

บทที่ 4

เครื่องมือและขั้นตอนการทดสอบ

จากวัตถุประสงค์และขอบเขตของวิทยานิพนธ์สามารถลำดับเครื่องมือ วัสดุและวิธีการทดสอบได้ดังนี้

4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนคือ

- เครื่องมือวัด ได้แก่
 1. เครื่องชั่ง
 2. เวอร์เนียคาลิเปอร์
 3. เทอร์โมมิเตอร์
 4. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง
- อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม
 1. ชุดอุปกรณ์ทดสอบหาขนาดคละและโมดูลัสความละเอียดของมวลรวม
 2. ชุดอุปกรณ์ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและร้อยละการดูดซับน้ำ
 3. ชุดอุปกรณ์ทดสอบหาหน่วยน้ำหนักและช่องว่างระหว่างมวลรวม
- อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต
 1. เครื่องผสมคอนกรีต
 2. เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine ขนาด 200 ตัน
 3. เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงความยาวของคอนกรีต
 4. เครื่องวัดการซึมผ่านได้ของน้ำของคอนกรีต
 5. เครื่องจี้คอนกรีต เหล็กกระทุ้ง เกรียงเหล็ก
 6. ชุดอุปกรณ์ทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต
 7. ชุดอุปกรณ์ทดสอบหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต
 8. แบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มม. สูง 300 มม.
 9. แบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 100 x 100 x 100 มิลลิเมตร

10. แบบหล่อขนาด 75 x 75 x 285 มิลลิเมตร
11. แบบหล่อขนาด 150 x 150 x 500 มิลลิเมตร
12. แบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มม. สูง 40 มม.
13. ชุดหล่อหัวคอนกรีต เครื่องตักก้ามเก็ด
14. เตาอบ

4.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150
2. น้ำสัลดิจจากโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ 3 โรงงาน
3. มวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33
4. มวลรวมหยาบใช้หินขนาดโตสุด 25 มิลลิเมตรตามมาตรฐาน ASTM C33
5. น้ำ สำหรับการทดสอบคุณสมบัติซีเมนต์เพสต์ผสมด้วยน้ำสัลดิจจะใช้น้ำประปาที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ส่วนการผสมคอนกรีตจะใช้น้ำของโรงงานผสมคอนกรีตเสร็จ
6. สารละลายกรดซัลฟริก (H_2SO_4) ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
7. สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

4.3 ขั้นตอนและรายละเอียดของการทดสอบ

จากวัตถุประสงค์และขอบเขตของงาน การทดสอบแบ่งได้ออกได้เป็น 3 ส่วนคือ การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่จะใช้ในการวิจัย การทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ผสมด้วยน้ำสัลดิจและการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมด้วยน้ำสัลดิจ มีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนการทดสอบดังนี้

4.3.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

ขั้นตอนนี้เป็นการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่จะใช้ในการวิจัย โดยเป็นการทดสอบเพื่อใช้เป็นข้อมูลเพื่อให้ทราบถึงลักษณะของวัสดุที่ใช้อยู่ในโรงงาน ตลอดจนใช้เป็นข้อมูล

ในการออกแบบคอนกรีต ซึ่งข้อมูลบางส่วนก็ทำการทดสอบเทียบกับข้อมูลเดิมที่มีอยู่ของแต่ละโรงงาน การทดสอบมีรายละเอียดแยกตามประเภทวัสดุดังนี้

4.3.1.1 การทดสอบมวลรวม

การทดสอบคุณสมบัติของมวลรวมเป็นการทดสอบเพื่อใช้ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต โดยใช้มาตรฐาน ASTM C33 (Standard Specification for Concrete Aggregates) เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบผลการทดสอบ รายละเอียดการทดสอบประกอบด้วย

- หน่วยน้ำหนักและช่องว่างระหว่างมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C29
- ปริมาณสารอินทรีย์ในมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C40
- ความคงตัวของมวลรวมโดยใช้ โซเดียมซัลเฟตตามมาตรฐาน ASTM C88
- ปริมาณส่วนละเอียดกว่าตะแกรงเบอร์ 200 ในมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C117
- ความถ่วงจำเพาะและร้อยละของการดูดซับน้ำของมวลรวมหยาบตามมาตรฐาน ASTM C127
- ความถ่วงจำเพาะและร้อยละของการดูดซับน้ำของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C128
- ความทนทานต่อการขัดสีของมวลรวมหยาบ ตามมาตรฐาน ASTM C131
- ขนาดคละและโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C136
- ปริมาณดินและส่วนที่แตกร่วนในมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C142

