืดหยุ่นที่ 28 วัน	9	9	9	27
		ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัว	3	3	3	9
		กำลังรับแรงอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90 และ 180 วัน	54	54	54	162
		กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ	54	54	54	162
		กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90 และ 180 วัน	54	54	54	162
		การหดตัวแบบแห้ง	9	9	9	27
		การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการดูด	18	18	18	54
		คุณสมบัติของปฏิกิริยาไฮเดรชัน	3	3	3	9

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์ที่หนึ่งอัตราส่วนปริมาตรพลัสต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสภาวะที่แห้ง (V) เท่ากับ 1.2, 1.4 และ 1.6

ร้อยละการแทนที่ของน้ำ สลัดจ์ในน้ำประปา	สัญลักษณ์	รายการทดสอบ	จำนวนตัวอย่างทดสอบ			รวม
			อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์			
			0.50	0.60	0.70	
10	SW10	ระยะเวลาการก่อตัว	3	3	3	9
		โมดูลัสยืดหยุ่นที่ 28 วัน	9	9	9	27
		ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัว	3	3	3	9
		กำลังรับแรงอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90 และ 180 วัน	54	54	54	162
		กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ	54	54	54	162
		กำลังรับแรงดัดที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90 และ 180 วัน	54	54	54	162
		การหดตัวแบบแห้ง	9	9	9	27
		การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการรด	18	18	18	54
		อุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮเดรชัน	3	3	3	9

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์ที่อัตราส่วนปริมาตรพลัสต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสภาวะที่แห้ง (γ) เท่ากับ 1.2, 1.4 และ 1.6

ร้อยละการแทนที่ของน้ำ สลัดจ์ในน้ำประปา	สัญลักษณ์	รายการทดสอบ	จำนวนตัวอย่างทดสอบ			รวม
			อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์			
			0.50	0.60	0.70	
20	SW20	ระยะเวลาการก่อตัว	3	3	3	9
		โมดูลัสยืดหยุ่นที่ 28 วัน	9	9	9	27
		ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัว	3	3	3	9
		กำลังรับแรงอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90 และ 180 วัน	54	54	54	162
		กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ	54	54	54	162
		กำลังรับแรงดัดที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90 และ 180 วัน	54	54	54	162
		การหดตัวแบบแห้ง	9	9	9	27
		การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรด อุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮเดรชัน	18	18	18	54
		3	3	3	9	

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์ที่อัตราส่วนปริมาตรพลัสต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสภาวะที่แห้ง (γ) เท่ากับ 1.2, 1.4 และ 1.6

ร้อยละการแทนที่ของน้ำ สลัดจ์ในน้ำประปา	สัญลักษณ์	รายการทดสอบ	จำนวนตัวอย่างทดสอบ			รวม
			อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์			
			0.50	0.60	0.70	
30	SW30	ระยะเวลาการก่อตัว	3	3	3	9
		โมดูลัสยืดหยุ่นที่ 28 วัน	9	9	9	27
		ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัว	3	3	3	9
		กำลังรับแรงอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90 และ 180 วัน	54	54	54	162
		กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ	54	54	54	162
		กำลังรับแรงดัดที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90 และ 180 วัน	54	54	54	162
		การหดตัวแบบแห้ง	9	9	9	27
		การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการดูดกลืนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน	18	18	18	54
		อุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮเดรชัน	3	3	3	9
รวมจำนวนตัวอย่างทดสอบทั้งสิ้น			828	828	828	2,484

บทที่ 5

ผลการทดสอบและวิจารณ์

5.1 การทดสอบคุณสมบัติของน้ำสลัดจ์ ตะกอนสลัดจ์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

5.1.1 คุณสมบัติของน้ำสลัดจ์

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของน้ำสลัดจ์ที่ได้จากการปรับสัดส่วนในอ่างจำลองซึ่งมีขนาดย่อส่วนจากบ่อดักตะกอนจริงเท่ากับ 1 ต่อ 10 ที่นำมาใช้ผสมคอนกรีตเปรียบเทียบกับน้ำประปาแสดงในตารางที่ 5.1 พบว่าน้ำสลัดจ์มีค่าเป็นด่างสูง โดยมีค่าความเป็นกรดด่างสูงถึง 12.2 จากมาตรวัดของค่าความเป็นกรดด่าง (pH) (กำหนดจากค่า pH เท่ากับ 0 มีความเป็นกรดสูง ถึง pH เท่ากับ 14 มีความเป็นด่างสูง) และสูงกว่าน้ำประปาที่มีค่าเท่ากับ 7.4 เนื่องจากในน้ำสลัดจ์มีส่วนประกอบคือ อนุภาคปูนซีเมนต์ทั้งที่ไม่ทำปฏิกิริยา (Unhydrated Cement) และทำปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้วได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีความสามารถในการละลายน้ำและแตกตัวเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไอออน (Ca^{2+}) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) โดยความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความเป็นกรดด่างสูงขึ้นไปด้วย

เมื่อพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรดด่างเมื่อทำการแทนที่น้ำสลัดจ์ในน้ำประปาโดยน้ำหนักดังแสดงในภาพที่ 5.1 จะเห็นว่าค่าความเป็นกรดด่างของน้ำผสม (น้ำประปาและน้ำสลัดจ์) มีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นสัดส่วนกับอัตราส่วนการแทนที่ของน้ำสลัดจ์ในน้ำประปา โดยน้ำหนักโดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อในน้ำผสมมีน้ำสลัดจ์อยู่ กล่าวคือค่าความเป็นกรดด่างของน้ำประปามีค่าเท่ากับ 7.4 ในขณะที่เมื่อมีการแทนที่น้ำสลัดจ์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ในน้ำประปาจะทำให้ค่าความเป็นกรดด่างเพิ่มขึ้นเป็น 11.6 และมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อการแทนที่ของน้ำสลัดจ์เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่ในน้ำสลัดจ์ซึ่งดูได้จากค่าความเป็นกรดด่างที่สูง เมื่อนำมาแทนที่ในน้ำประปาจะทำให้ความเข้มข้นของไอออนเพิ่มขึ้นน้อยมาก และไม่เป็นปฏิกิริยากับสัดส่วนการแทนที่ของน้ำสลัดจ์ในน้ำประปาโดยน้ำหนักกล่าว โดยเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดสอบและการคำนวณตามสมการที่ 5.1 พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกันโดยค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของน้ำสลัดจ์และน้ำประปามีค่าเท่ากับ 12.2 และ 7.4 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 5.1 และเมื่อนำมาคำนวณค่าความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออน [H^+] ของน้ำสลัดจ์ตาม

สมการที่ 5.1 มีค่าเท่ากับ 6.31×10^{-13} โมลต่อลิตร และน้ำประปามีค่าเท่ากับ 3.98×10^{-8} โมลต่อลิตร หรือความเข้มข้นในรูปของไฮดรอกไซด์ไอออน $[\text{OH}^-]$ จากการคำนวณในสมการที่ 5.2 เท่ากับ 1.58×10^{-2} และ 2.51×10^{-7} โมลต่อลิตร ดังนั้นในกรณีของการนำน้ำสลัดจ์มาผสมในสัดส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักในน้ำประปา ทำให้ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนในน้ำผสมระหว่างน้ำสลัดจ์และน้ำประปามีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.54×10^{-3} โมลต่อลิตร และเมื่อนำไปคำนวณกลับตามสมการที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ ทำให้ได้ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 11.2 และในทำนองเดียวกันเมื่อทำการแทนที่น้ำสลัดจ์ในน้ำประปาที่ร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนัก จะทำให้ได้ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำผสมเท่ากับ 11.5 และ 11.7 ตามลำดับ (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก)

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+] \quad (5.1)$$

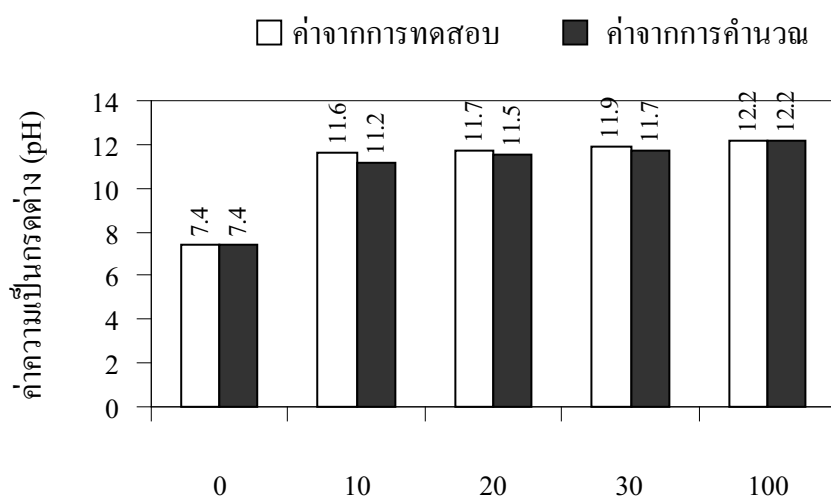
$$[\text{OH}^-] = \frac{1.0 \times 10^{-14}}{[\text{H}^+]} \quad (5.2)$$

โดยที่ $[\text{H}^+]$ คือ ความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออน หน่วยเป็นโมลต่อลิตร
 $[\text{OH}^-]$ คือ ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนหน่วยเป็นโมลต่อลิตร
 1.0×10^{-14} คือ ค่าคงที่สำหรับการแตกตัวของน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

สำหรับองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ ปริมาณคลอไรด์ในน้ำสลัดจ์ที่มีค่าเท่ากับ 8.6 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งต่ำกว่าที่มีในน้ำประปาและต่ำกว่ามาตรฐานของน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตในงานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป (ASTM C 94 Standard Specification for Ready-mixed Concrete) ที่กำหนดไว้ไม่ควรเกิน 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เช่นเดียวกับปริมาณของซัลเฟตที่มีค่าเท่ากับ 16.35 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งต่ำกว่าที่มีในน้ำประปา (34.96 มิลลิกรัมต่อลิตร) และในมาตรฐานกำหนด (น้อยกว่า 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) และสำหรับค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำสลัดจ์มีค่าเท่ากับ 1.03 ซึ่งไม่ต่างไปจากน้ำประปา (ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.0)

ตารางที่ 5.1
คุณสมบัติทางเคมีของน้ำประปาและน้ำสลัดจ์

คุณสมบัติทางเคมี	หน่วย	น้ำประปา	น้ำสลัดจ์	ASTM C 94
1. ค่าความเป็นกรดด่าง (pH)	-	7.4	12.2	-
2. คลอไรด์ (Cl ⁻)	มิลลิกรัมต่อลิตร	14.9	8.6	ไม่เกิน 1,000
3. ซัลเฟต (SO ₄ ²⁻)	มิลลิกรัมต่อลิตร	34.96	16.35	ไม่เกิน 3,000
4. ของแข็งทั้งหมด (Total Solids)	มิลลิกรัมต่อลิตร	160	73,250	ไม่เกิน 50,000
5. ความถ่วงจำเพาะ	-	1.0	1.03	-
6. อัลคาไลน์ ในรูปคาร์บอเนต และไบคาร์บอเนต	มิลลิกรัมต่อลิตร	81	761	ไม่เกิน 1,000 (BS 3148)

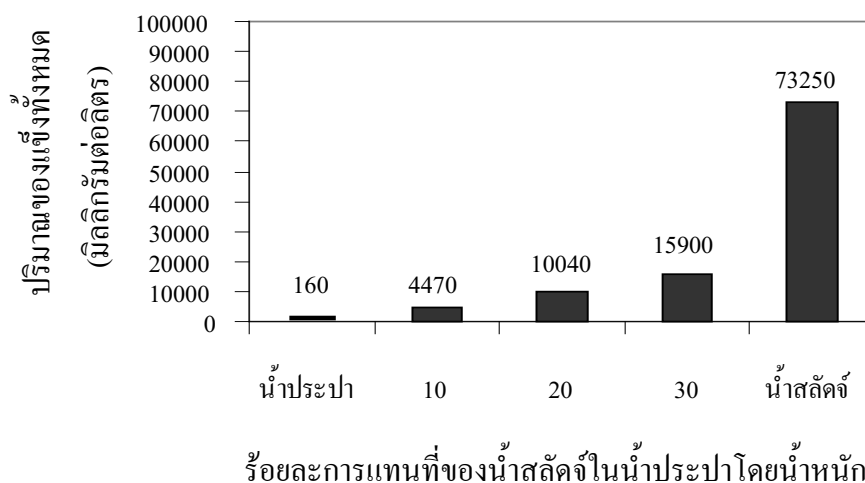


ร้อยละการแทนที่ของน้ำสลัดจ์ในน้ำประปาโดยน้ำหนัก

ภาพที่ 5.1 ค่าความเป็นกรดด่างของน้ำประปาและน้ำสลัดจ์

จากการทดสอบหาปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solids) ที่มีในน้ำสลัดจ์มีค่าสูงถึง 73,250 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานกำหนดคือไม่เกิน 50,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (ASTM C 94) แต่จะเห็นว่าปริมาณการแทนที่ของน้ำสลัดจ์ในน้ำประปาที่ระบุในขอบเขตของการ

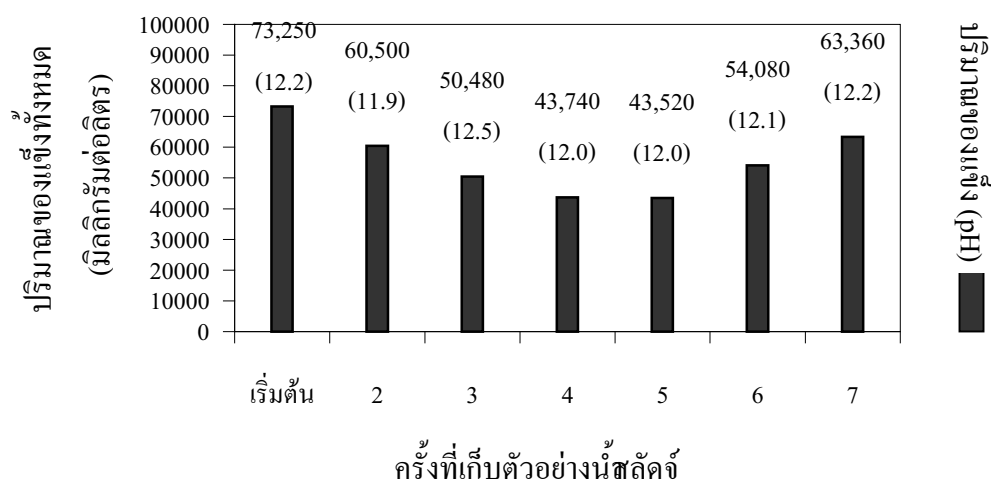
ศึกษาไว้ไม่เกินร้อยละ 30 โดยน้ำหนักซึ่งมีปริมาณของแข็งรวมทั้งหมดเท่ากับ 15,900 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในภาพที่ 5.2 ทำให้ปริมาณของแข็งรวมมีค่าไม่เกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด



ภาพที่ 5.2 ปริมาณของแข็งทั้งหมดในสารผสมระหว่างน้ำประปาและน้ำสลัดจ์

5.1.2 การตรวจสอบคุณสมบัติของน้ำสลัดจ์ที่ได้จากการสุมเก็บตัวอย่างระหว่างการทำวิจัย

ในระหว่างการทำวิจัยเป็นเวลาทั้งสิ้น 12 เดือน (มิถุนายน พ.ศ.2545 ถึง พฤษภาคม พ.ศ.2546) นั้นได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำสลัดจ์เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างคุณสมบัติของน้ำสลัดจ์ในรูปของปริมาณของแข็งทั้งหมดและค่าความเป็นกรด่างผันแปรตามเวลา โดยใช้วิธีการสุมเก็บตัวอย่างน้ำสลัดจ์ทุกๆ 2 เดือน อีกจำนวน 6 ครั้ง และนำมาปรับสัดส่วนในอ่างจำลองเช่นเดียวกันกับการเก็บน้ำสลัดจ์ที่นำมาใช้ในครั้งแรก ซึ่งคุณสมบัติในรูปของปริมาณของแข็งทั้งหมดและค่าความเป็นกรด่างของน้ำสลัดจ์ของแต่ละครั้งที่ได้นั้นแสดงค่าในภาพที่ 5.3 โดยครั้งที่ 1 คือน้ำสลัดจ์ที่เก็บมาครั้งแรกที่ใช้ในการทำวิจัย และผลจากการวิเคราะห์น้ำสลัดจ์รวมทั้งหมดทุกครั้งนั้นจะมีค่าความเป็นกรด่างเฉลี่ยเท่ากับ 12.13 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.20 ส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดนั้นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 55,560 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 10,890 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณของแข็งทั้งหมดและค่าความเป็นกรด่างแล้วพบว่าปริมาณของแข็งทั้งหมดนั้นมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมากกว่าค่าความเป็นกรด่าง ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จะใช้ปริมาณของแข็งทั้งหมดเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีต



ภาพที่ 5.3 ปริมาณของแข็งทั้งหมดและค่าความเป็นกรดต่างของน้ำสลัดจ์ในช่วงระหว่างการทำวิจัย

5.1.3 คุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และตะกอนสลัดจ์

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของปูนซีเมนต์และตะกอนสลัดจ์แสดงในตารางที่ 5.2 พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนสลัดจ์จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 32.0 ซึ่งน้อยกว่าที่มีในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ร้อยละ 66.28) เนื่องจากองค์ประกอบดังกล่าว (CaO แทนด้วย C) เป็นส่วนประกอบของทุกองค์ประกอบหลักของปูนซีเมนต์ (C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF) เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) ซึ่งเป็นตัวเชื่อมประสานและถูกแทนที่จากกรดผสมคอนกรีตผสมเสร็จลงแบบหล่อ ส่วนที่เหลือซึ่งเป็นเศษของคอนกรีตที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์น้อยลง ในขณะที่องค์ประกอบอื่นๆ มีปริมาณไม่แตกต่างกันไปจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และตะกอนสลัดจ์ได้แก่ ค่าร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) ของตะกอนสลัดจ์มีค่าสูงถึงร้อยละ 25.50 เมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีเพียงร้อยละ 0.96 เนื่องมาจากองค์ประกอบของตะกอนสลัดจ์ซึ่งมีทั้งปูนซีเมนต์ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮดรชัน (แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และอื่นๆ) ซึ่งในองค์ประกอบดังกล่าวจะมีน้ำเป็นองค์ประกอบ โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส จะทำให้น้ำที่มีภายนอกสามารถระเหยออกได้ ดังจะเห็นได้จากปริมาณความชื้นที่ใช้อุณหภูมิในการอบเดียวกันมีค่าร้อยละ 0 ในขณะที่น้ำที่เป็นส่วนประกอบของโครงสร้างของซิลิเกตไฮดรตไม่สามารถระเหยออกได้ แต่เมื่อทำการทดสอบหาร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ซึ่งกำหนดอุณหภูมิการเผาไว้ที่ 950 ± 50 องศาเซลเซียส ทำให้

น้ำที่เป็นส่วนประกอบในโครงสร้างและมีปริมาณมากกว่าน้ำภายนอกดังกล่าวระเหยออกได้ และการเผาที่อุณหภูมิสูงถึงเกือบ 1,000 องศาเซลเซียส จะทำให้โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ไฮดรชัน ที่มีพันธะยึดกันไม่แน่นเกิดการสูญเสียเสถียรภาพในการเกาะยึดและสลายตัวออกได้ เนื่องมาจากความพรุนที่มีมากดังแสดงในภาพถ่ายขยายอนุภาคของตะกอนสลัดจ์ (ภาพที่ 5.4) ทำให้ระยะเวลาที่อากาศปริมาณคงที่ผ่านเข้าไปนานขึ้น (ASTM C 204, 1994, pp.157-162) ส่งผลให้ความละเอียดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความถ่วงจำเพาะของตะกอนสลัดจ์อบจะมีค่าต่ำกว่าปูนซีเมนต์ เนื่องด้วยความพรุนที่มีมากดังกล่าว

ตารางที่ 5.2

คุณสมบัติทางเคมีของตะกอนสลัดจ์ที่ผ่านกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส
เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์	ตะกอนสลัดจ์
1. ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	20.84	26.87
2. อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	5.22	6.91
3. ไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3)	3.20	3.17
4. แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	66.28	32.00
5. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.24	1.51
6. โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.22	0.98
7. โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.10	0.18
8. ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	2.41	3.92
9. ปูนขาวอิสระ (Free CaO)	0.99	0.62
คุณสมบัติทางกายภาพ	ปูนซีเมนต์	ตะกอนสลัดจ์
1. การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (ร้อยละ)	0.96	25.50
2. ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	0.19	0.00
3. พื้นที่ผิวจำเพาะ โดยวิธีเบลน (ตร.ซม./กรัม)	3,248	9,940
4. ความถ่วงจำเพาะ	3.11	2.50

ตารางที่ 5.2 (ต่อ)

คุณสมบัติทางเคมีของตะกอนสลัดจ์ที่ผ่านกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส
เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

คุณสมบัติทางกายภาพ	ปูนซีเมนต์	ตะกอนสลัดจ์
5. ความละเอียด (ขนาดของอนุภาค, ร้อยละผ่าน)		
- ≥ 75 ไมโครเมตร	0.50	8.99
- 75 ไมโครเมตร	5.25	9.85
- 45 ไมโครเมตร	3.60	4.94
- ≤ 36 ไมโครเมตร	90.62	76.22
6. ดัชนีกำลัง		
7 วัน	100	64
28 วัน	100	66
7. ความหนาแน่นรวม (กก./ลิตร)	1.03	0.39

เมื่อพิจารณาดัชนีกำลัง (Strength Index) ของมอร์ตาร์ซึ่งทำการแทนที่ตะกอนสลัดจ์ที่ผ่านการอบแห้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และตะกอนสลัดจ์) เท่ากับ 0.485 ตามมาตรฐาน ASTM C 311 โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ขนาด 5 ซม. ที่อายุ 7 และ 28 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 64 และ 66 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนตามลำดับ ส่วนความหนาแน่นรวม (Bulk Density) ของสลัดจ์มีค่าเท่ากับ 0.39 ซึ่งน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.03 เนื่องจากตะกอนสลัดจ์มีความพรุนสูงจึงทำให้มีช่องว่างระหว่างระหว่งวัสดุ (Voids) มากกว่า

ผลการเปรียบเทียบระหว่างคุณสมบัติของตะกอนสลัดจ์กับมาตรฐาน ASTM C 618 ซึ่งเป็นมาตรฐานเบื้องต้นสำหรับการพิจารณาวัสดุปอชโซลานที่จะนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีต โดยแบ่งออกเป็น 3 หมวดคือ หมวด N ใช้สำหรับพิจารณาวัสดุปอชโซลานที่มีแหล่งที่มาจากวัตถุดิบธรรมชาติหรือผ่านการเผาจนเป็นผง โดยมีองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) หรืออะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) หมวด F ใช้พิจารณาเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) หรือถ่านหินบิทูมินัส (Bituminous Coal) ส่วนหมวด C ใช้เพื่อพิจารณาเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) หรือถ่านหินซับบิทูมินัส (Sub-bituminous Coal) โดยสำหรับตะกอนสลัดจ์ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส พบว่า

ไม่สามารถจัดตะกอนสลัดจ์เป็นสารปอชโซลานได้ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ไม่ได้ตามมาตรฐานหลายประการอันได้แก่ มีปริมาณรวมของซิลิกอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และไอรอนออกไซด์ที่ค่าเท่ากับ 36.95 ซึ่งต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดดังแสดงในตารางที่ 5.3 รวมทั้งความละเอียดในรูปของร้อยละข้างสูงสุดบนตะแกรงขนาด 45 ไมโครเมตร และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ที่มีค่า 76.22 และ 25.50 จากมาตรฐานกำหนดไว้ที่สูงสุดไม่เกินร้อยละ 34 และ 10 ตามลำดับ ในขณะที่ดัชนีกำลังต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนดว่าต้องไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ต้าร่ควบคุม

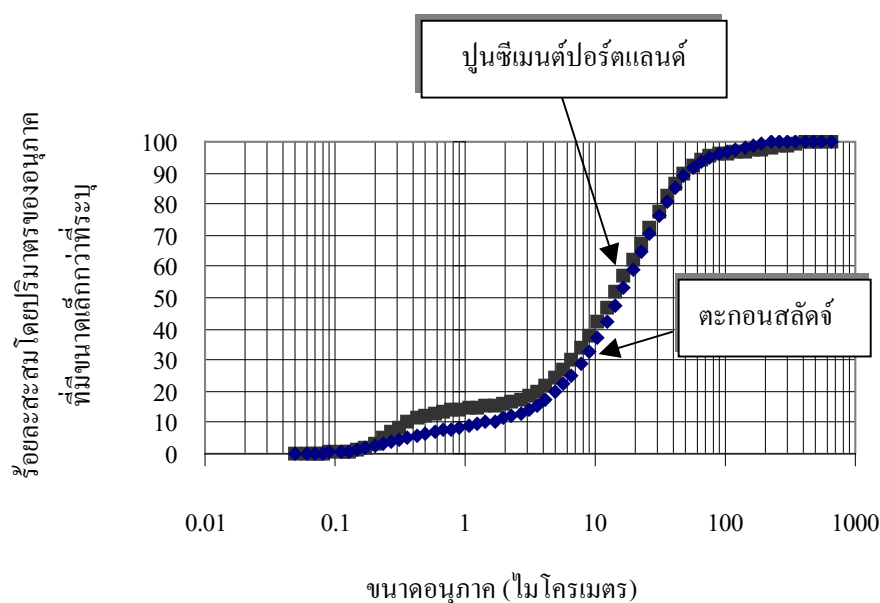
ตารางที่ 5.3

คุณสมบัติตะกอนสลัดจ์ทดสอบเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C 618

องค์ประกอบทางเคมี	หมวดวัสดุปอชโซลาน			ตะกอนสลัดจ์
	N	F	C	
1. ร้อยละต่ำสุดของซิลิกอนไดออกไซด์ + อะลูมิเนียมออกไซด์ + ไอรอนออกไซด์	70.00	70.00	50.00	36.95
2. ร้อยละสูงสุดของซัลเฟอไรต์รอกไซด์	4.00	5.00	5.00	3.92
3. ร้อยละสูงสุดของอัลคาไลน์ในรูปของ โซเดียมออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$)	1.50	1.50	1.50	0.82
คุณสมบัติทางกายภาพ	N	F	C	ตะกอนสลัดจ์
1. ความละเอียด (ร้อยละข้างสูงสุดบน ตะแกรงขนาด 45 ไมโครเมตร)	34.0	34.0	34.0	76.22
2. ดัชนีกำลัง				
ที่อายุ 7 วัน (ร้อยละ)	75	75	75	64
ที่อายุ 28 วัน (ร้อยละ)	75	75	75	66
3. ความต้องการน้ำสูงสุด (ร้อยละ)	115	105	105	110
4. การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ สูงสุด (ร้อยละ)	10.00	6.00	6.00	25.50
5. ปริมาณความชื้นสูงสุด (ร้อยละ)	3.00	3.00	3.00	0.00

5.1.4 การกระจายขนาดของอนุภาค

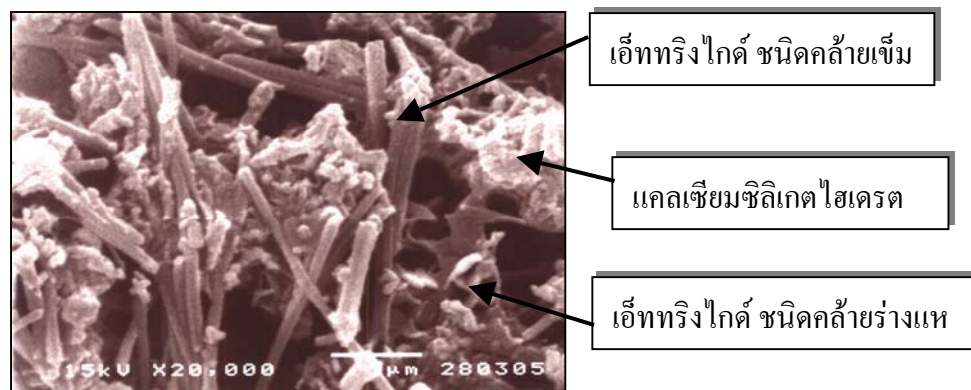
ผลการทดสอบการกระจายขนาดคละสะสมโดยปริมาตรของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และตะกอนสลัดจ์แสดงในภาพที่ 5.4 พบว่าตะกอนสลัดจ์มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



ภาพที่ 5.4 การกระจายขนาดคละของอนุภาคตะกอนสลัดจ์เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

5.1.5 การทดสอบภาพขยายทางกายภาพ

จากภาพที่ 5.5 อนุภาคของตะกอนสลัดจ์ และภาพที่ 5.6 อนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งถ่ายด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า พบว่าลักษณะของอนุภาคตะกอนสลัดจ์จะมีลักษณะส่วนใหญ่เป็นแบบคล้ายเข็ม บางส่วนเป็นตาข่ายร่างแหขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) และมีพื้นผิวขรุขระซึ่งเป็นลักษณะของเอ็ททริงไกท์ (Ettringite) และประกอบด้วยแคลเซียมซลิเกตไฮเดรต ในขณะที่อนุภาคปูนซีเมนต์จะมีรูปร่างหลายเหลี่ยมไม่แน่นอน (Irregular Polygonal Shape) และมีพื้นผิวขรุขระ



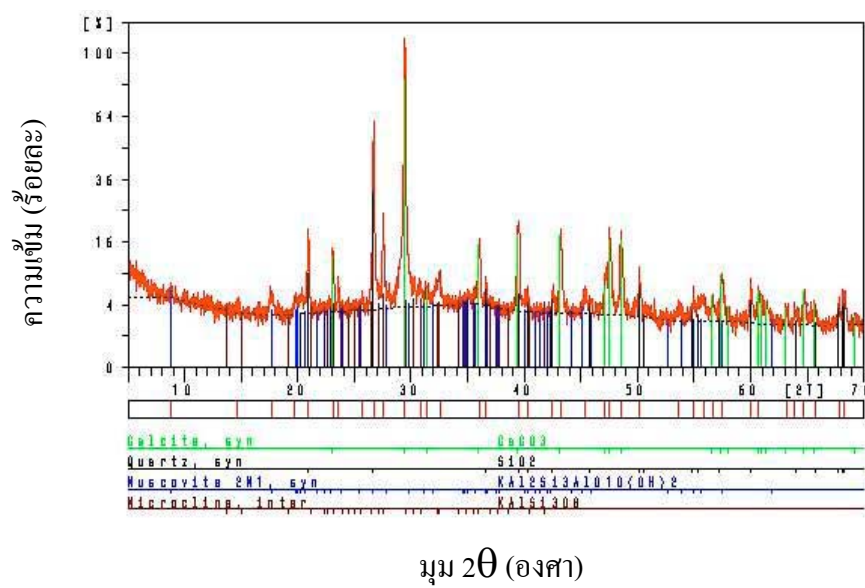
ภาพที่ 5.5 ภาพขยายอนุภาคตะกอนสลัดจ์ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า



ภาพที่ 5.6 ภาพขยายอนุภาคปูนซีเมนต์ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า

5.1.6 การวิเคราะห์ระดับอนุภาคของตะกอนสลัดจ์

จากการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตะกอนสลัดจ์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction พบว่าส่วนประกอบของตะกอนสลัดจ์ นอกจากจะมีแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่มาจากมวลรวมหยาบที่ใช้ หินปูนแล้วยังมีซิลิโคนไดออกไซด์จากองค์ประกอบในปูนซีเมนต์และผลึกผสมของซิลิโคนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังแสดงในภาพที่ 5.7



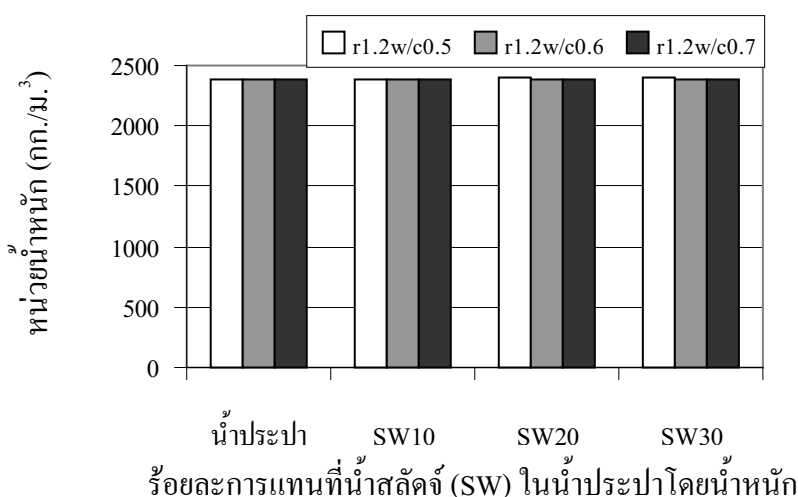
ภาพที่ 5.7 ผลการทดสอบความเป็นผลึกของตะกอนสัลดจ์
ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction

5.2 คุณสมบัติของคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์ในสภาพสด

5.2.1 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตในสภาพสด (Unit Weight)

