



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การนำทรายทิ้งจากโรงงานผลิตเครื่องยนต์มาใช้เป็นส่วนประกอบของคอนกรีต”

โดย รองศาสตราจารย์ ดร. บุรณัฏฐ์ ฉัตรวีระ และคณะ

มกราคม พ.ศ. 2547

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การนำทรายทิ้งจากโรงงานผลิตเครื่องยนต์มาใช้เป็นส่วนประกอบของคอนกรีต”

คณะผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. บุรฉัตร ฉัตรวีระ

ณรงค์ศักดิ์ มากุล

สังกัด

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ชุดโครงการ สนับสนุนผู้ปฏิบัติการวิจัยในภาคอุตสาหกรรม (IRAS)

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานผลการวิจัยเป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

ของคอนกรีตผสมผงปูนทรายได้แบบมีการพัฒนามากขึ้นเมื่ออายุของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวและระยะเวลาการก่อตัวมีค่าเพิ่มขึ้น

สำหรับคอนกรีตผสมผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW มีค่าความต้องการน้ำที่ทำให้เกิดค่ายุบตัวเริ่มต้นตามที่กำหนด หน่วยงานน้ำหนักของคอนกรีตในสภาพสด การสูญเสียค่าการยุบตัว การขยายตัวในน้ำ การหดตัวแบบแห้งและการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตเพิ่มขึ้น ในขณะที่กำลังรับแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีก โมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน และร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดมียาลดลง เมื่อสัดส่วนของผงปูนทรายได้แบบในทรายธรรมชาติมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันลดลงร้อยละ 1 ถึง 39 ขึ้นอยู่กับปัจจัยเดียวกันกับคอนกรีตผสมผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม SSW

จากผลการทดสอบสรุปว่า สามารถใช้ผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพื่อผลิตคอนกรีตผสมเสร็จได้ถึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ซึ่งขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ในขณะที่สามารถนำผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW มาแทนที่ในทรายธรรมชาติโดยน้ำหนัก ได้ถึงร้อยละ 15 โดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จ

Executive Summary

ในอดีตวิธีการกำจัดผงฝุ่นทรายไส้แบบ (Foundry Sand Powder) ที่เป็นพลอยได้จากกระบวนการหล่อชิ้นส่วนเครื่องยนต์ของบริษัท สยามโตโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด ได้นำไปทำการถมที่ (Landfill) ผ่านบริษัทที่รับกำจัดเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งโดยรวมแล้วการกำจัดด้วยวิธีดังกล่าวไม่ได้ก่อให้เกิดประโยชน์เท่าที่ควรและอาจก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากของเสียที่สารพิษที่สะสมในธรรมชาติ ดังนั้นในปัจจุบันทางบริษัทได้หันมาทำการกำจัดผ่านบริษัทผลิตปูนซีเมนต์ที่นำไปกำจัดด้วยการนำไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตปูนซีเมนต์ แต่กระนั้นทางบริษัท สยามโตโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด ก็ยังต้องต้องเสียค่าใช้จ่ายสำหรับกำจัดอยู่เช่นเดิม (โดยเฉลี่ยประมาณตันละพันกว่าบาท) จึงได้เกิดทางเลือกใหม่ในการนำผงฝุ่นทรายไส้แบบกลับมาใช้เป็นส่วนประกอบของคอนกรีตผสมเสร็จแล้วทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตดีขึ้น โดยปริมาณเฉลี่ยของผงฝุ่นทรายไส้แบบที่ 250 ตันต่อเดือนในปี พ.ศ. 2546 ทำให้ทางบริษัท เอเชียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัด ซึ่งผลิตคอนกรีตผสมเสร็จที่สนใจในการนำพลอยได้ดังกล่าวมาใช้งานในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยจากการศึกษาวิจัยได้ผลว่าสามารถใช้ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW) ที่ได้จากกระบวนการทำแบบหล่อภายนอกแทนที่ในทรายธรรมชาติได้ถึงร้อยละ 15 และใช้ผงฝุ่นทรายกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) จากการทำแบบหล่อภายในแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้ถึงร้อยละ 30 และสามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านความทนทานได้

จากผลดังกล่าวทำให้ทางบริษัทผลิตคอนกรีตผสมเสร็จสามารถนำผงฝุ่นทรายไส้แบบไปใช้เป็นวัสดุใหม่ นอกเหนือจากจากที่ใช้เถ้าลอย (Fly Ash) กับการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ เนื่องจากข้อได้เปรียบหลายประการที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบเป็นวัตถุดิบที่ปราศจากมูลค่าสำหรับการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ ประกอบกับแหล่งของผงฝุ่นทรายไส้แบบที่อยู่นิคมอุตสาหกรรมอมตะนคร จังหวัดชลบุรี ซึ่งมีระยะทางที่ใกล้กว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งของเถ้าลอยที่อยู่จังหวัดลำปาง ทำให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งวัตถุดิบถูกลงมากและสามารถนำมาใช้ทดแทนเถ้าลอยได้ในช่วงเวลาที่ทั้งปริมาณเถ้าลอยขาดตลาดและจะเห็นว่าปัจจุบันราคาของเถ้าลอยพุ่งสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในขณะเดียวกันผลที่ได้รับกับบริษัท สยามโตโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด คือ สามารถกำจัดผงฝุ่นทรายไส้แบบได้อย่างต่อเนื่องและยั่งยืน อีกทั้งสามารถลดค่ากำจัดได้อีกทางหนึ่ง นอกจากนั้นการนำร่องในเรื่องของการใช้ผงฝุ่นทรายไส้แบบในงานคอนกรีตผสมเสร็จยังทำให้เป็นเหตุจูงใจให้อุตสาหกรรมที่มีพลอยได้ในลักษณะเดียวกันและกำลังเป็นปัญหาหันกลับมาใช้วิธีกำจัดเดียวกัน อันเป็นการส่งเสริมการแก้ปัญหาทั้งระบบที่มีความยั่งยืนและเบ็ดเสร็จ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบ (Foundry Sand Powder) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการกระบวนการหล่อขึ้นส่วนเครื่องยนต์ของบริษัทสยามโตโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด จังหวัดชลบุรี โดยผงฝุ่นทรายที่ทำการศึกษามี 2 กลุ่มคือ ผงฝุ่นทรายกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW) ที่ได้จากการกระบวนการทำแบบหล่อภายนอก และจากการทำแบบหล่อภายใน ได้ผงฝุ่นทรายกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) คุณสมบัติที่ทำการทดสอบประกอบด้วย องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของผงฝุ่นทรายไส้แบบ คุณสมบัติของคอนกรีตสด ได้แก่ ค่าความต้องการน้ำที่ทำให้คอนกรีตมีค่าการยุบตัวเริ่มต้นตามที่กำหนด การสูญเสียค่าการยุบตัว หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตในสภาวะสด และระยะเวลาในการก่อตัว คุณสมบัติทางกลของคอนกรีต ได้แก่ กำลังรับแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีก และโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน ส่วนคุณสมบัติทางด้านความทนทานของคอนกรีตประกอบด้วย การขยายตัวในน้ำ การหดตัวแบบแห้ง ความทนทานต่อการสลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในรูปของการยืดและ/หรือหดตัว และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และอะซิติก (CH_3COOH) ซึ่งกำหนดความเข้มข้นเท่ากับ 1 นอร์มอลิตี (N) โดยมีตัวแปรหลักได้แก่ ปริมาณการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ส่วนผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ถูกนำมาใช้แทนที่ในทรายธรรมชาติที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จเป็นคอนกรีตปกติและไม่มีส่วนประกอบของสารผสมเพิ่ม รวมทั้งกำหนดปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีตหนึ่งลูกบาศก์เมตรเท่ากับ 300, 350 และ 400 กิโลกรัม และค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 เซนติเมตร ตามลำดับ จากการทดสอบ พบว่าความต้องการน้ำที่ทำให้คอนกรีตเกิดค่ายุบตัวเริ่มต้นตามที่กำหนด หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตในสภาวะสด กำลังรับแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีก โมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน การขยายตัวในน้ำ การหดตัวแบบแห้ง การขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตของและความต้านทานต่อการกัดกร่อนในรูปของร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการดซัลฟิวริกและอะซิติกของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW มีค่าลดลง เมื่อสัดส่วนการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าเพิ่มขึ้น โดยคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบมีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ลดลงร้อยละ 4 ถึง 49 ของคอนกรีตปกติซึ่งขึ้นอยู่กับสัดส่วนของคอนกรีตและร้อยละการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบ แต่กระนั้นค่ากำลังรับแรงอัด