4.3.1.2 การทดสอบปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

การทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 เป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ที่ใช้อยู่ของแต่ละโรงงานเพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิง โดยใช้มาตรฐาน ASTM C150 (Standard Specification for Portland Cement) เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบผลการทดสอบ รายละเอียดการทดสอบประกอบด้วย

- กำลังอัด ที่อายุ 3 และ 7 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109
- ระยะเวลาการก่อตัวตามมาตรฐาน ASTM C191

- พื้นที่ผิวจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM C204

4.3.1.3 การทดสอบน้ำ

การทดสอบคุณสมบัติของน้ำ เป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตของแต่ละโรงงานตลอดจนน้ำที่ใช้ในการผสมซีเมนต์เพสต์เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิง โดยใช้มาตรฐาน ASTM C94 (Standard Specification for Ready-Mixed Concrete) ตารางที่ 3 เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบผลการทดสอบ รายละเอียดการทดสอบประกอบด้วย

- ปริมาณคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM D512
- ปริมาณซัลเฟต ตามมาตรฐาน ASTM D 516
- ค่าความเป็นกรดต่างตามมาตรฐาน ASTM D1293
- ปริมาณของแข็งทั้งหมดตามมาตรฐาน AASHTO T26
- ค่าอัลคาลินิตีตามมาตรฐาน EPA

4.3.1.4 การทดสอบน้ำสลัดจ์

การทดสอบคุณสมบัติของน้ำสลัดจ์เป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของน้ำสลัดจ์จากบ่อคายกากของแต่ละโรงงานเพื่อเป็นข้อมูลในการเลือกแหล่งน้ำสลัดจ์และเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ผลทดสอบ โดยใช้มาตรฐาน ASTM C94 (Standard Specification for Ready-Mixed Concrete) ตารางที่ 3 เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบผลการทดสอบ รายละเอียดการทดสอบประกอบด้วย

- ปริมาณคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM D512
- ปริมาณซัลเฟตตามมาตรฐาน ASTM D 516
- ค่าความเป็นกรดต่างตามมาตรฐาน ASTM D1293
- ปริมาณของแข็งทั้งหมดตามมาตรฐาน AASHTO T26
- ค่าอัลคาลินิตีตามมาตรฐาน EPA
- ความถ่วงจำเพาะของน้ำสลัดจ์ โดยใช้ตาชั่ง

4.3.1.5 การทดสอบผงสไลด์

การทดสอบคุณสมบัติของผงสไลด์เป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของผงสไลด์ได้จากการบดน้ำสไลด์ ซึ่งเป็นน้ำสไลด์ที่เก็บมาจากบ่อคายกากของแต่ละโรงงานเพื่อเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ผลทดสอบ รายละเอียดการทดสอบประกอบด้วย

- ทดสอบหาปริมาณสารประกอบออกไซด์ของผงสไลด์ ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescent (XRF)
- ทดสอบหองศ์ประกอบของผงสไลด์ด้วยเครื่อง X-ray Diffraction (XRD)
- ถ่ายภาพขยายโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)
- ทดสอบการกระจายตัว (Size Distribution) ของขนาดผงสไลด์