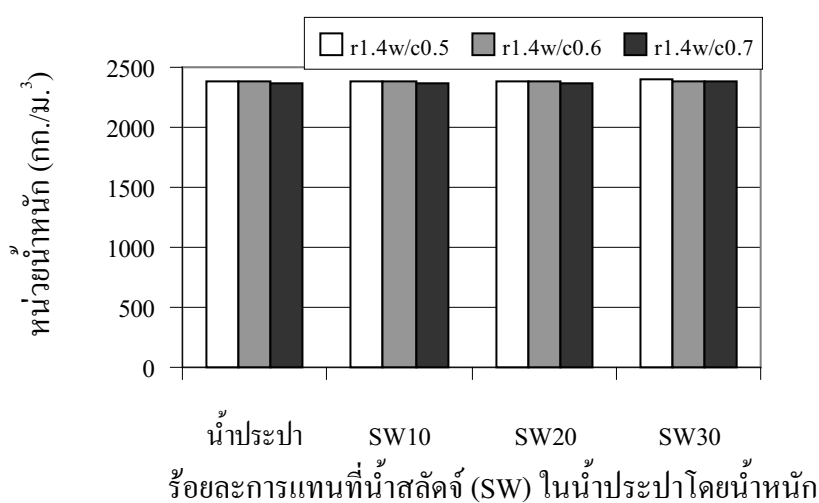
จากผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตในสภาพสดดังแสดงในภาพที่ 5.8 พบว่าคอนกรีตปกติ โดยมีอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวม (γ) เท่ากับ 1.2 และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 มีค่าหน่วยน้ำหนักในสภาพสดเท่ากับ 2,390 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยจะเห็นว่าเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นเป็น 0.6 และ 0.7 จะทำให้หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมีค่าลดลง ทั้งนี้เพราะคอนกรีตที่มีปริมาณเพสต์คงที่ (γ เท่ากับ 1.2) ในขณะนี้น้ำหนักของมวลรวมคงที่ เมื่อปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงในสัดส่วนที่มากกว่าน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต ดังแสดงสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในตารางที่ 4.1 ประกอบการที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงขึ้นมีผลต่อปริมาณช่องว่าง (Voids) ที่สูงขึ้นตามไปด้วย (Neville A.M., 1996, p. 186) จึงทำให้หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตลดลงตามลำดับ

เมื่อพิจารณาคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์ โดยปริมาณการแทนที่ของน้ำสลัดจ์ในน้ำประปามากขึ้นไม่ส่งผลกระทบต่อหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสดมาก ทั้งนี้เพราะน้ำสลัดจ์มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.03 ซึ่งไม่ต่างไปจากน้ำประปาที่มีค่าเท่ากับ 1.0

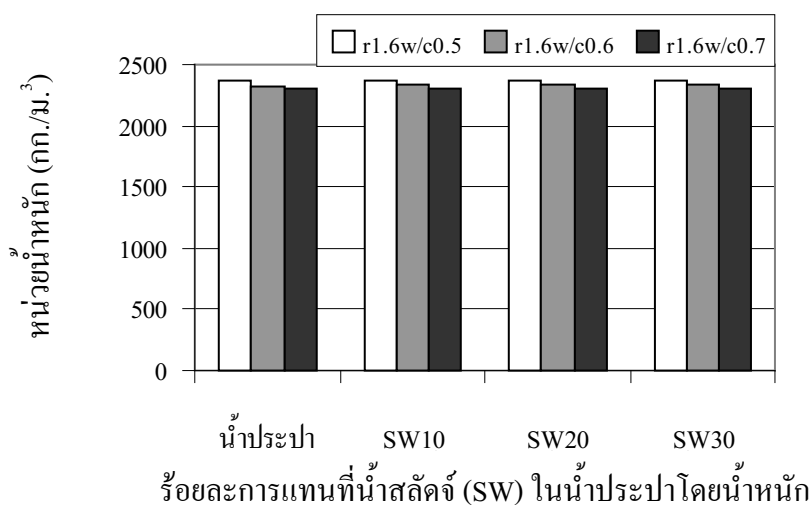


ภาพที่ 5.8 หน่วยน้ำหนักในสภาพสดของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสภาวะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.2 และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5, 0.6 และ 0.7 ตามลำดับ

สำหรับหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตทั้งที่ใช้น้ำประปาและผสมน้ำสลัดจ์ที่มีอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวม (γ) เท่ากับ 1.4 และ 1.6 แสดงในภาพที่ 5.9 และ 5.10 ตามลำดับ พบว่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมีค่าลดลงตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับที่ γ เท่ากับ 1.2 โดยพิจารณาได้จากสัดส่วนของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา ในขณะที่ผลกระทบของน้ำสลัดจ์ที่มีต่อหน่วยน้ำหนักจะเป็นไปในลักษณะเดียวกันคือ ไม่มีผลกระทบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต เนื่องจากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น



ภาพที่ 5.9 หน่วยน้ำหนักในสภาพสดของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.4 และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5, 0.6 และ 0.7 ตามลำดับ



ภาพที่ 5.10 หน่วยน้ำหนักในสภาพสดของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสภาวะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.6 และมีอัตราส่วนน้ำต่อน้ำปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5, 0.6 และ 0.7 ตามลำดับ

5.2.2 ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต (Slump and Slump Loss)

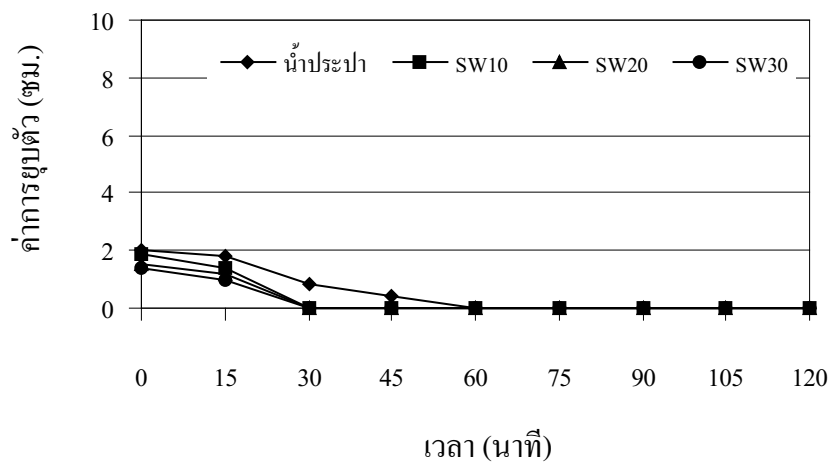
ผลการทดสอบค่าการยุบตัว (Slump) และการลดลงของค่าการยุบตัวเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นหรือการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต (Slump Loss) ของคอนกรีต แสดงในภาพที่ 5.11 ถึง 5.19 พบว่าคอนกรีตปกติที่ใช้น้ำประปา โดยมีอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวม (γ) เท่ากับ 1.2 และอัตราส่วนน้ำต่อน้ำปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ดังภาพที่ 5.11 มีค่าการยุบตัวเริ่มต้น (ที่เวลาเท่ากับ 0) เท่ากับ 2.0 ซม. ในขณะที่คอนกรีตซึ่งมีอัตราส่วนของน้ำสลัดจ์ในน้ำประปาเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักซึ่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 4470, 10040 และ 15900 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นลดลงเป็นเท่ากับ 1.9, 1.5 และ 1.4 ซม. ตามลำดับ เนื่องจากน้ำสลัดจ์มีทั้งเนื้อปูนซีเมนต์ที่เหลือหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและเศษตะกอนที่ละเอียด (Fine Solids) จากการล้างเครื่องผสมและรถโมบะปนอยู่ โดยสิ่งที่ตกค้างในน้ำดังกล่าวจะดูดซับน้ำซึ่งมีผลต่อความต้องการน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตลดลงตามลำดับ (Nan Su et al., 2002, pp. 777-782, Sato Y. et al., 1999, pp. 37-46, Moon H. Y., 2001, pp. 519-525)

สำหรับกรณีของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อน้ำปูนซีเมนต์เดียวกัน (w/c เท่ากับ 0.5) และมีค่า γ เพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.4 และ 1.6 ในภาพที่ 5.12 และ 5.13 ตามลำดับ มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเพิ่มขึ้น เมื่อ

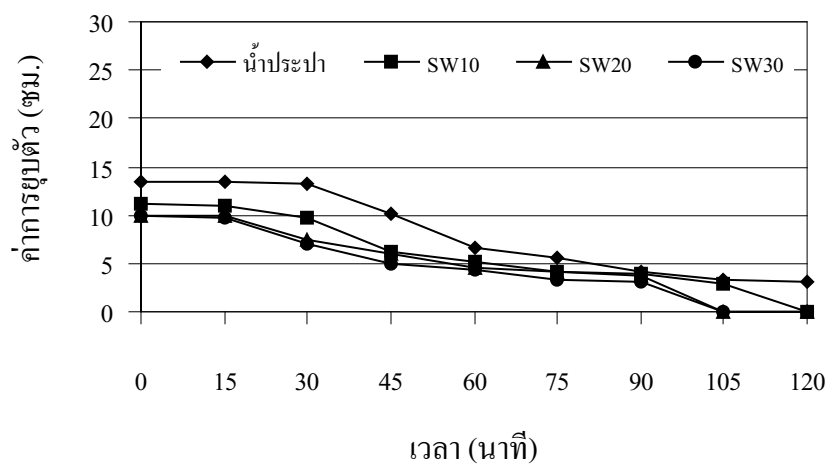
เปรียบเทียบกับที่ γ เท่ากับ 1.2 ทั้งนี้เพราะค่าการยุบตัวของคอนกรีตจะมาจากน้ำอิสระ (Free Water) ที่เหลือในคอนกรีต และเมื่อพิจารณาค่าของ γ ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงในคอนกรีตมีเนื้อของซีเมนต์ เพสต์ที่ช่วยหล่อลื่นและลดการเสียดทานในมวลรวมเพิ่มขึ้นทำให้ค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้น (สมนึก ตั้ง เตมสิริกุล, 2542, น. 7) และสำหรับคอนกรีตในภาพที่ 5.14 ถึง 5.19 ซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เพิ่มขึ้นเป็น 0.6 และ 0.7 พบว่าค่าการยุบตัวจะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เพราะเมื่อปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีตมากขึ้นจะทำให้เกิดน้ำอิสระเพิ่มขึ้น ผลคือ ค่าการยุบตัวที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตในภาพที่ 5.11 โดยทำการทดสอบทุกๆ 15 นาที พบว่าคอนกรีตปกติมีค่าการยุบตัวเท่ากับ 0 ซม. ที่เวลา 60 นาที ในขณะที่เมื่อร้อยละการแทนที่ของน้ำสลัดจ์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 10, 20 และ 30 ซึ่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 4470, 10040 และ 15900 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ทำให้ค่าการยุบตัวเท่ากับ 0 ซม. ที่เวลาเท่ากับ 30 นาที อันแสดงให้เห็นว่าร้อยละการแทนที่ของน้ำสลัดจ์ซึ่งมีเศษของปูนซีเมนต์และตะกอนละเอียดในน้ำประปาที่เพิ่มขึ้นจะยังทำให้การสูญเสียค่าการยุบตัวเร็วขึ้น โดยเฉพาะเศษของปูนซีเมนต์ที่จะเกิดปฏิกิริยาร่วมกับปูนซีเมนต์ในคอนกรีตเร็วขึ้นส่งผลให้น้ำอิสระลดลงเร็วขึ้นทำให้ค่าการยุบตัวลดลงตามลำดับ และเมื่อเพิ่มปริมาณเพสต์หรือ γ ขึ้นซึ่งส่งผลกระทบในลักษณะเดียวกันแต่จะขึ้นกับค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นด้วย

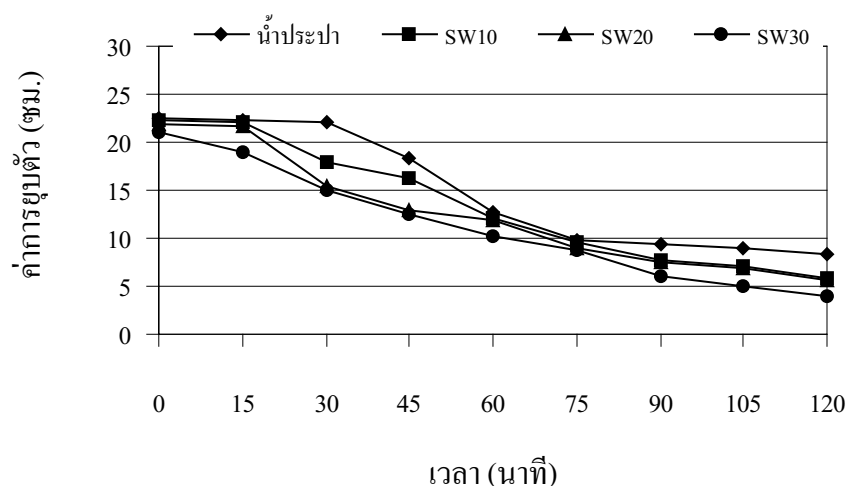
ในส่วนของการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตจะมีค่าแตกต่างกัน โดยจะเห็นว่าคอนกรีตปกติที่ใช้น้ำประปาที่มี γ เท่ากับ 1.2 และ w/c เท่ากับ 0.5 ในภาพที่ 5.11 พบว่าการลดลงของค่าการยุบตัวเป็นไปแบบต่อเนื่องจนถึงที่เวลา 120 นาที ในขณะที่คอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์จะมีการลดลงต่อเนื่องในช่วงแรก แต่เมื่อถึงจุดหนึ่งจะลดลงแบบทันทีทันใด ดังเช่นที่เวลาหลัง 15 นาทีแรก แต่ที่เวลา 30 นาที คอนกรีตไม่มีค่าการยุบตัว ทั้งนี้เพราะในคอนกรีตที่ค่า w/c ต่ำและมีปริมาณเพสต์ต่ำจะมีปริมาณน้ำอิสระน้อยและจะสูญเสียไปอย่างรวดเร็วภายใต้สภาวะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ค่า γ และ w/c สูงกว่า และยิ่งในส่วนผสมของคอนกรีตมีปริมาณน้ำสลัดจ์มากขึ้นก็ส่งจะผลให้การสูญเสียน้ำอิสระมากขึ้น แต่เมื่อ γ เพิ่มขึ้น (ในภาพที่ 5.12) ผลเนื่องจากน้ำสลัดจ์จะลดลงดังจะเห็นว่ามีเพียงร้อยละการแทนที่ของน้ำสลัดจ์เท่ากับ 20 และ 30 ซึ่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10,040 และ 15,900 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับจะมีพฤติกรรมดังกล่าว ในขณะที่ที่ร้อยละ 10 ซึ่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 4,470 มิลลิกรัมต่อลิตรมีแนวโน้มของการเปลี่ยนค่าการยุบตัวใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ



ภาพที่ 5.11 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร
ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.2
และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5

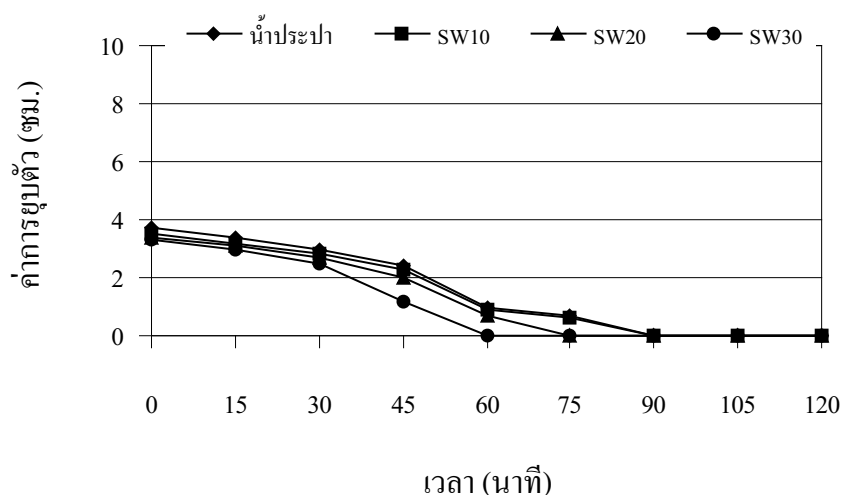


ภาพที่ 5.12 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร
ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.4
และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5

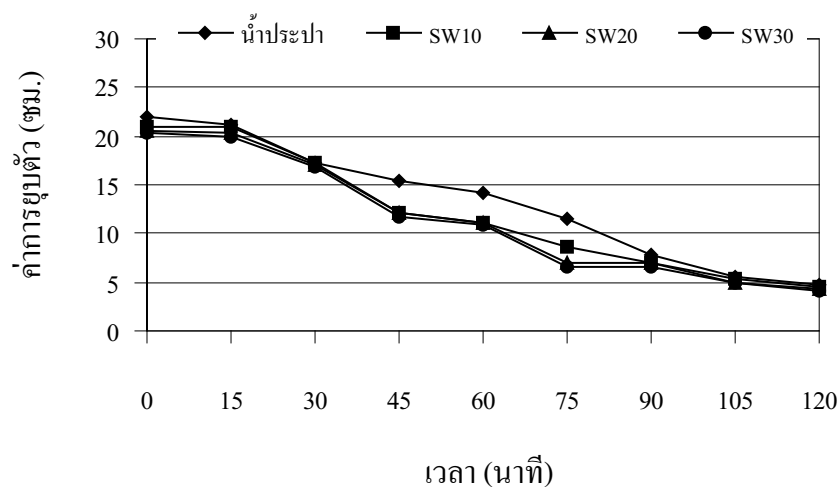


ภาพที่ 5.13 ค่าการยวบตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร
ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.6
และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5

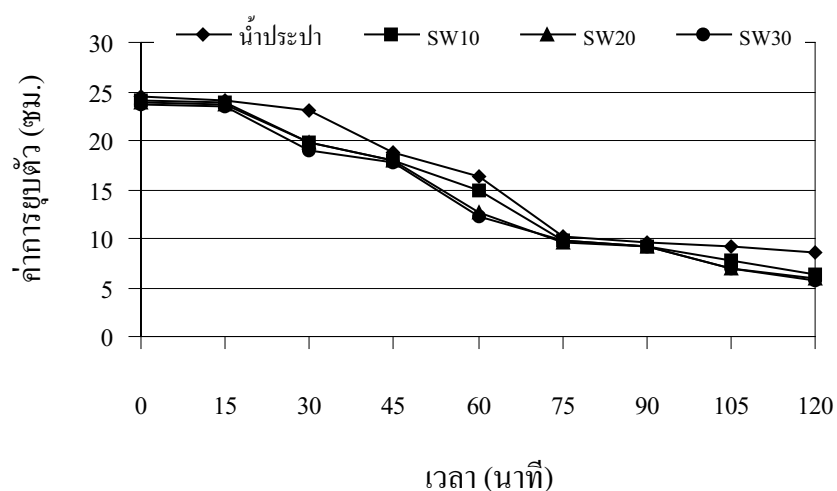
จากผลการทดสอบการสูญเสียค่าการยวบตัวของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.6 ในภาพที่ 5.14 ถึง 5.16 พบว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกับที่ w/c เท่ากับ 0.5 โดยที่คอนกรีตซึ่งมี γ เท่ากับ 1.2 และการสัดส่วนของน้ำสลัดจ์เท่ากับร้อยละ 10 จะมีค่าการสูญเสียค่าการยวบตัวใกล้เคียงกับคอนกรีตผสมน้ำประปา ในขณะที่คอนกรีตที่เวลา 120 นาที โดยมี γ เท่ากับ 1.4 และทุกสัดส่วนการแทนที่ของน้ำสลัดจ์จะค่าการยวบตัวเท่ากับคอนกรีตปกติ



ภาพที่ 5.14 ค่าการยวบตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร
ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.2
และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.6

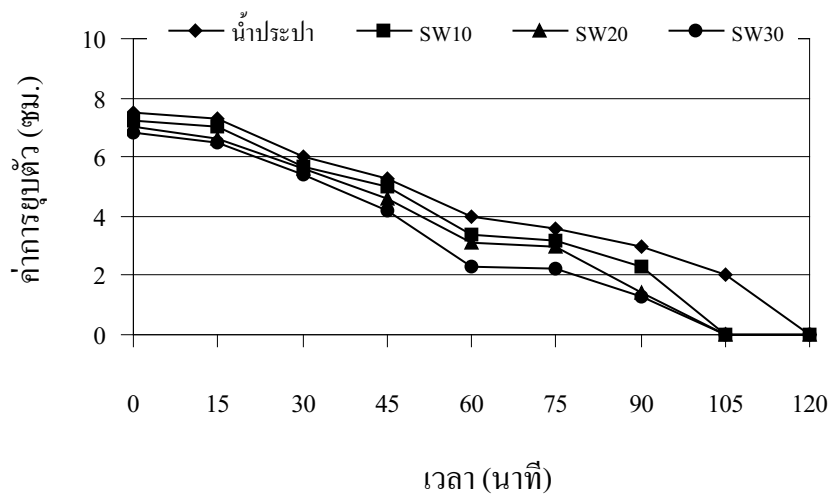


ภาพที่ 5.15 ค่าการยวบตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร
ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.4
และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.6

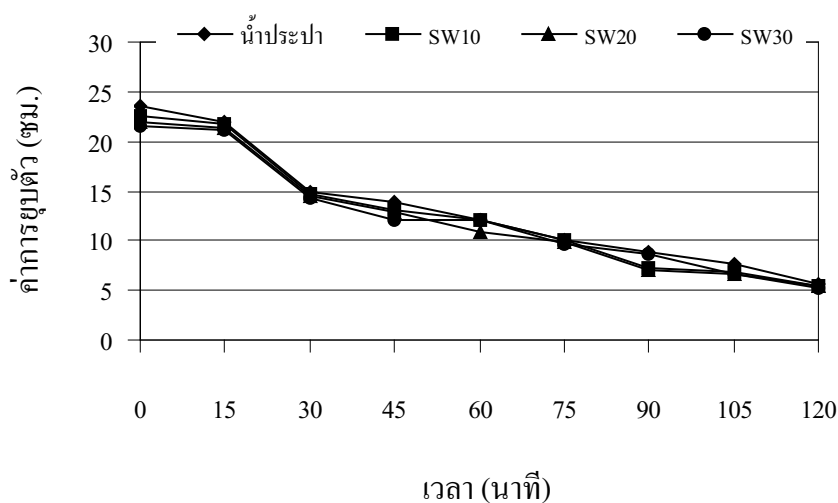


ภาพที่ 5.16 ค่าการยวบตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร
ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.6
และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.6

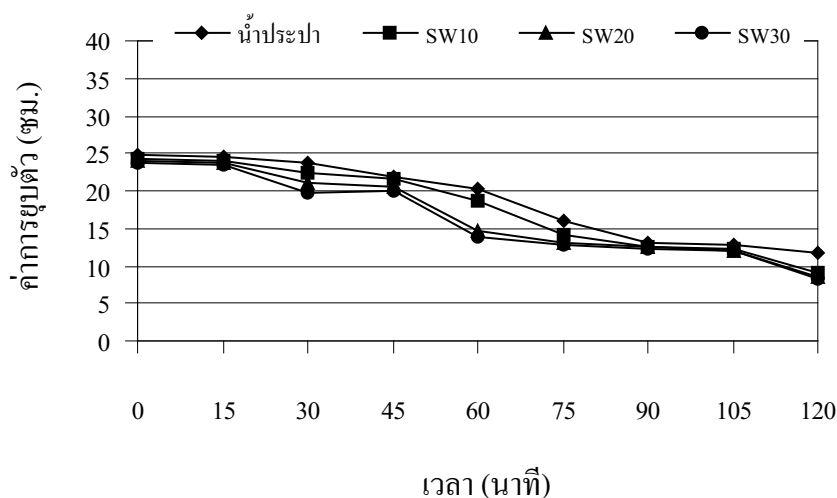
สำหรับการสูญเสียค่าการยวบตัวของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.7 และ γ เท่ากับ 1.2 พบว่าคอนกรีตที่ผสมน้ำสลัดจมีแนวโน้มเข้าใกล้ค่าเดียวกันที่เวลา 105 นาที ในขณะที่ค่าอัตราส่วน γ เท่ากับ 1.4 และ 1.6 จะใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ



ภาพที่ 5.17 ค่าการยวบตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร
ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.2
และมีอัตราส่วนน้ำต่อนูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.7



ภาพที่ 5.18 ค่าการยวบตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร
ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.4
และมีอัตราส่วนน้ำต่อนูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.7



ภาพที่ 5.19 ค่าการยวบตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.6 และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.7

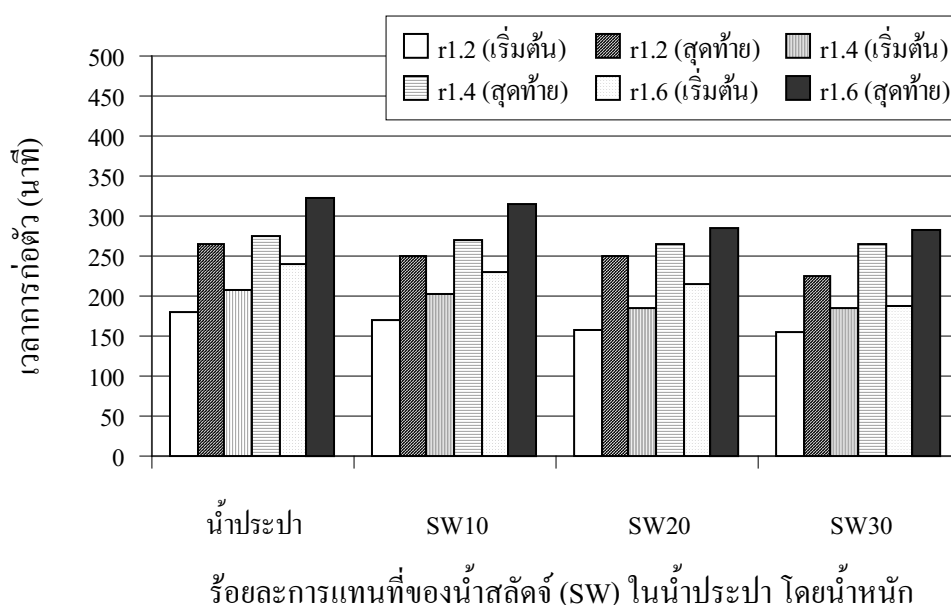
5.2.3 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต (Setting Time)

จากผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตปกติที่ผสมน้ำประปาและคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ตามมาตรฐาน ASTM C 403 (Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixture by Penetration Resistance) ที่กำหนดจากความสามารถในการต้านทานแรงกดของคอนกรีตเท่ากับ 500 และ 4,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว สำหรับระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 5.18 พบว่าคอนกรีตปกติที่ผสมน้ำประปา โดยที่มีอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.2 มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายเท่ากับ 180 และ 264 นาทีตามลำดับ ในขณะที่เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ของน้ำสลัดจ์ในน้ำประปาโดยน้ำหนัก เป็นร้อยละ 10, 20 และ 30 ซึ่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 4470, 10040 และ 15900 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ จะทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นลดลงเป็น 171, 157.5 และ 155 นาที และระยะสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 251, 249 และ 225 นาที ตามลำดับ เนื่องจากในน้ำสลัดจ์มีปริมาณของอัลคาไลด์ (Ca(OH)_2 , Na(OH)) มาก โดยเห็นได้จากค่าความกรดต่างที่มีค่าสูงถึง 12.2 ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าความกรดต่าง มีผลทำให้ระยะเวลาการก่อทั้งเริ่มต้นและสุดท้ายลดลง (Nan Su et al., 2002, pp. 778-782) กล่าวคือ เมื่ออัลคาไลด์ดังกล่าวแตกตัวออกเป็นไอออน (Ca^{2+} , Na^+) จะส่งผลต่อช่วงคอร์

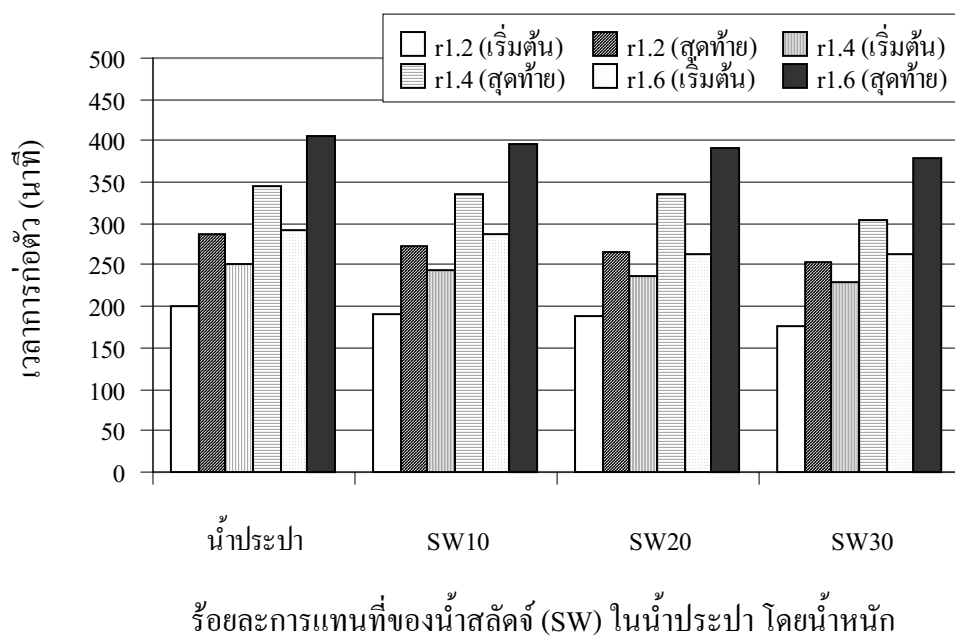
แมนที่ (Dormant Period) ซึ่งโดยปกติในช่วงนี้จะมีการเพิ่มขึ้นของอัลคาไลได้ออนที่สำคัญได้แก่ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca^{2+}) เมื่อมีอัลคาไลได้ออนจากน้ำสลัดจ์เข้าไปเพิ่มในช่วงนี้จะเป็นผลต่อการเร่งการตกผลึก (Crystallization) ของแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งเป็นสารเชื่อมประสาน และให้ความแข็งแรงกับคอนกรีต (Gartner, E. et al., 2002, pp. 90-91) ซึ่งเป็นการลดช่วงเวลาการเกิดช่วงดอร์แมนที่ตามไปด้วย ผลที่ได้คือทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตลดลง

สำหรับคอนกรีตปกติที่ค่า γ เท่ากับ 1.4 และ 1.6 มีค่าระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้เพราะในคอนกรีตมีปริมาณของเพสต์ที่เพิ่มขึ้น (ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น) ในขณะที่คอนกรีตซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.6 และ 0.7 ดังแสดงในภาพที่ 5.21 และ 5.22 ตามลำดับ มีระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

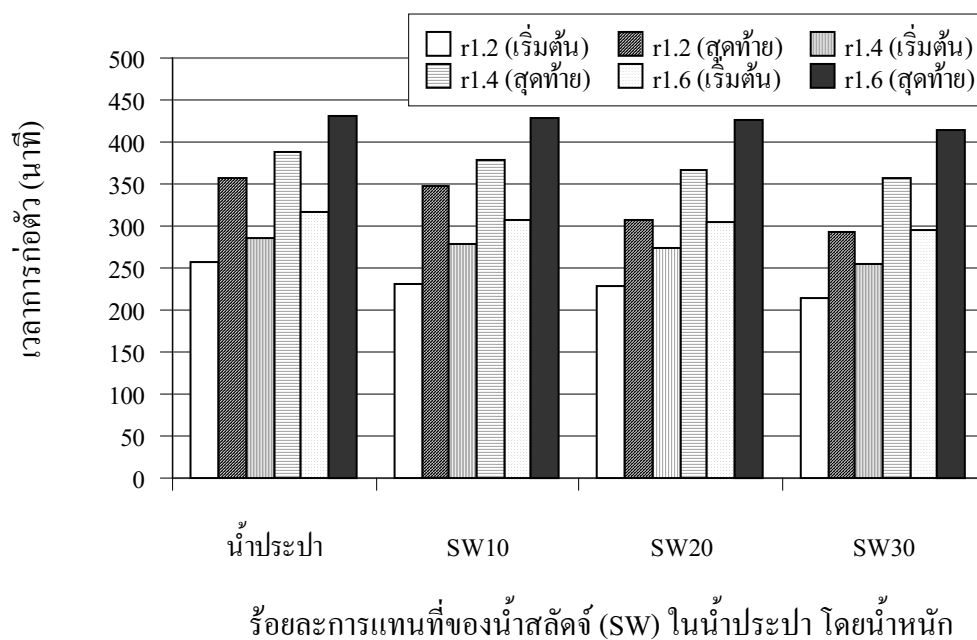
เมื่อพิจารณาผลกระทบของการแทนที่น้ำสลัดจ์ในน้ำประปาต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตสำหรับคอนกรีตที่มีอัตราส่วน γ เท่ากับ 1.4 และ 1.6 และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.6 และ 0.7 ตามลำดับ จะให้ผลในลักษณะเดียวกันคือ ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวทั้งเริ่มต้นและสุดท้ายลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่ของน้ำสลัดจ์ในน้ำประปาที่เพิ่มขึ้นด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น



ภาพที่ 5.20 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5



ภาพที่ 5.21 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อนูนซีเมนต์(w/c) เท่ากับ 0.6