ของคอนกรีตผสมผงปูนทรายไส้แบบมีการพัฒนามากขึ้นเมื่ออายุของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวและระยะเวลาการก่อตัวมีค่าเพิ่มขึ้น

สำหรับคอนกรีตผสมผงปูนทรายไส้แบบกลุ่ม GSW มีค่าความต้องการน้ำที่ทำให้เกิดค่ายุบตัวเริ่มต้นตามที่กำหนด หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตในสภาพสด การสูญเสียค่าการยุบตัว การขยายตัวในน้ำ การหดตัวแบบแห้งและการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตเพิ่มขึ้น ในขณะที่กำลังรับแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีก โมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน และร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกีดกร่อนของกรดมีค่าลดลง เมื่อสัดส่วนของผงปูนทรายไส้แบบในทรายธรรมชาติมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันลดลงร้อยละ 1 ถึง 39 ขึ้นอยู่กับปัจจัยเดียวกันกับคอนกรีตผสมผงปูนทรายไส้แบบกลุ่ม SSW

จากผลการทดสอบสรุปว่า สามารถใช้ผงปูนทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพื่อผลิตคอนกรีตผสมเสร็จได้ถึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ซึ่งขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ในขณะที่สามารถนำผงปูนทรายไส้แบบกลุ่ม GSW มาแทนที่ในทรายธรรมชาติโดยน้ำหนัก ได้ถึงร้อยละ 15 โดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จ

Abstract

The objective of this research was to study the properties of ready-mixed concrete containing foundry sand powder which was a main by-product from car engine casting process of Siam Toyota Manufacturing Co., Ltd. in Chonburi province. Two groups of foundry sand powder were Green Sand and Molding Waste (GSW) and Shell Sand Waste (SSW) from outer- and inner-cast forming process respectively. The tested properties included chemical composition and physical properties of foundry sand powder. Fresh concrete tests were water requirement of concrete that giving the specified slump value, slump loss, unit weight in fresh state, and setting time. The mechanical properties, compressive and splitting tensile strengths and modulus of elasticity at 28 days, were involved. The durability properties of concrete were expansion in water, drying shrinkage, the resistance of sodium sulfate (Na_2SO_4) at a concentration equal to 5% was kept constantly during each test as expansion and/or shrinkage of concrete, and weight loss due to sulfuric (H_2SO_4) and acetic acid (CH_3COOH) attacks. The concentration of both acids was equal to 1.0 Normality (N). The main variables were the percentage replacements by weight of SSW foundry sand in ordinary Portland cement type I (0, 10, 20, 30, and 40) and the percentage replacements of GSW foundry sand by weight in natural sand were 0, 5, 10, and 15 respectively. Ready-mixed concrete properties were normal concrete and without chemical admixture. In addition to ordinary Portland cement type I contents were 300, 350, and 400 kg/m^3 and initial slumps of concrete equal to 5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 , and 15 ± 0.5 centimeter were controlled. The test results indicated that water requirement of concrete at specified slump value, unit weight in fresh state, compressive and splitting tensile strengths, modulus of elasticity at 28 days, expansion in water, drying shrinkage, and expansion in sulfate solution of concrete containing SSW foundry sand, and the resistance due to sulfuric and acetic acids attacks as the percentage of weight loss decreased when the percent replacements of SSW foundry sand in ordinary Portland cement type I increased. The compressive strengths at 28 days of concrete mixed SSW foundry sand was lower than those of the conventional concrete in the range of 4% – 49% that was depended on the mix proportion of concrete and percent replacements of SSW foundry sand while the compressive

strength of SSW foundry sand concrete has developed when the time is increased. Whereas, slump loss and setting time of concrete increased.

For the properties of concrete containing GSW foundry sand, water requirement of concrete at specified slump value unit weight, slump loss, expansion in water, drying shrinkage, and expansion in sulfate solution increased whereas, compressive and splitting tensile strengths, modulus of elasticity at 28 days, and the percentage of weight loss decreased when the proportioning of GSW foundry sand has increased. The 28 days compressive strengths of concrete containing GSW foundry sand at were lower than those of the normal concrete in the range of 1% – 39%, which has also depended on the same factors on the concrete containing SSW foundry sand.

From the tested results, it can be concluded that using SSW foundry sand as ordinary Portland cement type I replacement by weight for producing ready-mixed concrete up to 30% depended on the purpose of utilizing. Whereas, using of GSW foundry sand replaced in natural sand by weight up to 15% which has not affected to the properties of ready-mixed concrete.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงด้วยดี คณะผู้วิจัยซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. บุรฉัตร ฉัตร-
วีระ และนายณรงค์ศักดิ์ มากุล ใคร่ขอขอบพระคุณผู้ให้การสนับสนุนดังรายนามต่อไปนี้ สำนักงาน
กองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยภายใต้สัญญาเลขที่ RGD4650019 โดย
เฉพาะศาสตราจารย์ ดร. ปิยะวัติ บุญหลง (ผู้อำนวยการ สกว.) รองศาสตราจารย์ ดร. สุธีระ
ประเสริฐสรรพ (ผู้อำนวยการสกว. ฝ่าย 5) คุณวิชากร จามิกร และคุณชนพงศ์ กลั่นอุทัย ผู้ประสาน
งานชุดโครงการสนับสนุนผู้ปฏิบัติการวิจัยในภาคอุตสาหกรรม (IRAS) และเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง
ทุกท่าน นอกจากนั้นมีฝ่ายอุตสาหกรรมที่เข้าร่วมโครงการและให้การสนับสนุนเป็นอย่างดีตั้งแต่
บริษัท สยามโตโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด โดยคุณมิโนรุ โยชิเคะ (กรรมการผู้จัดการ) คุณบันชัย จัน
ทชีวกุล (ผู้จัดการฝ่ายผลิตเหล็กหล่อ) และบริษัท เอเชียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัด โดยคุณโตเกียรติ ภา
อาภรณ์ (กรรมการผู้จัดการ) คุณวีระศักดิ์ ทองทา (ผู้จัดการฝ่ายควบคุมคุณภาพ) คุณธนกร ธนุสร
(หัวหน้าห้องปฏิบัติการ) และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทุกคน สำหรับความช่วยเหลือและกำลังใจใน
การทำวิจัยที่โรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ (คอนเมือง)

ท้ายสุดทางคณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้มีส่วนช่วยอื่นๆ ที่ทำให้งานวิจัยครั้งนี้เดินนำมาโดย
ตลอดจนประสบความสำเร็จทุกท่าน หากมีท่านใดที่ไม่ได้เอ่ยนามไว้ ณ ที่นี้ ต้องกราบขออภัยเป็น
อย่างสูง

บุรฉัตร ฉัตรวีระ
ณรงค์ศักดิ์ มากุล
กุมภาพันธ์ 2547

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

สรุปโครงการวิจัยฝ่ายอุตสาหกรรม (ฝ่าย 5)

สัญญาเลขที่ RDG4650019

ชื่อโครงการ การนำทรายทิ้งจากโรงงานผลิตเครื่องยนต์มาใช้เป็นส่วนประกอบของคอนกรีต

หัวหน้าโครงการ รองศาสตราจารย์ ดร. บุรฉัตร ฉัตรวีระ, สถาบัน มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