4.3.1.6 การทดสอบสารเคมีผสมเพิ่ม

การทดสอบคุณสมบัติของสารเคมีผสมเพิ่มเป็นการทดสอบเพื่อยืนยันถึงคุณภาพของสารเคมีผสมเพิ่มว่าทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์ที่กำหนดหรือไม่ เมื่อผสมด้วยสารเคมีผสมเพิ่มในอัตราการผลิตตามที่ผู้ผลิตแนะนำ การทดสอบสารเคมีผสมเพิ่มกระทำโดยการผสมในคอนกรีต แล้วทำการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตนั้นว่ามีคุณสมบัติอย่างไร การเปรียบเทียบผลการทดสอบจะใช้วิธีเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่เป็นคอนกรีตไม่ผสมสารผสมเพิ่ม โดยใช้มาตรฐาน ASTM C494 (Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete) แสดงดังตารางที่ 4.1 เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบผลการทดสอบ ซึ่งสารเคมีผสมเพิ่มในงานวิจัยประกอบด้วยสารลดน้ำระดับสูง (ASTM C494 ชนิด F) สำหรับการทดสอบน้ำสไลด์จากศูนย์นิคมอุตสาหกรรมอิตาเลียนไทย สารกันซึมแบบลดน้ำ (ASTM C494 ชนิด A) สำหรับการทดสอบน้ำสไลด์จากบริษัทเอเชียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัด และสารลดน้ำและหน่วงการก่อตัว (ASTM C494 ชนิด D) สำหรับการทดสอบน้ำสไลด์จากบริษัทพีไอ คอนกรีต จำกัด

การทดสอบสารเคมีผสมเพิ่มในขั้นการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานนี้เป็นการรวบรวมข้อมูลสารผสมเพิ่มที่ใช้อยู่ของโรงงานประกอบด้วยรายละเอียดของผลิตภัณฑ์ ค่าความถ่วงจำเพาะ อัตราการใช้สารผสมเพิ่มที่ผู้ผลิตแนะนำ ส่วนการทดสอบด้วยการผสมในคอนกรีตจะกระทำในขั้นตอนที่ 4.3.3 การผสมคอนกรีตด้วยน้ำสไลด์ ซึ่งมีรายละเอียดการทดสอบเช่นเดียวกับตัวอย่างทดสอบคอนกรีตอื่น เพียงแต่การเปรียบเทียบผลการทดสอบเพื่อยืนยันถึงคุณภาพของ

สารเคมีผสมเพิ่มจะใช้รายละเอียดการทดสอบตามตารางที่ 4.1 ในการเปรียบเทียบ ซึ่งมีรายละเอียดการทดสอบประกอบด้วย

- ร้อยละของปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีต
- กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วันตามมาตรฐาน ASTM C39
- กำลังดัดของคอนกรีตที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วันตามมาตรฐาน ASTM C78
- การยุบตัวของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C143
- การเปลี่ยนแปลงความยาวของแท่งคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C494
- ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C403

4.3.1.7 การทดสอบเถ้าลอย

การทดสอบคุณสมบัติของเถ้าลอยเป็นการทดสอบเพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต โดยการทดสอบคอนกรีตผสมเถ้าลอยเป็นการทดสอบคอนกรีตผสมด้วยน้ำสลัดจ์จากศูนย์นิคมอุตสาหกรรมอิตาเลียนไทย การเปรียบเทียบผลการทดสอบใช้มาตรฐาน มาตรฐาน ว.ส.ท 1014-46 (ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต) ตารางที่ 2.8 เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ รายละเอียดการทดสอบประกอบด้วย

- ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM C204
- ค่าดัชนีกำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วันตามมาตรฐาน ASTM C109

4.3.2 การทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เฟสท์ผสมด้วยน้ำสลัดจ์

การทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เฟสท์ผสมด้วยน้ำสลัดจ์เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาถึงผลของค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำสลัดจ์ที่มีต่อค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำสลัดจ์และผลต่อตัวอย่างซีเมนต์เฟสท์ผสมด้วยน้ำสลัดจ์ที่มีค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดตั้งแต่ร้อยละ 0.50 (ค่าโดยประมาณของน้ำสลัดจ์ส่วนที่ใส), 2.50, 5.00, 7.50, 10.00, 12.50 และ 15.00 โดยการทดสอบซีเมนต์เฟสท์ผสมด้วยน้ำสลัดจ์ประกอบด้วยการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 วันตามมาตรฐาน ASTM C109 และค่าระยะเวลาการก่อตัวตามมาตรฐาน ASTM C191 ซึ่งผลการทดสอบของตัวอย่างซีเมนต์เฟสท์ผสมด้วยน้ำสลัดจ์จะเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่เป็นซีเมนต์เฟสท์ผสมด้วย