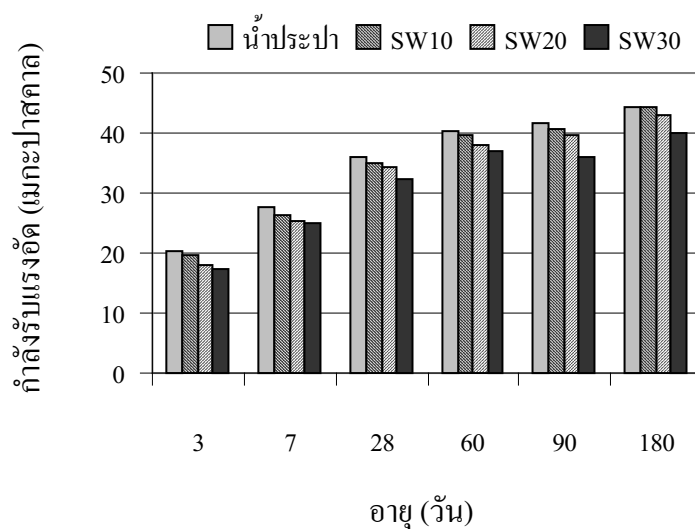
ภาพที่ 5.22 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อนูนซีเมนต์(w/c) เท่ากับ 0.7

5.3 คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์

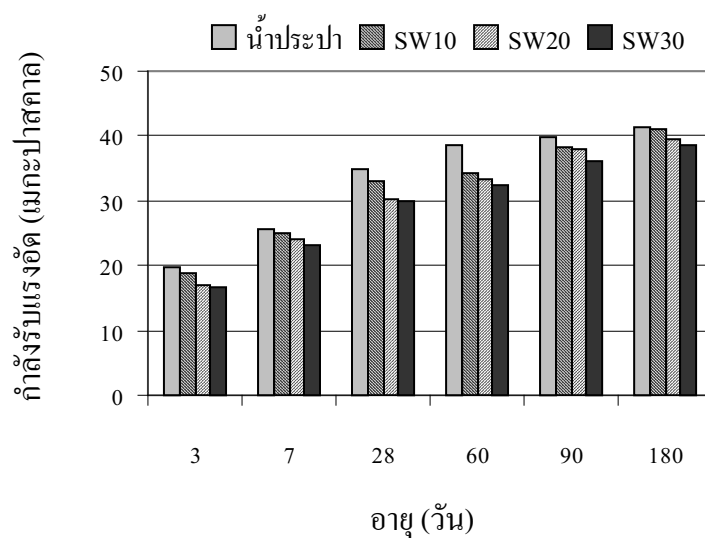
5.3.1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (Compressive Strength)

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์แสดงในภาพที่ 5.32 ถึง 5.34 พบว่าคอนกรีตปกติที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ 0.5 และอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.2 ดังแสดงในภาพที่ 5.32 จะมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในช่วงแรกจะมีอัตราการพัฒนากำลังในช่วงแรก (ก่อน 60 วัน) สูงเมื่ออายุของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามปริมาณตัวเชื่อมประสานซึ่งได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ที่เพิ่มขึ้น และจะมีอัตราการเพิ่มของกำลังในช่วงหลัง (หลังอายุ 60 วัน) ลดลง ในขณะที่คอนกรีตที่ผสมน้ำสลัดจ์จะมีกำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ของน้ำสลัดจ์ในน้ำประปา ทั้งนี้เพราะในน้ำสลัดจ์เมื่อนำอบแห้งที่อุณหภูมิที่ 110 ± 5 องศาเซลเซียส จะพบว่าตะกอนสลัดจ์มีส่วนประกอบของผลึกเอ็ททริงไกท์ (Ettringite) ซึ่งจะมีทั้งชนิดแบบแท่งกลม (Rod-like) และแบบที่เป็นตาข่าย (Lath-like) ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ (OH^-) (Mehta, P.K. 1983, pp.401-406) โดยเอ็ททริงไกท์ (Ettringite) ชนิดแบบแท่งกลมจะไม่เสถียรและสลายไปตามกลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชันและเมื่อเอ็ททริงไกท์สลายตัวจะทำให้เกิดโพรง (Pores) ในเนื้อคอนกรีต เมื่อโพรงเพิ่มขึ้นจะทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงลดลง (Neville, A.M. 1995, pp. 282-283) ประกอบกับในน้ำสลัดจ์จะมีเศษของปูนซีเมนต์ทั้งที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาและทำปฏิกิริยาเกิดเป็นโครงสร้างที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน แต่กระนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้ดังกล่าวจะอยู่กระเจาจนไม่สามารถยึดเกาะรวมกันได้ เมื่อนำไปผสมคอนกรีตจะเกิดความไม่ต่อเนื่องของโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในปูนซีเมนต์กับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในน้ำสลัดจ์อันจะส่งผลต่อกำลังรับแรงที่ลดลง (Matsuyama H. et al., 2000, pp. 29-33)

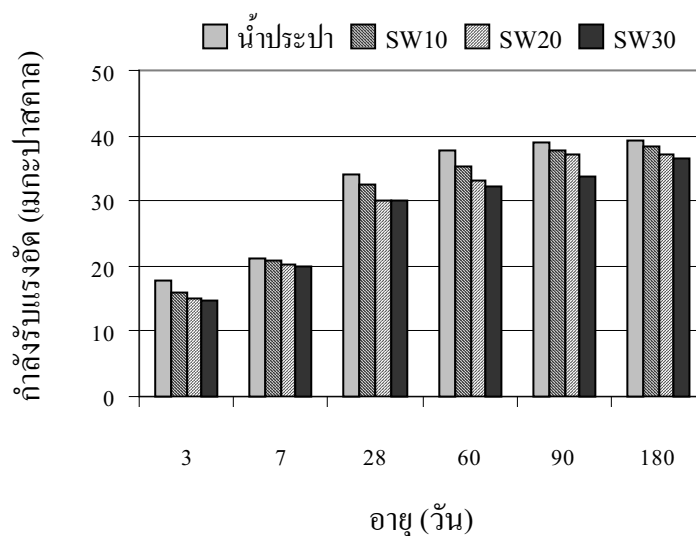
เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วน γ เป็น 1.4 และ 1.6 ดังแสดงในภาพที่ 5.33 ถึง 5.34 ตามลำดับ จะมีส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตปกติและที่ผสมน้ำสลัดจ์ โดยคอนกรีตปกติจะมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่มีอัตราส่วน γ เท่ากับ 1.2 ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณเพสต์ทำให้ปริมาณโพรงมากขึ้นตามไปด้วย ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นเมื่อเพสต์มีความหนาแน่นต่ำลงคือ กำลังรับแรงลดลง ในขณะที่ผลของการแทนที่น้ำสลัดจ์จะเป็นไปในทางตรงกันข้ามกับคอนกรีตที่มีอัตราส่วน γ เท่ากับ 1.2 กล่าวคือเมื่อสัดส่วนการแทนที่ของน้ำสลัดจ์ในน้ำประปาเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง



ภาพที่ 5.32 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเฟสต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.2 และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5



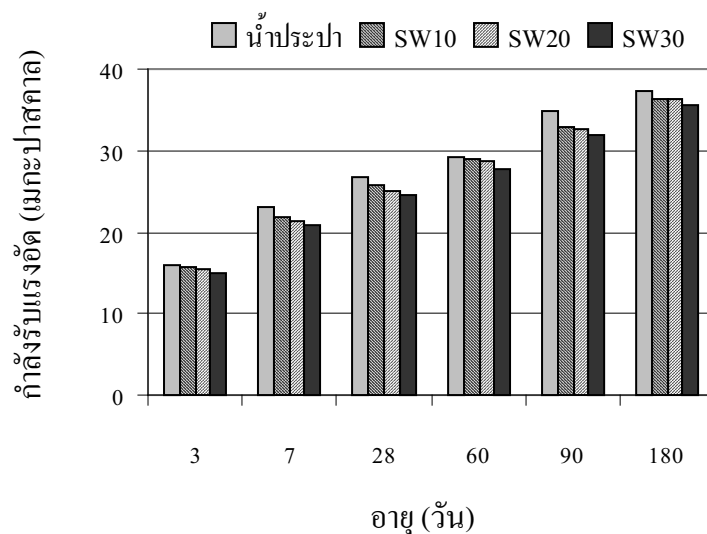
ภาพที่ 5.33 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเฟสต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.4 และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5



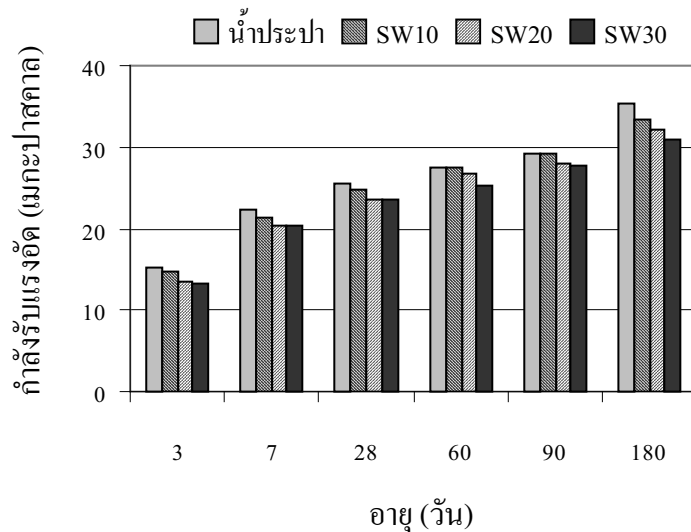
ภาพที่ 5.34 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร
ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสภาวะแห้ง (Y) เท่ากับ 1.6
และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5

จากผลของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.6 ดังภาพที่ 5.35 ถึง 5.37 พบว่าเมื่อคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นจาก 0.5 เป็น 0.6 จะมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลง เนื่องมาจากค่า w/c ที่สูงจะทำให้เกิดโพรงคาพิลลารี (Capillary Pores) มากในเพสต์ ซึ่งเป็นผลทำให้ความหนาแน่นของเพสต์ต่ำลง กำลังรับแรงอัดจึงลดลงตามไปด้วย แต่คอนกรีตที่มีค่า w/c สูงจะมีอัตราการพัฒนากำลังต่อเนื่องดีกว่าคอนกรีตที่มี w/c ต่ำ แต่อย่างไรก็ดีสำหรับคอนกรีตที่มีค่า w/c ต่ำ จะมีค่ากำลังรับแรงในระยะยาวดีกว่าคอนกรีต w/c สูง เนื่องด้วยผลของปริมาณต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดมีไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับผลของ w/c ต่อปริมาณโพรงคาพิลลารี (สมนึก ตั้งเดิมสิริกุล, 2542, น.5-6)

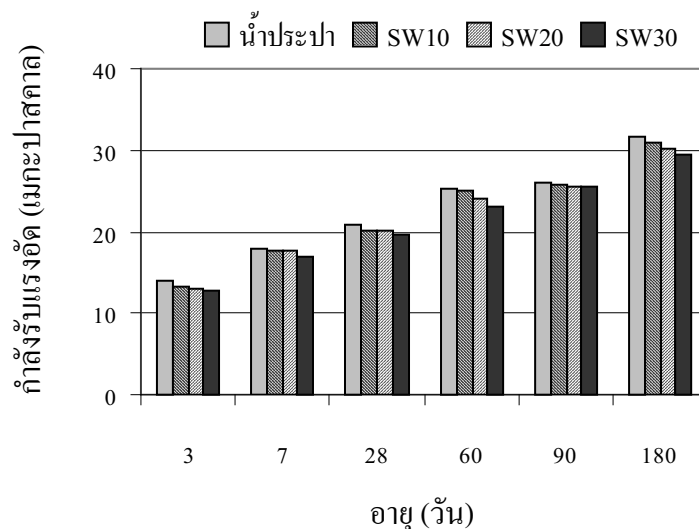
สำหรับผลของน้ำสลัดจ์ที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.6 มีลักษณะคล้ายกับที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 โดยกำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงไม่มากเมื่อร้อยละการแทนที่ของน้ำสลัดจ์ในน้ำประปาเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 5.35 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร
ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.2
และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.6

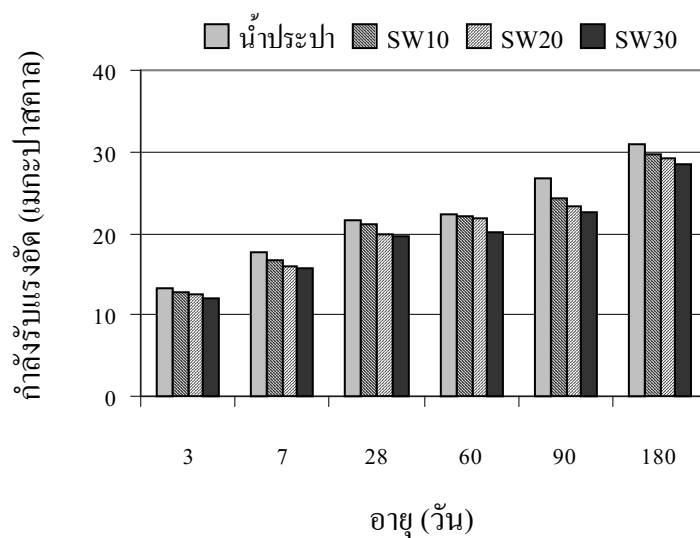


ภาพที่ 5.36 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร
ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.4
และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.6

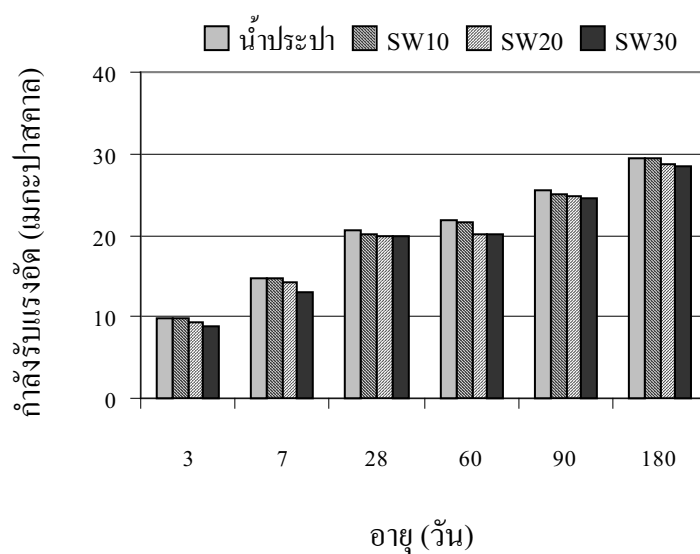


ภาพที่ 5.37 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร
ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.6
และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.6

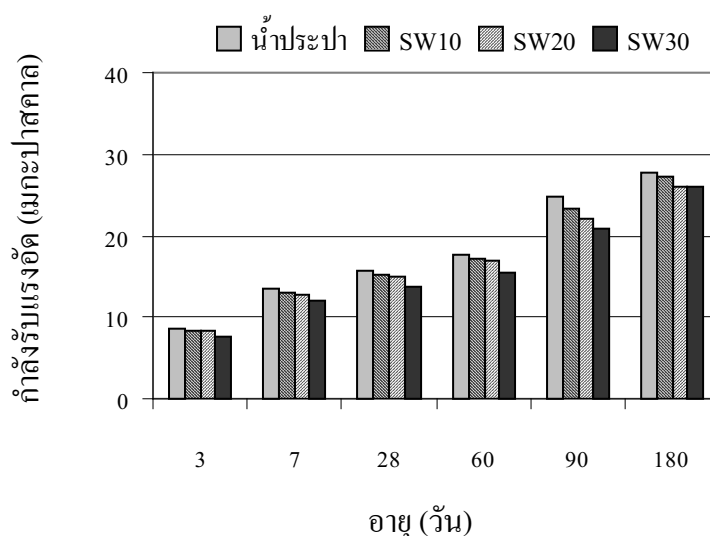
ในทำนองเดียวกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 และ 0.6 คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.7 ดังภาพที่ 5.38 ถึง 5.40 พบว่าเมื่อคอนกรีตที่มีอัตราส่วน γ เดียวกัน คอนกรีตจะมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลง เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของโพรงคาพิลลารี (Capillary Pores) ในเพสต์ ซึ่งเป็นผลทำให้ความหนาแน่นของเพสต์ต่ำลง ในขณะที่ผลของน้ำสลัดจ์ที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.7 จะมีลักษณะคล้ายกับที่เท่ากับ 0.5 และ 0.6 โดยกำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงไม่มากเมื่อร้อยละการแทนที่ของน้ำสลัดจ์ในน้ำประปาเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 5.38 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร
ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.2
และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.7



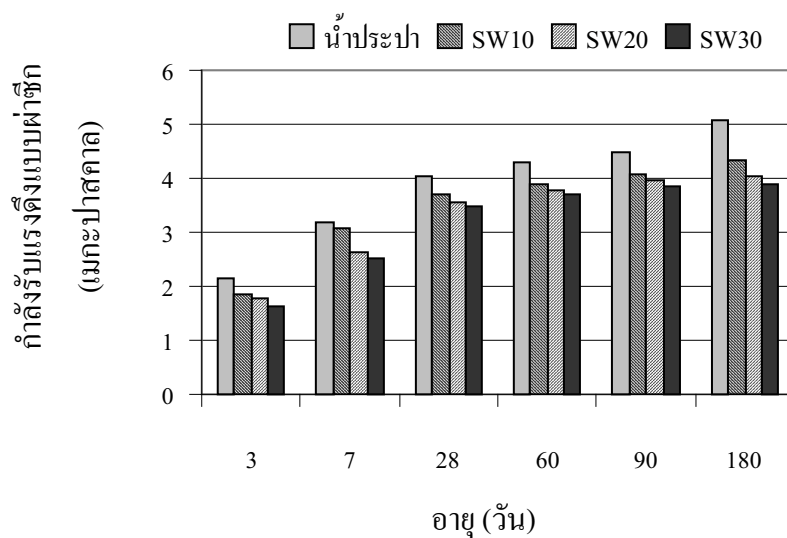
ภาพที่ 5.39 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร
ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.4
และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.7



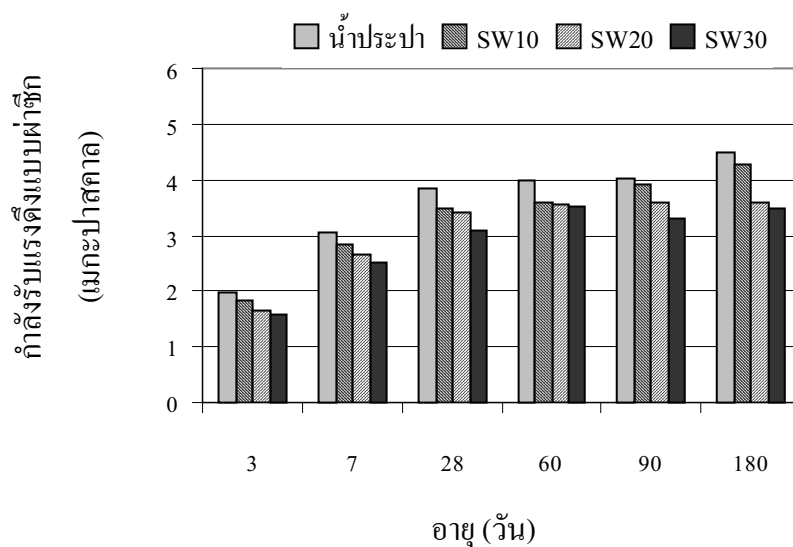
ภาพที่ 5.40 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร
ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสภาวะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.6
และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.7

5.3.2 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต (Splitting Tensile Strength)

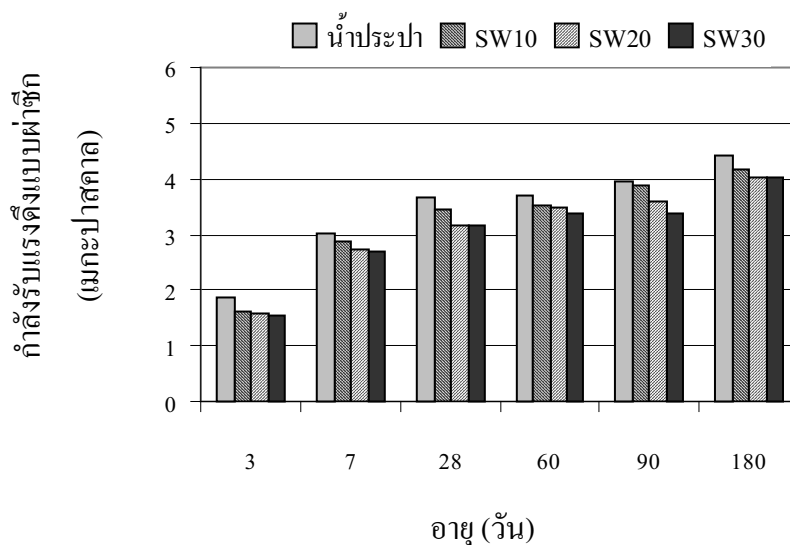
จากผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตปกติที่ใช้ น้ำประปาและคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) ที่ 0.5, 0.6 และ 0.7 แสดงในภาพที่ 5.41 ถึง 5.49 พบว่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นในสภาวะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.2 และ w/c เท่ากับ 0.5 ในภาพที่ 5.41 จะมีค่าน้อยกว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 8 ถึง 12 ของกำลังรับแรงอัด และผลของการแทนที่น้ำสลัดจ์ในน้ำประปาต่อกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกำลังรับแรงอัด แต่จะเห็นว่าที่อายุของคอนกรีตมากขึ้นจะทำให้ผลของสัดส่วนน้ำสลัดจ์ในน้ำประปาที่เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกลดลงมากตามไปด้วย ในขณะที่เมื่อค่า γ เพิ่มขึ้นเป็นเท่ากับ 1.4 และ 1.6 ในภาพที่ 5.42 และ 5.43 ตามลำดับ มีการลดลงของกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 5.41 กำลังรับแรงดิ่งแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.2 และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5

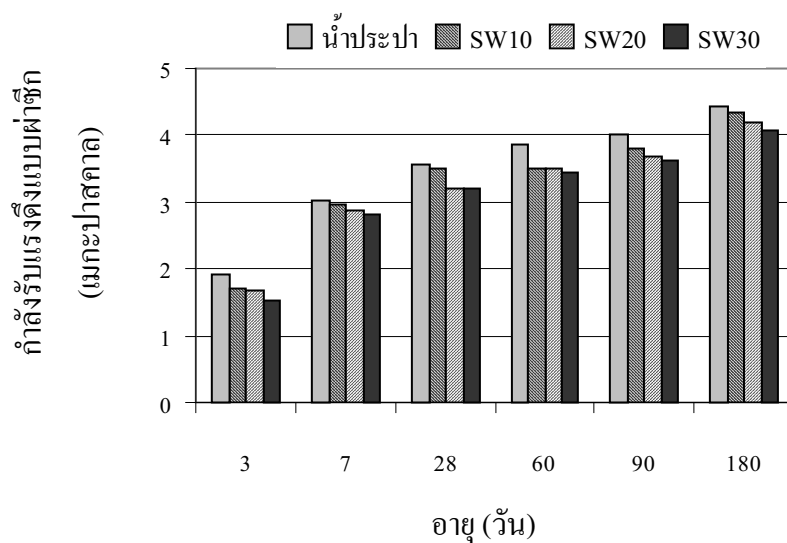


ภาพที่ 5.42 กำลังรับแรงดิ่งแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.4 และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5

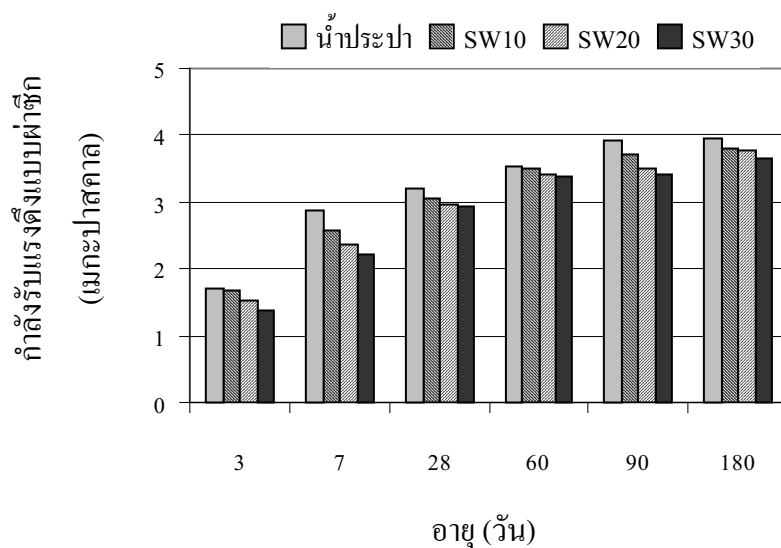


ภาพที่ 5.43 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร
ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.6
และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5

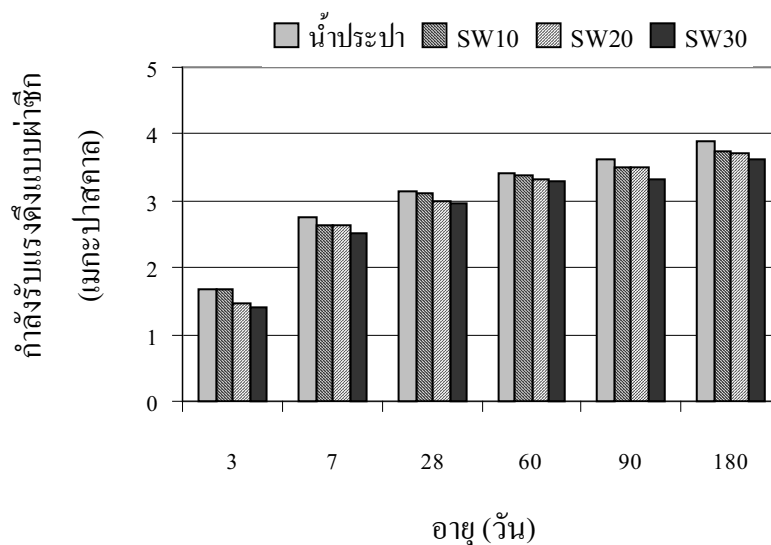
ผลของกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.6 แสดงในภาพที่ 5.44 ถึง 5.46 โดยค่าของกำลังรับแรงดึงจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำสลัดจ์ในน้ำประปาเนื่องจากเหตุผลเดียวกับที่อธิบายไว้ในหัวข้อกำลังรับแรงอัด แต่การลดลงของกำลังรับแรงดึงจะไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่มีค่า w/c เท่ากับ 0.5 เนื่องจากผลของการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่มีต่อปริมาณโพรงที่เกิดขึ้นในเนื้อเพสต์มากขึ้นทำให้กำลังรับแรงดึงลดลงมากและการมีสัดส่วนของปริมาณน้ำสลัดจ์ในเนื้อคอนกรีตมากขึ้นก็ไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงดึงที่ลดต่ำมาก



ภาพที่ 5.44 กำลังรับแรงดิ่งแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.2 และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.6

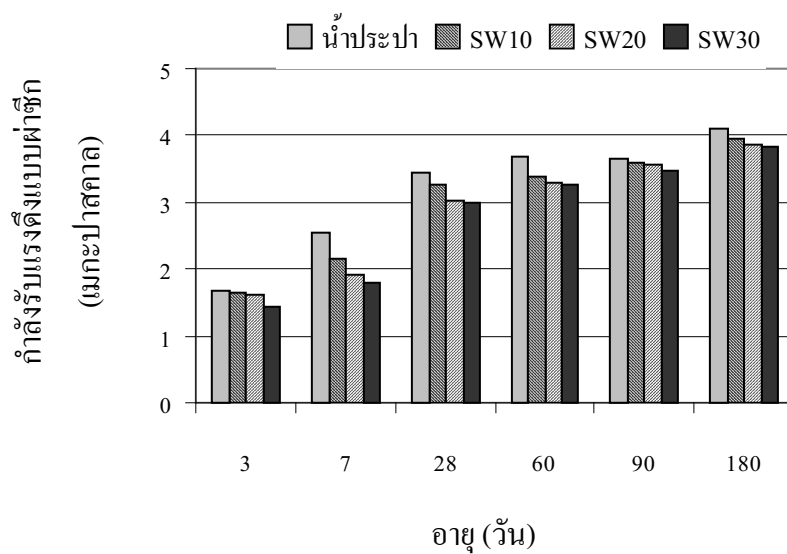


ภาพที่ 5.45 กำลังรับแรงดิ่งแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.4 และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.6

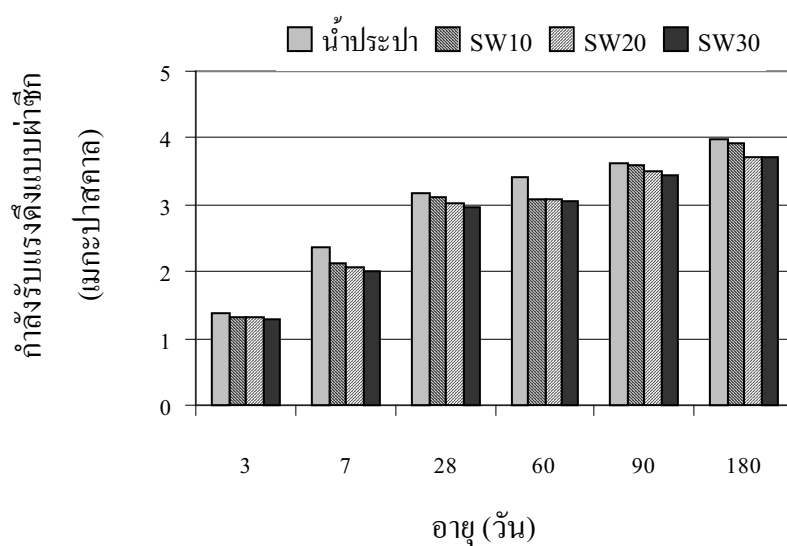


ภาพที่ 5.46 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร
ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.6
และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.6

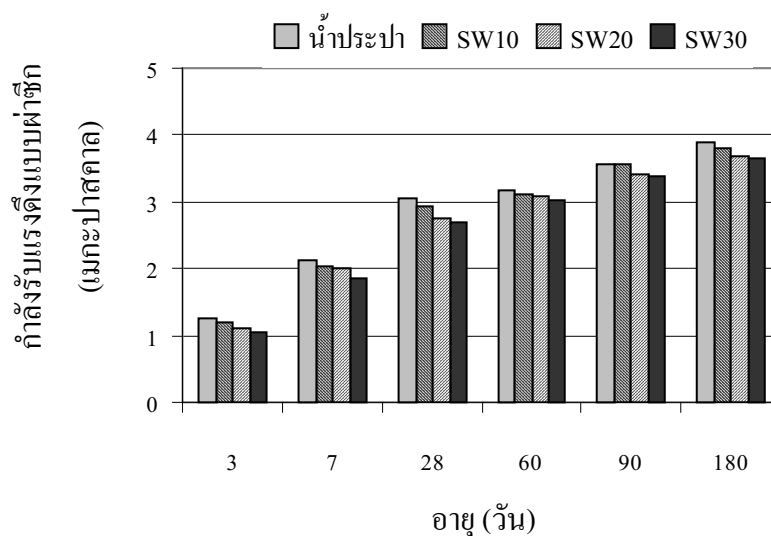
ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.7 แสดงในภาพที่ 5.47 ถึง 5.49 พบว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำสลัดจ์ในน้ำประปา แต่การลดลงของกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกจะไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่มีค่า w/c เท่ากับ 0.5 เช่นเดียวกัน เนื่องจากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น



ภาพที่ 5.47 กำลังรับแรงดิ่งแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร
ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.2
และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.7



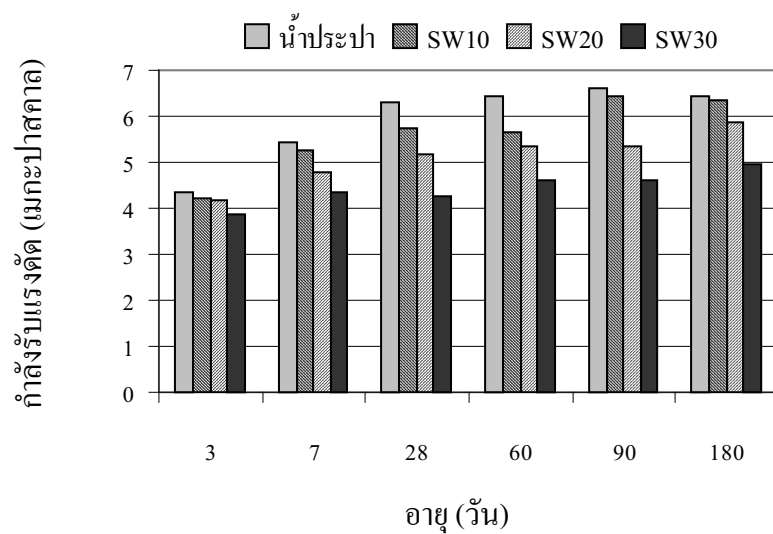
ภาพที่ 5.48 กำลังรับแรงดิ่งแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร
ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.4
และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.7