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

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

ความสำคัญ / ความเป็นมา

ภาคอุตสาหกรรมนับเป็นส่วนประกอบหลักที่สร้างความเจริญให้กับประเทศไทย แต่ในขณะเดียวกันภาคอุตสาหกรรมก็เป็นส่วนที่ผลิตของเสียออกมาเป็นจำนวนมากซึ่งมีทั้งชนิดที่เป็นพิษและไม่เป็นพิษ อาทิเช่นอุตสาหกรรมการหล่อขึ้นส่วนเครื่องยนต์จะมีของเสียจากกระบวนการผลิตอยู่เป็นจำนวนมากซึ่งถ้าหากมีระบบการจัดการของเสียดังกล่าวไม่ดีพอก็จะทำให้เกิดปัญหาตามมาอย่างมาก เช่น มลพิษที่ด้านสิ่งแวดล้อม เป็นต้น ดังกรณีของบริษัท สยามโคโยต้าอุตสาหกรรม (จำกัด) ซึ่งเป็นบริษัทผลิตชิ้นส่วนรถยนต์รายใหญ่ของประเทศไทย โดยในปีๆ หนึ่งจะมีของเสียจากกระบวนการหล่อขึ้นส่วนหลายชนิดและมีปริมาณมากทำให้ทางบริษัทต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้นซึ่งมีขนาดตั้งแต่เป็นผงฝุ่น เช่น ผงฝุ่นทรายได้แบบ (Foundry Sand Powder) ฝุ่นเตาหลอม ผงเหล็ก จนถึงที่เป็นเม็ดขนาดใหญ่เช่น ถ้ำตะกรันจากเตาหลอม (Slag) เป็นต้น นับล้านบาท ในอดีตทางบริษัทได้จ้างบริษัทกำจัดกากของเสียซึ่งใช้วิธีการฝังกลบเป็นหลักและแม้จะมีผลการตรวจสอบสารพิษที่ตกค้างอยู่ก็ตามแต่กระนั้นก็ไม่สามารถรับประกันได้ว่าในอนาคตกากของเสียที่ฝังกลบจะส่งผลกระทบใดๆ ต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นในปัจจุบันทางบริษัทจึงหันมาใช้จัดการโดยนำของเสียโดยนำเข้าไปสู่กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ร่วมกับการฝังกลบในลักษณะของการถมที่ (Landfill) แต่พบว่าการนำของเสียไปใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ก็ยังคงต้องเสียค่าใช้จ่ายเช่นเดียวกัน อีกทั้งการถมที่ก็เป็นการแก้ปัญหาที่ปลายเหตุและไม่ได้ใช้ประโยชน์จากของเสียเหลือทิ้งเท่าที่ควร

ความสำคัญ / ความเป็นมา (ต่อ)

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงมีแนวคิดใหม่ในการนำของเสียจากกระบวนการผลิตมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดคือ การนำของเสียจากกระบวนการหล่อขึ้นส่วนรถยนต์มาใช้ในงานคอนกรีตซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพในการแปรเปลี่ยนของเสียหลายๆ ชนิด มาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้มากขึ้น เช่น เถ้าลอย (Fly Ash) จากโรงผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินลิกไนต์ เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) จากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าที่ใช้แกลบ เป็นเชื้อเพลิง เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้จะเริ่มจากกากของเสียที่มีปริมาณและศักยภาพในการใช้งานมากที่สุด ซึ่งก็คือ ผงฝุ่นทรายและขณะเดียวกันก็จะพิจารณาในส่วนของการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตควบคู่กันไป

วัตถุประสงค์โครงการ

1. เพื่อนำฝุ่นทรายซึ่งเป็นกากของเสียจากโรงงานผลิตขึ้นส่วนรถยนต์มาใช้ในอุตสาหกรรมผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ
2. พัฒนาบุคลากรวิจัยซึ่งเป็นักเรียนปริญญาโทให้มีทักษะและเข้าใจในการปฏิบัติงานวิจัยจริงในโรงงานอุตสาหกรรม

ผลที่ได้รับ	บรรลुวัตถุประสงค์ข้อที่	โดยทำให้
1. ทราบศักยภาพในการนำผงฝุ่นทราย ไล้แบบ (Dust Foundry Sand) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากโรงงานหล่อขึ้นส่วนรถยนต์มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ	1	1. สามารถเลือกชนิดและประเภทของผงฝุ่นทรายไล้แบบที่เหมาะสมมาใช้ในผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ
2. ทราบคุณสมบัติทางกลและความทนของคอนกรีตผสมเสร็จที่ผสมผงฝุ่นทรายไล้แบบ	1	2. สามารถใช้ผงฝุ่นทรายไล้แบบเป็นวัตถุดิบในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้คอนกรีตมีคุณสมบัติตามข้อกำหนด
3. สร้างบุคลากรวิจัยระดับปริญญาโทให้มีทักษะและเข้าใจในการปฏิบัติงานวิจัยจริง	2	3. มีบุคลากรวิจัยระดับปริญญาโท

การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

1. สามารถนำผงฝุ่นทรายใต้แบบจากโรงงานหล่อชิ้นส่วนเครื่องยนต์ทั้งชนิด Green Sand and Molding Waste (GSW) และ Shell Sand Waste (SSW) กลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ
2. สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จให้ดียิ่งขึ้น
3. สามารถลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์จากการแทนที่ Shell Sand Waste (SSW) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และแทนที่ Green Sand and Molding Waste (GSW) ในทรายธรรมชาติ อันเป็นการลดการใช้ทรัพยากรซึ่งได้แก่ หินปูนที่จะนำมาทำเป็นปูนซีเมนต์
4. เป็นการรักษาสภาพสิ่งแวดล้อมจากการนำ GSW และ SSW ไปใช้ในการถมที่เป็นส่วนใหญ่ อันอาจก่อให้เกิดสภาพเป็นพิษสะสมจากปริมาณสารที่ตกค้างอยู่
5. เผยแพร่เพื่อเป็นการกระตุ้นให้โรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ที่มีของเหลือทิ้งและไม่ได้ใช้ประโยชน์อยู่เป็นจำนวนมากให้หันกลับมาใช้ของเหลือทิ้งแทนการปล่อยให้อยู่ในสิ่งแวดล้อมโดยเปล่าประโยชน์

การประชาสัมพันธ์

การประชาสัมพันธ์จะกระทำได้ดังต่อไปนี้

1. จัดทำบทความเพื่อเผยแพร่การนำเสนอในการประชุมระดับประเทศอาทิเช่น การประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ การประชุมคอนกรีตแห่งชาติ ซึ่งโดยปกติผู้เข้าร่วมประชุมส่วนใหญ่จะเป็นนักวิชาการ โดยเฉพาะกับบริษัทผลิตคอนกรีตผสมเสร็จที่สามารถกระตุ้นให้เกิดการนำของเสียจากอุตสาหกรรมประเภทที่เกี่ยวกับการหล่อชิ้นส่วนโลหะหรือโลหะกลับมาใช้ผลิตคอนกรีต
2. จัดทำบทความเพื่อเผยแพร่ลงในวารสารทางด้านวิศวกรรมต่างๆ ไปเช่น วิศวกรรมสาร โยธาสาร เป็นต้น ซึ่งโดยปกติวารสารประเภทดังกล่าวจะมีผู้อ่านที่เป็นผู้ประกอบการ วิศวกร นักศึกษา ช่างเทคนิคและผู้สนใจ จากหลายๆ สาขาวิชาที่อาจเกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์จากงานวิจัยนี้ อันอาจจะทำให้การทำวิจัยต่อยอดจากโรงงานอื่นที่มีอุตสาหกรรมการหล่อชิ้นส่วนโลหะและโลหะแล้วมีผงฝุ่นทรายใต้แบบเกิดขึ้นและกำลังเป็นปัญหาในขณะนี้

หมายเหตุ การเผยแพร่และประชาสัมพันธ์ใดๆ ของงานวิจัย จะอยู่ภายใต้ข้อกำหนดในสัญญาเลขที่

RDG4650019 ข้อที่ 8 “ผู้วิจัยจะไม่เปิดเผยข้อมูลของโครงการไม่ว่าโดยการใดๆ อันจะเป็นผลให้ทรัพย์สินทางปัญญาไม่ได้รับความคุ้มครองก่อนได้รับอนุญาตจากผู้ให้ทุน”

ตารางเปรียบเทียบกิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการ

ชื่อโครงการ “การนำทรายทิ้งจากโรงงานผลิตเครื่องยนต์มาใช้เป็นส่วนประกอบของคอนกรีต”

กิจกรรม (ตามแผน)	ผลที่คาดว่าจะได้รับ (ตามแผน)	ผลการดำเนินงาน	หมายเหตุ
ในช่วง 6 เดือน แรก (1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2546 ถึง 31 กรกฎาคม พ.ศ. 2547)			
1. เตรียมวัสดุ 1.1 ผงฝุ่นทรายไส้แบบ 1.2 วัสดุสำหรับผลิต คอนกรีตผสมเสร็จ		1. สามารถขนย้ายและสุมตัวอย่างผงฝุ่น ทรายไส้แบบทั้งสองชนิด (Shell Sand Waste (SSW) และ Green Sand and Molding Waste (GSW) จาก โรงงาน หล่อชิ้นส่วนเครื่องยนต์ของบริษัท โตโย ต้าอุตสาหกรรม จำกัด จ.ชลบุรี มายัง บริษัท เอเชียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัด กรุงเทพมหานคร 2. ได้ดำเนินการสร้างบ่อบ่มคอนกรีตใน โรงงานของบริษัท เอเชียผลิตภัณฑ์ ซีเมนต์	
2. ส่งผงฝุ่นทรายไส้แบบ จาก โรงงาน และปูน ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ไปทดสอบ ทางกายภาพและเคมี	2. ได้ผลการทดสอบทาง เคมีและทางกายภาพของผง ฝุ่นทรายไส้แบบและปูน ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท ที่ 1	2.1 ทราบผลการทดสอบองค์ประกอบ ทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของ ผงฝุ่นทรายไส้แบบเปรียบเทียบกับปูน ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 2.2 กำหนดแผนเพิ่มเติมและดำเนินการ จัดส่งตัวอย่างผงฝุ่นทรายไส้แบบไป ทดสอบความแปรปรวนคุณสมบัติทุก 2 เดือน รวมทั้งสิ้น 6 ครั้ง ที่ โรงงานผลิต ปูนซีเมนต์ของปูนเอเชีย	
3. ทดสอบคุณสมบัติทาง กลเบื้องต้นของคอนกรีต ปกติและคอนกรีตผสมผง ฝุ่นทรายทิ้ง	3. ได้คุณสมบัติทางกลของ คอนกรีตเบื้องต้นของ คอนกรีตผสมผงฝุ่นทราย ไส้แบบ	3.1 ได้ทำการผสมตัวอย่างคอนกรีต ผสมเสร็จใน โรงงานผลิตเพื่อใช้ในการ ทดสอบจำนวน 4,248 ตัวอย่าง	

ตารางเปรียบเทียบกิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการ (ต่อ)

ชื่อโครงการ “การนำทรายทิ้งจากโรงงานผลิตเครื่องย่นต์มาใช้เป็นส่วนประกอบของคอนกรีต”

กิจกรรม (ตามแผน)	ผลที่คาดว่าจะได้รับ (ตามแผน)	ผลการดำเนินงาน	หมายเหตุ
		3.2 ทราบคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต ได้ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดและแรงดึง แบบผ่าซีกที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน	
4. จัดทำรายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 1	4. ได้รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 1	4. ได้รายงานความก้าวหน้า	
ในช่วง 6 เดือน หลัง (1 สิงหาคม พ.ศ. 2546 ถึง 31 มกราคม พ.ศ. 2547)			
1. ทดสอบคุณสมบัติทางกลเบื้องต้นของคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายทิ้ง	1. ได้ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล ความทนทาน และคุณสมบัติระยะยาว คอนกรีตผสมผงฝุ่นทราย ใต้แบบของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายใต้แบบเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ	1. ทราบคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต ได้ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดและแรงดึง แบบผ่าซีกที่อายุ 60, 90, 120 และ 180 วัน และ โมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน ตามลำดับ	
2. ทดสอบคุณสมบัติที่ระยะยาว		2. ทดสอบคุณสมบัติทางด้านความทนทานของคอนกรีตซึ่งได้แก่ การหดตัวแบบแห้ง การขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟต และความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกและอะซิติก	
3. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์	3. ได้รายงานฉบับสมบูรณ์	3. รายงานฉบับสมบูรณ์	

สารบัญ

หน้า

Executive Summary	(ก)
บทคัดย่อ	(ข)
Abstract	(ง)
กิตติกรรมประกาศ	(ฉ)
สรุปโครงการวิจัยฝ่ายอุตสาหกรรม (ฝ่าย 5)	(ช)
ตารางเปรียบเทียบกิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการ	(ญ)
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(8)
สารบัญภาพประกอบ	(10)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(38)

บทที่

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาของการศึกษา	1
1.2 ประเด็นปัญหา	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษา	4
1.5 ขอบเขตของการศึกษา	4
2. ข้อมูลเกี่ยวกับการกระบวนการผลิตและปริมาณของผงฝุ่นทรายใส่แบบที่เกิดขึ้น รวมทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ข้อมูลเกี่ยวกับการผลิต	6
2.1.1 กระบวนการผลิตของโรงงานหล่อชิ้นส่วนรถยนต์	6

2.1.2 ปริมาณสารพิษจากฝุ่นในกระบวนการผลิต	10
2.2 ปริมาณของฝุ่นทรายใต้แบบ	11
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
3.1 ความหมายของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	15
3.2 สารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	15
3.2.1 สารประกอบหลัก	15
3.2.2 สารประกอบรอง	16
3.3 ปฏิริยาไฮเดรชัน	17
3.3.1 ปฏิริยาของสารประกอบ	17
3.3.2 กลไกของปฏิริยาไฮเดรชัน	19
3.4 ปฏิริยาปอซโซลานิก	21
3.4.1 ความหมายของสารปอซโซลาน	21
3.4.2 ปฏิริยาปอซโซลานิกของสารปอซโซลาน	21
3.4.3 กลไกของปฏิริยาไฮเดรชันที่มีสารปอซโซลาน	22
3.5 ทฤษฎีเกี่ยวกับคุณสมบัติที่มีการทดสอบ	23
3.5.1 การกระจายขนาดผลของอนุภาค	23
3.5.2 ทฤษฎีความเป็นผลึกของสสาร	24
3.5.3 คุณสมบัติของคอนกรีตในสภาพสด	25
3.5.3.1 ค่าการยุบตัว (Slump) และการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss)	25
3.5.3.2 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต	26
3.5.4 คุณสมบัติทางกลของคอนกรีต	27
3.5.4.1 กำลังรับแรงของคอนกรีต	27

สารบัญ (ต่อ)	หน้า
3.5.4.2 โมดูลสียึดหุ่นของคอนกรีต	28
3.5.5 คุณสมบัติทางด้านความทนทานของคอนกรีต	29
3.5.5.1 การหดตัวแบบแห้ง	29
3.5.5.2 การกระทำเนื่องจากซัลเฟต	29
3.5.5.3 การกระทำเนื่องจากกรด	31
4. วิธีการศึกษา	34
4.1 แผนการทดสอบ	34
4.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	34
4.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	35
4.1.2.1 เครื่องมือวัด	35
4.1.2.2 อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม	35
4.1.2.3 อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต	35
4.1.3 สถานที่ที่ใช้ในการทดสอบ	36
4.1.4 รายละเอียดวิธีการทดสอบ	36
4.1.4.1 การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ	36
4.1.4.2 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต	37
4.1.4.3 สัดส่วนที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต	39
4.1.4.4 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ	39
5. ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล	50
5.1 คุณสมบัติของผู้นทรายใส่แบบ	50
5.1.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ	50