น้ำประปาและใช้เกณฑ์ตามตารางที่ 1 ของมาตรฐาน ASTM C94 (Standard Specification for Ready-Mixed Concrete) เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบผลการทดสอบ มีรายละเอียดดังนี้คือ

- ค่ากำลังอัดที่อายุ 7 วันเทียบกับตัวอย่างควบคุมมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 ของตัวอย่างควบคุม
- ค่าระยะเวลาการก่อตัวเทียบกับตัวอย่างควบคุมอยู่ในน้อยกว่า 1 ชั่วโมงถึงมากกว่า 1.50 ชั่วโมง

4.3.2.1 ขั้นตอนการทดสอบซีเมนต์เพสต์ผสมด้วยน้ำสลัดจ์

น้ำสลัดจ์เพื่อใช้ในการทดสอบตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ผสมด้วยน้ำสลัดจ์จะถูกเก็บจากบ่อคายกากของโรงงานเป็นรายสัปดาห์ 4 ครั้งเป็นเวลาประมาณ 1 เดือน ผลการทดสอบของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ผสมด้วยน้ำสลัดจ์เทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ผ่านเกณฑ์ของมาตรฐาน ASTM C94 จะถูกใช้ในการพิจารณาเลือกค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำสลัดจ์สำหรับการทดสอบคอนกรีตผสมด้วยน้ำสลัดจ์ต่อไป รายละเอียดขั้นตอนการทดสอบเพสต์ผสมด้วยน้ำสลัดจ์มีดังต่อไปนี้

1) ขั้นตอนแรกเริ่มจากการเลือกแหล่งของน้ำสลัดจ์หรือบ่อคายกากที่จะใช้ในการทดสอบ โดยทำการสุ่มเก็บตัวอย่างน้ำสลัดจ์มาทดสอบปริมาณสารเคมีว่าอยู่เกณฑ์ของมาตรฐาน ASTM C94 หรือไม่ รายละเอียดการทดสอบยึดตามการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของน้ำสลัดจ์ตามหัวข้อ 4.3.1.4

2) เมื่อเลือกแหล่งของน้ำสลัดจ์ได้แล้วก็จะเริ่มเก็บตัวอย่างน้ำสลัดจ์เป็นปริมาณจำนวน 200 ลิตรมาทดสอบเป็นรายสัปดาห์รวม 4 ครั้งเป็นเวลาประมาณ 1 เดือน

3) น้ำสลัดจ์ที่เก็บจากโรงงาน จะถูกนำมาอุ่นแยกเอามวลรวมออก โดยใช้ตะแกรงขนาดเบอร์ 50 (0.30 มม.) การอุ่นแยกเอามวลรวมออกเพื่อควบคุมให้อนุภาคของน้ำสลัดจ์มีขนาดโตสุดของอนุภาคที่เท่ากันในแต่ละสัปดาห์และเพื่อให้มีขนาดอนุภาคที่มีขนาดไม่ใหญ่จนเกินไป เนื่องจากขนาดอนุภาคในน้ำสลัดจ์ที่ใหญ่เกินไปมีผลทำให้เกิดการแยกชั้นของตะกอนสลัดจ์และทำให้น้ำสลัดจ์ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ตัวอย่างน้ำสลัดจ์บางส่วนจะถูกเก็บเพื่อส่งไปทดสอบหาปริมาณสารเคมีรายละเอียดตามหัวข้อ 4.3.1.4 ต่อไป

4) น้ำสลัดจ์ที่ผ่านการอุ่นจะถูกปล่อยให้ตกตะกอน เพื่อแบ่งแยกส่วนของน้ำสลัดจ์ส่วนที่ขึ้นและน้ำสลัดจ์ส่วนใส การแบ่งตัวอย่างน้ำสลัดจ์ออกเป็น 2 ส่วนเพื่อความสะดวกในการ

เก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด ซึ่งน้ำสลัดจ์จากทั้ง 2 ส่วนจะใช้ผสมกันเพื่อแบ่งเป็นตัวอย่างย่อยที่มีน้ำหนักประมาณ 2,000 กรัม สำหรับใช้ในการหาค่าความถ่วงจำเพาะและค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดของน้ำสลัดจ์

5) ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะกับค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดของน้ำสลัดจ์ โดยความสัมพันธ์ที่ได้จะถูกใช้ในการผสมตัวอย่างน้ำสลัดจ์ให้มีค่าร้อยละ 0.50 (ค่าโดยประมาณของน้ำสลัดจ์ส่วนที่ใส), 2.50, 5.00, 7.50, 10.00, 12.50 และ 15.00 โดยมีตัวอย่างที่ผสมด้วยน้ำประปาเป็นตัวอย่างควบคุม รายละเอียดการผสมแสดงได้ดังตารางที่ 4.2

6) ตัวอย่างน้ำสลัดจ์ที่มีค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดตามตารางที่ 4.2 จะถูกนำไปผสมกับปูนซีเมนต์ โดยมีอัตราส่วนของน้ำสลัดจ์ต่อปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 30 ตัวอย่างซีเมนต์เฟสท์ที่ผสมเสร็จจะใช้ในการทดสอบค่ากำลังอัดที่อายุ 7 วันและค่าระยะเวลาการก่อตัวต่อไป

7) ทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบซีเมนต์เฟสท์ผสมด้วยน้ำสลัดจ์กับตัวอย่างควบคุม

8) ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่มีค่าสูงที่สุดในแต่ละสัปดาห์ของตัวอย่างซีเมนต์เฟสท์ที่ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน ASTM C94 ตารางที่ 1 จะใช้ในการพิจารณาเลือกค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำสลัดจ์สำหรับการทดสอบคอนกรีตผสมด้วยน้ำสลัดจ์ต่อไป

ตารางที่ 4.1

รายละเอียดของเกณฑ์ของคอนกรีตที่ผสมสารเคมีผสมเพิ่มของมาตรฐาน ASTM C494

ชนิดการทดสอบ	ชนิดของสารผสมเพิ่ม		
	สารลดน้ำ (ASTM C494 ชนิด A)	สารลดน้ำ และหน่วงการก่อตัว (ASTM C494 ชนิด D)	สารลดน้ำระดับสูง (ASTM C494 ชนิด F)
ร้อยละของปริมาณน้ำในส่วนผสมเทียบกับคอนกรีตควบคุม	ไม่เกิน 95	ไม่เกิน 95	ไม่เกิน 88
ค่าระยะเวลาการก่อตัวเทียบกับคอนกรีตควบคุม			
- ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น	น้อยกว่าไม่เกิน 1 ชม. มากกว่าไม่เกิน 1.5 ชม.	มากกว่าอย่างน้อย 1 ชม. มากกว่าไม่เกิน 3.5 ชม.	น้อยกว่าไม่เกิน 1 ชม. มากกว่าไม่เกิน 1.5 ชม.
- ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย	น้อยกว่าไม่เกิน 1 ชม. มากกว่าไม่เกิน 1.5 ชม.	มากกว่าไม่เกิน 3.5 ชม.	น้อยกว่าไม่เกิน 1 ชม. มากกว่าไม่เกิน 1.5 ชม.
ร้อยละของค่ากำลังอัดเทียบกับคอนกรีตควบคุม ที่อายุ			
1 วัน	-	-	ไม่น้อยกว่า 140
3 วัน	ไม่น้อยกว่า 110	ไม่น้อยกว่า 110	ไม่น้อยกว่า 125
7 วัน	ไม่น้อยกว่า 110	ไม่น้อยกว่า 110	ไม่น้อยกว่า 115
28 วัน	ไม่น้อยกว่า 110	ไม่น้อยกว่า 110	ไม่น้อยกว่า 110
ร้อยละของค่ากำลังอัดเทียบกับคอนกรีตควบคุม ที่อายุ			
3 วัน	ไม่น้อยกว่า 100	ไม่น้อยกว่า 100	ไม่น้อยกว่า 110
7 วัน	ไม่น้อยกว่า 100	ไม่น้อยกว่า 100	ไม่น้อยกว่า 100
28 วัน	ไม่น้อยกว่า 100	ไม่น้อยกว่า 100	ไม่น้อยกว่า 100
ค่าการเปลี่ยนแปลงความยาว			
- ร้อยละเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม ¹	ไม่เกิน 135	ไม่เกิน 135	ไม่เกิน 135
- เพิ่มจากชุดควบคุม ²	ไม่เกิน 0.010	ไม่เกิน 0.010	ไม่เกิน 0.010