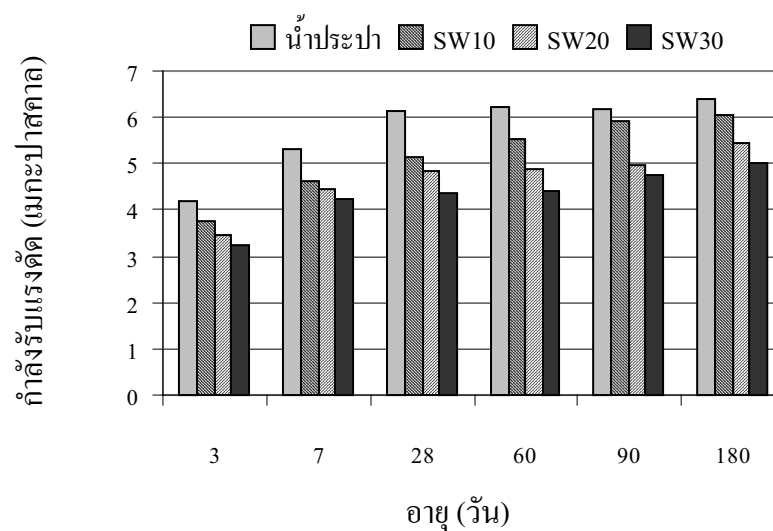
ภาพที่ 5.49 กำลังรับแรงดิ่งแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.6 และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.7

5.3.3 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีต (Flexural Strength)

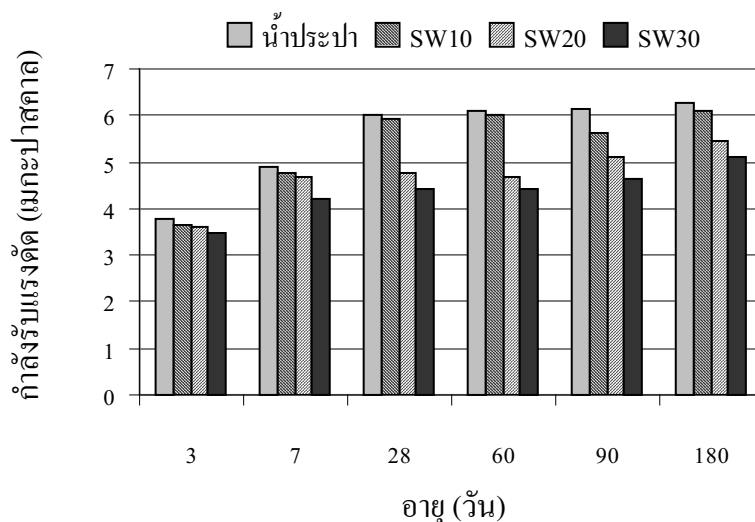
ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์แสดงในภาพที่ 5.50 ถึง 5.58 พบว่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่มีอัตราส่วน γ เท่ากับ 1.2 และ w/c เท่ากับ 0.5 ในภาพที่ 5.50 จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในบ่มน้ำเพิ่มขึ้น โดยในช่วงแรก (28 วันแรก) จะมีอัตราการพัฒนากำลังสูงและจะลดต่ำลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณสารตั้งต้นในปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ลดลง ดังจะเห็นได้จากกำลังรับแรงดัดคอนกรีตปกติที่อายุหลัง 28 วัน จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่คอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์จะกำลังรับแรงดัดที่ลดลงเมื่อทำการเพิ่มร้อยละการแทนที่ของน้ำสลัดจ์ในน้ำประปา โดยสามารถอธิบายผลกระทบของน้ำสลัดจ์ได้ในทำนองเดียวกับกำลังรับแรงอัดและแรงดิ่งแบบผ่าซีก นอกจากนั้นเมื่ออัตราส่วน γ เพิ่มขึ้นเป็น 1.4 และ 1.6 และค่า w/c เพิ่มขึ้นเป็น 0.6 และ 0.7 ในภาพที่ 5.51 และ 5.52 มีแนวโน้มต่อกำลังรับแรงดัดในทำนองเดียวกันคือจะเพิ่มขึ้นตามอายุของการบ่มและลดลงตามสัดส่วนของน้ำสลัดจ์ที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 5.50 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร
ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสภาวะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.2
และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5



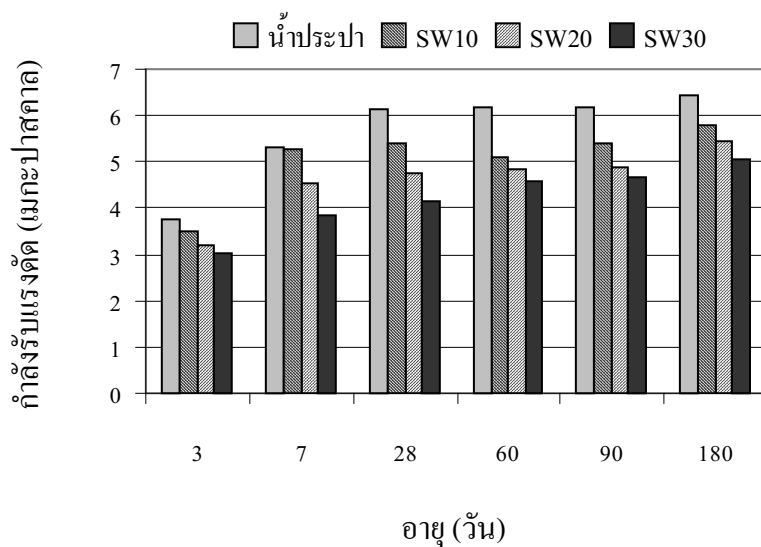
ภาพที่ 5.51 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร
ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสภาวะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.4
และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5



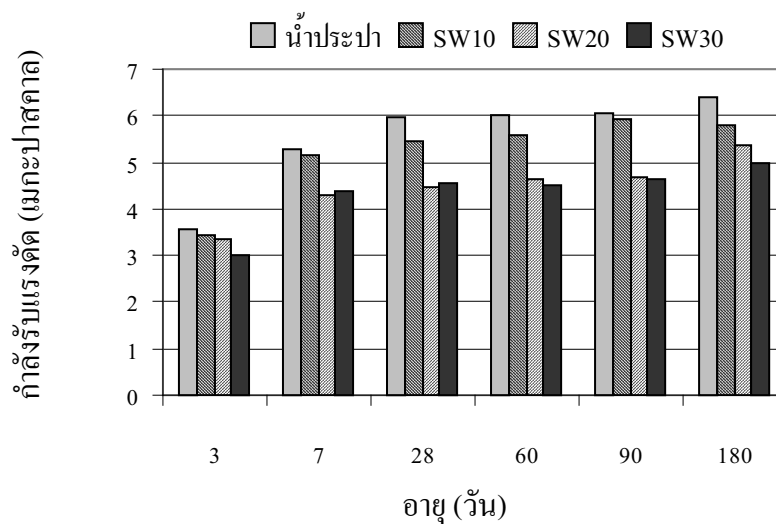
ภาพที่ 5.52 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร
ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสภาวะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.6
และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5

สำหรับกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.6 แสดงในภาพที่ 5.53 ถึง 5.55 พบว่าแนวโน้มของกำลังรับแรงดัดจะเป็นในลักษณะเดียวกับที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 เนื่องจากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น แต่จะสังเกตว่าผลกระทบของน้ำสลัดจ์ที่มีต่อกำลังรับแรงดัดจะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังเช่นในกรณีของคอนกรีตที่มีค่า γ เท่ากับ 1.2 (ภาพที่ 5.53) โดยที่อายุคอนกรีตเท่ากับ 3 วัน เมื่อทำการแทนที่น้ำสลัดจ์ในน้ำประปาร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จะทำให้กำลังรับแรงลดลงตามการเพิ่มขึ้นปริมาณน้ำสลัดจ์อย่างเป็นสัดส่วนกัน ในขณะที่คอนกรีตที่อายุ 7 วัน การลดลงของกำลังรับแรงดัดจะลดลงอย่างมากเมื่อการแทนที่ของน้ำสลัดจ์เท่ากับร้อยละ 20 และ 30 ซึ่งมีปริมาณของแข็งเท่ากับ 10,040 และ 15,900 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ แต่ที่การแทนที่ร้อยละ 10 จะยังคงพัฒนากำลังรับแรงดัดใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ และที่อายุเพิ่มขึ้นเป็น 28, 60, 90 และ 180 วัน จะพบว่ากำลังรับแรงดัดจะลดลงมากเมื่อในคอนกรีตมีน้ำสลัดจ์ผสมอยู่ด้วย

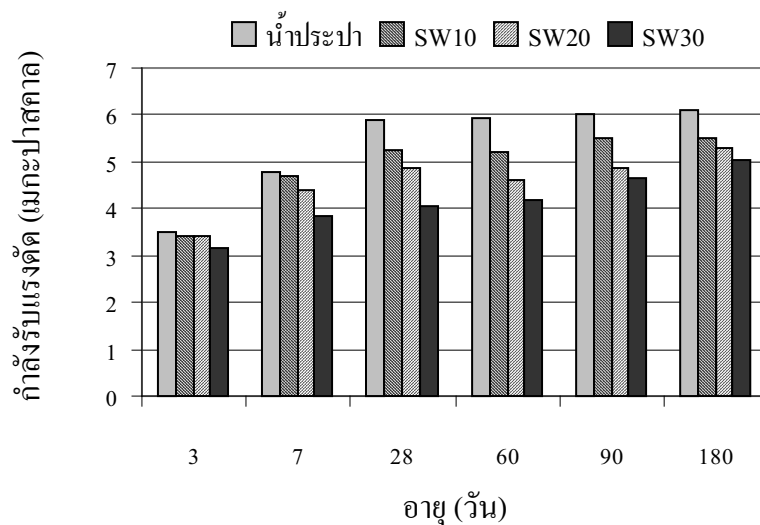
เมื่อพิจารณาจากกรณีดังกล่าวข้างต้นกับคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วน γ เท่ากับ 1.4 และ 1.6 ในภาพที่ 5.54 และ 5.55 จะเป็นไปในลักษณะเดียวกัน แต่ผลกระทบที่มีต่อการลดลงของกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่เวลาการบ่มเพิ่มขึ้นจะมีมากเมื่อการแทนที่ของน้ำสลัดจ์ในน้ำประปาเท่ากับร้อยละ 20 และ 30 ซึ่งให้ค่ากำลังใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 5.53 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร
ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสภาวะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.2
และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.6

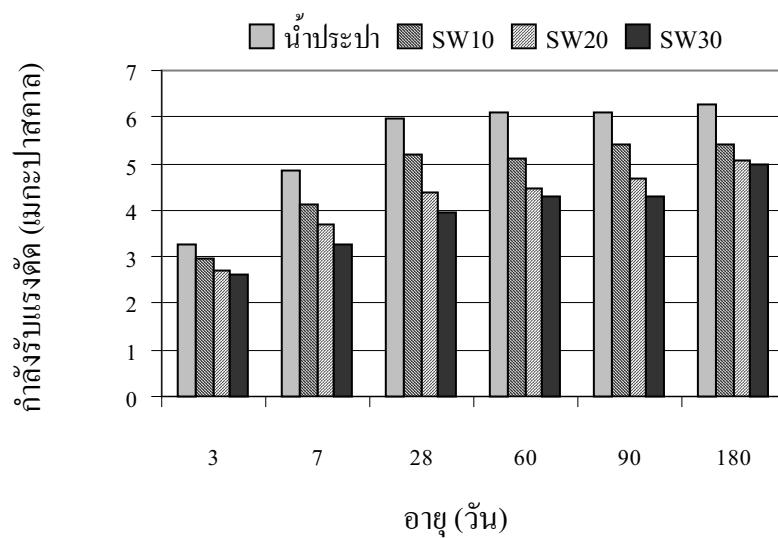


ภาพที่ 5.54 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร
ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสภาวะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.4
และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.6

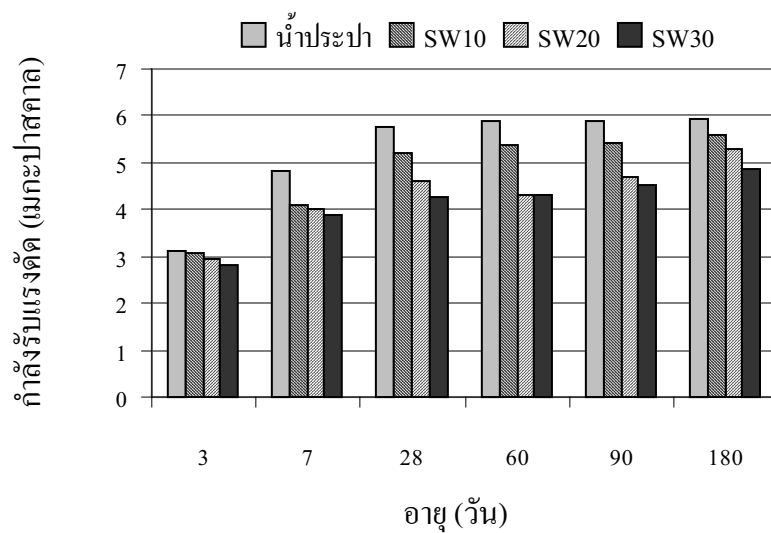


ภาพที่ 5.55 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเฟสต่อปริมาตร
ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.6
และมีอัตราส่วนน้ำต่อน้ำปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.6

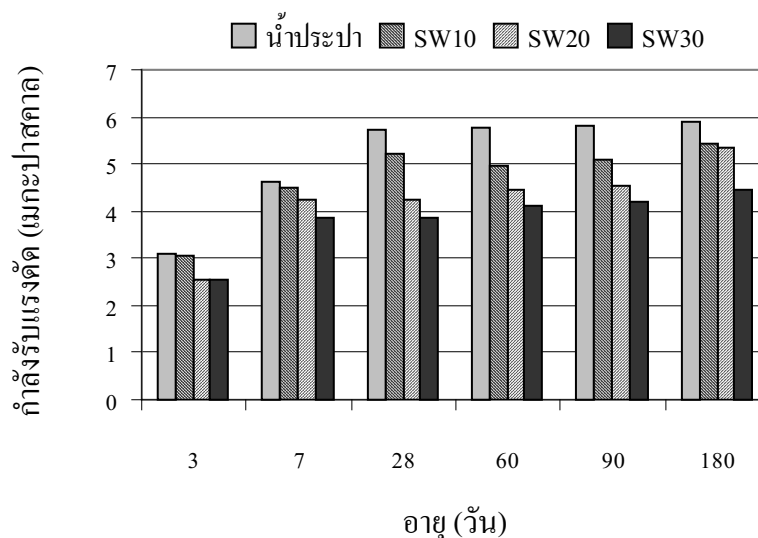
ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อน้ำปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.7 แสดงในภาพที่ 5.56 ถึง 5.58 พบว่าแนวโน้มการลดลงของกำลังรับแรงดัดจะมีเป็นในลักษณะเดียวกับที่อัตราส่วนน้ำต่อน้ำปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.6 โดยคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วน γ เท่ากับ 1.2, 1.4 และ 1.6 ในภาพจะเป็นไปในลักษณะเดียวกัน แต่ผลกระทบที่มีต่อการลดลงของกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่เวลาการบ่มเพิ่มขึ้นจะมีมากเมื่อการแทนที่ของน้ำสลัดจันในน้ำประปาเท่ากับร้อยละ 20 และ 30 ซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงดัดใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 5.56 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร
ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสภาวะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.2
และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.7



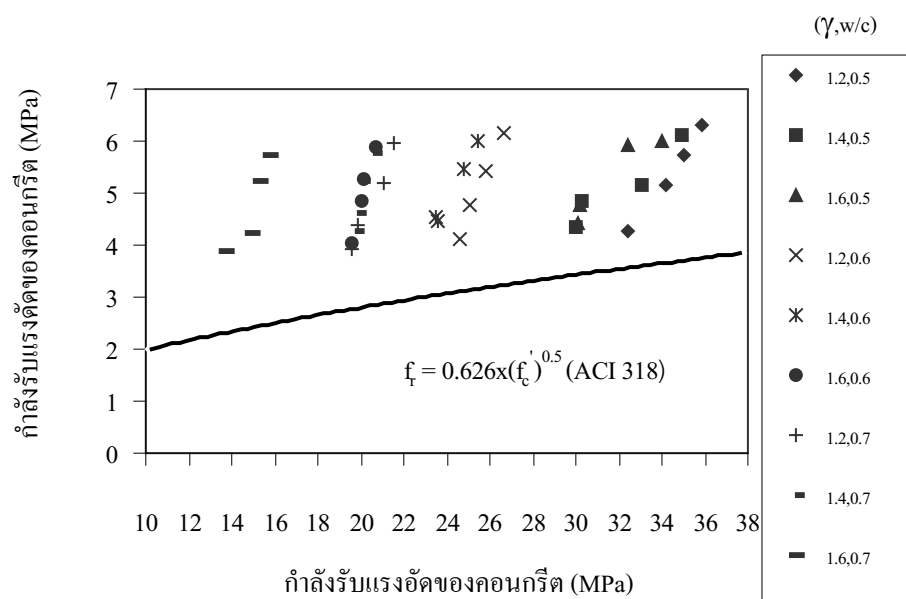
ภาพที่ 5.57 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร
ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสภาวะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.4
และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.7



ภาพที่ 5.58 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร
ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.6
และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.7

5.3.4 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตกับมาตรฐาน ACI 318

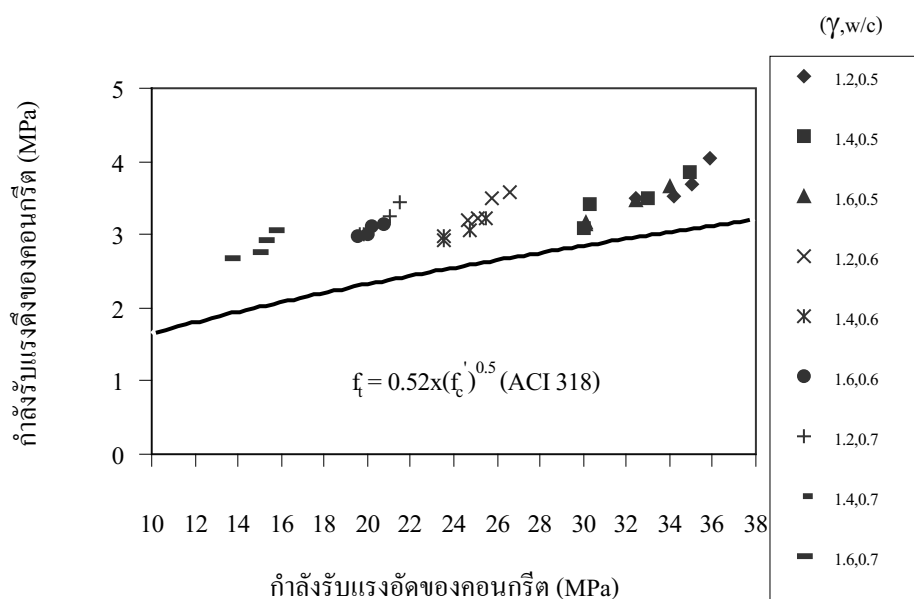
เมื่อพิจารณากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตปกติและที่ผสมน้ำสลัดจ์เปรียบเทียบกับมาตรฐาน ACI ที่กำหนดจากกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (f'_c) ซึ่งไปไปตามความสัมพันธ์ดังแสดงในภาพที่ 5.59 พบว่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่ทำการทดสอบมีค่าสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนด แม้ว่าในคอนกรีตจะมีส่วนผสมของน้ำสลัดจ์แทนที่ในน้ำประปาถึงร้อยละ 30 อยู่แล้วก็ตาม และกำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของกำลังเช่นเดียวกันกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต



ภาพที่ 5.59 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ACI 318

5.3.5 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตกับมาตรฐาน ACI 318

จากการเปรียบเทียบของความสัมพันธ์ของกำลังแรงดัดและแรงอัดเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ACI ดังแสดงในภาพที่ 5.60 พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ทำการทดสอบจะมีค่าสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนด และจะมีแนวโน้มของการเพิ่มและลดเช่นเดียวกับกำลังรับแรงดัด



ภาพที่ 5.60 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ACI 318

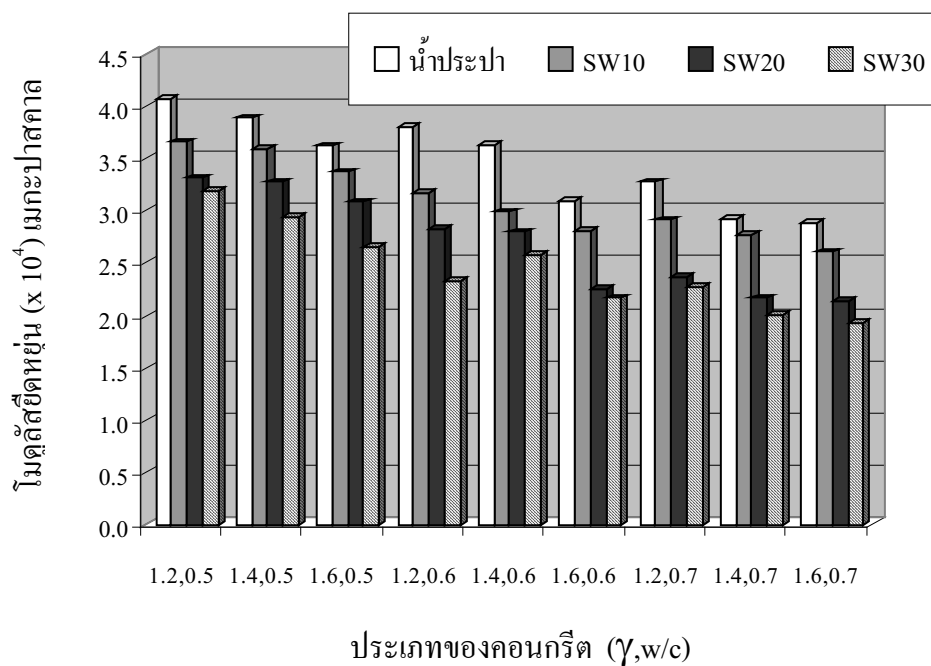
5.3.6 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (Modulus of Elasticity, E_c)

โมดูลัสของความยืดหยุ่นของคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์ที่อายุ 28 วัน จะมีค่าลดลงตามสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่แตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 5.61 โดยเมื่ออัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวม (γ) และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) และอัตราส่วนที่ของน้ำประปาด้วยน้ำสลัดจ์เพิ่มขึ้น ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่ไม่มีพฤติกรรมการยืดหยุ่นที่แท้จริง เมื่อได้รับค่าหน่วยแรง (Stress) เพิ่มขึ้นเกินกว่าความสามารถที่ส่วนของเพสต์และมวลรวมจะรับได้ทำให้เกิดการแตกร้าวทั้งระดับจุลภาคและมหภาคในคอนกรีต และเมื่อเพิ่มค่าหน่วยแรงขึ้นไปจะส่งผลการกระจายของรอยแตกร้าวในคอนกรีตก็จะเพิ่มมากขึ้น ความเครียด (Strain) จึงเพิ่มมากยิ่งขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมวลรวมมีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ ทำให้เมื่อคอนกรีตมีปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมเพิ่มขึ้น ทำให้คอนกรีตมีปริมาณมวลรวมลดลงและมีซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้น ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นจึงน้อยลงตามไปด้วย

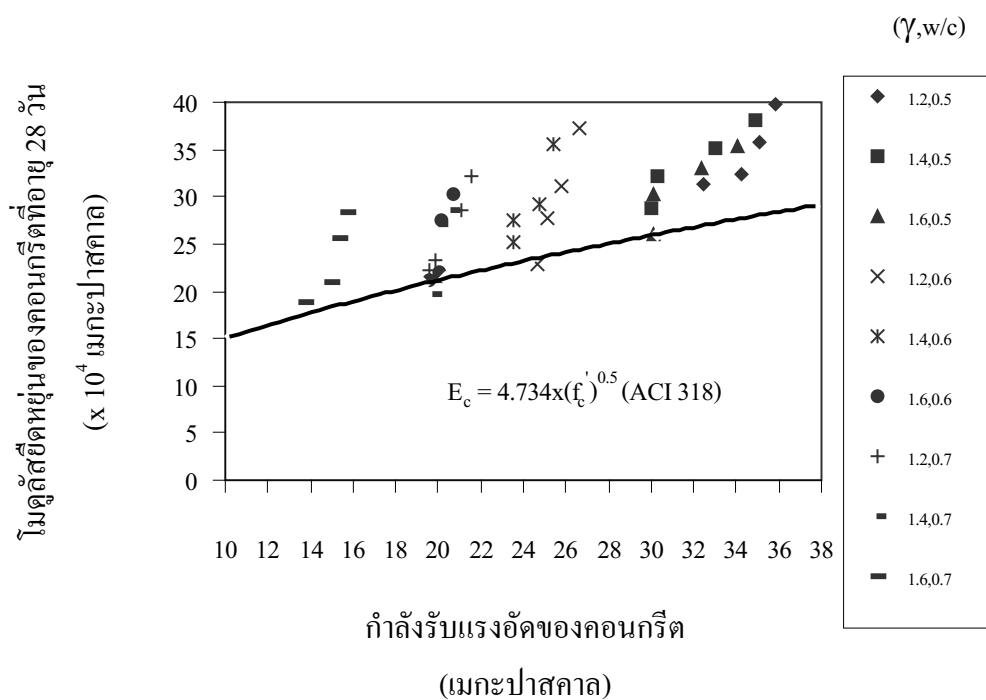
ในคอนกรีตมีแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (C-S-H) ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ให้ความแข็งแรงกับคอนกรีตแล้ว ยังมีผลต่อโมดูลัสของความยืดหยุ่นของคอนกรีตด้วยคือหากมีปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์มากและมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ คอนกรีตจะมีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นสูงตามไปด้วย (Neville, A.M. 1995, pp. 412-419) เมื่อมีการผสมน้ำประปาดูด้วยน้ำสลัดจ์ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความต่อเนื่องแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ที่มาจากปูนซีเมนต์และที่มีในน้ำสลัดจ์จึงส่งผลให้โมดูลัสของความยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์ที่อายุ 28 วัน มีค่าลดลงตามไปด้วย

สำหรับประเด็นที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ACI 318 (Building Code Requirement for Reinforced Concrete) ได้กำหนดให้ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นขึ้นอยู่กับหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตในสภาพสด (กำหนดให้ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นสำหรับคอนกรีต (E_c) ในการออกแบบเท่ากับ $\omega^{1.5} \times 33 \sqrt{f'_c}$ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยที่ ω คือหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ส่วน f'_c เท่ากับกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน หรือสำหรับคอนกรีตทั่วไปให้ใช้ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นเท่ากับ $57,000 \sqrt{f'_c}$ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) เมื่อหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์ใกล้เคียงคอนกรีตปกติจึงทำให้ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์น่าจะใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ แต่จากการเปรียบเทียบในประเด็นของความสัมพันธ์ที่ขึ้นอยู่กับค่า f'_c ในภาพที่ 5.62 พบว่าค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์ที่อายุ 28 วัน จะต่ำกว่าคอนกรีตปกติและแปรผันตามกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน (f'_c) ที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง แต่ทั้งนี้คอนกรีตส่วนใหญ่มี

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกว่าที่เกณฑ์มาตรฐานกำหนด มีเพียงคอนกรีตที่ผสมน้ำสัจจในอัตราส่วนร้อยละ 30 และมีสัดส่วนของ γ เท่ากับ 1.6 และ w/c เท่ากับ 0.7 ที่มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานเล็กน้อย



ภาพที่ 5.61 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน



ภาพที่ 5.62 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน เปรียบเทียบกับมาตรฐาน ACI 318

5.4 คุณสมบัติทางด้านการทนทานของคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์

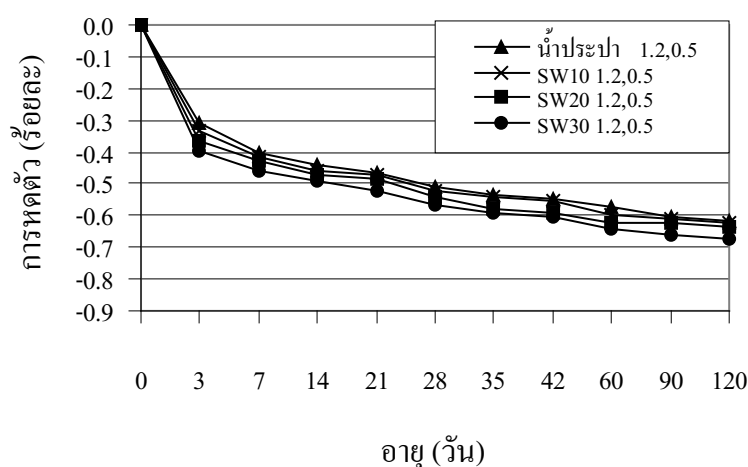
5.4.1 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต (Drying Shrinkage)

จากผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตปกติและคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่น้ำสลัดจ์ในน้ำประปาที่ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักซึ่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 4470, 10,040 และ 15,900 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ โดยเริ่มทำการวัดการเปลี่ยนแปลงความยาวภายหลังจากการบ่มในน้ำ 28 วันจนถึงอายุ 120 วัน อย่างสม่ำเสมอแสดงในภาพที่ 5.63 ถึง 5.71 พบว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.2 และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5 ดังแสดงในภาพที่ 5.63 มีค่าการหดตัวแบบแห้งเชิงเส้นของตัวอย่างคอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ของน้ำสลัดจ์และมีค่ามากที่สุดที่ร้อยละการแทนที่ของน้ำสลัดจ์เท่ากับ 30 ซึ่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 15,900 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าร้อยละ -0.68 (ค่าลบแสดงการหดตัวซึ่งความยาวของคอนกรีตลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวเริ่มต้น) ที่อายุคอนกรีตเท่ากับ 120 วัน ทั้งนี้เพราะน้ำสลัดจ์มีองค์ประกอบที่เป็นเอ็ททริงไกท์ (Ettringite) ซึ่งมีความไม่เสถียรและจะสลายตัวไปในที่สุดด้วยเหตุนี้เมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้เนื้อของคอนกรีตมีความพรุนเพิ่มขึ้นซึ่งหมายถึงการเพิ่มขึ้นของจำนวนและขนาดของโพรงคาพิลลารี (Capillary) โดยโพรงดังกล่าวจะเป็นช่องเปิดที่น้ำจากภายในคอนกรีตซึ่งมีมากกว่าสิ่งแวดล้อมเคลื่อนออกสู่ภายนอก เมื่อความชื้น (หรือน้ำ) สูญเสียไปจะทำให้โครงสร้างภายในโดยเฉพาะส่วนที่มีความชื้นอยู่ของคอนกรีตมีความดันลดลงและเกิดการหดตัวในที่สุด แต่กระนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคอนกรีตเนื่องจากการหดตัวแบบแห้งจะไม่เท่ากับปริมาตรที่สูญเสียไปเนื่องจากการยิดรังของโครงสร้างเพสต์และมวลรวม (Neville A.M., 1996, pp. 426-428)

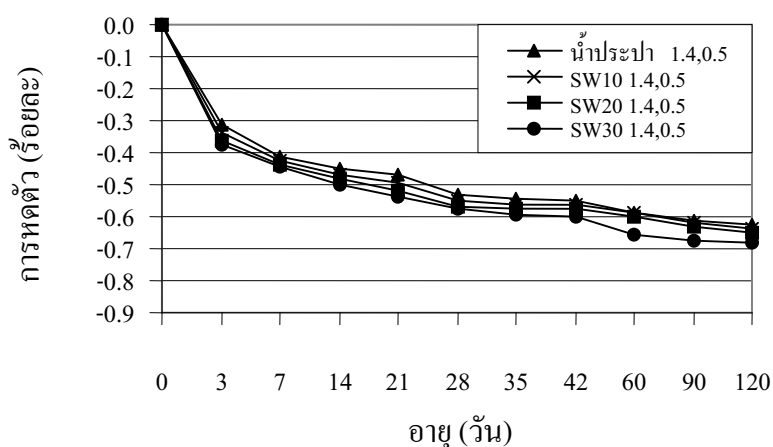
เมื่อพิจารณาการหดตัวของคอนกรีตที่อายุ 3 วันแรก มีอัตราการหดตัวมากและเริ่มลดลงตามลำดับเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และสำหรับการการหดตัวแบบแห้งในช่วงแรกที่เกิดขึ้นในปริมาณมากอันเป็นผลเนื่องจากในระยะแรกหลังจากที่คอนกรีตถูกนำขึ้นมาจากกระบอบน้ำซึ่งมีความชื้นสูง (ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100) ทำให้เมื่อนำไปไว้ในบริเวณที่มีความชื้นต่ำกว่า (ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 60 ± 5) ซึ่งจะให้ความชื้นในบริเวณผิวของคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมเคลื่อนตัวออกมาได้ก่อนและง่ายทำให้เกิดการหดตัวแบบแห้งเกิดขึ้นได้มากซึ่งต่างจากในช่วงหลังที่ความชื้นที่ผิวลดลงมาก คงเหลือเพียงความชื้นภายในคอนกรีตที่สามารถเคลื่อนที่ออกสู่ภายนอกได้ยากกว่า ประกอบกับจากการหดตัวในช่วงแรกจะทำให้โครงสร้างของโพรงคาพิลลารียุบตัวลงบางส่วนทำ

ให้เป็นการปิดกั้นความชื้นจากภายในที่จะสูญเสียออกสู่ภายนอกได้ ผลดังกล่าวจึงยังทำให้การหดตัวลดลงตามลำดับ