5.1.2 ลักษณะของอนุภาค	55
5.1.2.1 ทรายจากประเทศออสเตรเลีย (Australia Sand)	55
5.1.2.2 ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW)	56
5.1.2.3 ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW)	57
5.1.3 การกระจายขนาดผลของอนุภาคผงฝุ่นทรายไส้แบบ	59
5.1.4 ความเป็นผลึกของอนุภาค	60
5.1.5 การนำผงฝุ่นทรายไส้แบบไปใช้เป็นส่วนประกอบของคอนกรีต	61
5.1.6 รายละเอียดการผสมคอนกรีตผสมเสร็จ (Ready-mixed Concrete)	
ผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบ	64
5.2 คุณสมบัติของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบในสถานะสด	65
5.2.1 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตในสภาพสด (Unit Weight)	67
5.2.2 ปริมาณน้ำที่ทำให้เกิดค่าการยุบตัว (Water Requirement) ของคอนกรีต	72
5.2.3 ค่าการยุบตัวเริ่มต้นและการสูญเสียค่าการยุบตัว (Initial Slump and Slump Loss)	77
5.2.4 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตสด (Setting Time)	88
5.3 คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบ	95
5.3.1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (Compressive Strength)	95
5.3.2 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting Tensile Strength)	108
5.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเสร็จ	119
5.3.4 โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)	120
5.4 คุณสมบัติทางด้านความทนทานของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบ	126
5.4.1 การขยายตัวในน้ำ (Expansion in Water)	126
5.4.2 การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage)	138
5.4.2.1 การเปลี่ยนแปลงความยาวของคอนกรีต (Length Change)	138

5.4.3 การกระทำเนื่องจากซัลเฟต (Sulfate Attack)	151
5.4.4 การกระทำเนื่องจากกรด	164
5.4.4.1 การกระทำเนื่องจากกรดซัลฟูริก (Sulfuric Acid Attack)	164
5.4.4.2 การกระทำเนื่องจากกรดอะซิติก (Acetic acid Attack)	176
6. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	187
6.1 สรุปผลการศึกษา	187
6.1.1 คุณสมบัติของผงปูนทรายไส้แบบ	187
6.1.2 คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงปูนทรายไส้แบบในสภาพสด	188
6.1.3 คุณสมบัติของทางกลคอนกรีตผสมผงปูนทรายไส้แบบ	188
6.1.4 คุณสมบัติของทางด้านความทนทานคอนกรีตผสมผงปูนทรายไส้แบบ	189
6.1.5 การนำผงปูนทรายไส้แบบมาใช้เป็นวัสดุดิบของคอนกรีตผสมเสร็จ	190
6.3 ข้อเสนอแนะ	191
บรรณานุกรม	192
ภาคผนวก	196
ก. คุณสมบัติของมวลรวมและการคำนวณสารละลายกรดที่ใช้ในการทดสอบ	197
ก.1 คุณสมบัติของมวลรวม	197
ก.2 การกระจายของขนาดอนุภาคทรายที่ใช้ในการทดสอบ	198
ก.3 การคำนวณสารละลายกรดที่ใช้ในการทดสอบ	205
ข. ผลการทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสด	208
ข.1 ผลการทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตในสภาพสด	208
ข.2 ผลการทดสอบหาค่าการยุบตัว (Slump) และการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss)	211

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ข.3 ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต	216
ค. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต	219
ค.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต	219
ค.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดผ่าสี่ของคอนกรีต	291
ค.3 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต	363
ง. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านความทนทานของคอนกรีต	366
ง.1 ผลการทดสอบการขยายตัวในน้ำ (Expansion in Water)	366
ง.2 ผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง	371
ง.3 ผลการทดสอบการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟต (Expansion in Sodium Sulfate)	387
ง.4 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟริก	403
ง.5 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดอะซิติก	407
จ. ภาพที่ได้จากการศึกษา	411
จ.1 โรงงานหล่อชิ้นส่วนรถยนต์ของบริษัท โตโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด จังหวัดชลบุรี	411
จ.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	413
จ.3 การทดสอบการกระจายขนาดผลึกของอนุภาคผงฝุ่นทรายใส่แบบ	414
จ.4 การปรับเทียบถังสำหรับใช้ในการทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนัก	415
จ.5 ภาพแสดงการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จในโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จของ บริษัท เอเซียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์จำกัด*	416
จ.6 การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตในสภาพสด (Unit Weight)	417
จ.7 การทดสอบค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) และการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss)	418
จ.8 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว	419
จ.9 ตัวอย่างคอนกรีตผสมเสร็จหลังจากการถอดแบบ	419
จ.10 การทดสอบหาลังรับแรงอัดของคอนกรีต	420

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

จ.11 การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต	420
จ.12 การทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน	421
จ.13 การทดสอบหาค่าหดรัดแบบแห้งของคอนกรีต	422
จ.14 การทดสอบความทนทานต่อโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีต	424
จ.15 การทดสอบการกัดกร่อนของคอนกรีตเนื่องจากกรด	425

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณสารพิษที่ทำการตรวจวัดจากของเสียจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์	10
2.2 ข้อกำหนดของขนาดกะของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C 33	14
3.1 การแบ่งกลุ่มความสามารถในการละลายของเกลือแคลเซียมในกรดอินทรีย์	31
3.2 การแบ่งกลุ่มความสามารถในการละลายของเกลือแคลเซียมในกรดอนินทรีย์	33
4.1 คุณสมบัติที่ทำการทดสอบ เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	36
4.2 สัดส่วนผสมของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ด้วย <u>Shell Sand Waste</u> (SSW) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	40
4.3 สัดส่วนผสมของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ด้วย <u>Green Sand Waste</u> (GSW) ในทรายธรรมชาติ	41
4.4 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จผสม <u>Shell Sand Waste</u> (SSW)	42
5.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผงฝุ่นทรายไล่แบบกลุ่ม SSW <u>Green Sand</u> and <u>Molding Waste</u> (GSW) และ <u>Shell Sand Waste</u> (SSW) เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	52
5.2 สมบัติทางกายภาพและเคมีของผงฝุ่นทรายไล่แบบกลุ่ม <u>Green Sand and Molding Waste</u> (GSW) และกลุ่ม <u>Shell Sand Waste</u> (SSW) กับสารปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618-93 ที่ได้จากการประเมินจากการเก็บตัวอย่างในครั้งที่ 1	54
5.3 ค่าการขยายตัวของเพสต์ซีเมนต์ที่ผ่านการเร่งด้วยเทคนิคออโตแคล์ฟ	62
5.4 ค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) ของมวลรวมผสมผงฝุ่นทรายไล่แบบกลุ่ม GSW	63
ภาคผนวก	
ก.1.1 ความถ่วงจำเพาะและร้อยละการดูดซับของมวลรวม	197
ก.2.1 การกระจายของขนาดอนุภาคทรายวัดด้วย	198
ก.2.2 การกระจายของขนาดอนุภาคทรายผงฝุ่นทรายไล่แบบชนิด GSW	201

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.2.3 การกระจายของขนาดอนุภาคทรายผงฝุ่นทรายใต้แบบชนิด SSW	203
ข.1.1 ผลการทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตในสภาพสด	208
ข.2.1 ผลการทดสอบหาค่าการยุบตัว (Slump) และการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss)	211
ข.3.1 ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต	216
ค.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต	219
ค.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต	291
ค.3.1 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน	363
ง.1.1 ผลการทดสอบการขยายตัวในน้ำ (Expansion in Water)	366
ง.2.1 ผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage)	371
ง.3.1 ผลการทดสอบเนื่องจากการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟต (Expansion in Sodium Sulfate)	397
ง.4.1 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริกของคอนกรีต	403
ง.6.1 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดอะซิติกของคอนกรีต	407

สารบัญภาพประกอบ

ภาพที่	หน้า
2.1 กระบวนการผลิตของโรงงานหล่อชิ้นส่วนรถยนต์	7
2.2 แบบหล่อภายในและแบบหล่อภายนอก	8
2.3 แผนผังแสดงตำแหน่งกระบวนการผลิตและของเสียที่เกิดขึ้น	9
2.4 ปริมาณของผงฝุ่นทรายได้แบบที่เกิดขึ้น	11
3.1 ปฏิกริยาของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S, C_2S)	17
3.2 ลักษณะของเอ็ทริงไกต์ (Etringite) มีรูปทรงอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับเข็มผลึก	18
3.3 การพัฒนาของปฏิกริยาไฮเดรชันในแต่ละสารประกอบหลัก	20
3.4 การเกิดไฮเดรต	21
3.5 ปฏิกริยาไฮเดรชันที่เกิดร่วมกับปฏิกริยาปอซโซลานิก	23
3.6 เครื่อง Laser Particle Size Analyzer	24
3.7 แบบจำลองสำหรับการแทรกสอดของคลื่นตามสมการ $2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda$	25
3.8 ระยะเวลาการก่อตัวของตัวอย่างคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM 403-99	27
3.9 การพัฒนากำลังของคอนกรีตที่อายุต่างๆ	28
3.10 การสูญเสียความชื้นผ่านทางโพลคาพิวลาไรและเจล	29
4.1 การติดตั้งเครื่องทดสอบแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 496	38
5.1 ลักษณะของอนุภาคทรายจากประเทศออสเตรเลีย โดยใช้เทคนิค (ก) SEM ที่กำลังขยาย 150 เท่า และ (ข) BEI ที่กำลังขยาย 150 เท่า	55
5.2 ลักษณะของอนุภาคทรายจากประเทศออสเตรเลีย โดยใช้เทคนิค (ก) SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า และ (ข) BEI ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า	56
5.3 ลักษณะของอนุภาคทรายจากกลุ่ม SSW โดยใช้เทคนิค (ก) SEM ที่กำลังขยาย 150 เท่า และ (ข) BEI ที่กำลังขยาย 150 เท่า	57
5.4 ลักษณะของอนุภาคผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW โดยใช้เทคนิค (ก) SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า และ (ข) BEI ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า	57

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.5 ลักษณะของอนุภาคผงฝุ่นทรายไล่แบบจากกลุ่ม GSW โดยใช้เทคนิค (ก) SEM ที่กำลังขยาย 150 เท่า และ (ข) BEI ที่กำลังขยาย 150 เท่า	58
5.6 ลักษณะของอนุภาคผงฝุ่นทรายไล่แบบจากกลุ่ม GSW โดยใช้เทคนิค (ก) SEM ที่กำลังขยาย 150 เท่า และ (ข) BEI ที่กำลังขยาย 150 เท่า	58
5.7 การกระจายขนาดกละของอนุภาคผงฝุ่นทรายไล่แบบเปรียบเทียบกับ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	59
5.8 การกระจายขนาดกละสะสมของอนุภาคผงฝุ่นทรายไล่แบบเปรียบเทียบกับ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	60
5.9 ผลการตรวจวัดความเป็นผลึกด้วยรังสี X-Ray ของผงฝุ่นทรายไล่แบบกลุ่ม SSW	60
5.10 ผลการตรวจวัดความเป็นผลึกด้วยรังสี X-Ray ของผงฝุ่นทรายไล่แบบกลุ่ม GSW	61
5.11 การกระจายขนาดกละของทรายธรรมชาติและที่ผสมผงฝุ่นทรายไล่แบบกลุ่ม GSW	63
5.12 กระบวนผลิตคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงฝุ่นทรายไล่แบบ	65
5.13 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมเสร็จในสภาพสด โดยกำหนดค่าการยุบตัว เริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. สำหรับผงฝุ่นทรายไล่แบบกลุ่ม SSW	68
5.14 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมเสร็จในสภาพสด โดยกำหนดค่าการยุบตัว เริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. สำหรับผงฝุ่นทรายไล่แบบกลุ่ม SSW	68
5.15 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมเสร็จในสภาพสด โดยกำหนดค่าการยุบตัว เริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. สำหรับผงฝุ่นทรายไล่แบบกลุ่ม SSW	69
5.16 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมเสร็จในสภาพสด โดยกำหนดค่าการยุบตัว เริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. สำหรับผงฝุ่นทรายไล่แบบกลุ่ม GSW	70
5.17 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมเสร็จในสภาพสด โดยกำหนดค่าการยุบตัว เริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. สำหรับผงฝุ่นทรายไล่แบบกลุ่ม GSW	70
5.18 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมเสร็จในสภาพสด โดยกำหนดค่าการยุบตัว เริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. สำหรับผงฝุ่นทรายไล่แบบกลุ่ม GSW	71
	68

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.19 ปริมาณน้ำที่ทำให้ได้ค่ายุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) ของคอนกรีตผสมเสร็จ เท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. สำหรับผงปูนทรายใส่แบบกลุ่ม SSW	72
5.20 ปริมาณน้ำที่ทำให้ได้ค่ายุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) ของคอนกรีตผสมเสร็จ เท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. สำหรับผงปูนทรายใส่แบบกลุ่ม SSW	73
5.21 ปริมาณน้ำที่ทำให้ได้ค่ายุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) ของคอนกรีตผสมเสร็จ เท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. สำหรับผงปูนทรายใส่แบบกลุ่ม SSW	74
5.22 ปริมาณน้ำที่ทำให้ได้ค่ายุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) ของคอนกรีตผสมเสร็จ เท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. สำหรับผงปูนทรายใส่แบบกลุ่ม GSW	75
5.23 ปริมาณน้ำที่ทำให้ได้ค่ายุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) ของคอนกรีตผสมเสร็จ เท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. สำหรับผงปูนทรายใส่แบบกลุ่ม GSW	75
5.24 ปริมาณน้ำที่ทำให้ได้ค่ายุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) ของคอนกรีตผสมเสร็จ เท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. สำหรับผงปูนทรายใส่แบบกลุ่ม GSW	76
5.25 การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงปูนทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	77
5.26 การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงปูนทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	78
5.27 การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงปูนทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	79

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.28 การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฟูนทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	79
5.29 การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฟูนทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	80
5.30 การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฟูนทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	80
5.31 การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฟูนทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	81
5.32 การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฟูนทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	81
5.33 การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฟูนทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	82

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.34 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากหดรัดตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฟูนทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	83
5.35 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากหดรัดตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฟูนทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	83
5.36 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากหดรัดตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฟูนทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	84
5.37 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากหดรัดตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฟูนทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	85
5.38 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากหดรัดตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฟูนทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	85
5.39 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากหดรัดตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฟูนทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	86

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.40 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	86
5.41 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	87
5.42 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	87
5.43 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตผสมเสร็จ โดยกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. สำหรับผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW	88
5.44 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตผสมเสร็จ โดยกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. สำหรับผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW	90
5.45 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตผสมเสร็จ โดยกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. สำหรับผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW	91
5.46 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตผสมเสร็จ โดยกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. สำหรับผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW	92
5.47 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตผสมเสร็จ โดยกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. สำหรับผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW	93
5.48 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตผสมเสร็จ โดยกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. สำหรับผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW	94

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

[illegible]

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.57 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเสร็จ ที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ใน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	101
5.58 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเสร็จ ที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ใน ทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	103
5.59 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเสร็จ ที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ใน ทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	103
5.60 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเสร็จ ที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ใน ทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	104
5.61 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเสร็จ ที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ใน ทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	105
5.62 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเสร็จ ที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ใน ทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	105
5.63 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเสร็จ ที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ใน ทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	106
5.64 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเสร็จ ที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ใน ทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	106

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.65 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเสร็จ ที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ใน ทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	107
5.66 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเสร็จ ที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ใน ทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	107
5.67 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	108
5.68 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	109
5.69 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	110
5.70 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	111
5.71 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	111
5.72 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	112

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.73 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	112
5.74 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	113
5.75 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	113
5.76 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	114
5.77 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	115
5.78 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	115
5.79 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	116
5.80 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	116

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.81 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	117
5.82 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	117
5.83 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	118
5.84 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	118
5.85 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตปกติ และคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายใส่แบบ	119
5.86 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมเสร็จในสภาพสด โดยกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. สำหรับผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW	121
5.87 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมเสร็จในสภาพสด โดยกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. สำหรับผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW	122
5.88 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมเสร็จในสภาพสด โดยกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. สำหรับผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW	122
5.89 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมเสร็จในสภาพสด โดยกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. สำหรับผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW	123
5.90 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมเสร็จในสภาพสด โดยกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. สำหรับผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW	124