หมายเหตุ ¹ในกรณีที่คอนกรีตควบคุมมีค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวมากกว่าร้อยละ 0.030²ในกรณีที่คอนกรีตควบคุมมีค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวน้อยกว่าร้อยละ 0.030

ตารางที่ 4.2
รายละเอียดอัตราส่วนการผสมน้ำสลัดจ์ของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์

หมายเลข ตัวอย่าง	ร้อยละของ ค่าปริมาณของแข็ง ทั้งหมดในน้ำผสม	อัตราส่วนร้อยละ ของน้ำสลัดจ์ ในน้ำที่ผสม	จำนวน ตัวอย่าง
1	0.00 ¹	0	3
2	0.50 ²	100	3
3	2.50	50	3
4	2.50	100	3
5	5.00	50	3
6	5.00	100	3
7	7.50	50	3
8	7.50	100	3
9	10.00	50	3
10	10.00	100	3
11	12.50	50	3
12	12.50	100	3
13	15.00	50	3
14	15.00	100	3
		รวม	42

หมายเหตุ ¹ เป็นตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ผสมด้วยน้ำประปาและเป็นตัวอย่างควบคุม

² เป็นค่าที่แสดงเป็นค่าโดยประมาณของน้ำสลัดจ์ส่วนที่ใส

4.3.3 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมด้วยน้ำสลัดจ์

การทดสอบคอนกรีตผสมด้วยน้ำสลัดจ์เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาถึงผลกระทบจากการใช้น้ำสลัดจ์ผสมคอนกรีต โดยเฉพาะคอนกรีตผสมสารผสมเพิ่มซึ่งเป็นหัวข้อของงานวิจัย ตัวอย่างน้ำสลัดจ์ที่ใช้ผสมคอนกรีตเป็นน้ำสลัดจ์ที่มีค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่เลือกจากการทดสอบ

ซีเมนต์เพสต์ผสมด้วยน้ำสลัดจ์ ซึ่งสารผสมเพิ่มของแต่ละโรงงานประกอบด้วยเถ้าลอยและสารลดน้ำระดับสูง (ASTM C494 ชนิด F) สำหรับการทดสอบน้ำสลัดจ์จากศูนย์นิคมอุตสาหกรรมอิตาเลียนไทย สารกันซึมแบบลดน้ำ (ASTM C494 ชนิด A) สำหรับการทดสอบน้ำสลัดจ์จากบริษัทเอเชียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัด และสารลดน้ำและหน่วงการก่อตัว (ASTM C494 ชนิด D) สำหรับการทดสอบน้ำสลัดจ์จากบริษัททีพีไอ คอนกรีต จำกัด รายละเอียดของชุดตัวอย่างทดสอบของศูนย์นิคมอุตสาหกรรมอิตาเลียนไทย บริษัทเอเชียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัดและบริษัททีพีไอ คอนกรีต จำกัดแสดงได้ดังตารางที่ 4.3 ถึง 4.5 ตามลำดับ

จากตารางแสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 โรงงานพบว่าตัวอย่างคอนกรีตของแต่ละโรงงานประกอบด้วยตัวอย่าง 4 ชนิดคือคอนกรีตไม่ผสมสารผสมเพิ่มผสมด้วยน้ำประปา ใช้เป็นตัวอย่างควบคุม คอนกรีตผสมสารผสมเพิ่มผสมด้วยน้ำประปา คอนกรีตไม่ผสมสารผสมเพิ่มผสมด้วยน้ำสลัดจ์และคอนกรีตผสมสารผสมเพิ่มผสมด้วยน้ำสลัดจ์ ช่วงของการทดสอบมีทั้งหมด 3 ช่วง ซึ่งช่วงแรกจะมีการทดสอบคอนกรีตทั้ง 4 ชนิด ส่วนช่วงที่ 2 และ 3 เป็นการทดสอบซ้ำเฉพาะคอนกรีตผสมสารผสมเพิ่มผสมด้วยน้ำสลัดจ์ โดยการเปรียบเทียบผลการทดสอบจะประกอบด้วย 2 รูปแบบคือรูปแบบแรกเป็นการเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างควบคุมกับตัวอย่างคอนกรีตอื่นๆ โดยในส่วนคอนกรีตผสมสารเคมีผสมเพิ่มจะใช้เกณฑ์การเปรียบเทียบตามมาตรฐาน ASTM C494 แสดงดังตารางที่ 4.1 ส่วนรูปแบบที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบของคอนกรีตผสมสารผสมเพิ่มระหว่างผสมด้วยน้ำประปากับผสมด้วยน้ำสลัดจ์

คอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้มีค่าการยุบตัวอย่างในช่วงเดียวกันและมีปริมาณปูนซีเมนต์ในแต่ละชุดทดสอบเท่ากัน การที่กำหนดไว้เช่นนี้เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นของแต่ละชุดทดสอบ ซึ่งค่าการยุบตัวและปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมที่กำหนดเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับงานคอนกรีตทั่วไป โดยเป็นคอนกรีตกำลังปานกลางมีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันอยู่ในช่วง 300 ถึง 400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เกณฑ์ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตในงานวิจัยมีรายละเอียดดังนี้คือ

- ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ 350 กก./ลบ.ม.
- ค่าการยุบตัวของคอนกรีตอยู่ในช่วง 10 ± 2.5 เซนติเมตร
- อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น (γ) เท่ากับ 1.3
- อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบเท่ากับ 0.425
- สารผสมเพิ่มชนิดเถ้าลอยจะใช้การแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 20
- อัตราส่วนการใช้สารเคมีผสมเพิ่มจะใช้ตามที่แนะนำโดยผู้ผลิต

ตารางที่ 4.3

รายละเอียดของชุดตัวอย่างคอนกรีตของศูนย์นิคมอุตสาหกรรมอิตาเลียนไทย

รายการ	ช่วงของการทดสอบ									
	ช่วงที่ 1						ช่วงที่ 2		ช่วงที่ 3	
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ชุดที่ 4	ชุดที่ 5	ชุดที่ 6	ชุดที่ 7	ชุดที่ 8	ชุดที่ 9	ชุดที่ 10
ปูนซีเมนต์	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
มวลรวมละเอียด	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
มวลรวมหยาบ	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
น้ำประปา	X	X	X							
น้ำสลัดจ์				X	X	X	X	X	X	X
เถ้าลอย		X			X		X		X	
สารลดน้ำระดับสูง			X			X		X		X

X แสดงถึงวัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตในแต่ละชุดทดสอบ

ตารางที่ 4.4

รายละเอียดของชุดตัวอย่างคอนกรีตของบริษัทเอเชียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัด

รายการ	ช่วงของการทดสอบ					
	ช่วงที่ 1				ช่วงที่ 2	ช่วงที่ 3
	ชุดที่ 11	ชุดที่ 12	ชุดที่ 13	ชุดที่ 14	ชุดที่ 15	ชุดที่ 16
ปูนซีเมนต์	X	X	X	X	X	X
มวลรวมละเอียด	X	X	X	X	X	X
มวลรวมหยาบ	X	X	X	X	X	X
น้ำประปา	X	X				
น้ำสลัดจ์			X	X	X	X
สารกันซึม แบบลดน้ำ		X		X	X	X

X แสดงถึงวัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตในแต่ละชุดทดสอบ

ตารางที่ 4.5

รายละเอียดของชุดตัวอย่างคอนกรีตของบริษัทพีไอ คอนกรีต จำกัด

รายการ	ช่วงของการทดสอบ					
	ช่วงที่ 1				ช่วงที่ 2	ช่วงที่ 3
	ชุดที่ 17	ชุดที่ 18	ชุดที่ 19	ชุดที่ 20	ชุดที่ 21	ชุดที่ 22
ปูนซีเมนต์	X	X	X	X	X	X
มวลรวมละเอียด	X	X	X	X	X	X
มวลรวมหยาบ	X	X	X	X	X	X
น้ำประปา	X	X				
น้ำสลัดจ์			X	X	X	X
สารลดน้ำและ หน่วงการก่อตัว		X		X	X	X

X แสดงถึงวัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตในแต่ละชุดทดสอบ

4.3.3.1 ขั้นตอนการทดสอบคอนกรีตผสมด้วยน้ำสลัดจ์

การผสมคอนกรีตจะดำเนินการที่โรงงานผลิตคอนกรีตแบ่งออกเป็น 3 ช่วง โดยช่วงแรก จะทำการทดสอบประกอบด้วยคอนกรีต 4 ชนิดคือคอนกรีตไม่ผสมสารผสมเพิ่มผสมด้วยน้ำประปาใช้เป็นตัวอย่างควบคุม คอนกรีตผสมสารผสมเพิ่มผสมด้วยน้ำประปา คอนกรีตไม่ผสมสารผสมเพิ่มผสมด้วยน้ำสลัดจ์และคอนกรีตผสมสารผสมเพิ่มผสมด้วยน้ำสลัดจ์ และ 2 ช่วงหลัง จะทดสอบซ้ำเฉพาะคอนกรีตผสมสารผสมเพิ่มผสมด้วยน้ำสลัดจ์ การทดสอบประกอบด้วย การทดสอบในช่วงก่อนคอนกรีตแข็งตัวและการทดสอบหลังช่วงคอนกรีตแข็งตัว มีรายละเอียดของการทดสอบดังนี้

1) ทำการเตรียมตัวอย่างน้ำสลัดจ์ โดยการร่อนแยกเอามวลรวมออกและผสมน้ำสลัดจ์ ให้ได้ความเข้มข้นหรือค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่กำหนดไว้ โดยใช้ข้อมูลของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะและค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดของน้ำสลัดจ์จากการทดสอบซีเมนต์เพสต์ผสมด้วยน้ำสลัดจ์

2) ทำการทดสอบตัวอย่างน้ำสลัดจ์ก่อนการผสมคอนกรีตด้วยการผสมเป็นซีเมนต์เพสต์ การทดสอบประกอบด้วยกำลังอัดที่อายุ 1 วันและค่าระยะเวลาการก่อตัว ผลการทดสอบ

เทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ผสมด้วยน้ำประปา โดยใช้เกณฑ์ตามมาตรฐาน ASTM C94 แสดงดังตารางที่ 3.3 ในการเปรียบเทียบผล

3) ตัวอย่างน้ำสลัดจ์ที่ผ่านเกณฑ์การทดสอบของมาตรฐาน ASTM C94 จะใช้ในการผสมคอนกรีต โดยใช้เงื่อนไขการออกแบบคอนกรีตแสดงในหัวข้อที่ 4.3.3 และรายละเอียดส่วนผสมคอนกรีตตามตารางที่ 4.3 ถึง 4.5 ตามลำดับ ซึ่งตัวอย่างน้ำสลัดจ์ที่ใช้ผสมคอนกรีตบางส่วนจะถูกส่งไปทดสอบหาค่าปริมาณสารเคมี มีรายละเอียดตามหัวข้อ 4.3.1.4

4) หลังจากผสมคอนกรีตให้มีค่าการยุบตัวอยู่ในช่วง 7.50 ถึง 12.50 เซนติเมตร ทำการทดสอบในช่วงก่อนคอนกรีตแข็งตัว มีรายละเอียดการทดสอบคือ

- หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตและปริมาณอากาศในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C138
- ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C143
- ระยะเวลาในการก่อตัวของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C403

5) ทำการทดสอบในช่วงหลังคอนกรีตแข็งตัว มีรายละเอียดการทดสอบคือ

- กำลังอัดที่อายุ 1, 3, 7, 28, 56 และ 91 วันตามมาตรฐาน ASTM C39
- กำลังดัดที่อายุ 1, 3, 7, 28, 56 และ 91 วันตามมาตรฐาน ASTM C78
- การเปลี่ยนแปลงความยาวของแท่งคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C494
- การซึมผ่านได้ของน้ำของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ตามมาตรฐาน JIS A1404
- การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเนื่องจากการแช่กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักที่อายุ 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน
- การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเนื่องจากการแช่สารละลายไฮเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักที่อายุ 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน

6) ทำการทดสอบคอนกรีตผสมด้วยน้ำสลัดจ์ซ้ำในช่วงที่ 2 และ 3 ตามขั้นตอนการทดสอบตั้งแต่ข้อ 1 ถึงข้อ 5 ตามลำดับ โดยมีระยะห่างของเวลาการทดสอบในแต่ละช่วงประมาณ 1 เดือน