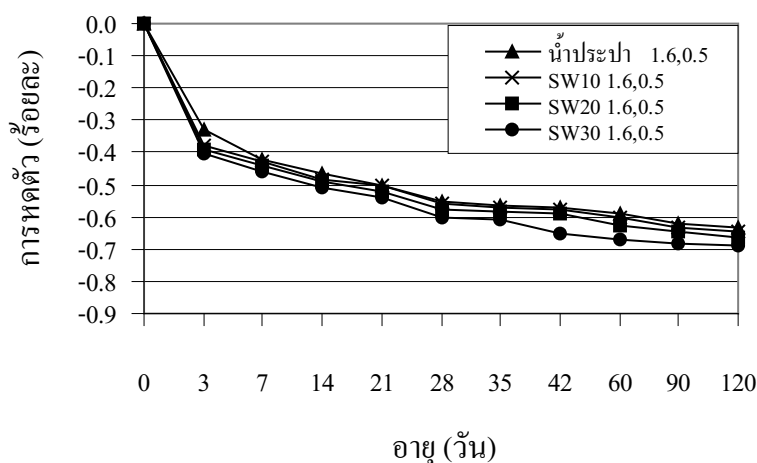
สำหรับการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วน γ เท่ากับ 1.4 และ 1.6 ดังแสดงในภาพที่ 5.64 และ 5.65 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่มีค่า γ เท่ากับ 1.2 ทั้งนี้เพราะการเพิ่มค่า γ ทำให้คอนกรีตมีปริมาณเพสต์เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงจำนวนของโพรงคาพิวลาเรียนเป็นผลให้ความชื้นจากภายในเคลื่อนที่ออกสู่สิ่งแวดล้อมได้มากขึ้น การหดตัวจึงมีมากขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 5.63 การหดตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น (γ) เท่ากับ 1.2 และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5



ภาพที่ 5.64 การหดตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น (γ) เท่ากับ 1.4 และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5

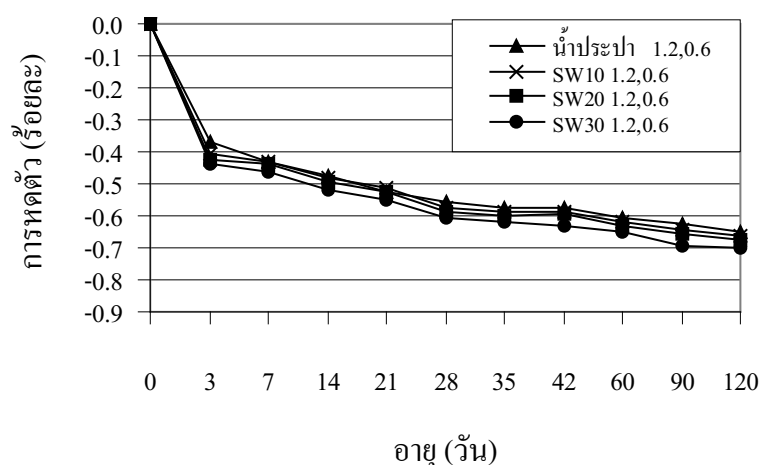


ภาพที่ 5.65 การหดตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร

ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น (γ) เท่ากับ 1.6

และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5

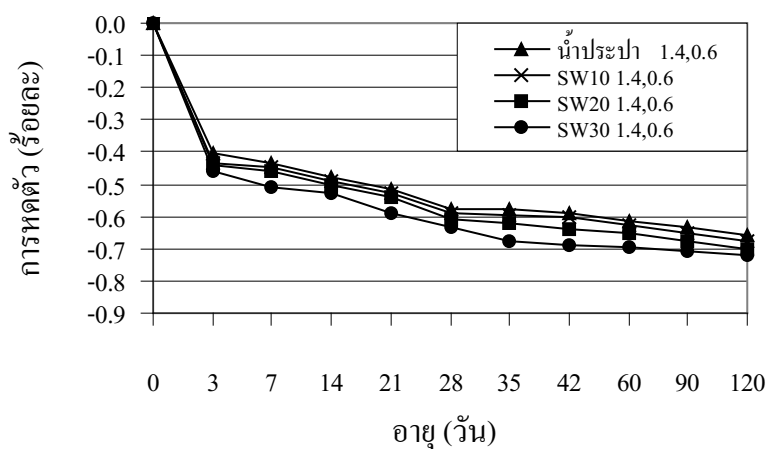
การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.6 และค่า γ เท่ากับ 1.2, 1.4 และ 1.6 แสดงในภาพที่ 5.66 ถึง 5.68 ตามลำดับ พบว่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาทั้งคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์ โดยคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์มีค่ามากกว่าคอนกรีตปกติ เนื่องจากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น และสังเกตว่าการหดตัวเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 จะมีค่ามากกว่าเนื่องจากความพรุน ที่เพิ่มขึ้น (Neville A.M., 1996, p. 277) ทำให้ความชื้นสูญเสียออกสู่ภายนอกคอนกรีตได้มากขึ้น



ภาพที่ 5.66 การหดตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร

ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น (γ) เท่ากับ 1.2

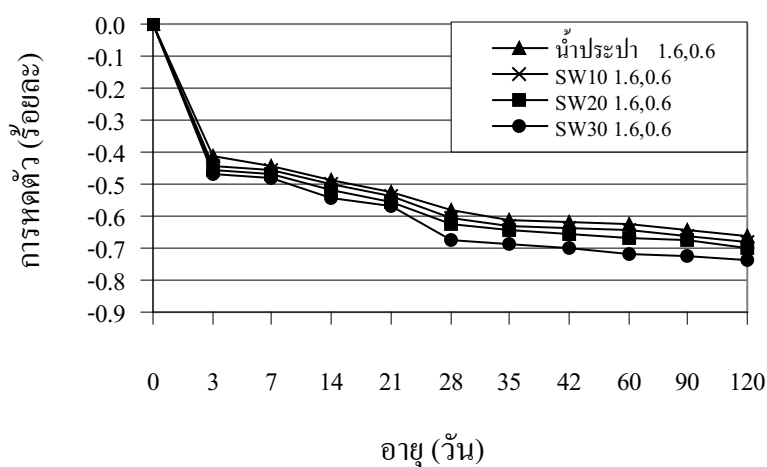
และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.6



ภาพที่ 5.67 การหดตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร

ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น (γ) เท่ากับ 1.4

และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.6



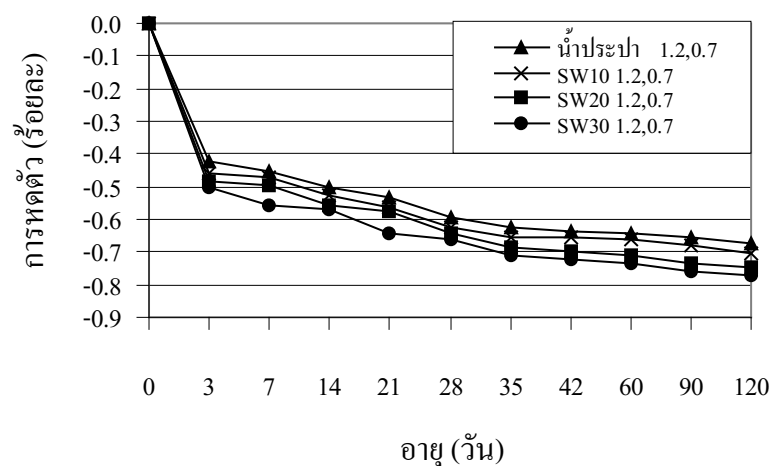
ภาพที่ 5.68 การหดตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร

ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น (γ) เท่ากับ 1.6

และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.6

เมื่อพิจารณาการหดตัวแบบแห้งที่เกิดขึ้นกับคอนกรีตปกติที่และคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์ ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.7 และค่า γ เท่ากับ 1.2, 1.4 และ 1.6 แสดงในภาพที่ 5.69 ถึง 5.71 ตามลำดับ พบว่าแนวโน้มของการหดตัวของคอนกรีตจะเป็นไปในลักษณะเดียวกับที่เกิดขึ้นใน w/c เท่ากับ 0.5 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์มีค่ามากกว่า

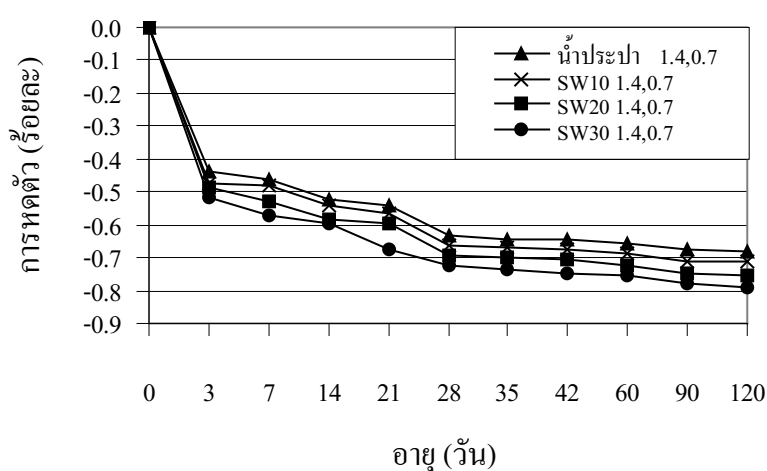
คอนกรีตปกติตลอดช่วงเวลาที่ทำการบ่มในที่ที่มีอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส และมีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับร้อยละ 60 ± 5 เนื่องจากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น และจะสังเกตว่าการหดตัวเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 และ 0.6 จะมีค่ามากกว่าเนื่องจากความพรุน (Porosity) ที่เพิ่มขึ้นในเนื้อคอนกรีตเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 5.69 การหดตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร

ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น (γ) เท่ากับ 1.2

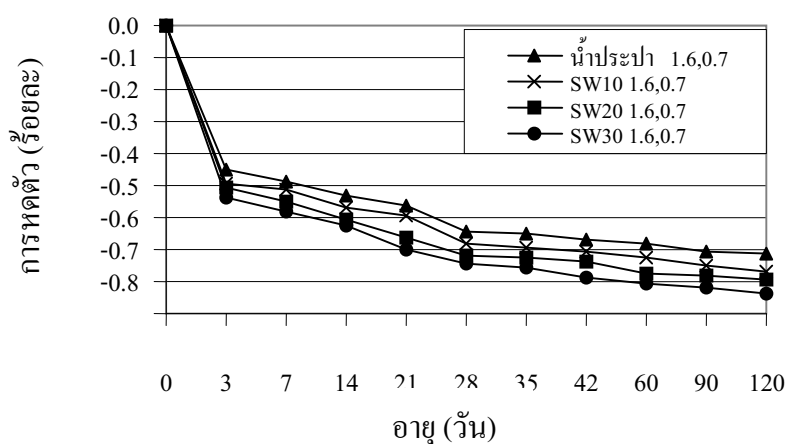
และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.7



ภาพที่ 5.70 การหดตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร

ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น (γ) เท่ากับ 1.4

และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.7

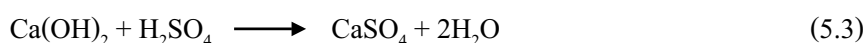


ภาพที่ 5.71 การหดตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตร
ช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น (γ) เท่ากับ 1.6
และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.7

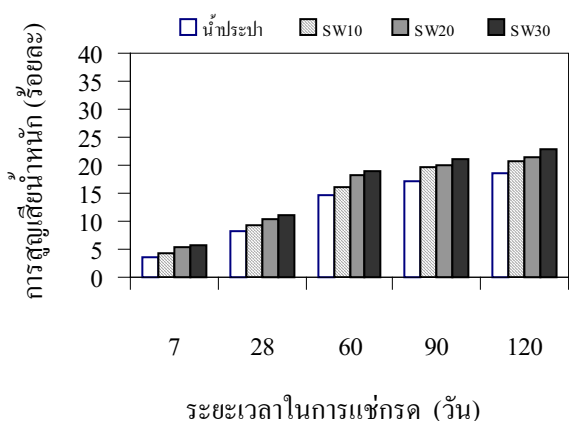
5.4.2 ความทนทานต่อสารละลายกรด (Acid Attack)

1) ความทนทานต่อสารละลายกรดซัลฟริก (Sulfuric Acid Attack)

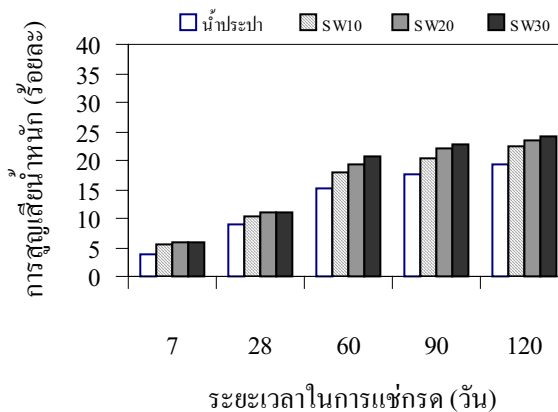
จากความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากสารละลายกรดซัลฟริก (H_2SO_4) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก กับระยะเวลาในการแช่ของคอนกรีตซึ่งมีอัตราส่วนน้ำปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5 แสดงในภาพที่ 5.72 ถึง 5.74 พบว่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดของคอนกรีตจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการแช่กรดซัลฟริกที่เพิ่มขึ้น โดยมีกลไกการทำลายทั้งการทำปฏิกิริยาหลักกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) แสดงในสมการที่ 5.3 เกิดผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ตกตะกอนที่ผิวของคอนกรีต โดยยิปซัมที่เกิดขึ้นจากซัลเฟตไอออนและแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีความสามารถในการละลาย (Solubility) ต่ำมาก (0.22 กรัมในน้ำ 100 กรัมที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส) (Asavaptsit S. et al., 2002, pp. 46 – 54) ดังนั้นการก่อตัวของแคลเซียมซัลเฟตซึ่งมีละลายน้ำได้น้อยจะทำให้เกิดชั้นขึ้นที่ผิวคอนกรีตและป้องกันการทำลายของกรด แต่ชั้นดังกล่าวมีการยึดเกาะกันแบบหลวมทำให้เป็นง่ายต่อการชะล้างออกและกรดสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบแคลเซียมทุกชนิดในคอนกรีต (สมนึก ตั้งเดิมสิริกุล, 2543, 58-59)



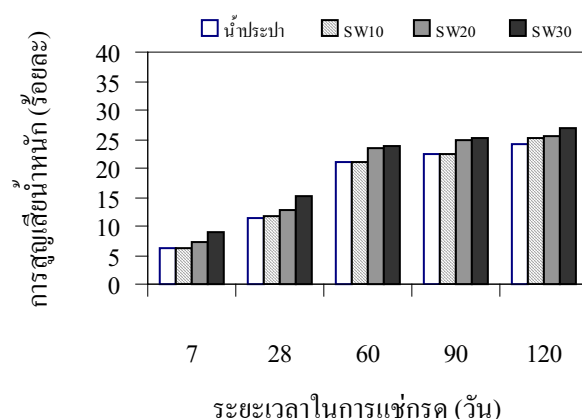
สำหรับคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์ โดยที่ค่าอัตราส่วน γ เท่ากับ 1.2 ดังภาพที่ 5.72 มีการสูญเสีย น้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริกมากกว่าคอนกรีตปกติที่ใช้น้ำประปาและมีความมากที่สุดที่การแทนที่ ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 15,900 มิลลิกรัมต่อลิตรเนื่องจากเหตุ ผล 2 ประการคือ ประการแรกในน้ำสลัดจ์มีองค์ประกอบเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นสารตั้ง ต้น (สมการที่ (5.3)) ของการทำลายเนื่องจากกรดมากทำให้การสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้น ประกอบกับ น้ำสลัดจ์ส่วนใหญ่มีเม็ดทรินไคต์ซึ่งไม่เสถียรและสลายตัวไปจึงส่งผลต่อความพรุนของคอนกรีตที่ เพิ่มขึ้นทำให้ไอออนของกรดเข้าไปทำลายภายในเนื้อคอนกรีตได้มากขึ้น การสูญเสียน้ำหนักจึงมาก ขึ้น ในขณะที่คอนกรีตที่มีค่า γ เท่ากับ 1.4 และ 1.6 ดังภาพที่ 5.73 ถึง 5.74 ตามลำดับ มีค่าการสูญ เสียน้ำหนักเนื่องจากกรดเพิ่มขึ้นตามความพรุนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณที่มีมากในเนื้อเพสต์จะทำให้ เกิดโพรงชนิดต่างๆ และที่สำคัญคือ โพรงคาพิวลารีที่เป็ดออกสู่ภายนอกทำให้กรดเข้าไปทำลาย ภายในเนื้อคอนกรีตได้มากขึ้น



ภาพที่ 5.72 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนัก
เนื่องจากกรดซัลฟูริกที่ γ เท่ากับ 1.2
และ w/c เท่ากับ 0.5

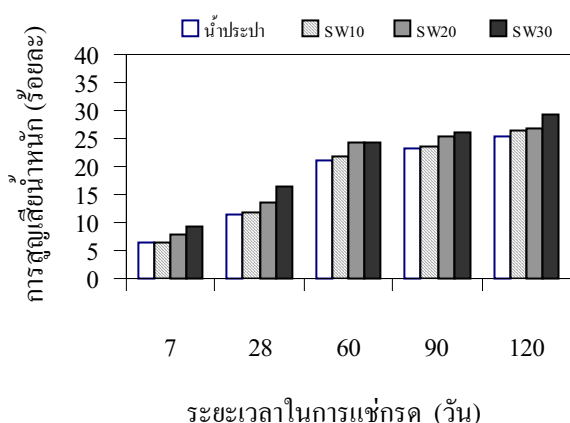


ภาพที่ 5.73 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนัก
เนื่องจากกรดซัลฟูริกที่ γ เท่ากับ 1.4
และ w/c เท่ากับ 0.5

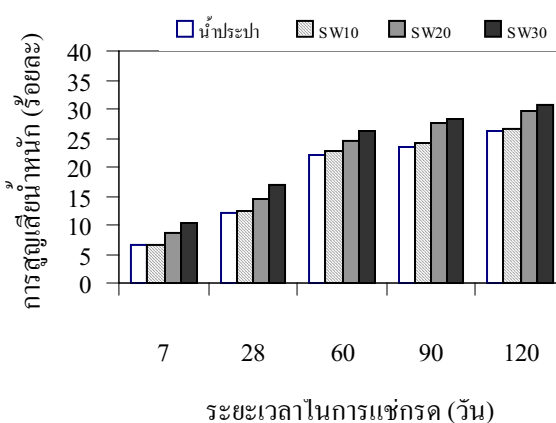


ภาพที่ 5.74 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจาก
กรดซัลฟริกที่ γ เท่ากับ 1.6 และ w/c เท่ากับ 0.5

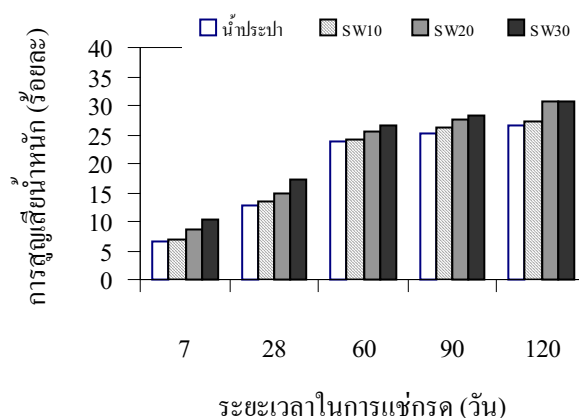
สำหรับการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟริกคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.6 แสดงในภาพที่ 5.75 ถึง 5.77 พบว่าแนวโน้มของการสูญเสียน้ำหนักจะคล้ายกับคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 มีการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น แต่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่า เนื่องด้วยการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำในคอนกรีตจะเป็นการเพิ่มความพรุนในเนื้อคอนกรีต ในขณะที่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ของน้ำสลัดจ์ในน้ำประปาทำให้การสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้น เนื่องจากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น



ภาพที่ 5.75 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนัก
เนื่องจากกรดซัลฟริกที่ γ เท่ากับ 1.2
และ w/c เท่ากับ 0.6

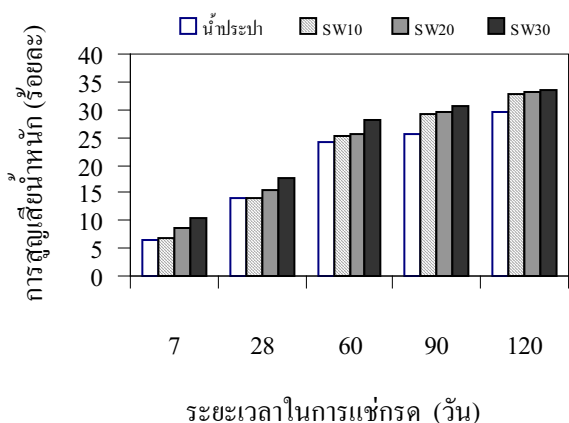


ภาพที่ 5.76 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนัก
เนื่องจากกรดซัลฟริกที่ γ เท่ากับ 1.4
และ w/c เท่ากับ 0.6

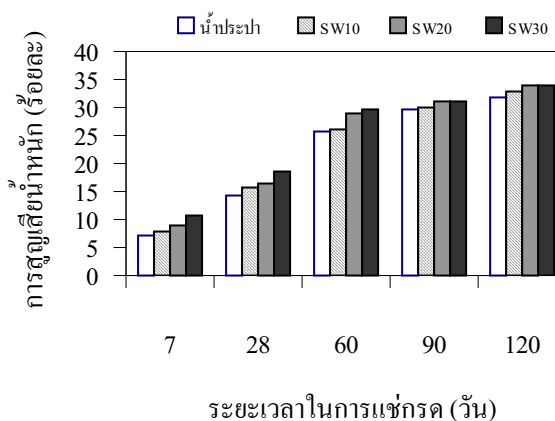


ภาพที่ 5.77 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจาก
กรดซัลฟริกที่ γ เท่ากับ 1.6 และ w/c เท่ากับ 0.6

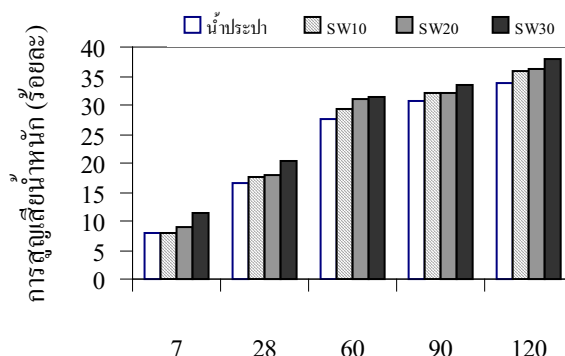
ความสัมพันธ์ของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟริกคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.7 แสดงในภาพที่ 5.78 ถึง 5.80 พบว่าการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น แต่จะมีค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าคอนกรีตที่ w/c เท่ากับ 0.5 และ 0.6 ในขณะที่เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ของน้ำสลัดจ์ในน้ำประปาทำให้การสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้น เนื่องจากสาเหตุที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่ w/c เท่ากับ 0.5



ภาพที่ 5.78 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนัก
เนื่องจากกรดซัลฟริกที่ γ เท่ากับ 1.2
และ w/c เท่ากับ 0.7



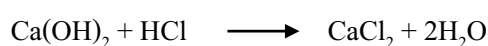
ภาพที่ 5.79 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนัก
เนื่องจากกรดซัลฟริกที่ γ เท่ากับ 1.4
และ w/c เท่ากับ 0.7



ภาพที่ 5.80 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจาก
กรดซัลฟริกที่ γ เท่ากับ 1.6 และ w/c เท่ากับ 0.7

2) ความทนทานต่อสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid Attack)

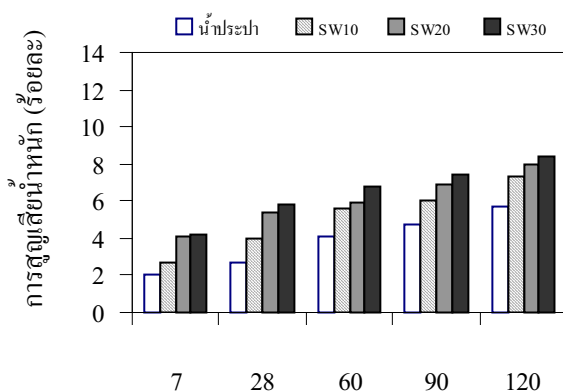
ความทนทานของกรดไฮโดรคลอริกของคอนกรีตปกติและผสมน้ำสัจจ์ในรูปแบบของร้อยละการสูญเสียน้ำหนักแสดงในภาพที่ 5.81 ถึง 5.89 พบว่าแนวโน้มของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดจะมีลักษณะคล้ายกับคอนกรีตที่บ่มในกรดซัลฟริก กล่าวคือ การสูญเสียน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยมีอัตราของการสูญเสียน้ำหนักสูงในช่วงแรกของการแช่และจะลดลงจนคงที่และคอนกรีตที่ผสมน้ำสัจจ์จะมีค่าของการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าคอนกรีตปกติ ดังกรณีของคอนกรีตที่อายุ 7 วัน และมีค่าอัตราส่วน γ เท่ากับ 1.2 และ w/c เท่ากับ 0.5 จะมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 2, 2.8, 4 และ 4.2 สำหรับคอนกรีตปกติและผสมน้ำสัจจ์เท่ากับร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับซึ่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 4470, 10040 และ 15900 มิลลิกรัมต่อลิตร และจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยปฏิกิริยาเคมีระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับกรดไฮโดรคลอริกแสดงในสมการที่ (5.4) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) และน้ำ โดยแคลเซียมคลอไรด์มีความสามารถในการละลายน้ำได้สูงกว่าแคลเซียมซัลเฟต



(5.4)

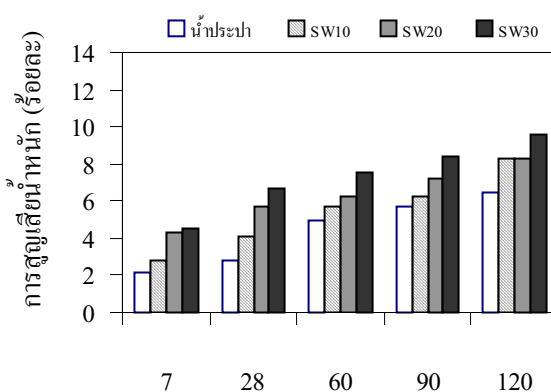
สำหรับคอนกรีตผสมน้ำสัจจ์ที่มีร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดไฮโดรคลอริกมากกว่าคอนกรีตปกติ เนื่องมาจากปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีมากในน้ำสัจจ์ทำให้มี

สารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาได้เพิ่มขึ้นจึงได้ผลิตภัณฑ์ที่ละลายหรือถูกชะล้างเกิดขึ้นมากตามไปด้วย และกรณีของการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตที่มีค่า γ เท่ากับ 1.4 และ 1.6 ในภาพที่ 5.82 ถึง 5.83 ตามลำดับ จะมีการสูญเสียมากกว่าคอนกรีตที่มี γ เท่ากับ 1.2



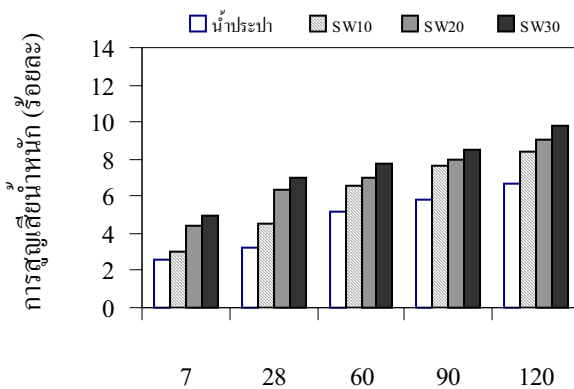
ระยะเวลาในการแช่กรด (วัน)

ภาพที่ 5.81 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนัก
เนื่องจากกรดไฮโดรคลอริกที่ γ เท่ากับ 1.2
และ w/c เท่ากับ 0.5



ระยะเวลาในการแช่กรด (วัน)

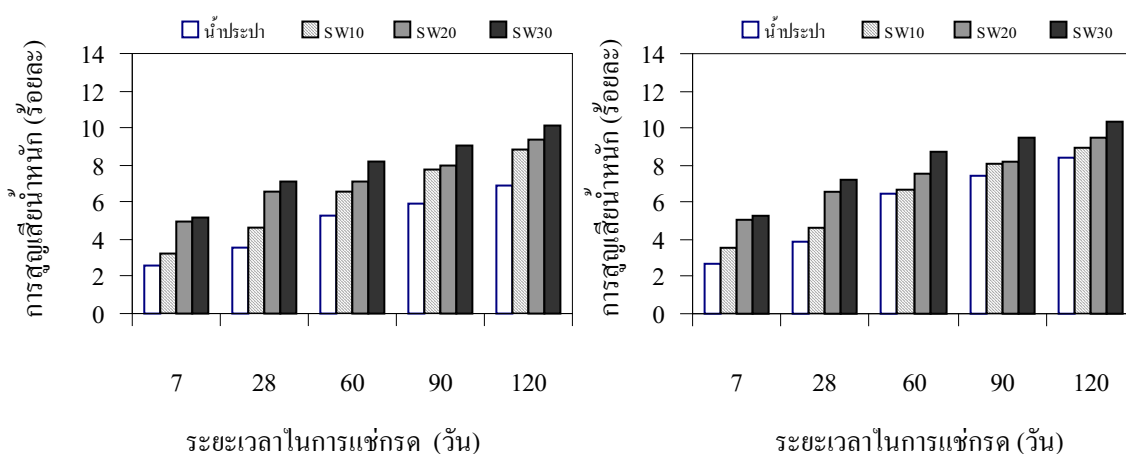
ภาพที่ 5.82 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนัก
เนื่องจากกรดไฮโดรคลอริกที่ γ เท่ากับ 1.4
และ w/c เท่ากับ 0.5



ระยะเวลาในการแช่กรด (วัน)

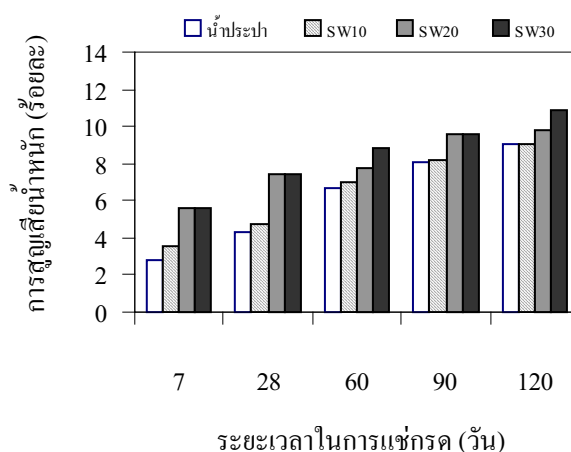
ภาพที่ 5.83 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจาก
กรดไฮโดรคลอริกที่ γ เท่ากับ 1.6 และ w/c เท่ากับ 0.5

ความสัมพันธ์ของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดไฮโดรคลอริกของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.6 แสดงในภาพที่ 5.84 ถึง 5.86 พบว่าการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น แต่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าคอนกรีตที่ w/c เท่ากับ 0.5 และเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ของน้ำสลัดจ์ในน้ำประปาทำให้การสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้น



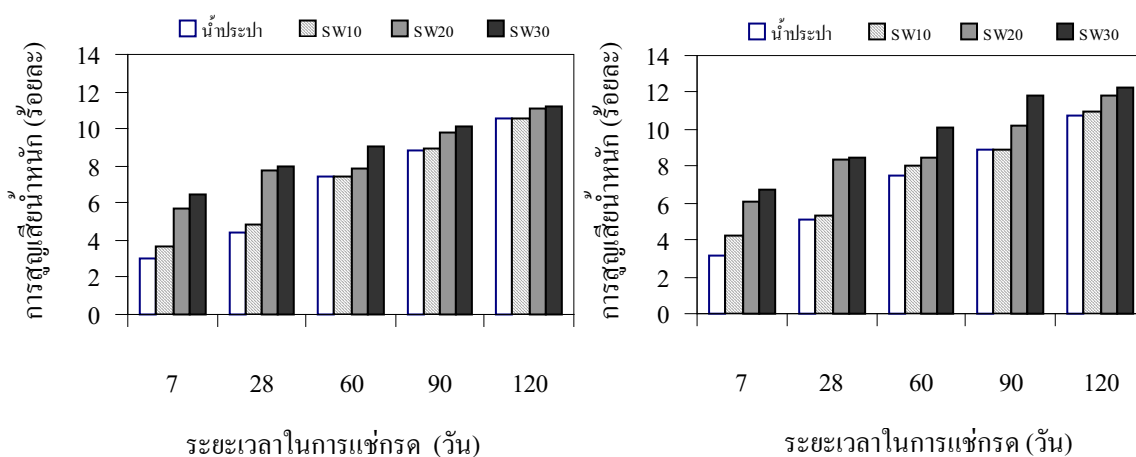
ภาพที่ 5.84 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดไฮโดรคลอริกที่ γ เท่ากับ 1.2 และ w/c เท่ากับ 0.6

ภาพที่ 5.85 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดไฮโดรคลอริกที่ γ เท่ากับ 1.4 และ w/c เท่ากับ 0.6



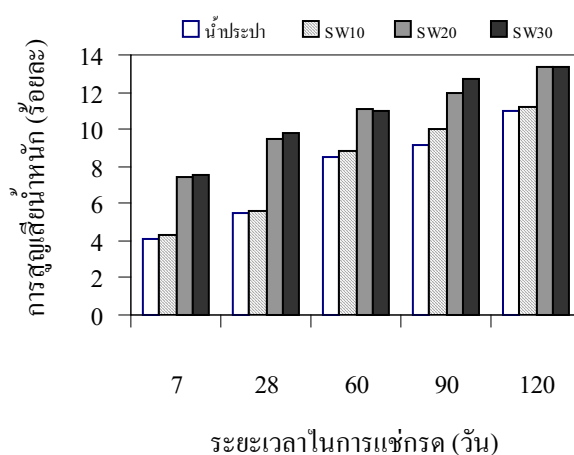
ภาพที่ 5.86 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดไฮโดรคลอริกที่ γ เท่ากับ 1.6 และ w/c เท่ากับ 0.6