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.91 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมเสร็จในสภาพสด โดยกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. สำหรับผงดุนทรายได้แบบกลุ่ม GSW	124
5.92 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ 28 วัน เปรียบเทียบกับมาตรฐาน ACI 318	125
5.93 การขยายตัวในน้ำของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงดุนทรายได้แบบกลุ่ม SSW ใน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	126
5.94 การขยายตัวในน้ำของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงดุนทรายได้แบบกลุ่ม SSW ใน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	127
5.95 การขยายตัวในน้ำของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงดุนทรายได้แบบกลุ่ม SSW ใน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	128
5.96 การขยายตัวในน้ำของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงดุนทรายได้แบบกลุ่ม SSW ใน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	129
5.97 การขยายตัวในน้ำของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงดุนทรายได้แบบกลุ่ม SSW ใน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	129
5.98 การขยายตัวในน้ำของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงดุนทรายได้แบบกลุ่ม SSW ใน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	130
5.99 การขยายตัวในน้ำของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงดุนทรายได้แบบกลุ่ม SSW ใน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	130

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.100 การขยายตัวในน้ำของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ใน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	131
5.101 การขยายตัวในน้ำของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ใน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	131
5.102 การขยายตัวในน้ำของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ใน ทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	132
5.103 การขยายตัวในน้ำของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ใน ทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	133
5.104 การขยายตัวในน้ำของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ใน ทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	134
5.105 การขยายตัวในน้ำของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ใน ทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	135
5.106 การขยายตัวในน้ำของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ใน ทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	135
5.107 การขยายตัวในน้ำของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ใน ทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	136

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.108 การขยายตัวในน้ำของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ใน ทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	136
5.109 การขยายตัวในน้ำของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ใน ทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	137
5.110 การขยายตัวในน้ำของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ใน ทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	137
5.111 การหัดัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	139
5.112 การหัดัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	140
5.113 การหัดัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	140
5.114 การหัดัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	141
5.115 การหัดัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	142

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.116 การหัดัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	142
5.117 การหัดัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	143
5.118 การหัดัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	144
5.119 การหัดัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	144
5.120 การหัดัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	145
5.121 การหัดัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	146
5.122 การหัดัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	146
5.123 การหัดัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	147

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.124 การหัดัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	148
5.125 การหัดัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	148
5.126 การหัดัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	149
5.127 การหัดัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	149
5.128 การหัดัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	150
5.129 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากหัดัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	153
5.130 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากหัดัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	153

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.131 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากหดรัดแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฟูนทรายไล้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	154
5.132 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากหดรัดแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฟูนทรายไล้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	155
5.133 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากหดรัดแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฟูนทรายไล้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	155
5.134 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากหดรัดแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฟูนทรายไล้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	156
5.135 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากหดรัดแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฟูนทรายไล้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	156
5.136 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากหดรัดแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฟูนทรายไล้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	157

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.137 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากหดรัดตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	157
5.138 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากหดรัดตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	159
5.139 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากหดรัดตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	159
5.140 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากหดรัดตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	160
5.141 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากหดรัดตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	160
5.142 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากหดรัดตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	161

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.143 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากหดรัดแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	161
5.144 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากหดรัดแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	162
5.145 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากหดรัดแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	162
5.146 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากหดรัดแบบแห้งของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	163
5.147 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	165
5.148 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	166

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.149 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	166
5.150 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	167
5.151 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	168
5.152 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	168
5.153 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	169
5.154 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	169

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.155 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	170
5.156 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	171
5.157 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	171
5.158 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	172
5.159 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	172
5.160 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	173

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.161 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฟูในทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	173
5.162 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฟูในทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	174
5.163 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฟูในทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	174
5.164 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฟูในทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	175
5.165 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฟูในทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	176
5.166 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฟูในทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	177

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.167 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	177
5.168 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	178
5.169 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	179
5.170 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	179
5.171 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	180
5.172 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	180

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.173 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	181
5.174 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	182
5.175 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	182
5.176 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	183
5.177 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	183
5.178 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	184

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.179 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	184
5.180 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	185
5.181 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	185
5.182 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟริกของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	186
.	
ภาพภาคผนวก	
จ.1.1 โรงงานหล่อชิ้นส่วนรถยนต์ของบริษัทโตโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด	411
จ.1.2 Pig Iron วัตถุดิบซึ่งใช้ในกระบวนการหล่อหล่อชิ้นส่วนรถยนต์	411
จ.1.3 Scrap (Mild Steel) วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการหล่อชิ้นส่วนรถยนต์	411
จ.1.4 สถานที่กองเก็บทรายที่ใช้ทำใส่แบบกระบวนการหล่อชิ้นส่วนรถยนต์	411
จ.1.5 ทรายที่ใช้ในกระบวนการหล่อชิ้นส่วนรถยนต์ซึ่งนำเข้ามาจากประเทศออสเตรเลีย	411
จ.1.6 แม่แบบซึ่งทำจากทรายใช้ในกระบวนการหล่อชิ้นส่วนรถยนต์	412

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
จ.1.7 บริเวณเตาหลอมโลหะ	412
จ.1.8 เตาหลอมโลหะ	412
จ.1.9 ผงฝุ่นทรายไส้แบบไส้แบบกลุ่ม Green Sand และ Molding Waste (TDC-0002)	412
จ.1.10 ผงฝุ่นทรายไส้แบบไส้แบบกลุ่ม Finishing Waste (TDC-0003)	412
จ.1.11 ผงฝุ่นทรายไส้แบบไส้แบบกลุ่มที่มาจาก Shell Sand Waste (TDC-0006)	412
จ.2.1 ผงฝุ่นทรายไส้แบบไส้แบบชนิด Green Sand and Molding Waste (GSW)	413
จ.2.2 ผงฝุ่นทรายไส้แบบไส้แบบชนิด Shell Sand Waste (SSW)	413
จ.2.3 ทรายธรรมชาติ	413
จ.2.4 โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4)	413
จ.3.1 ขนาดของตะแกรงที่ใช้ในการทดสอบการกระจายขนาดคละ	414
จ.3.2 การชั่งตะแกรง	414
จ.3.3 การชั่งตัวอย่างทดสอบจำนวน 500 กรัม	414
จ.3.4 การเขย่าในเครื่องเขย่า (Sieve)	414
จ.4.1 การชั่งน้ำหนักถัง	415
จ.4.2 การเทน้ำลงในถัง	415
จ.4.3 ถังที่ใส่น้ำหลังจากนำกระบอกมาปรับระดับน้ำให้เสมอขอบถังรวมทั้งวัดอุณหภูมิ ของน้ำเป็นที่เรียบร้อย	415
จ.5.1 โรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จของบริษัท เอเชียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัด	416
จ.5.2 แบบหล่อที่ใช้ในการตัวอย่างคอนกรีตผสมเสร็จ	416
จ.5.3 เครื่องผสมคอนกรีตผสมเสร็จ	416
จ.5.4 การชั่งผงฝุ่นทรายไส้แบบก่อนนำไปใส่ในเครื่องผสมคอนกรีตผสมเสร็จ	416
จ.5.5 การบรรจุคอนกรีตผสมเสร็จลงรถโม	416
จ.5.6 การขนถ่ายคอนกรีตผสมเสร็จลงจากรถโม	416

