บทที่ 6

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการศึกษา

6.1.1 คุณสมบัติของผงฝุ่นทรายไส้แบบ

1. ผงฝุ่นทรายไส้แบบ (Foundry Sand Powder) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการกระบวนหล่อชิ้นส่วนเครื่องยนต์ของบริษัท สยามโตโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด จังหวัดชลบุรี แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่คือ ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW) ที่ได้จากกระบวนการทำแบบหล่อภายนอก และจากกระบวนการทำแบบหล่อภายในได้ผงฝุ่นทรายกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ถึงร้อยละ 83 ถึง 90 ในขณะที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW มีปริมาณร้อยละ 70 ถึง 77 นอกจากนั้นผงฝุ่นทรายไส้แบบมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และจากการวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction ตามลำดับ พบว่าผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW มีสารประกอบของไอรอนออกไซด์และเหล็กเพิ่มเติม

2. อนุภาคของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW มีสีเทาน้ำตาลและพื้นผิวขรุขระ ในขณะที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW มีสีคล้ำจนถึงเป็นสีทรายไหม้และพื้นผิวมีความขรุขระ นอกจากนั้นผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW และ GSW มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 102.85 และ 165.41 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (63.44 ไมโครเมตร)

3. ศักยภาพของผงฝุ่นทรายไส้แบบทางด้านซีเมนต์เมื่อนำมาใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ต-แลนด์ประเภทที่ 1 จากค่าดัชนีกำลัง (Strength Index) โดยผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW มีค่าร้อยละ 78 และกลุ่ม GSW มีค่าร้อยละ 55 ที่อายุ 7 วัน ในขณะที่อายุ 28 วัน ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW มีค่าร้อยละ 82 และผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW มีค่าร้อยละ 60 และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกันเกณฑ์มาตรฐานของสารปอซโซลานมาใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ASTM C 618 (Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete)) ได้ว่าผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ซึ่งมีแนวโน้มที่สามารถนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้ ในขณะที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ที่ไม่ผ่าน

ข้อกำหนดได้ปรับมาใช้ในการแทนที่ในมวลรวมละเอียด (ทรายธรรมชาติหรือทรายแม่น้ำ) ไม่เกินร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก

6.1.2 คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบในสภาพสด

1. หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตในสภาพสด (Unit Weight) โดยคอนกรีตผสมเสร็จที่มีส่วนผสมของผงทรายไส้แบบกลุ่ม SSW มีค่าหน่วยน้ำหนักที่ทุกๆ สัดส่วนของปริมาณปูนซีเมนต์ (300, 350 และ 400 กก./ม.^{3}) น้อยกว่าคอนกรีตปกติและมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ในขณะที่การแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติทำให้หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตในสภาพสดเพิ่มขึ้น

2. ปริมาณน้ำที่ทำให้เกิดค่าการยุบตัว (Water Requirement) ของคอนกรีตผสมเสร็จซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าความต้องการน้ำที่ทำให้เกิดค่าการยุบตัวเริ่มต้นลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ ในขณะที่การแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติทำให้ค่าความต้องการน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบในทรายธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น

3. ค่าการยุบตัวเริ่มต้นและการสูญเสียค่าการยุบตัว (Initial Slump and Slump Loss) โดยคอนกรีตซึ่งผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบทั้งกลุ่ม SSW และ GSW มีระยะเวลาของการสูญเสียค่าการยุบตัวมากกว่าคอนกรีตปกติ

4. ระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time) ของคอนกรีตเสร็จและผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW และ GSW มีระยะเวลาการก่อตัวทั้งเริ่มต้นและสุดท้ายเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติและมีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามสัดส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และในทรายธรรมชาติที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ

6.1.3 คุณสมบัติของทางกลคอนกรีตผสมเสร็จที่ผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบ

1. กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเสร็จ (Compressive Strength) โดยคอนกรีตที่ทุกๆ ค่าการยุบตัวเริ่มต้น (5 ± 0.5, 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 เซนติเมตร) และปริมาณปูนซีเมนต์ (300, 350 และ 400 กก./ม.^{3}) และทุกอายุมีกำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่ออายุของคอนกรีตภายใต้การบ่มในน้ำเพิ่มขึ้นทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง

คอนกรีตซึ่งมีร้อยละการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบเท่ากับร้อยละ 40 ที่อายุ 180 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 81 ของคอนกรีตปกติซึ่งเพิ่มขึ้นมากกว่าคอนกรีตที่อายุ 3 ถึงร้อยละ 50

สำหรับคอนกรีตผสมเสร็จซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0 (ทรายธรรมชาติ), 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก พบว่าการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW มีผลทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติและสัดส่วนของผงฝุ่นทรายไส้แบบในคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น โดยการลดลงของกำลังรับแรงอัดดังกล่าวมีความแตกต่างจากคอนกรีตปกติมากในช่วงแรก ในขณะที่ช่วงหลังมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีต

2. กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting Tensile Strength) ของคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW มีแนวโน้มการลดลงของกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกมีลักษณะเดียวกันกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต เมื่ออัตราส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าเพิ่มขึ้น และสำหรับคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติ พบว่าเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบในทรายธรรมชาติเพิ่มขึ้นทำให้กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตมีค่าลดลงมาก

3. โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) โดยเมื่อร้อยละของการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าลดลง ในขณะที่การแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติ มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนของผงฝุ่นทรายไส้แบบมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นคอนกรีตผสมเสร็จทั้งคอนกรีตปกติและที่ผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบส่วนใหญ่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ 28 วัน สูงกว่าที่มาตรฐาน ACI 318 – 2002 (Building Code Requirements for Structural Concrete) ในขณะคอนกรีตที่มีสัดส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบบางส่วนมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานเล็กน้อย

6.1.4 คุณสมบัติของทางด้านความทนทานคอนกรีตผสมเสร็จที่ผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบ

1. การขยายตัวในน้ำ (Expansion in Water) คอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าการขยายตัวในน้ำจนถึงอายุ 28 วัน มีค่าลดลง ในขณะที่เมื่อร้อยละการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ค่าการขยายตัวของคอนกรีตจนถึงอายุ 28 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นจากคอนกรีตปกติเล็กน้อย

2. การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) ในรูปของการเปลี่ยนแปลงความยาวของคอนกรีต (Length Change) พบว่าสำหรับการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW มีแนวโน้มของค่าการหดตัวน้อยกว่าคอนกรีตปกติ ในขณะที่การหดตัวแบบของคอนกรีตปกติ

เปรียบเทียบกับคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติ โดยในทุกๆ อัตราส่วนของคอนกรีตมีค่าการหดตัวแบบแห้งเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงในช่วง 30 วันแรก และมีค่าลดลงตามลำดับเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นเมื่ออัตราส่วนการแทนของผงฝุ่นทรายไส้แบบในทรายธรรมชาติเพิ่มขึ้นทำให้การหดตัวแบบแห่งมีค่าเพิ่มขึ้น

3. ความต้านทานต่อการกระทำเนื่องจากซัลเฟต (Sulfate Resistance) โดยคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าการขยายตัวเนื่องจากสารละลายโซเดียม (Na_2SO_4) ซัลเฟตน้อยกว่าคอนกรีตปกติ และการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนปริมาณผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติมีผลทำให้การขยายตัวเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่าเพิ่มขึ้น

4. ความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟุริก (H_2SO_4) และกรดอะซิติก (CH_3COOH) โดยคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW หรือทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติมีค่าการสูญเสียน้ำหนักที่อายุต่างๆ น้อยกว่าคอนกรีตปกติ

6.1.5 การนำผงฝุ่นทรายไส้แบบมาใช้เป็นวัตถุดิบของคอนกรีตผสมเสร็จ

จากผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางกายภาพของผงฝุ่นทรายไส้แบบ และคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จ ทั้งในสภาวะสด คุณสมบัติทางกลและความทนทาน โดยนำผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) และผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม **G**reen **S**and and Molding **W**aste (GSW) มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยคอนกรีตผสมเสร็จมีอยู่ภายใต้ขอบเขตของงานวิจัยนี้มีคุณสมบัติได้แก่ คอนกรีตปกติที่ไม่มีสารผสมเพิ่มเป็นส่วนประกอบปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีตหนึ่งลูกบาศก์เมตร เท่ากับ 300, 350 และ 400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ และมีค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) ของคอนกรีตเท่ากับ 5 ± 0.5, 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 เซนติเมตร ตามลำดับ ได้ข้อสรุปดังต่อไปนี้

1. ในกรณีของการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ตราภูเขา) เมื่อพิจารณาจากเกณฑ์ที่ใช้งานด้านกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน เทียบเคียงกับมาตรฐานASTM C 618 (Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete) ซึ่งควรจะทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรง***ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75*** เมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ ดังนั้นอัตราส่วนร้อยละการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงไม่เกิน***ร้อยละ 20*** โดยน้ำหนัก

2. สำหรับการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติ เมื่อพิจารณาการใช้งานในส่วนของกำลังอัดเป็นสำคัญและหลักเกณฑ์เช่นเดียวกัน ดังนั้นอัตราส่วนร้อยละการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบในทรายธรรมชาติจึงไม่ควรเกิน***ร้อยละ 5*** โดยน้ำหนัก

3. เนื่องจากการใช้ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW มีผลทำให้กำลังดึงของคอนกรีตไม่ลดลงมาก ดังนั้นจึงอนุโลมให้ใช้เป็นวัตถุดิบผลิตคอนกรีตผสมเสร็จสำหรับโครงสร้างซึ่งทำหน้าที่รับแรงดึงเป็นสำคัญได้ถึง***ร้อยละ 30*** ในขณะที่คอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ไม่แนะนำให้ใช้ เนื่องจากผลกระทบของการใช้ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ผสมคอนกรีตทำให้กำลังดึงลดลงมาก

4. สำหรับปริมาณการใช้ผงฝุ่นทรายไส้แบบเป็นวัตถุดิบในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จสามารถพิจารณาเปรียบเทียบได้กับการใช้เถ้าลอยซึ่งใช้กันเป็นประจำในโรงงานผลิต โดยมีอัตราส่วนการแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งในปัจจุบันทางบริษัทมีอัตราการใช้เถ้าลอยอยู่ที่ประมาณ ***200 ตันต่อวัน***

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จ โดยทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และทำการแทนที่กลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติ ซึ่งใช้คอนกรีตผสมเสร็จประเภทปกติที่ไม่มีการผสมสารผสมเพิ่ม (Admixture) ดังนั้นจึงควรศึกษาผลกระทบของสารผสมเพิ่มอาทิเช่น สารลดน้ำอย่างแรง (Superplastizer) และสารหน่วงการก่อตัว (Retarder) ที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบ ทั้งนี้เพราะโดยทั่วไปในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จในปัจจุบันจะต้องใส่สารผสมเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีต

2. ในกรณีของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ซึ่งทำการแทนที่ในทรายธรรมชาติที่กำหนดไว้ในขอบเขตการศึกษาที่เท่ากับร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก อันเนื่องมาจากข้อจำกัดในเรื่องขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33 แต่จากผลการทดสอบ พบว่าผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ไม่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมาก ดังนั้นจึงควรศึกษาในกรณีที่เมื่ออัตราส่วนการแทนที่เพิ่มขึ้นไปจนกระทั่งใช้ผงฝุ่นทรายไส้แบบเพื่อทดแทนทรายธรรมชาติ

3. ในส่วนของคุณสมบัติทางด้านความทนทาน โดยจะเห็นว่าผงฝุ่นทรายไส้แบบเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรม ดังนั้นการศึกษาในเรื่องการสะสมสารพิษที่ตกค้างจึงเป็นประเด็นที่ควรพิจารณาเพิ่มเติมถึงแม้ว่าจะมีผลการทดสอบว่าผงฝุ่นทรายไส้แบบมีปริมาณสารพิษตกค้างไม่เกินกว่าค่าที่กำหนดของกระทรวงอุตสาหกรรม (ตารางที่ 2.1) โดยทำการศึกษาคุณสมบัติอาทิเช่น การชะล้าง (Leachate) ของสารพิษในระยะยาวประกอบด้วย เป็นต้น