เมื่อพิจารณาการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดไฮโดรคลอริกของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.7 แสดงในภาพที่ 5.87 ถึง 5.89 พบว่าการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น คล้ายกับคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 และ 0.6 แต่จะสังเกตว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่า เนื่องด้วยการเพิ่มขึ้นของความพรุนในเนื้อคอนกรีตจากปริมาณที่เพิ่มขึ้นและเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ของน้ำสลัดจ์ในน้ำประปามากขึ้นทำให้การสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 5.87 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนัก
เนื่องจากกรดไฮโดรคลอริกที่ γ เท่ากับ 1.2
และ w/c เท่ากับ 0.7

ภาพที่ 5.88 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนัก
เนื่องจากกรดไฮโดรคลอริกที่ γ เท่ากับ 1.4
และ w/c เท่ากับ 0.7



ภาพที่ 5.89 ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจาก
กรดไฮโดรคลอริกที่ γ เท่ากับ 1.6 และ w/c เท่ากับ 0.7

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษา ปริมาณน้ำสลัดจ์ที่เหมาะสมและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการศึกษา

6.1.1 คุณสมบัติของน้ำสลัดจ์และตะกอนสลัดจ์

1) น้ำสลัดจ์มีค่าเป็นกรดต่าง (pH) สูงถึง 12.2 โดยเป็นผลมาจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮดรอลิซชันละลายน้ำแล้วแตกตัวเป็นแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ซึ่งเมื่อทำการแทนที่ในน้ำประปาโดยน้ำหนักรวบรวมค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของน้ำผสมคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นโดยทันที

2) น้ำสลัดจ์มีปริมาณคลอไรด์และซัลเฟตเท่ากับ 8.8 และ 16.35 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานของน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต (ASTM C 94) ในขณะที่ปริมาณของแข็งมีค่า 73,250 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน (ไม่เกิน 50,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) แต่ปริมาณการแทนที่ของน้ำสลัดจ์ในน้ำประปาที่สัดส่วนการแทนที่เท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนักซึ่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 15,900 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าไม่เกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด

3) ตะกอนสลัดจ์อบแห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส มีลักษณะของเอ็ททริงไกท์แบบคล้ายเข็มและร่างแห โดยมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ร้อยละ 25.50 ทำให้โดยรวมตะกอนสลัดจ์ไม่สามารถจัดเป็นสารปอซโซลานตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618

6.1.2 คุณสมบัติของคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์ในสภาพสด

1) หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตในสภาพสดคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์ โดยปริมาณการแทนที่ของน้ำสลัดจ์ในน้ำประปามากขึ้นไม่ส่งผลกระทบต่อหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสดมาก

2) คอนกรีตซึ่งมีอัตราส่วนของน้ำสลัดจ์ในน้ำประปาเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักซึ่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 4470, 10400 และ 15900 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นลดลงและมีการสูญเสียค่าการยุบตัวเร็วขึ้นตามลำดับ เมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติที่ใช้น้ำประปา

3) ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายลดลงตามสัดส่วนการแทนที่ของสลัดจ์ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติที่ผสมน้ำประปาแล้ว

4) สำหรับคอนกรีตที่ผสมน้ำสลัดจ์ในสัดส่วนถึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 15,900 มิลลิกรัมต่อลิตร มีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นไม่แตกต่างไปจากคอนกรีตปกติที่ผสมน้ำประปา ซึ่งได้ข้อสรุปว่าอัตราส่วนของน้ำสลัดจ์และองค์ประกอบในน้ำสลัดจ์ไม่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นและลดลงของอุณหภูมิคอนกรีต

6.1.3 คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์

1) คอนกรีตที่ผสมน้ำสลัดจ์จะมีกำลังรับแรงอัด แรงดึงแบบผ่าซีกและแรงดัดลดลง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ของน้ำสลัดจ์ในน้ำประปา โดยเมื่อพิจารณากำลังรับแรงดัดและแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์เปรียบเทียบกับมาตรฐาน ACI 318 พบว่ากำลังรับแรงดัดและแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตมีค่าสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนด แม้ว่าในคอนกรีตจะมีส่วนผสมของน้ำสลัดจ์แทนที่ในน้ำประปาถึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 15,900 มิลลิกรัมต่อลิตร

2) ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์ที่อายุ 28 วัน จะต่ำกว่าคอนกรีตปกติ ซึ่งขึ้นกับสัดส่วนของน้ำสลัดจ์ในน้ำประปาที่เพิ่มขึ้น และแปรผันตามกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน (f'_c) ที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง โดยคอนกรีตส่วนใหญ่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกว่าที่เกณฑ์มาตรฐานกำหนด มีเพียงคอนกรีตที่ผสมน้ำสลัดจ์ในอัตราส่วนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 15,900 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีสัดส่วนของ γ เท่ากับ 1.6 และ w/c เท่ากับ 0.7 ที่มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานเล็กน้อย

6.1.4 คุณสมบัติทางด้านการทนทานของคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์

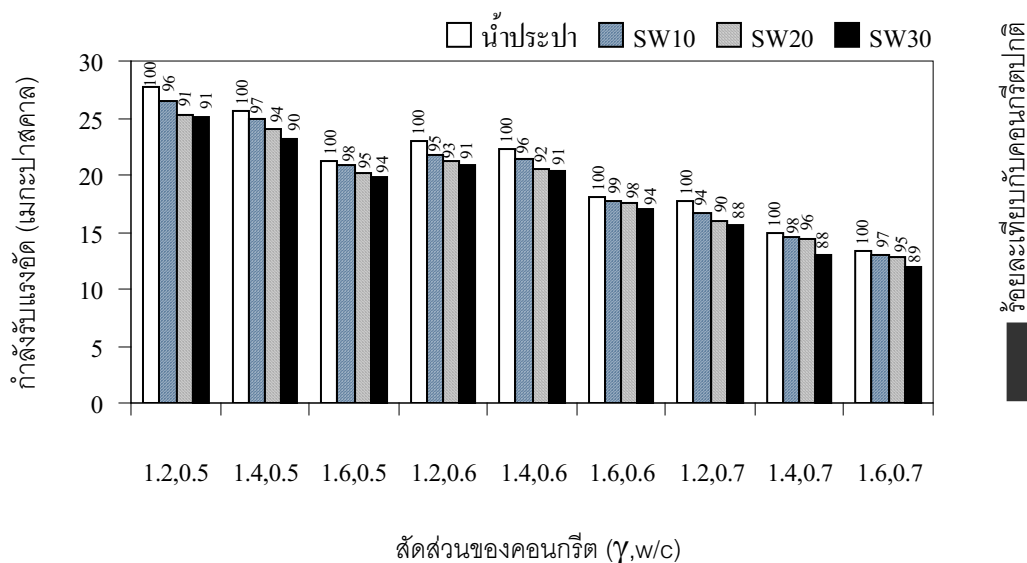
1) การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ของน้ำสลัดจ์ในน้ำประปา

2) สำหรับคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริกและไฮโดรคลอริกมากกว่าคอนกรีตปกติที่ใช้น้ำประปาและมีค่ามากที่สุดที่การแทนที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 15,900 มิลลิกรัมต่อลิตร

6.2 ปริมาณน้ำสลัดจ์ที่เหมาะสม

จากข้อกำหนดในมาตรฐานของน้ำที่จะถูกนำมาใช้ผสมทำเป็นคอนกรีต (มาตรฐานคอนกรีตในประเทศไทย (EIT CODE) มาตรฐาน ASTM C 94 (Standard Specification for Ready-mixed Concrete), BS 3148:1980 (Method of Tests for Water for Making Concrete (Including Notes on the Suitability of the Water)) และ AASHTO M 157 (Standard Specification for Ready-mixed Concrete) ซึ่งได้กำหนดหลักเกณฑ์เบื้องต้นของน้ำที่ทำการทดสอบตามคุณสมบัติต่อไปนี้

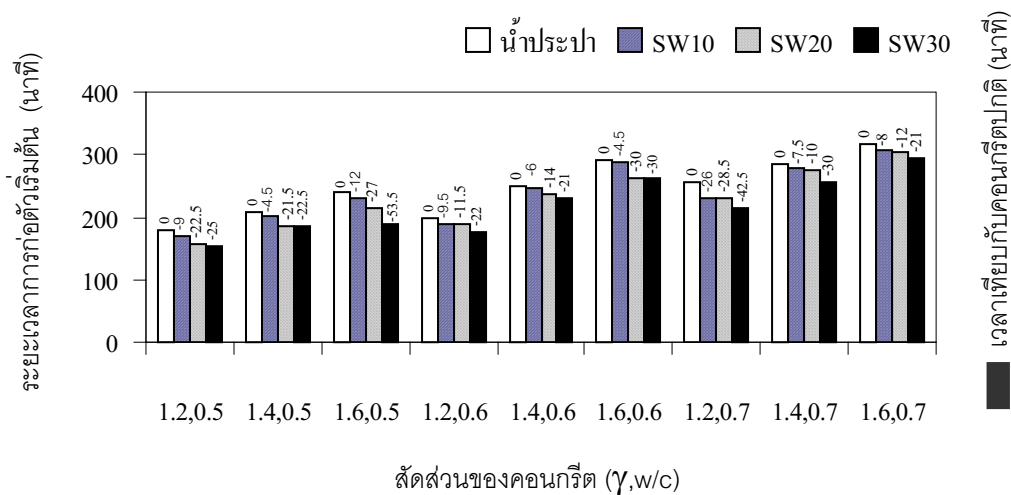
1) น้ำดังกล่าวจะต้องไม่ทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 7 วัน น้อยกว่าร้อยละ 90 โดยคอนกรีตส่วนใหญ่ซึ่งมีส่วนประกอบของน้ำสลัดจ์แทนที่ในน้ำประปาร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 15,900 มิลลิกรัมต่อลิตรไม่ทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงต่ำกว่าร้อยละ 90 ในขณะที่คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.7 และมีอัตราส่วนของน้ำสลัดจ์เท่ากับร้อยละ 30 ทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงที่ต่ำกว่ามาตรฐานเล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 6.1



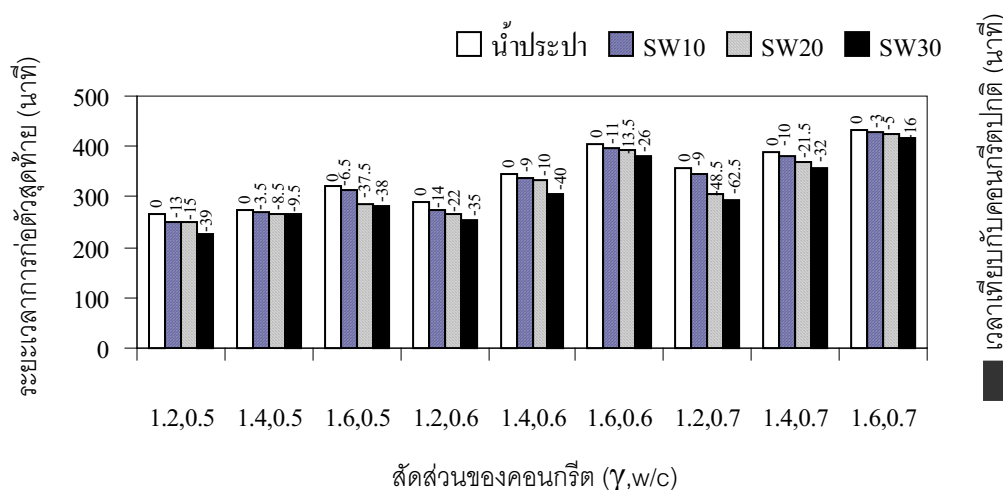
ภาพที่ 6.1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 7 วัน

2) น้ำดังกล่าวจะต้องไม่มีผลต่อระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นของคอนกรีตเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้น้ำสะอาด (ในที่นี้ใช้น้ำประปาเป็นเกณฑ์) โดยไม่เร็วเกินกว่า 1 ชั่วโมง และระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายจะต้องไม่ช้าเกินกว่า 1.5 ชั่วโมง ซึ่งคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์มีระยะเวลาการก่อตัวอยู่

ภายในเกณฑ์มาตรฐาน ดังแสดงในภาพที่ 6.2 และ 6.3 สำหรับการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายตามลำดับ



ภาพที่ 6.2 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของคอนกรีต



ภาพที่ 6.3 ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีต

6.3 การประเมินทางเศรษฐศาสตร์

สำหรับการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของการนำน้ำสลัดจ์ (Sludge Water) มาใช้ทดแทนการใช้น้ำประปาเพื่อผสมคอนกรีตผสมเสร็จ โดยสามารถประเมินในเชิงราคาการผลิต ราคาการกำจัด และคุณค่าทางสิ่งแวดล้อม ดังแสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 การเปรียบเทียบราคาของคอนกรีตผสมเสร็จ 1 ลูกบาศก์เมตร

ประเด็นในการประเมิน	อัตราส่วนการนำน้ำสลัดจ์มาแทนที่ในน้ำประปา (โดยน้ำหนัก)			
	0	10	20	30
1. ราคาของคอนกรีต โดยเปรียบเทียบกับ ราคาของน้ำประปาเป็นเกณฑ์	12 ^[1] (0%) ^[2]	10.8 (10%) ^[2]	9.6 (20%) ^[2]	8.4 (30%) ^[2]
2. คุณค่าราคาในการกำจัดน้ำสลัดจ์	ไม่มี	ลดได้โดยเฉลี่ย 1 บาท ต่อ ม. ³		
3. ราคาทางสิ่งแวดล้อม ทั้งระยะสั้นและระยะยาว	ไม่มี	ไม่สามารถประเมินค่าได้		

หมายเหตุ ^[1] ตัวเลขในวงเล็บ คือ ร้อยละของราคาที่ลดลงของคอนกรีต

^[2] ราคาน้ำประปาที่ใช้ประเมินในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จเท่ากับ 12 บาท /ม.³
ของคอนกรีต

6.4 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษา พบว่าน้ำสลัดจ์ (Sludge Water) สามารถนำมาใช้แทนที่น้ำประปาในการผสมทำคอนกรีตได้ แต่อย่างไรก็ตาม เพื่อให้สามารถนำน้ำดังกล่าวมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงควรมีการศึกษาเพิ่มในส่วนที่เกี่ยวข้องอื่นๆ ดังต่อไปนี้

1) ควรมีการศึกษาในส่วนของผลกระทบที่มีต่อคอนกรีตเมื่อเพิ่มสัดส่วนการแทนที่ของน้ำสลัดจ์ที่สูงขึ้นจนสามารถนำมาใช้ทดแทนน้ำประปาได้ทั้งหมด

2) เนื่องจากในน้ำสลัดจ์มีส่วนประกอบอื่น อาทิเช่น สารผสมเพิ่มทั้งหมด สารลดน้ำ สารหน่วง และสารปอซโซลาน เป็นต้น ดังนั้นจึงควรศึกษาผลกระทบของสารดังกล่าวที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีต

3) เมื่อพิจารณาจากขอบเขตของการศึกษา พบว่าปริมาณของแข็งที่อยู่ในน้ำสลัดจ์จะมีค่าน้อยกว่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานดังเช่น มาตรฐานคอนกรีตในประเทศไทย (EIT CODE) และมาตรฐาน ASTM C 94 ที่กำหนดปริมาณของแข็งไม่เกิน 50,000 หนึ่งส่วนในล้านส่วน (ppm) เป็นต้น ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพื่อขยายขอบเขตของปริมาณของแข็งที่ไม่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งระยะสั้นและระยะยาว

บรรณานุกรม

ัชชาวล เศรษฐบุตร. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ: , 2543.

ัชชาวล เศรษฐบุตร. คู่มือการทดสอบ หิน ทราย และคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: , 2543.

บุรฉัตร ฉัตร์วีระ. คอนกรีตเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์คุรุสภา, 2539.

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: ว.ส.ท., 2540.

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, ความคงทนของคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: จุฑทอง, 2543.

สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล. การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตผสมเถ้าลอย. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2542.

ณรงค์ศักดิ์ มากุล และคณะ. “คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ผสมน้ำล้างโมโนในโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ”, เอกสารการประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 5, 2542, หน้า 165-170.

วัชรกร วงศ์คำจันทร์. “พฤติกรรมทางกลของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดละเอียด”, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2544.

ACI Committee 318, “Building Code Requirements for Reinforced Concrete”, American Concrete Institute.

ASSHTO Committee, “ASSHTO M 157 Standard Specification for Ready-mixed Concrete”, American Association of State Highway and Transportation Officials.

ASTM Committee, “ASTM C 39 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”, Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

ASTM Committee, “ASTM C 78 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete”, Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

ASTM Committee, “ASTM C 94 Standard Specification for Ready-mixed Concrete”, Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

ASTM Committee, “ASTM C 403 Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance”, Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

ASTM Committee, “ASTM C 469 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression”, Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

ASTM Committee, “ASTM C 490 Standard Test Method for Apparatus for Use in Measurement of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar and Concrete”, Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

ASTM Committee, “ASTM C 496 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens”, Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

BSI Committee, “BS 3148 British Standard Methods of Tests for Water for Making Concrete”, British Standards Institute.

- Gartner, E. M., Young, J. F. and others. "Hydration of Portland Cement." In Structure and Performance of Cement , pp. 90-91. Edited by Bensted, J. and Barnes, P., London: Spon Press, 2002.
- Chini, A. R., Muszynski, L. C. and other. "Reuse of Wastewater Generated at Concrete Plants in Florida in the Production of Fresh Concrete", Magazine of Concrete Research, 2001, 53, No. 5, pp.311-319.
- Matsuyama, H., and Young J. F., "Effects of pH on Precipitation of Quasi-crystalline Calcium Silicate Hydrate in Aqueous Solution", In Advances in Cement Research , 2000, 12, No. 1, pp.29-33.
- Moon, H. Y., Shin, H. C., and other. "Properties of Cement Matrix Mixed with Ready-mixed Concrete Sludge and Residual Water", In ICCMC/IBST 2001, pp. 519–525.
- Neville, A.M., Properties of Concrete, Fourth Ed. England: Longman, 1996.
- Nan Su, Buquan Maio and Fu-Shung Liu, "Effect of Wash Water and Underground Water on Properties of Concrete", In Cement and Concrete Research 32(2002) : pp.777-782.
- Sato, Y., Kiyohara, C. and other. "Studies on the Effective Use of Concrete Sludge-Sludge Water and Pulverized Dry Sludge.", In Exploiting Waste in Concrete , pp. 37-46. Edited by Dhir, R. K. and Jappy T. D., London: Telford, 1999.
- Souwerbren, C., "Re-use of Wash Water in the Concrete Industrial Production Circle without Waste." European Standard for Mixing Water and the Re-use of Wash Water., In Concrete for Environment Enhancement and Protection, pp.183-197, Edited by Dhir, R. K. and Dyer, T. D., London : E & FN Spon, 1996.

Suwimol, A., Manop, B., and Chongrak, P. "Corrosion of Cement – based Solidified Wastes Due to Different Acid Attack.", Thammasat International Journal of Science and Technology, Vol.7, No. 2, pp. 46-54, 2002.

ภาคผนวก

ผนวก ก คุณสมบัติของมวลรวมและตะกอนสัจด์

ก.1 คุณสมบัติของมวลรวม

ตารางที่ ก.1

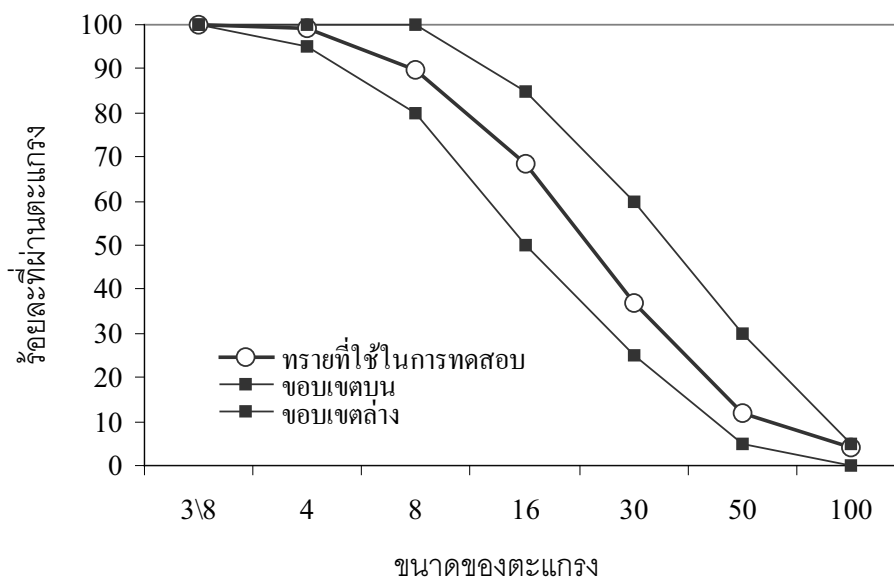
ความถ่วงจำเพาะและร้อยละการดูดซับน้ำของมวลรวม

คุณสมบัติ	มวลรวมหยาบ	มวลรวมละเอียด
ความถ่วงจำเพาะในสภาพอิ่มน้ำผิวแห้ง (Bulk Specific Gravity : SSD)	2.71	2.54
ความถ่วงจำเพาะในสภาพแห้ง (Bulk Specific Gravity : Oven-Dried)	2.70	2.53
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent Specific Gravity : SSD)	2.78	2.66
ร้อยละการดูดซับน้ำ (Absorption %)	0.89	1.97

ตารางที่ ก.2

ผลการทดสอบขนาดผละของมวลรวมละเอียด

Sieve No.	Sieve Size (mm.)	Cumulative Percentage Passing (%)	ASTM C33 Passing (%)
3/8"	9.5	99.98	100
No.4	4.75	99.34	95-100
No.8	2.36	89.83	80-100
No.16	1.18	68.50	50-85
No.30	0.06	36.78	25-60
No.50	0.0003	11.73	5-30
No.100	0.00015	3.90	0-10



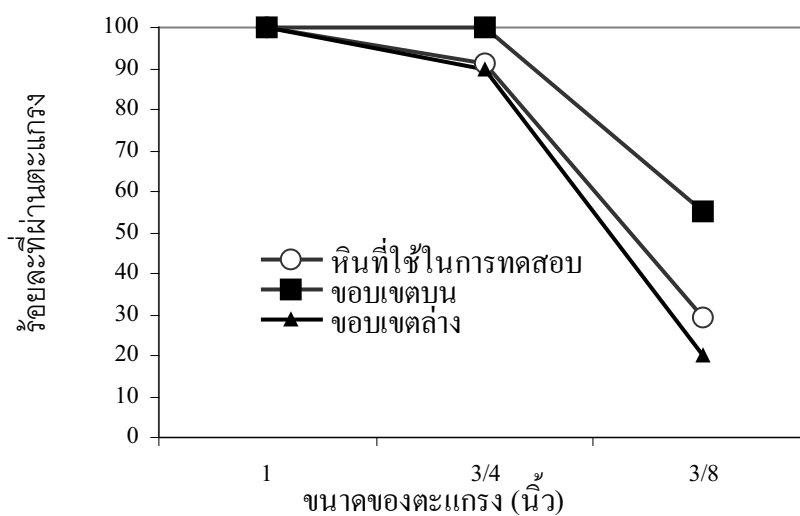
ภาพที่ ก.1 ขนาดผลของมวลรวมละเอียด

ตารางที่ ก.3

ขนาดผลของมวลรวมหยาบ

Sieve No.	Sieve Size (mm.)	Cumulative Percentage Retain (%)	Cumulative Percentage Passing (%)	ASTM C33 Passing (%)
1"	25	0	100	100
3/4"	19	8.82	91.18	90-100
5/8"	16	29.26	70.74	- ^[1]
1/2"	12.5	50.90	49.10	- ^[1]
3/8"	9.5	70.74	29.26	20-55

หมายเหตุ : ^[1] ไม่ได้กำหนดไว้ในมาตรฐาน



ภาพที่ ก.2 ขนาดคละของมวลรวมหยาบ

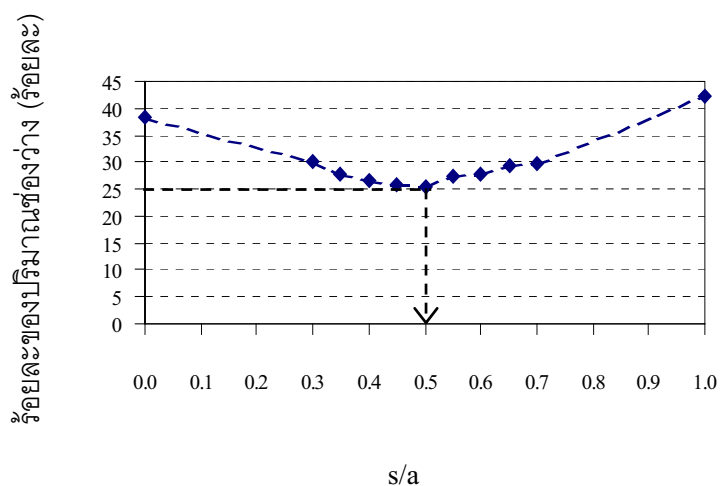
ตารางที่ ก.4

ปริมาณช่องว่าง และหน่วยน้ำหนักมวลรวมที่ อัตราส่วนระหว่างปริมาตร
มวลรวมละเอียดต่อมวลรวม ต่างกัน

s/a ratio	Weight of Sand (kg)	Weight of Rock (kg)	Weight of Cylinder (kg)	Weight of Cylinder & Sample (kg)	Weight of Sample (kg)	Volume of Cylinder ($\times 10^{-3} \text{ m}^3$)	Unit Weight of Sample (kg/m^3)	Specific Gravity of Sample	Percentage of Voids (%)
0	0.000	5.712	2.940	8.653	5.712	3.672	1555.67	2.53	38.36
0.30	1.922	4.844	2.940	9.706	6.765	3.672	1842.40	2.65	30.29
0.35	2.324	4.664	2.940	9.928	6.988	3.672	1903.11	2.64	27.76
0.40	2.707	4.386	2.940	10.033	7.093	3.672	1931.70	2.63	26.44
0.45	3.067	4.050	2.940	10.057	7.117	3.672	1938.12	2.62	25.96
0.50	3.443	3.720	2.940	10.103	7.162	3.672	1950.55	2.62	25.24
0.55	3.682	3.254	2.940	9.876	6.936	3.672	1888.81	2.61	27.37
0.60	3.991	2.874	2.940	9.806	6.866	3.672	1869.75	2.60	27.87

ตารางที่ ก.4 (ต่อ)
 ปริมาณช่องว่าง และหน่วยน้ำหนักมวลรวมที่ อัตราส่วนระหว่างปริมาตร
 มวลรวมละเอียดต่อมวลรวม ต่างกัน

s/a ratio	Weight of Sand (kg)	Weight of Rock (kg)	Weight of Cylinder (kg)	Weight of Cylinder & Sample (kg)	Weight of Sample (kg)	Volume of Cylinder ($\times 10^{-3} \text{ m}^3$)	Unit Weight of Sample (kg/m^3)	Specific Gravity of Sample	Percentage of Voids (%)
0.65	4.236	2.464	2.940	9.641	6.701	3.672	1824.79	2.59	29.37
0.70	4.553	2.108	2.940	9.601	6.660	3.672	1813.81	2.58	29.56
1.00	5.715	0.000	2.940	8.656	5.715	3.672	1556.50	2.70	42.21



ภาพที่ ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างปริมาตรมวลรวมละเอียดต่อมวลรวม (s/a)
 และร้อยละของปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวม

ก.2 การกระจายของขนาดอนุภาคตะกอนสilt

ตารางที่ ก.5

การกระจายของขนาดอนุภาคตะกอนสilt

ขนาด-ต่ำ (μm)	ร้อยละ	ขนาด-สูง (μm)	ร้อยละสะสม
0.05	0.03	0.06	0.03
0.06	0.06	0.07	0.08
0.07	0.09	0.08	0.17
0.08	0.12	0.09	0.29
0.09	0.16	0.11	0.46
0.11	0.21	0.13	0.67
0.13	0.27	0.15	0.94
0.15	0.36	0.17	1.30
0.17	0.46	0.20	1.76
0.20	0.58	0.23	2.34
0.23	0.70	0.27	3.05
0.27	0.77	0.31	3.81
0.31	0.75	0.36	4.56
0.36	0.69	0.42	5.25
0.42	0.63	0.49	5.88
0.49	0.58	0.58	6.46
0.58	0.52	0.67	6.98
0.67	0.48	0.78	7.46
0.78	0.47	0.91	7.93
0.91	0.47	1.06	8.39
1.06	0.48	1.24	8.87
1.24	0.51	1.44	9.38
1.44	0.55	1.68	9.93

ตารางที่ ก.5 (ต่อ)
การกระจายของขนาดอนุภาคตะกอนสลัดจ์

ขนาด-ต่ำ (μm)	ร้อยละกว้าง	ขนาด-สูง (μm)	ร้อยละกว้างสะสม
1.68	0.60	1.95	10.53
1.95	0.69	2.28	11.22
2.28	0.80	2.65	12.03
2.65	0.97	3.09	12.99
3.09	1.18	3.60	14.17
3.60	1.45	4.19	15.62
4.19	1.78	4.88	17.41
4.88	2.17	5.69	19.57
5.69	2.59	6.63	22.17
6.63	3.05	7.72	25.22
7.72	3.53	9.00	28.75
9.00	4.02	10.48	32.77
10.48	4.50	12.21	37.27
12.21	4.94	14.22	42.21
14.22	5.33	16.57	47.54
16.57	5.62	19.31	53.16
19.31	5.79	22.49	58.95
22.49	5.81	26.20	64.77
26.20	5.72	30.53	70.49
30.53	5.54	35.56	76.03
35.56	4.99	41.43	81.02
41.43	4.29	48.27	85.31
48.27	3.51	56.23	88.83
56.23	2.73	65.51	91.55
65.51	2.01	76.32	93.56

ตารางที่ ก.5 (ต่อ)
การกระจายของขนาดอนุภาคตะกอนสัณฐาน

ขนาด-ต่ำ (μm)	ร้อยละข้าง	ขนาด-สูง (μm)	ร้อยละข้างสะสม
76.32	1.43	88.91	94.99
88.91	1.01	103.58	96.00
103.58	0.77	120.67	96.77
120.67	0.65	140.58	97.42
140.58	0.63	163.77	98.05
163.77	0.62	190.80	98.68
190.80	0.58	222.28	99.25
222.28	0.45	258.95	99.70
258.95	0.25	301.68	99.95
301.68	0.05	351.46	100.00
351.46	0.00	409.45	100.00

ก.3 การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตผสมน้ำสลัดจ์

ตัวอย่างการคำนวณส่วนผสมของคอนกรีตใช้ข้อกำหนด ดังต่อไปนี้

เลือกส่วนผสมของคอนกรีตที่มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างต่ำสุดระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นและอยู่ในสถานะแห้ง (γ) เท่ากับ 1.2
- อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5
- ปริมาณการแทนที่น้ำสลัดจ์ในน้ำประปาที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

วิธีการออกแบบ

- ปริมาตรซีเมนต์เพสต์หาได้จากการเลือกค่า γ เท่ากับ 1.2

$$\begin{aligned}
 \text{จาก} \quad V_p &= \gamma \times V_v \\
 V_p &= 1.2 \times 245.6 \\
 V_p &= 294.7 \times 10^{-3} \quad \text{ม.}^3 \quad (ก.1)
 \end{aligned}$$

- เลือกอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 โดยน้ำหนัก และกำหนดให้ค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์เท่ากับ 3.11 ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 W_w/W_c &= 0.5 \\
 1.0 \times V_w / (3.11 \times V_c) &= 0.5 \\
 V_w &= 0.5 \times (3.11 \times V_c) \quad (ก.2)
 \end{aligned}$$

- แทนค่าในสมการที่ (ก.1) และ (ก.2) เพื่อหาน้ำหนักของสารต่างๆ ในซีเมนต์เพสต์ โดยกำหนดค่าปริมาตรอากาศ (Air Content) ที่ร้อยละ 1

$$\begin{aligned}
 V_p &= V_c + V_w + V_{\text{air}} \\
 294.7 &= V_c + 0.5 \times (3.11 \times V_c) + 10 \\
 \text{ดังนั้น} \quad V_c &= 111.4 \times 10^{-3} \quad \text{ม.}^3 \\
 V_w &= 173.3 \times 10^{-3} \quad \text{ม.}^3
 \end{aligned}$$

4. หาน้ำหนักของปูนซีเมนต์และน้ำ

$$\begin{aligned}
 W_c &= 111.4 \times 3.11 \\
 &= 346.6 && \text{กก.} \\
 W_w &= 173.3 \\
 &= 173.3 && \text{กก.}
 \end{aligned}$$

5. คำนวณหาน้ำหนักของมวลรวม

$$\text{ปริมาตรทั้งหมด} = 1000 \times 10^{-3} \quad \text{ม.}^3$$

$$\text{ปริมาตรของซีเมนต์เฟสค์} = 294.7 \times 10^{-3} \quad \text{ม.}^3$$

$$\text{ปริมาตรของมวลรวมทั้งหมด} = (1000 - 294.7) \times 10^{-3} \quad \text{ม.}^3$$

$$= 705.3 \times 10^{-3} \quad \text{ม.}^3$$

$$s/a = 0.50 \quad (\text{โดยปริมาตร})$$

$$V_s / (V_s + V_g) = 0.50$$

$$V_s = 1.0 \times V_g \quad (\text{ก.3})$$

$$V_s + V_g = 352.6 \times 10^{-3} \quad \text{ม.}^3 \quad (\text{ก.4})$$

แก้สมการที่ (ก.3) และ (ก.4) ได้

$$V_s = 352.6 \times 10^{-3} \quad \text{ม.}^3$$

$$V_g = 352.6 \times 10^{-3} \quad \text{ม.}^3$$

จะได้

$$W_s = 352.6 \times 2.54$$

$$= 895.7 \quad \text{กก.}$$

$$W_g = 352.6 \times 2.71$$

$$= 955.6 \quad \text{กก.}$$

6. ทำการแทนที่น้ำประปาด้วยน้ำสลัดจ์ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จะได้

$$W_{\text{sludge}} = 0.1 \times 173.3$$

$$= 17.3 \quad \text{กก.}$$

7. สรุปน้ำหนักของวัสดุที่ต้องใช้ในการผสมคอนกรีต 1 ลบ.ม. โดยมีค่า w/c เท่ากับ 0.5 และ γ เท่ากับ 1.2 ดังนี้

น้ำหนักปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	347	กก.
น้ำหนักน้ำประปา	156	กก.
น้ำหนักน้ำสลัดจ์	17	กก.
น้ำหนักหิน	956	กก.
น้ำหนักทราย	896	กก.

ตารางที่ ก.6

ส่วนผสมคอนกรีตต่อหนึ่งหน่วยลูกบาศก์เมตร

ประเภท คอนกรีต	γ	w/c	ปริมาณปูน ซีเมนต์ (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณมวล รวมละเอียด (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณมวล รวมหยาบ (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณน้ำ (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณ น้ำสลัดจ์ (กก./ลบ.ม.)
OPC	1.2	0.5	347	896	956	173	0
	1.2	0.6	309	896	956	185	0
	1.2	0.7	279	896	956	195	0
OPC	1.4	0.5	406	833	889	203	0
	1.4	0.6	362	833	889	217	0
	1.4	0.7	327	833	889	229	0
OPC	1.6	0.5	466	771	823	233	0
	1.6	0.6	416	771	823	249	0
	1.6	0.7	375	771	823	262	0
SW10	1.2	0.5	347	896	956	156	17
	1.2	0.6	309	896	956	167	18
	1.2	0.7	279	896	956	176	19
SW10	1.4	0.5	406	833	889	183	20
	1.4	0.6	362	833	889	195	22
	1.4	0.7	327	833	889	206	23

ตารางที่ ก.6 (ต่อ)
ส่วนผสมคอนกรีตต่อหนึ่งหน่วยลูกบาศก์เมตร

ประเภท คอนกรีต	γ	w/c	ปริมาณปูน ซีเมนต์ (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณมวล รวมละเอียด (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณ มวลรวม หยาบ (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณน้ำ (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณ น้ำสลัดจ์ (กก./ลบ.ม.)
SW10	1.6	0.5	466	771	823	210	23
	1.6	0.6	416	771	823	224	25
	1.6	0.7	375	771	823	236	26
SW20	1.2	0.5	347	896	956	138	35
	1.2	0.6	309	896	956	148	37
	1.2	0.7	279	896	956	156	39
SW20	1.4	0.5	406	833	889	162	41
	1.4	0.6	362	833	889	174	43
	1.4	0.7	327	833	889	183	46
SW20	1.6	0.5	466	771	823	186	47
	1.6	0.6	416	771	823	199	50
	1.6	0.7	375	771	823	210	52
SW30	1.2	0.5	347	896	956	121	52
	1.2	0.6	309	896	956	130	55
	1.2	0.7	279	896	956	137	58
SW30	1.4	0.5	406	833	889	142	61
	1.4	0.6	362	833	889	152	65
	1.4	0.7	327	833	889	160	69
SW30	1.6	0.5	466	771	823	163	70
	1.6	0.6	416	771	823	174	75
	1.6	0.7	375	771	823	183	79

ก.4 การคำนวณค่าความเป็นกรดต่างของน้ำผสมระหว่างน้ำประปาและน้ำสลัดจ์

ตัวอย่างการคำนวณค่าความเป็นกรดต่างของน้ำประปาและน้ำสลัดจ์ใช้ข้อกำหนดดังต่อไปนี้

1. ข้อมูลสำหรับการคำนวณ

- 1) อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าคงที่ในการแตกตัวของน้ำ (K_w) เท่ากับ 1.0×10^{-14}
- 2) ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำประปาเท่ากับ 7.40 และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.00
- 3) ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำสลัดจ์เท่ากับ 12.2 และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.03

2. วิธีการคำนวณ ในการคำนวณหาค่าความเป็นกรดต่างของน้ำประปาและน้ำสลัดจ์นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (ก.5) และ (ก.6)

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+] \quad (\text{ก.5})$$

$$\text{pOH} = -\log[\text{OH}^-] \quad (\text{ก.6})$$

โดยที่ $[\text{H}^+]$ คือ ความเข้มข้นของไฮโดรเจน $[\text{H}^+]$ หรือไฮโดรเนียมไอออน $[\text{H}_3\text{O}^+]$

$[\text{OH}^-]$ คือ ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน $[\text{OH}^-]$

2.1) จากค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของน้ำประปาเท่ากับ 7.4 นั้นสามารถคำนวณหาความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออน $[\text{H}_3\text{O}^+]$ ได้ดังนี้

$$\text{จาก} \quad \text{pH} = -\log[\text{H}_3\text{O}^+]$$

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-7.4}$$

$$\text{ดังนั้น } [\text{H}_3\text{O}^+] \text{ ของน้ำประปา} = 3.98 \times 10^{-8} \quad \text{โมลต่อลิตร}$$

และสามารถคำนวณหาความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน $[\text{OH}^-]$ ได้ดังนี้

$$[\text{OH}^-] = \frac{1.0 \times 10^{-14}}{3.98 \times 10^{-8}}$$

$$\text{ดังนั้น } [\text{OH}^-] \text{ ของน้ำประปา} = 2.51 \times 10^{-7} \quad \text{โมลต่อลิตร}$$

2.2) จากค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของน้ำสลัดจ์เท่ากับ 12.2 นั้นสามารถคำนวณหาค่าความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออน $[H_3O^+]$ ได้ดังนี้

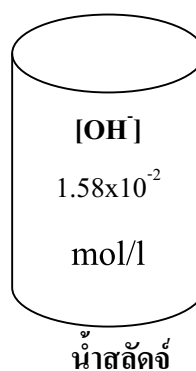
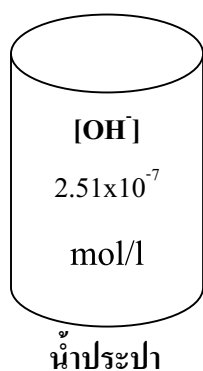
$$\begin{aligned} \text{จาก } pH &= -\log[H_3O^+] \\ [H_3O^+] &= 10^{-12.2} \\ \text{ดังนั้น } [H_3O^+] \text{ ของน้ำสลัดจ์} &= 6.31 \times 10^{-13} \quad \text{โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

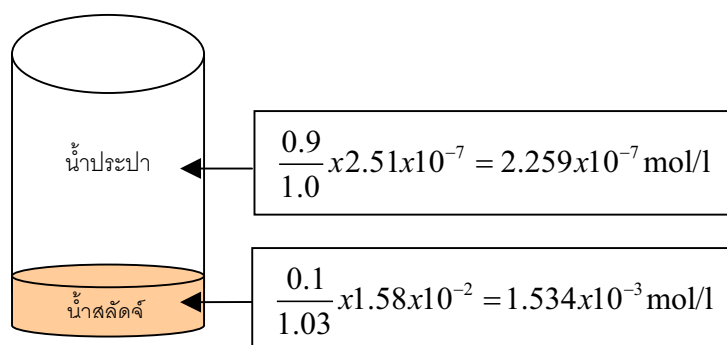
และสามารถคำนวณหาค่าความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน $[OH^-]$ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} [OH^-] &= \frac{1.0 \times 10^{-14}}{6.31 \times 10^{-13}} \\ \text{ดังนั้น } [OH^-] \text{ ของน้ำสลัดจ์} &= 1.58 \times 10^{-2} \quad \text{โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

3. ตัวอย่างการคำนวณค่าความเป็นกรดต่างของน้ำผสมระหว่างน้ำประปาและน้ำสลัดจ์ซึ่งทำการแทนที่น้ำประปาคับด้วยน้ำสลัดจ์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

$$\begin{aligned} \text{โดยค่า } [OH^-] \text{ ของน้ำประปา} &= 2.51 \times 10^{-7} \quad \text{โมลต่อลิตร} \\ \text{และค่า } [OH^-] \text{ ของน้ำสลัดจ์} &= 1.58 \times 10^{-2} \quad \text{โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$





$$\text{pOH} = -\log[2.259 \times 10^{-7} + 1.534 \times 10^{-3}]$$

$$\text{pOH} = 2.8$$

และ $\text{pH} = 14 - 2.8$

ดังนั้น $\text{pH} = 11.2$

ตารางที่ ก.7

ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของการแทนที่น้ำประปาด้วยน้ำสลัดจ์ที่ได้จากการคำนวณ

ร้อยละการแทนที่ของน้ำสลัดจ์	ค่าความเป็นกรดต่าง (pH)
0	7.4
10	11.2
20	11.5
30	11.7
100	12.2

ผนวก ข คุณสมบัติของคอนกรีตสด

ข.1 หน่วยน้ำหนักในสภาพสดของคอนกรีต

ตารางที่ ข.1

หน่วยน้ำหนักในสภาพสดของคอนกรีต

หน่วยน้ำหนัก (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)					
w/c	γ	ปกติ	น้ำสัจ ร้อยละ 10	น้ำสัจ ร้อยละ 20	น้ำสัจ ร้อยละ 30
0.5	1.2	2390	2390	2393	2396
	1.4	2385	2388	2389	2392
	1.6	2370	2372	2373	2373
0.6	1.2	2380	2384	2385	2388
	1.4	2377	2376	2380	2384
	1.6	2325	2330	2332	2336
0.7	1.2	2379	2382	2383	2385
	1.4	2367	2371	2372	2376
	1.6	2297	2304	2306	2309

ข.2 ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัว

ตารางที่ ข.2

ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัว (เซนติเมตร)

OPC	0.5			0.6			0.7		
	1.2	1.4	1.6	1.2	1.4	1.6	1.2	1.4	1.6
เวลา	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว
0	2	13.5	22.5	3.7	22.0	24.5	7.5	23.5	24.8
15	1.8	13.4	22.3	3.4	21.1	24.0	7.3	22.0	24.5
30	0.8	13.3	22.0	3.0	17.3	23.0	6.0	14.9	23.8
45	0.4	10.2	18.4	2.4	15.4	18.7	5.3	13.8	22.0
60	0.0	6.6	12.8	1.0	14.1	16.3	4.0	12.0	20.4
75	0.0	5.5	9.7	0.7	11.6	10.2	3.6	10.1	16.0
90	0.0	4.2	9.3	0.0	7.9	9.5	3	8.8	13.0
105	0.0	3.3	9.0	0.0	5.5	9.1	2	7.6	12.7
120	0.0	3.1	8.3	0.0	4.7	8.5	0	5.7	11.8
SW10	0.5			0.6			0.7		
	1.2	1.4	1.6	1.2	1.4	1.6	1.2	1.4	1.6
เวลา	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว
0	1.9	11.2	22.3	3.5	21.0	24.0	7.2	22.5	24.2
15	1.4	10.9	22.1	3.2	20.9	23.9	7.0	21.8	24.1
30	0.0	9.8	18.0	2.8	17.2	19.8	5.7	14.6	22.4
45	0.0	6.2	16.2	2.3	12.2	18.0	5.0	13.0	21.7
60	0.0	5.2	12.0	0.9	11.0	15.0	3.4	12.0	18.6
75	0.0	4.2	9.5	0.6	8.7	9.8	3.2	10.0	14.2
90	0.0	3.9	7.7	0	7.0	9.2	2.3	7.3	12.6
105	0.0	3	7.0	0	5.4	7.7	0	6.8	12.2
120	0.0	0	5.8	0	4.5	6.3	0	5.5	9

ข.2 ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัว

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัว (เซนติเมตร)

SW20	0.5			0.6			0.7		
	1.2	1.4	1.6	1.2	1.4	1.6	1.2	1.4	1.6
เวลา	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว
0	1.5	10	21.8	3.4	20.5	23.8	7.0	22.0	24.0
15	1.2	9.9	21.6	3.1	20.3	23.6	6.6	21.3	23.8
30	0.0	7.5	15.4	2.7	17.0	19.7	5.6	14.5	21.0
45	0.0	6.1	12.9	2.0	12.1	17.9	4.6	12.8	20.6
60	0.0	4.6	11.8	0.7	11.0	12.6	3.1	10.8	14.8
75	0.0	4.1	8.9	0	7.0	9.6	3.0	9.9	13.0
90	0.0	3.8	7.6	0	6.9	9.1	1.4	7.0	12.5
105	0.0	0	6.9	0	5.0	7	0	6.7	12.0
120	0.0	0	5.7	0	4.4	6	0	5.4	8.5
SW30	0.5			0.6			0.7		
	1.2	1.4	1.6	1.2	1.4	1.6	1.2	1.4	1.6
เวลา	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว	ค่าการยุบตัว
0	1.4	9.9	21.0	3.3	20.3	23.7	6.8	21.5	23.7
15	1	9.8	19.0	3	20.0	23.5	6.5	21.1	23.6
30	0.0	7	15.0	2.5	16.9	19.0	5.4	14.3	19.8
45	0.0	5	12.6	1.2	11.7	17.8	4.2	12.1	20.0
60	0.0	4.4	10.2	0	10.9	12.3	2.3	12.0	14.0
75	0.0	3.3	8.8	0	6.6	9.7	2.2	9.7	12.8
90	0.0	3.2	6	0	6.6	9.1	1.3	8.6	12.4
105	0.0	0	5	0	4.9	6.9	0	6.6	11.9
120	0.0	0	4	0	4.2	5.8	0	5.2	8.3

ข.3 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

ตารางที่ ข.3
ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

แรงต้านทานต่อพื้นที่ของคอนกรีต (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)						
คอนกรีต	อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.5					
	$\gamma = 1.2$		$\gamma = 1.4$		$\gamma = 1.6$	
	500	4000	500	4000	500	4000
ปกติ	180	264	207.5	274.5	241	321.5
น้ำสลัดจ์ SW10	171	251	207.5	271	229	315
น้ำสลัดจ์ SW20	157.5	249	186	266	214	284
น้ำสลัดจ์ SW30	155	225	185	265	187.5	283.5
คอนกรีต	อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.6					
	$\gamma = 1.2$		$\gamma = 1.4$		$\gamma = 1.6$	
	500	4000	500	4000	500	4000
ปกติ	199.5	288	251	345	292.5	406
น้ำสลัดจ์ SW10	190	274	245	336	288	395
น้ำสลัดจ์ SW20	188	266	237	335	262.5	392.5
น้ำสลัดจ์ SW30	177.5	253	230	305	262.5	380

หมายเหตุ : ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) คือ ระยะเวลาที่แรงต้านทานต่อพื้นที่เท่ากับ 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และ 4000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ

ตารางที่ ข.3 (ต่อ)
ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

คอนกรีต	อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.7					
	$\gamma = 1.2$		$\gamma = 1.4$		$\gamma = 1.6$	
	500	4000	500	4000	500	4000
ปกติ	257.5	356	285	389	316	431
น้ำสลัดจ์ SW10	231.5	347	277.5	379	308	428
น้ำสลัดจ์ SW20	229	307.5	275	367.5	304	426
น้ำสลัดจ์ SW30	215	293.5	255	357	295	415

หมายเหตุ : ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) คือ ระยะเวลาที่แรงต้านทานต่อพื้นที่เท่ากับ 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และ 4000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ

ข.4 อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ตารางที่ ข.4

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

สำหรับ γ เท่ากับ 1.2 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.5

$\gamma = 1.2, w/c = 0.5$						$\gamma = 1.2, w/c = 0.5$					
เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC
0	33.5	536	63.7	1076	60.6	1616	56.6	2156	51.7	2696	47.3
30	34.2	566	63.7	1106	60.4	1646	56.2	2186	51.4	2726	47.2
60	35.7	596	63.7	1136	60.1	1676	56.0	2216	51.1	2756	46.9
90	39.0	626	63.6	1166	59.9	1706	55.8	2246	50.9	2786	46.8
120	41.4	656	63.5	1196	59.6	1736	55.5	2276	50.7	2816	46.6
150	47.2	686	63.4	1226	59.4	1766	55.3	2306	50.4	2846	46.5
180	50.6	716	63.2	1256	59.1	1796	54.9	2336	50.1	2876	46.4
210	54.5	746	63.1	1286	58.8	1826	54.6	2366	49.9	2906	46.2
236	55.0	776	62.9	1316	58.6	1856	54.4	2396	49.6	2936	46.1
266	56.7	806	62.7	1346	58.3	1886	54.0	2426	49.4	2966	45.9
296	58.4	836	62.5	1376	58.1	1916	53.8	2456	49.1	2996	45.8
326	59.8	866	62.3	1406	57.9	1946	53.5	2486	48.8	3026	45.7
356	61.0	896	62.0	1436	57.7	1976	53.3	2516	48.6	3056	45.4
386	61.8	926	61.8	1466	57.4	2006	53.0	2546	48.5	3086	45.3
416	62.5	956	61.6	1496	57.2	2036	52.7	2576	48.2	3116	45.1
446	63.0	986	61.3	1526	57.0	2066	52.5	2606	48	3146	45
476	63.3	1016	61.1	1556	56.6	2096	52.2	2636	47.7	3176	44.8
506	63.5	1046	60.9	1586	56.9	2126	51.9	2666	47.5	3206	44.8

ข.4 อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ตารางที่ ข.4 (ต่อ)

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

สำหรับ γ เท่ากับ 1.2 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.5

$\gamma = 1.2, w/c = 0.5$						$\gamma = 1.2, w/c = 0.5$					
เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC
3236	44.5	3776	42.1	4316	40.1	4856	38.9	5396	37.6	5936	36.9
3266	44.4	3806	41.9	4346	40.1	4886	38.9	5426	37.5	5966	36.9
3296	44.3	3836	41.8	4376	40	4916	38.8	5456	37.4	5996	36.9
3326	44.1	3866	41.6	4406	39.9	4946	38.7	5486	37.4	6026	36.8
3356	44	3896	41.5	4436	39.9	4976	38.6	5516	37.3	6056	36.8
3386	43.8	3926	41.5	4466	39.8	5006	38.5	5546	37.2	6086	36.8
3416	43.7	3956	41.3	4496	39.7	5036	38.5	5576	37.2	6116	36.7
3446	43.5	3986	41.2	4526	39.7	5066	38.4	5606	37.1	6146	36.7
3476	43.4	4016	41	4556	39.6	5096	38.3	5636	37.1	6176	36.7
3506	43.3	4046	40.9	4586	39.5	5126	38.2	5666	37.1	6206	36.6
3536	43.1	4076	40.8	4616	39.4	5156	38.1	5696	37	6236	36.6
3566	43	4106	40.7	4646	39.4	5186	38.1	5726	37	6266	36.5
3596	42.8	4136	40.6	4676	39.3	5216	38	5756	37	6296	36.5
3626	42.8	4166	40.5	4706	39.3	5246	37.9	5786	37	6326	36.4
3656	42.6	4196	40.4	4736	39.2	5276	37.9	5816	37	6356	36.4
3686	42.4	4226	40.3	4766	39.1	5306	37.8	5846	37	6386	36.4
3716	42.3	4256	40.3	4796	39.1	5336	37.7	5876	37	6416	36.3
3746	42.2	4286	40.2	4826	39	5366	37.6	5906	36.9	6446	36.2

ข.4 อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ตารางที่ ข.4 (ต่อ)

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

สำหรับ γ เท่ากับ 1.2 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.5

$\gamma = 1.2, w/c = 0.5$						$\gamma = 1.2, w/c = 0.5$					
เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%
6476	36.2	7016	35.2	0	33.8	541	64.2	1081	60.8	1621	56.2
6506	36.1	7046	35.1	30	34.0	571	64.2	1111	60.6	1651	55.9
6536	36.1	7076	35.1	60	34.9	601	64.4	1141	60.3	1681	55.7
6566	36	7106	35.0	90	36.8	631	64.3	1171	59.9	1711	55.4
6596	35.9	7136	35.0	120	39.4	661	64.0	1201	59.6	1741	55.1
6626	35.9	7166	34.9	150	42.7	691	64.0	1231	59.3	1771	54.9
6656	35.8	7196	34.9	181	48.0	721	63.9	1261	59.1	1801	54.6
6686	35.8	7200	34.8	211	51.7	751	63.6	1291	58.9	1831	54.3
6716	35.7			241	54.2	781	63.4	1321	58.6	1861	54.0
6746	35.6			271	56.4	811	63.2	1351	58.3	1891	53.8
6776	35.6			301	58.2	841	63.0	1381	58.1	1921	53.5
6806	35.5			331	59.8	871	62.6	1411	57.8	1951	53.2
6836	35.5			361	61.1	901	62.5	1441	57.6	1981	53.0
6866	35.4			391	62.1	931	62.0	1471	57.3	2011	52.7
6896	35.4			421	62.8	961	61.9	1501	57.1	2041	52.4
6926	35.3			451	63.5	991	61.6	1531	57.0	2071	52.1
6956	35.3			481	63.6	1021	61.3	1561	56.7	2101	51.9
6986	35.2			511	64.3	1051	61.1	1591	56.5	2131	51.6

ข.4 อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ตารางที่ ข.4 (ต่อ)

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

สำหรับ γ เท่ากับ 1.2 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.5

$\gamma = 1.2, w/c = 0.5$						$\gamma = 1.2, w/c = 0.5$					
เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%
2161	51.3	2701	46.8	3241	44.2	3781	41.8	4321	40.0	4861	38.8
2191	51.1	2731	46.6	3271	44.0	3811	41.7	4351	39.9	4891	38.7
2221	50.8	2761	46.5	3301	43.9	3841	41.5	4381	39.8	4921	38.6
2251	50.5	2791	46.3	3331	43.8	3871	41.4	4411	39.8	4951	38.6
2281	50.3	2821	46.1	3361	43.6	3901	41.3	4441	39.7	4981	38.5
2311	50.0	2851	46.0	3391	43.5	3931	41.1	4471	39.6	5011	38.4
2341	49.8	2881	45.9	3421	43.4	3961	41.0	4501	39.5	5041	38.4
2371	49.5	2911	45.7	3451	43.2	3991	40.9	4531	39.5	5071	38.3
2401	49.3	2941	45.6	3481	43.1	4021	40.8	4561	39.4	5101	38.2
2431	49.0	2971	45.4	3511	43.0	4051	40.6	4591	39.4	5131	38.1
2461	48.8	3001	45.3	3541	42.8	4081	40.5	4621	39.3	5161	38.1
2491	48.5	3031	45.1	3571	42.7	4111	40.4	4651	39.3	5191	38.0
2521	48.3	3061	45.0	3601	42.6	4141	40.3	4681	39.2	5221	37.9
2551	48.0	3091	44.9	3631	42.4	4171	40.2	4711	39.1	5251	37.9
2581	47.8	3121	44.7	3661	42.3	4201	40.2	4741	39.1	5281	37.8
2611	47.5	3151	44.6	3691	42.1	4231	40.2	4771	39.0	5311	37.7
2641	47.3	3181	44.4	3721	42.0	4261	40.1	4801	38.9	5341	37.7
2671	47.0	3211	44.3	3751	41.9	4291	40.0	4831	38.9	5371	37.6

ข.4 อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ตารางที่ ข.4 (ต่อ)
อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน
สำหรับ γ เท่ากับ 1.2 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.5

$\gamma = 1.2, w/c = 0.5$						$\gamma = 1.2, w/c = 0.5$					
เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%
5401	37.5	5941	36.9	6481	36.1	7021	35.1	0	34.1	541	64.4
5431	37.5	5971	36.9	6511	36.1	7051	35.1	30	38.6	571	64.5
5461	37.4	6001	36.9	6541	36.0	7081	35.0	60	35.2	601	64.4
5491	37.3	6031	36.8	6571	35.9	7111	35.0	90	36.9	631	64.5
5521	37.2	6061	36.9	6601	35.9	7141	34.9	121	39.8	661	64.4
5551	37.2	6091	36.8	6631	35.8	7171	34.9	151	42.4	691	64.2
5581	37.1	6121	36.8	6661	35.8	7200	34.8	181	47.1	721	64.0
5611	37.1	6151	36.7	6691	35.7			211	52.0	751	63.9
5641	37.0	6181	36.7	6721	35.6			241	54.2	781	63.7
5671	37.0	6211	36.6	6751	35.6			271	56.3	811	63.4
5701	37.0	6241	36.6	6781	35.5			301	58.1	841	63.2
5731	37.0	6271	36.6	6811	35.5			331	59.1	871	62.8
5761	37.0	6301	36.5	6841	35.4			361	61.0	901	62.7
5791	37.0	6331	36.5	6871	35.4			391	62.1	931	62.4
5821	37.0	6361	36.4	6901	35.3			421	62.9	961	62.1
5851	37.0	6391	36.3	6931	35.3			451	63.6	991	62.0
5881	36.9	6421	36.3	6961	35.2			481	63.9	1021	61.6
5911	36.9	6451	36.2	6991	35.2			511	64.2	1051	61.4

ข.4 อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ตารางที่ ข.4 (ต่อ)
อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน
สำหรับ γ เท่ากับ 1.2 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.5

$\gamma = 1.2, w/c = 0.5$						$\gamma = 1.2, w/c = 0.5$					
เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%
1081	61.1	1621	56.4	2161	51.6	2701	47.2	3241	44.6	3781	42.2
1111	60.7	1651	56.1	2191	51.3	2731	47.0	3271	44.4	3811	42.0
1141	60.4	1681	55.9	2221	51.0	2761	46.8	3301	44.3	3841	41.8
1171	60.1	1711	55.8	2251	50.7	2791	46.6	3331	44.2	3871	41.7
1201	59.9	1741	55.4	2281	50.5	2821	46.5	3361	44.0	3901	41.6
1231	59.8	1771	55.0	2311	50.2	2851	46.4	3391	43.9	3931	41.5
1261	59.4	1801	54.7	2341	50.1	2881	46.2	3421	43.7	3961	41.3
1291	59.1	1831	54.7	2371	49.7	2911	46.1	3451	43.7	3991	41.2
1321	58.8	1861	54.3	2401	49.5	2941	45.9	3481	43.6	4021	41.0
1351	58.6	1891	54.0	2431	49.2	2971	45.8	3511	43.3	4051	40.9
1381	58.4	1921	53.7	2461	49.0	3001	45.7	3541	43.2	4081	40.9
1411	58.0	1951	53.4	2491	48.7	3031	45.5	3571	43.1	4111	40.7
1441	57.8	1981	53.0	2521	48.4	3061	45.4	3601	42.9	4141	40.7
1471	57.6	2011	52.9	2551	48.2	3091	45.3	3631	42.8	4171	40.6
1501	57.3	2041	52.7	2581	48.0	3121	45.2	3661	42.7	4201	40.6
1531	57.1	2071	52.4	2611	47.7	3151	45.0	3691	42.5	4231	40.5
1561	56.6	2101	52.1	2641	47.5	3181	44.9	3721	42.4	4261	40.5
1591	56.6	2131	51.8	2671	47.6	3211	44.7	3751	42.3	4291	40.4

ข.4 อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ตารางที่ ข.4 (ต่อ)
อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน
สำหรับ γ เท่ากับ 1.2 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.5

$\gamma = 1.2, w/c = 0.5$						$\gamma = 1.2, w/c = 0.5$					
เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%
4321	40.3	4861	39.2	5401	37.9	5941	37.3	6481	36.6	7021	35.4
4351	40.3	4891	39.2	5431	37.8	5971	37.3	6511	36.5	7051	35.4
4381	40.2	4921	39.1	5461	37.7	6001	37.3	6541	36.4	7081	35.3
4411	40.2	4951	39.0	5491	37.6	6031	37.3	6571	36.3	7111	35.3
4441	40.2	4981	38.9	5521	37.5	6061	37.2	6601	36.3	7141	35.3
4471	40.1	5011	38.9	5551	37.5	6091	37.2	6631	36.2	7171	35.2
4501	40.0	5041	38.8	5581	37.5	6121	37.2	6661	36.2	7200	35.1
4531	40.0	5071	38.7	5611	37.5	6151	37.1	6691	36.1		
4561	39.9	5101	38.7	5641	37.4	6181	37.1	6721	36.1		
4591	39.9	5131	38.5	5671	37.5	6211	37.0	6751	36.0		
4621	39.8	5161	38.4	5701	37.4	6241	37.0	6781	35.9		
4651	39.8	5191	38.3	5731	37.5	6271	37.0	6811	35.9		
4681	39.7	5221	38.2	5761	37.7	6301	36.9	6841	35.8		
4711	39.6	5251	38.2	5791	37.4	6331	36.8	6871	35.7		
4741	39.5	5281	38.2	5821	37.3	6361	36.8	6901	35.7		
4771	39.5	5311	38.1	5851	37.3	6391	36.7	6931	35.6		
4801	39.4	5341	38.0	5881	37.4	6421	36.6	6961	35.5		
4831	39.3	5371	37.9	5911	37.3	6451	36.6	6991	35.5		

ข.4 อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ตารางที่ ข.4 (ต่อ)

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

สำหรับ γ เท่ากับ 1.2 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.5

$\gamma = 1.2, w/c = 0.5$						$\gamma = 1.2, w/c = 0.5$					
เวลา (นาทีก)	SW 30%	เวลา (นาทีก)	SW 30%	เวลา (นาทีก)	SW 30%	เวลา (นาทีก)	SW 30%	เวลา (นาทีก)	SW 30%	เวลา (นาทีก)	SW 30%
0	33.8	576	64.3	1116	60.7	1656	56.4	2196	51.4	2736	47.3
30	34.1	606	64.4	1146	60.6	1686	56.1	2226	51.2	2766	47.1
66	35.4	636	64.3	1176	60.4	1716	55.7	2256	51.0	2796	47.0
126	40.0	666	64.2	1206	60.1	1746	55.4	2286	50.8	2826	46.8
156	43.2	696	64.1	1236	59.8	1776	55.4	2316	50.4	2856	46.7
186	48.4	726	64.0	1266	59.6	1806	55.0	2346	50.2	2886	46.5
216	51.7	756	63.7	1296	59.4	1836	54.7	2376	49.9	2916	46.4
246	53.9	786	63.6	1326	59.1	1866	54.4	2406	49.7	2946	46.3
276	55.8	816	63.2	1356	58.8	1896	54.1	2436	49.4	2976	46.1
306	57.5	846	63.2	1386	58.6	1926	53.8	2466	49.1	3006	46.0
336	59.3	876	62.9	1416	58.3	1956	53.6	2496	48.9	3036	45.9
366	60.3	906	62.6	1446	58.0	1986	53.4	2526	48.7	3066	45.7
396	61.8	936	62.5	1476	57.8	2016	53.1	2556	48.4	3096	45.5
426	62.4	966	62.1	1506	57.6	2046	52.8	2586	48.2	3126	45.4
456	63.0	996	61.9	1536	57.3	2076	52.5	2616	48.0	3156	45.3
486	63.6	1026	61.7	1566	57.1	2106	52.3	2646	47.8	3186	45.1
516	64.0	1056	61.3	1596	56.8	2136	52.0	2676	47.6	3216	45.0
546	64.0	1086	61.0	1626	56.6	2166	51.7	2706	47.5	3246	44.9

ข.4 อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ตารางที่ ข.4 (ต่อ)

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

สำหรับ γ เท่ากับ 1.2 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.5

$\gamma = 1.2, w/c = 0.5$						$\gamma = 1.2, w/c = 0.5$					
เวลา (นาทีก)	SW 30%	เวลา (นาทีก)	SW 30%	เวลา (นาทีก)	SW 30%	เวลา (นาทีก)	SW 30%	เวลา (นาทีก)	SW 30%	เวลา (นาทีก)	SW 30%
3276	44.7	3816	42.1	4356	40.5	4896	39.2	5436	37.7	5976	37.3
3306	44.5	3846	41.9	4386	40.5	4926	39.2	5466	37.6	6006	37.3
3336	44.4	3876	41.8	4416	40.4	4956	39.1	5496	37.6	6036	37.3
3366	44.2	3906	41.6	4446	40.3	4986	39.0	5526	37.5	6066	37.2
3396	44.1	3936	41.5	4476	40.3	5016	38.9	5556	37.6	6096	37.2
3426	44.0	3966	41.3	4506	40.2	5046	38.8	5586	37.6	6126	37.2
3456	43.8	3996	41.2	4536	40.1	5076	38.7	5616	37.5	6156	37.1
3486	43.6	4026	41.1	4566	40.0	5106	38.6	5646	37.5	6186	37.0
3516	43.5	4056	41.0	4596	40.1	5136	38.5	5676	37.5	6216	37.0
3546	43.3	4086	41.0	4626	39.9	5166	38.4	5706	37.4	6246	36.9
3576	43.2	4116	40.9	4656	39.8	5196	38.4	5736	37.5	6276	36.9
3606	43.1	4146	40.8	4686	39.7	5226	38.3	5766	37.4	6306	36.8
3636	42.9	4176	40.8	4716	39.6	5256	38.2	5796	37.4	6336	36.8
3666	42.8	4206	40.7	4746	39.6	5286	38.2	5826	37.5	6366	36.7
3696	42.7	4236	40.7	4776	39.5	5316	38.0	5856	37.5	6396	36.6
3726	42.5	4266	40.6	4806	39.5	5346	38.0	5886	37.4	6426	36.6
3756	42.4	4296	40.6	4836	39.3	5376	37.9	5916	37.4	6456	36.5
3786	42.2	4326	40.6	4866	39.3	5406	37.8	5946	37.3	6486	36.4

ข.4 อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ตารางที่ ข.4 (ต่อ)

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน
สำหรับ γ เท่ากับ 1.2 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.5

$\gamma = 1.2, w/c = 0.5$			
เวลา (นาทีก)	SW 30%	เวลา (นาทีก)	SW 30%
6516	36.4	7056	35.4
6546	36.3	7086	35.3
6576	36.2	7116	35.3
6606	36.2	7146	35.2
6636	36.2	7176	35.2
6666	36.1	7200	35.1
6696	36.1		
6726	36.0		
6756	36.0		
6786	35.8		
6816	35.8		
6846	35.7		
6876	35.7		
6906	35.6		
6936	35.6		
6966	35.5		
6996	35.5		
7026	35.4		

ข.4 อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ตารางที่ ข.5

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

สำหรับ γ เท่ากับ 1.2 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.6

$\gamma = 1.2, w/c = 0.6$						$\gamma = 1.2, w/c = 0.6$					
เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC
0	31.8	548	59.8	1088	59	1643	54.2	2183	49.9	2723	45.8
30	32.2	578	60.2	1118	58.8	1673	54	2213	49.7	2753	45.7
60	32.9	608	60.4	1148	58.5	1703	53.8	2243	49.5	2783	45.4
90	34.1	638	60.6	1178	58.3	1733	53.5	2273	49.2	2813	45.2
120	35.8	668	60.8	1208	58	1763	53.3	2303	49	2843	45
150	37.9	698	60.8	1238	57.8	1793	53.1	2333	48.7	2873	44.9
188	41.2	728	60.8	1268	57.5	1823	52.8	2363	48.5	2903	44.7
218	45.1	758	60.8	1298	57.3	1853	52.5	2393	48.3	2933	44.5
248	48.2	788	60.8	1328	57	1883	52.3	2423	48.1	2963	44.1
278	50.1	818	60.7	1358	56.7	1913	52.1	2453	47.8	2993	44.1
308	51.8	848	60.6	1388	56.5	1943	51.8	2483	47.6	3023	44
338	53.3	878	60.4	1418	56.2	1973	51.6	2513	47.3	3053	43.8
368	54.7	908	60.2	1448	56	2003	51.4	2543	47.1	3083	43.7
398	55.8	938	60.1	1478	55.7	2033	51.1	2573	46.9	3113	43.4
428	56.9	968	59.9	1508	55.5	2063	50.9	2603	46.7	3143	43.3
458	57.9	998	59.7	1553	55	2093	50.6	2633	46.4	3173	43.1
488	58.6	1028	59.5	1583	54.8	2123	50.4	2663	46.2	3203	42.9
518	59.3	1058	59.2	1613	54.5	2153	50.2	2693	46	3233	42.7

ข.4 อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ตารางที่ ข.5 (ต่อ)

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

สำหรับ γ เท่ากับ 1.2 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.6

$\gamma = 1.2, w/c = 0.6$						$\gamma = 1.2, w/c = 0.6$					
เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC
3263	42.6	3788	40	4343	37.5	4883	36.4	5423	35.2	5963	34.5
3293	42.4	3818	39.8	4373	37.6	4913	36.3	5453	35.2	5993	34.5
3323	42.3	3848	39.6	4403	37.5	4943	36.3	5483	35.1	6023	34.5
3353	42.1	3893	39.5	4433	37.4	4973	36.2	5513	35	6053	34.5
3383	42	3923	39.3	4463	37.3	5003	36.2	5543	35	6083	34.5
3413	41.8	3953	39.2	4493	37.2	5033	36.1	5573	34.9	6113	34.5
3443	41.7	3983	39	4523	37.2	5063	36	5603	34.9	6143	34.5
3473	41.5	4013	38.9	4553	37.1	5093	36	5633	34.8	6173	34.4
3503	41.3	4043	38.7	4583	37.1	5123	35.9	5663	34.7	6203	34.4
3533	41.2	4073	38.7	4613	37	5153	35.8	5693	34.7	6233	34.4
3563	41	4103	38.5	4643	36.9	5183	35.8	5723	34.7	6263	34.4
3593	40.9	4133	38.4	4673	36.9	5213	35.7	5753	34.6	6293	34.4
3623	40.7	4163	38.3	4703	36.8	5243	35.6	5783	34.6	6323	34.4
3653	40.6	4193	38.1	4733	36.8	5273	35.6	5813	34.6	6353	34.3
3683	40.4	4223	38.1	4763	36.7	5303	35.5	5843	34.5	6383	34.3
3713	40.3	4253	38	4793	36.6	5333	35.4	5873	34.5	6413	34.3
3743	40.2	4283	37.8	4823	36.6	5363	35.4	5903	34.5	6443	34.2
3773	40	4313	37.7	4853	36.5	5393	35.3	5933	34.5	6473	34.2

ข.4 อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ตารางที่ ข.5 (ต่อ)
อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน
สำหรับ γ เท่ากับ 1.2 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.6

$\gamma = 1.2, w/c = 0.6$						$\gamma = 1.2, w/c = 0.6$					
เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%
6503	34.2	7043	33.5	0	32.9	543	59.9	1083	57.6	1638	53.1
6533	34.2	7073	33.5	30	33.2	573	60.3	1113	57.5	1668	58.8
6563	34.1	7103	33.5	60	34.1	603	60.1	1143	57.4	1698	53.3
6593	34.1	7133	33.4	90	35.6	633	60.4	1173	57.3	1728	52.5
6623	34	7163	33.4	120	38	663	60.2	1203	57.3	1758	51.8
6653	34	7193	33.4	153	40.9	693	60.8	1233	57.2	1788	52.8
6683	34	7200	33.4	183	45.2	723	59.1	1263	57.2	1818	51.3
6713	33.9			213	48.3	753	58.9	1293	57.1	1848	50.9
6743	33.9			243	50.1	783	58.6	1323	56.8	1878	52
6773	33.9			273	51.8	813	58.7	1353	56.4	1908	52.5
6803	33.8			303	53.3	843	58.6	1383	55.8	1938	53
6833	33.8			333	54.8	873	58.5	1413	55.6	1968	53.1
6863	33.7			363	55.8	903	58.3	1443	54.8	1998	53
6893	33.7			393	56.8	933	58.2	1473	54.5	2028	52.8
6923	33.6			423	57.8	963	58.1	1518	54.1	2058	52.7
6953	33.6			453	58.5	993	57.9	1548	54.6	2088	52.6
6983	33.6			483	59.2	1023	57.7	1578	53.6	2118	52.6
7013	33.5			513	59.5	1053	57.7	1608	53.4	2148	52.4

ข.4 อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ตารางที่ ข.5 (ต่อ)

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

สำหรับ γ เท่ากับ 1.2 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.6

$\gamma = 1.2, w/c = 0.6$						$\gamma = 1.2, w/c = 0.6$					
เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%
2178	52.3	2718	46.5	3258	42.1	3798	38.9	4338	36.5	4878	35.9
2208	52.3	2748	46.3	3288	41.8	3828	38.5	4368	37.1	4908	35.5
2238	52	2778	46.1	3318	41.7	3858	38.4	4398	36.4	4938	35.4
2268	52.1	2808	45.7	3348	41.3	3888	38.8	4428	36.8	4968	35.5
2298	52.1	2838	45.5	3378	41.4	3918	38.5	4458	36.4	4998	35.4
2328	49.7	2868	44.6	3408	41	3948	38.3	4488	36.9	5028	35.8
2358	49.6	2898	44.2	3438	41.1	3978	38.4	4518	36.2	5058	35.6
2388	49.5	2928	43.7	3468	40.5	4008	38.2	4548	36.1	5088	35.2
2418	49.2	2958	43.7	3498	40.7	4038	37.6	4578	36.7	5118	35.5
2448	48.8	2988	43.3	3528	40.1	4068	38	4608	36.6	5148	35.3
2478	48.5	3018	43.1	3558	40	4098	37.9	4638	36	5178	35.4
2508	48.1	3048	42.9	3588	39.5	4128	37.8	4668	36.4	5208	35.3
2538	47.8	3078	43.1	3618	40.2	4158	37.3	4698	35.9	5238	35.3
2568	47.6	3108	42.8	3648	39.9	4188	37.6	4728	35.8	5268	35.2
2598	47.6	3138	42.8	3678	39.8	4218	37.5	4758	35.8	5298	35.1
2628	47.4	3168	42.3	3708	39.6	4248	36.8	4788	36.1	5328	35
2658	47.1	3198	42.1	3738	39.3	4278	36.8	4818	35.7	5358	37.9
2688	46.7	3228	42.3	3768	39.4	4308	36.9	4848	35.8	5388	34.9

ข.4 อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ตารางที่ ข.5 (ต่อ)

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

สำหรับ γ เท่ากับ 1.2 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.6

$\gamma = 1.2, w/c = 0.6$						$\gamma = 1.2, w/c = 0.6$					
เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%
5418	34.8	5958	33.9	6498	34	7038	33.1	0	32.6	543	60.4
5448	34.5	5988	34.3	6528	33.7	7068	33.3	30	33	573	60.8
5478	34.7	6018	34	6558	33.7	7098	33.1	60	33.8	603	60.9
5508	34.5	6048	34.3	6588	33.7	7128	33.1	93	35.3	633	61
5538	34.3	6078	34.3	6618	33.8	7158	33.2	123	37.2	663	61
5568	34.5	6108	34.1	6648	33.8	7188	33.1	153	39.6	693	61
5598	34.2	6138	34.3	6678	33.8	7200	33	183	42.5	723	60.9
5628	34.4	6168	34.3	6708	33.7			213	46.9	753	60.8
5658	34.4	6198	34.3	6738	33.7			243	49.6	783	60.8
5688	34	6228	34	6768	33.6			273	51.5	813	60.6
5718	34	6258	34.2	6798	33.6			303	53.1	843	60.4
5748	34	6288	34.1	6828	33.6			333	54.6	873	60.3
5778	33.9	6318	34.2	6858	33.5			363	56	903	60
5808	34.2	6348	34	6888	33.4			393	57.1	933	59.8
5838	34.2	6378	33.9	6918	33.3			423	58.2	963	59.6
5868	34.1	6408	34	6948	33.3			453	58.9	993	59.4
5898	34.3	6438	33.8	6978	33.3			483	59.6	1023	59.2
5928	34.2	6468	33.8	7008	33.2			513	60.1	1053	58.9

ข.4 อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ตารางที่ ข.5 (ต่อ)

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

สำหรับ γ เท่ากับ 1.2 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.6

$\gamma = 1.2, w/c = 0.6$						$\gamma = 1.2, w/c = 0.6$					
เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%
1083	58.7	1638	54	2178	49.9	2718	45.7	3258	42.5	3798	39.9
1113	58.5	1668	53.8	2208	49.6	2748	45.5	3288	42.3	3828	39.7
1143	58.2	1698	53.6	2238	49.4	2778	45.3	3318	42.1	3858	39.5
1173	57.9	1728	53.3	2268	49.2	2808	45.2	3348	42	3888	39.4
1203	57.7	1758	53.1	2298	48.9	2838	45	3378	41.9	3918	39.3
1233	57.4	1788	52.9	2328	48.7	2868	44.8	3408	41.7	3948	39.1
1263	57.1	1818	52.6	2358	48.4	2898	44.6	3438	41.6	3978	39
1293	56.9	1848	52.4	2388	48.2	2928	44.4	3468	41.4	4008	38.9
1323	56.7	1878	52.2	2418	47.9	2958	44.2	3498	41.3	4038	38.7
1353	56.4	1908	51.9	2448	47.7	2988	44	3528	41.1	4068	38.6
1383	56.2	1938	51.7	2478	47.5	3018	43.9	3558	41	4098	38.5
1413	55.9	1968	51.5	2508	47.2	3048	43.7	3588	40.8	4128	38.4
1458	55.5	1998	51.2	2538	47	3078	43.5	3618	40.7	4158	38.3
1488	55.3	2028	51	2568	46.8	3108	43.3	3648	40.5	4188	38.2
1518	55	2058	50.8	2598	46.6	3138	43.2	3678	40.4	4218	38.1
1548	54.7	2088	50.5	2628	46.3	3168	43	3708	40.2	4248	38
1578	54.5	2118	50.3	2658	46.1	3198	45.8	3738	40.1	4278	37.9
1608	54.3	2148	50.1	2688	45.9	3228	42.6	3768	40	4308	37.8

ข.4 อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ตารางที่ ข.5 (ต่อ)

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

สำหรับ γ เท่ากับ 1.2 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.6

$\gamma = 1.2, w/c = 0.6$						$\gamma = 1.2, w/c = 0.6$					
เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%
4338	37.7	4878	36.6	5418	35.3	5958	34.8	6498	34.4	7038	33.7
4368	37.7	4908	36.5	5448	35.3	5988	34.8	6528	34.4	7068	33.7
4398	37.6	4938	36.4	5478	35.2	6018	34.8	6558	34.3	7098	33.7
4428	37.5	4968	36.3	5508	35.1	6048	34.8	6588	34.3	7128	33.7
4458	37.4	4998	36.3	5538	35.1	6078	34.8	6618	34.3	7158	33.7
4488	37.4	5028	36.2	5568	35	6108	34.8	6648	34.2	7173	33.5
4518	37.3	5058	36.1	5598	35	6138	34.7	6678	34.2	7200	33.7
4548	37.2	5088	36.1	5628	34.9	6168	34.7	6708	34.1		
4578	37.2	5118	36	5658	34.9	6198	34.7	6738	34.1		
4608	37.2	5148	35.9	5688	34.8	6228	34.7	6768	34		
4638	37.1	5178	35.9	5718	34.8	6258	34.6	6798	34		
4668	37	5208	35.8	5748	34.8	6288	34.6	6828	33.9		
4698	37	5238	35.7	5778	34.8	6318	34.6	6858	33.9		
4728	36.9	5268	35.6	5808	34.8	6348	34.6	6888	33.9		
4758	36.8	5298	35.6	5838	34.8	6378	34.5	6918	33.8		
4788	36.8	5328	35.5	5868	34.8	6408	34.5	6948	33.8		
4818	36.7	5358	35.4	5898	34.8	6438	34.5	6978	33.8		
4848	36.6	5388	35.4	5928	34.8	6468	34.4	7008	33.7		

ข.4 อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ตารางที่ ข.5 (ต่อ)

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

สำหรับ γ เท่ากับ 1.2 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.6

$\gamma = 1.2, w/c = 0.6$						$\gamma = 1.2, w/c = 0.6$					
เวลา (นาทีก)	SW 30%	เวลา (นาทีก)	SW 30%	เวลา (นาทีก)	SW 30%	เวลา (นาทีก)	SW 30%	เวลา (นาทีก)	SW 30%	เวลา (นาทีก)	SW 30%
0	32.8	578	60.5	1118	58.4	1673	53.7	2213	49.2	2753	45.2
38	33.5	608	60.7	1148	58.2	1703	53.5	2243	48.9	2783	45
98	35.7	638	60.8	1178	58	1733	53.2	2273	48.7	2813	44.8
128	37.7	668	60.9	1208	57.6	1763	52.9	2303	48.5	2843	44.6
158	40.1	698	60.9	1238	57.3	1793	52.7	2333	48.3	2873	44.5
188	43.2	728	60.9	1268	57.1	1823	52.5	2363	48.1	2903	44.2
218	47.4	758	60.8	1298	56.8	1853	52.3	2393	47.8	2933	44
248	49.7	788	60.7	1328	56.6	1883	52	2423	47.6	2963	43.8
278	51.5	818	60.6	1358	56.3	1913	51.7	2453	47.3	2993	43.8
308	53	848	60.4	1388	56	1943	51.5	2483	47.1	3023	43.5
338	54.5	878	60.3	1433	55.7	1973	51.3	2513	46.9	3053	43.3
368	55.7	908	60.1	1463	55.3	2003	51	2543	46.6	3083	43.2
398	56.9	938	59.8	1493	55.1	2033	50.8	2573	46.4	3113	43
428	57.8	968	59.6	1523	54.9	2063	50.5	2603	46.2	3143	42.8
458	58.6	998	59.3	1553	54.7	2093	50.1	2633	46	3173	42.7
488	59.3	1028	59.1	1583	54.4	2123	49.9	2663	45.8	3203	42.5
518	59.9	1058	59	1613	54.2	2153	49.6	2693	45.6	3233	42.3
548	60.3	1088	58.7	1643	54	2183	49.4	2723	45.3	3263	42.1

ข.4 อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ตารางที่ ข.5 (ต่อ)

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

สำหรับ γ เท่ากับ 1.2 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.6

$\gamma = 1.2, w/c = 0.6$						$\gamma = 1.2, w/c = 0.6$					
เวลา (นาทีก)	SW 30%	เวลา (นาทีก)	SW 30%	เวลา (นาทีก)	SW 30%	เวลา (นาทีก)	SW 30%	เวลา (นาทีก)	SW 30%	เวลา (นาทีก)	SW 30%
3293	42	3833	39.2	4373	37.2	4913	36.1	5453	34.8	5993	34.4
3323	41.9	3863	39.1	4403	37.2	4943	36	5483	34.8	6023	34.3
3353	41.7	3893	39	4433	37.1	4973	35.9	5513	34.7	6053	34.3
3383	41.5	3923	38.8	4463	37	5003	35.8	5543	34.6	6083	34.3
3413	41.3	3953	38.7	4493	37	5033	35.7	5573	34.5	6113	34.3
3428	41.3	3983	38.6	4463	36.9	5063	35.7	5603	34.5	6143	34.3
3458	41.1	4013	38.4	4553	36.8	5093	35.6	5633	34.5	6173	34.3
3488	40.9	4043	38.3	4583	36.8	5123	35.5	5663	34.4	6203	34.2
3518	40.9	4073	38.2	4613	36.7	5153	35.5	5693	34.4	6233	34.2
3548	40.7	4103	38.1	4643	36.6	5183	35.4	5723	34.4	6263	34.2
3578	40.5	4133	38	4673	36.5	5213	35.4	5753	34.4	6293	34.2
3608	40.3	4163	37.9	4703	36.5	5243	35.3	5783	34.4	6323	34.1
3638	40.2	4193	37.7	4733	36.4	5273	35.2	5813	34.3	6353	34.1
3668	40.1	4223	37.6	4763	36.3	5303	35.2	5843	34.4	6383	34.1
3698	40	4253	37.5	4793	36.3	5333	35.1	5873	34.4	6413	34
3728	39.8	4283	37.4	4823	36.3	5363	35	5903	34.3	6443	34
3773	39.6	4313	37.4	4853	36.2	5393	35	5933	34.4	6473	34
3803	39.5	4343	37.3	4883	36.2	5423	34.9	5963	34.4	6503	33.9

ข.4 อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ตารางที่ ข.5 (ต่อ)

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน
สำหรับ γ เท่ากับ 1.2 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.6

$\gamma = 1.2, w/c = 0.6$			
เวลา (นาทีก)	SW 30%	เวลา (นาทีก)	SW 30%
6533	33.9	7073	33.2
6563	33.8	7103	33.2
6593	33.8	7133	33.1
6623	33.8	7163	33.1
6653	33.7	7193	32.9
6683	33.7	7200	32.9
6713	33.7		
6743	33.6		
6773	33.6		
6803	33.6		
6833	33.5		
6863	33.5		
6893	33.4		
6923	33.4		
6953	33.4		
6983	33.3		
7013	33.3		
7043	33.2		

ข.4 อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ตารางที่ ข.6

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

สำหรับ γ เท่ากับ 1.2 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.7

$\gamma = 1.2, w/c = 0.7$						$\gamma = 1.2, w/c = 0.7$					
เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC
0	32.1	538	57.5	1078	56.7	1618	52.9	2158	49.1	2698	45.8
30	32.1	568	57.7	1108	56.8	1648	52.8	2188	49.0	2728	45.4
60	33.1	598	58.1	1138	56.4	1678	52.5	2218	48.9	2758	45.2
90	34.4	628	58.3	1168	56.3	1708	52.3	2248	48.7	2788	45.0
120	36.5	658	58.4	1198	56.1	1738	52.1	2278	48.4	2818	45.0
150	39.2	688	58.4	1228	55.7	1768	51.8	2308	48.2	2848	44.8
180	42.4	718	58.5	1258	55.7	1798	51.7	2338	48.1	2878	44.5
210	46.0	748	58.5	1288	55.3	1828	51.3	2368	47.7	2908	44.4
240	48.2	778	58.5	1318	55.2	1858	51.3	2398	47.6	2938	44.4
270	49.4	808	58.4	1348	55.0	1888	51.0	2428	47.5	2968	44.2
300	51.1	838	58.3	1378	54.7	1918	50.8	2458	47.2	2998	43.9
328	52.3	868	58.2	1408	54.5	1948	50.7	2488	47.1	3028	43.9
358	53.2	898	58.1	1438	54.2	1978	50.3	2518	46.8	3058	43.7
388	53.9	928	57.8	1468	54.0	2008	50.1	2548	46.7	3088	43.5
418	54.9	958	57.6	1498	53.9	2038	50.0	2578	46.4	3118	43.5
448	55.7	988	57.5	1528	53.6	2068	49.7	2608	46.3	3148	43.4
478	56.4	1018	57.4	1558	53.2	2098	49.7	2638	46.0	3178	43.3
508	56.9	1048	57.1	1588	53.1	2128	49.6	2668	45.9	3208	43.1

ข.4 อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ตารางที่ ข.6 (ต่อ)

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

สำหรับ γ เท่ากับ 1.2 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.7

$\gamma = 1.2, w/c = 0.7$						$\gamma = 1.2, w/c = 0.7$					
เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC
3238	43.0	3778	40.9	4318	38.9	4858	37.6	5398	36.4	5938	35.0
3268	42.9	3808	40.7	4348	38.7	4888	37.6	5428	36.4	5968	35.0
3298	42.8	3838	40.7	4378	38.6	4918	37.5	5458	36.3	5998	35.0
3328	42.7	3868	40.5	4408	38.5	4948	37.5	5488	36.2	6028	35.0
3358	42.6	3898	40.4	4438	38.4	4978	37.4	5518	36.2	6058	35.0
3388	42.5	3928	40.3	4468	38.4	5008	37.3	5548	36.0	6088	35.0
3418	42.4	3958	40.2	4498	38.4	5038	37.3	5578	35.9	6118	35.0
3448	42.2	3988	40.1	4528	38.2	5068	37.2	5608	35.8	6148	35.0
3478	42.1	4018	40.0	4558	38.1	5098	37.2	5638	35.7	6178	35.0
3508	42.0	4048	39.8	4588	38.2	5128	37.1	5668	35.6	6208	35.0
3538	41.8	4078	39.8	4618	38.1	5158	37.0	5698	35.5	6238	34.9
3568	41.6	4108	39.5	4648	38.0	5188	37.0	5728	35.4	6268	34.9
3598	41.5	4138	39.4	4678	38.0	5218	36.9	5758	35.4	6298	34.9
3628	41.5	4168	39.3	4708	38.0	5248	36.8	5788	35.3	6328	34.9
3658	41.4	4198	39.2	4738	37.9	5278	36.7	5818	35.2	6358	34.9
3688	41.3	4228	39.2	4768	37.9	5308	36.7	5848	35.2	6388	34.9
3718	41.1	4258	39.0	4798	37.7	5338	36.6	5878	35.1	6418	34.9
3748	41.0	4288	38.9	4828	37.7	5368	36.5	5908	35.1	6448	34.8

ข.4 อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ตารางที่ ข.6 (ต่อ)

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

สำหรับ γ เท่ากับ 1.2 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.7

$\gamma = 1.2, w/c = 0.7$						$\gamma = 1.2, w/c = 0.7$					
เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	OPC	เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%
6478	34.8	7018	33.9	0	32.2	548	56.6	1088	54.1	1628	50.2
6508	34.8	7048	33.8	30	32.6	578	58.9	1118	59.0	1658	50.1
6538	34.7	7078	33.8	60	33.2	608	56.9	1148	53.8	1688	49.8
6568	34.7	7108	33.6	90	34.9	638	57.0	1178	58.2	1718	49.6
6598	34.6	7138	33.6	120	37.1	668	56.9	1208	53.3	1748	49.3
6628	34.6	7168	33.6	150	39.6	698	56.9	1238	53.0	1778	50.0
6658	34.5	7198	33.5	180	43.3	728	56.6	1268	52.8	1808	48.9
6688	34.5	7200	33.4	218	47.5	758	56.6	1298	52.5	1838	48.9
6718	34.4			248	49.1	788	56.3	1328	52.5	1868	48.5
6748	34.4			278	50.7	818	56.1	1358	52.2	1898	48.2
6778	34.3			308	52.1	848	55.9	1388	52.0	1928	48.1
6808	34.2			338	53.3	878	56.0	1418	51.8	1958	47.9
6838	34.2			368	54.3	908	55.7	1448	51.6	1988	47.6
6868	34.2			398	55.3	938	55.3	1478	51.4	2018	47.4
6898	34.1			428	56.0	968	55.2	1508	51.2	2048	47.2
6928	34.0			458	56.0	998	54.9	1538	51.0	2078	47.0
6958	34.0			488	56.4	1028	54.7	1568	50.8	2108	46.8
6988	33.9			518	56.4	1058	54.5	1598	50.6	2138	46.5

ข.4 อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ตารางที่ ข.6 (ต่อ)

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

สำหรับ γ เท่ากับ 1.2 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.7

$\gamma = 1.2, w/c = 0.7$						$\gamma = 1.2, w/c = 0.7$					
เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%
2168	46.4	2708	45.7	3248	40.5	3788	38.2	4328	36.3	4868	35.5
2198	46.1	2738	42.5	3278	40.4	3818	38.1	4358	36.3	4898	35.5
2228	45.9	2768	42.4	3308	40.3	3848	38.0	4388	36.3	4928	35.5
2258	45.7	2798	42.2	3338	40.2	3878	37.8	4418	36.3	4958	35.4
2288	45.5	2828	42.0	3368	40.0	3908	37.7	4448	36.2	4988	35.4
2318	45.2	2858	41.9	3398	39.9	3938	37.6	4478	36.2	5018	35.3
2348	45.0	2888	41.7	3428	39.7	3968	37.5	4508	36.2	5048	35.3
2378	44.8	2918	41.6	3458	39.6	3998	37.3	4538	36.2	5078	36.7
2408	44.6	2948	41.4	3488	39.6	4028	37.2	4568	36.2	5108	35.2
2438	44.5	2978	41.4	3518	39.4	4058	37.2	4598	36.2	5138	35.1
2468	44.2	3008	41.4	3548	39.2	4088	37.1	4628	36.1	5168	35.0
2498	44.0	3038	41.3	3578	39.1	4118	38.2	4658	36.0	5198	34.9
2528	43.9	3068	41.2	3608	39.0	4148	36.9	4688	35.8	5228	35.0
2558	43.6	3098	41.1	3638	38.9	4178	36.8	4718	35.7	5258	34.8
2588	43.5	3128	41.0	3668	38.7	4208	39.7	4748	35.6	5288	34.7
2618	43.3	3158	40.7	3698	38.6	4238	36.5	4778	35.6	5318	34.7
2648	43.1	3188	40.6	3728	38.5	4268	36.4	4808	35.6	5348	34.6
2678	42.9	3218	40.6	3758	38.4	4298	36.4	4838	35.6	5378	34.5

ข.4 อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ตารางที่ ข.6 (ต่อ)

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

สำหรับ γ เท่ากับ 1.2 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.7

$\gamma = 1.2, w/c = 0.7$						$\gamma = 1.2, w/c = 0.7$					
เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 10%	เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%
5408	34.4	5948	33.7	6488	33.6	7028	32.7	0	31.8	548	57.9
5438	34.4	5978	33.7	6518	33.5	7058	32.7	30	31.8	578	58.3
5468	34.3	6008	33.7	6548	33.4	7088	32.6	60	32.6	608	58.4
5498	34.2	6038	33.8	6578	33.4	7118	32.6	90	34.1	638	58.5
5528	34.2	6068	33.8	6608	33.4	7148	32.5	120	36.0	668	58.6
5558	34.1	6098	33.7	6638	33.3	7178	32.5	150	38.6	698	58.7
5588	34.0	6128	33.7	6668	33.3	7200	32.6	188	42.7	728	58.6
5618	33.9	6158	33.8	6698	33.2			218	46.3	758	58.6
5648	34.0	6188	34.7	6728	33.5			248	48.2	788	58.5
5678	33.8	6218	33.7	6758	33.1			278	49.9	818	58.4
5708	33.8	6248	33.7	6788	33.1			308	51.3	848	58.2
5738	33.7	6278	33.7	6818	33.0			338	52.6	878	58.1
5768	33.7	6308	33.7	6848	33.0			368	53.9	908	57.9
5798	33.7	6338	33.7	6878	32.9			398	54.8	938	57.8
5828	33.7	6368	33.7	6908	32.8			428	55.7	968	57.7
5858	33.7	6398	33.7	6938	32.8			458	56.5	998	57.4
5888	33.7	6428	33.6	6968	32.7			488	57.2	1028	57.2
5918	33.7	6458	33.6	6998	32.7			518	57.7	1058	57.0

ข.4 อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ตารางที่ ข.6 (ต่อ)

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

สำหรับ γ เท่ากับ 1.2 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.7

$\gamma = 1.2, w/c = 0.7$						$\gamma = 1.2, w/c = 0.7$					
เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%
1088	56.7	1628	52.7	2168	48.7	2708	45.1	3233	42.7	3773	40.3
1118	56.5	1658	52.6	2198	48.5	2738	45.0	3263	42.5	3803	40.2
1148	56.3	1688	52.2	2228	48.3	2768	44.8	3293	42.5	3833	40.0
1178	56.0	1718	52.0	2258	48.0	2798	44.6	3323	42.3	3863	39.9
1208	55.9	1748	51.8	2288	47.8	2828	44.5	3353	42.2	3893	39.8
1238	55.6	1778	51.6	2318	47.6	2843	44.5	3383	42.0	3923	39.6
1268	55.5	1808	51.4	2348	47.4	2873	44.3	3413	41.9	3953	39.5
1298	55.2	1838	51.2	2378	47.2	2903	44.2	3443	41.7	3983	39.4
1328	55.0	1868	50.9	2408	47.1	2933	44.1	3473	41.6	4013	39.3
1358	54.7	1898	50.7	2438	46.8	2963	43.9	3503	41.5	4043	39.2
1388	54.6	1928	50.4	2468	46.6	2993	43.8	3533	41.3	4073	39.2
1418	54.2	1958	50.3	2498	46.4	3023	43.7	3563	41.2	4103	39.0
1448	54.0	1988	50.0	2528	46.2	3053	43.5	3593	41.1	4133	38.9
1478	53.8	2018	49.8	2558	46.0	3083	43.4	3623	40.9	4163	38.7
1508	53.5	2048	49.6	2588	45.8	3113	43.2	3653	40.8	4193	38.4
1538	53.4	2078	49.3	2618	45.8	3143	43.1	3683	40.7	4223	38.6
1568	53.2	2108	49.2	2648	45.5	3173	43.0	3713	40.5	4253	38.6
1598	52.9	2138	48.9	2678	45.3	3203	42.8	3743	40.4	4283	38.5

ข.4 อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ตารางที่ ข.6 (ต่อ)

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

สำหรับ γ เท่ากับ 1.2 และ ที่ w/c เท่ากับ 0.7

$\gamma = 1.2, w/c = 0.7$						$\gamma = 1.2, w/c = 0.7$					
เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%	เวลา (นาทีก)	SW 20%
4313	38.4	4853	37.2	5393	35.8	5933	35.1	6473	34.4	7013	33.5
4343	38.3	4883	37.2	5423	35.7	5963	35.0	6503	34.3	7043	33.5
4373	38.3	4913	37.0	5453	35.6	5993	35.1	6533	34.4	7073	33.4
4403	38.2	4943	37.0	5483	35.6	6023	35.2	6563	34.3	7103	33.6
4433	38.1	4973	36.9	5513	35.5	6053	34.9	6593	34.2	7133	33.5
4463	38.2	5003	36.8	5543	35.4	6083	34.9	6623	34.2	7163	33.4
4493	38.1	5033	36.7	5573	35.4	6113	34.9	6653	34.1	7193	33.5
4523	38.0	5063	36.6	5603	35.3	6143	34.9	6683	34.0	7200	33.5
4553	37.9	5093	36.5	5633	35.4	6173	35.0	6713	34.0		
4583	37.9	5123	36.5	5663	35.3	6203	34.8	6743	33.9		
4613	37.8	5153	36.4	5693	35.3	6233	34.8	6773	34.0		
4643	37.7	5183	36.3	5723	35.2	6263	34.7	6803	33.8		
4673	37.6	5213	36.3	5753	35.2	6293	34.6	6833	33.8		
4703	37.6	5243	36.1	5783	35.2	6323	34.6	6863	33.7		
4733	37.5	5273	36.1	5813	35.2	6353	34.5	6893	33.7		
4763	37.4	5303	36.0	5843	35.2	6383	34.5	6923	33.6		
4793	37.4	5333	35.9	5873	35.2	6413	34.5	6953	33.6		
4823	37.3	5363	35.9	5903	35.1	6443	34.4	6983	33.6		