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
จ.5.7 การเติมน้ำในรถผสม คอนกรีตเพื่อให้คอนกรีตมีค่าการยุบตัว (Slump) ของคอนกรีตได้ตามกำหนดไว้	417
จ.5.8 การบรรจุคอนกรีตลงในแบบหล่อ	417
จ.5.9 คอนกรีตหลังจากการถอดแบบ	417
จ.5.10 การบ่มคอนกรีตในบ่อบ่มที่สร้างในโรงงานของบริษัทฯ	417
จ.6.1 คอนกรีตผสมเสร็จ	417
จ.6.2 การใส่คอนกรีตลงในถังทดสอบ	417
จ.6.3 การกระทุ้งคอนกรีตในถังทดสอบ	418
จ.6.4 การเคาะที่บริเวณด้านข้างของถังเพื่อไล่ฟองอากาศ	418
จ.6.5 การปาดหน้าคอนกรีต	418
จ.6.6 การชั่งน้ำหนักของคอนกรีต	418
จ.7.1 คอนกรีตผสมเสร็จ	418
จ.7.2 การตักคอนกรีตลงในกรวยทดสอบ	418
จ.7.3 การตักคอนกรีตในกรวยทดสอบ	419
จ.7.4 การวัดค่าการยุบตัว	419
จ.8.1 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต	419
จ.9.1 คอนกรีตผสม SSW	419
จ.9.2 คอนกรีตผสม GSW	419
จ.10.1 การวัดตัวอย่างคอนกรีต	420
จ.10.2 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตอัด	420
จ.10.3 การติดตั้งตัวอย่างคอนกรีต	420
จ.10.4 สภาพของคอนกรีตหลังการทดสอบ	420
จ.11.1 การติดตั้งตัวอย่างคอนกรีต	420
จ.11.2 สภาพของคอนกรีตหลังการทดสอบ	420

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
จ.12.1 การเค็ปหัวคอนกรีต	421
จ.12.2 คอนกรีตที่ทำการเค็ปหัวเป็นที่เรียบร้อย	421
จ.12.3 เครื่องทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น	421
จ.12.4 การติดตั้งตัวอย่างคอนกรีตเข้ากับอุปกรณ์วัดการยืด/หดตัว	421
จ.12.7 สภาพของคอนกรีตหลังการทดสอบ	421
จ.13.1 การบ่มคอนกรีตในน้ำ	422
จ.13.2 คอนกรีตขณะทำการทดสอบ	422
จ.13.3 เครื่องทดสอบชนิด Digital Length Comparator	422
จ.13.4 การวัดค่าการหดตัวของคอนกรีต	422
จ.14.1 การหล่อตัวอย่างคอนกรีตผสม GSW	423
จ.14.2 การหล่อตัวอย่างคอนกรีตผสม SSW	423
จ.14.3 การบ่มตัวอย่างในน้ำ	423
จ.14.4 การบ่มตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟต	423
จ.14.5 การวัดการขยายตัว	423
จ.15.1 การบ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำ	424
จ.15.2 คอนกรีตก่อนการแช่กรด	424
จ.15.3 การชั่งน้ำหนักเริ่มต้น	424
จ.15.4 การเรียงตัวอย่างในถังแช่กรด	424
จ.15.5 ตัวอย่างคอนกรีตที่เรียงเสร็จแล้ว	424
จ.15.6 กรดที่ใช้ในการทดสอบ (ก) ซัลฟูริก (H_2SO_4) (ข) อะซิติก (CH_3COOH)	424
จ.15.7 การเทกรดในถังผสมสารละลาย	425
จ.15.8 การคนสารละลายกรด	425
จ.15.9 การเทสารละลายกรดในถังแช่ตัวอย่าง	425
จ.15.10 การเรียงถังแช่กรด	425
จ.15.11 ตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการบ่มในกรดซัลฟูริก (H_2SO_4)	425
จ.15.12 ตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการบ่มในกรดอะซิติก (CH_3COOH)	425

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

GSW	Green Sand and Molding Waste
SSW	Shell Sand Waste
<u>X(Y)SSW(Z)</u>	คอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ X กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้น $Y \pm 0.5$ ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ Z โดยน้ำหนัก
<u>X(Y)GSW(Z)</u>	คอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ X กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้น $Y \pm 0.5$ ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ Z โดยน้ำหนัก
C	แคลเซียมออกไซด์ (CaO)
S	ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂)
H	น้ำ (H ₂ O)
CH	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH) ₂)
C ₃ S	ไตรแคลเซียมซิลิเกต
C ₂ S	ไดแคลเซียมซิลิเกต
C ₃ A	ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต
C ₄ AF	เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์
C-S-H	แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต
C-A-H	แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต
C ₄ ASH ₁₂	แคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต
w/c	อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์
w/b	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
SEM	Scanning Electron Microscope(y)
BEI	Back Scattered Image

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของการศึกษา

ในปัจจุบันวิสัยทัศน์ของการทำวิจัยในประเทศไทยได้เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมที่สถาบันการศึกษาซึ่งมีบุคลากรที่มีความรู้ความสามารถจะเน้นศึกษาเพียงเพื่อหาองค์ความรู้ใหม่ (Academic Research) แต่อย่างเดียวนำมาเป็นการนำศักยภาพที่มีอยู่มาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาเพื่อตอบสนองกับผู้ใช้จริง (Applied Research) โดยเฉพาะกับภาคการเกษตรและอุตสาหกรรมนับเป็นกลไกหลักที่สร้างความเจริญให้กับประเทศไทย

สำหรับภาคอุตสาหกรรมซึ่งมีการเปลี่ยนวัตถุดิบประเภทต่างๆ ให้เป็นผลิตภัณฑ์หรือสินค้าออกมาแต่สิ่งที่เป็นปัญหาในขณะเดียวกันคือ ของเสีย (Waste/By-product) ทั้งที่เป็นพิษและไม่เป็นพิษ ดังเช่น อุตสาหกรรมการหล่อขึ้นส่วนเครื่องยนต์ซึ่งมีของเสียจากกระบวนการผลิตอยู่เป็นหลายประเภทและมีปริมาณมากในแต่ละปี โดยหากมีระบบการจัดการของเสียดังกล่าวไม่ดีพอจะทำให้เกิดปัญหาตามมา อาทิเช่น สารพิษที่ตกค้าง การฝังกลบ เป็นต้น ยกตัวอย่างในกรณีของบริษัท สยาม โคโยต้าอุตสาหกรรม (จำกัด) ซึ่งในปีๆ หนึ่งมีของเสียจากกระบวนการหล่อเครื่องยนต์เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากและต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียให้กับบริษัทที่ทำการกำจัดของเสียดังกล่าวซึ่งเกือบทั้งหมดมีลักษณะเป็นผงฝุ่นเช่น ผงฝุ่นทรายไส้แบบ (Foundry Sand Powder) จนถึงที่เป็นก้อนขนาดใหญ่เช่น ตะกรันจากเตาหลอมโลหะ (Slag) ผงเหล็ก (Steel Powder) เป็นต้น นับล้านบาท โดยในปัจจุบันทางบริษัทได้ใช้วิธีการกำจัดของเสียจากกระบวนการผลิตโดยนำเข้ากระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ผ่านบริษัทผลิตปูนซีเมนต์และบางส่วนถูกนำไปถมที่ (Landfill) แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นการนำของเสียไปใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ก็ยังคงเสียค่าใช้จ่ายมากอยู่เช่นเดิม อีกทั้งการนำไปถมที่เป็นการละทิ้งประโยชน์จากของเหลือทิ้งและไม่ได้ก่อให้เกิดการพัฒนาที่มีความยั่งยืน จึงได้มีแนวทางในการนำของเสียจากบริษัท สยาม โคโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด กลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ให้งานคอนกรีต โดยอุตสาหกรรมผลิตคอนกรีตผสมเสร็จนับเป็นทางเลือกของอุตสาหกรรมที่ศักยภาพในการปรับเปลี่ยนของเสียหลายๆ ชนิด เช่น เถ้าลอย (Fly Ash) จากโรงผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินลิกไนต์ เถ้าตะกรัน (Slag) จากโรงงานหลอมโลหะ เป็นต้น มาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้มากยิ่งขึ้น แต่การนำของเสียมาใช้จำเป็นต้องมีการพิจารณาในประเด็นของการปรับปรุงคุณภาพ

ของคอนกรีตที่ต้องมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นตามไปด้วย และการนำมาใช้จะต้องสามารถนำมาใช้ได้โดยตรงและผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพของวัตถุดิบน้อยที่สุด

ในการนำของเสียจากกระบวนการทำแบบหล่อชิ้นส่วนเครื่องยนต์ของบริษัท สยามโตโยต้าอุตสาหกรรม (จำกัด) ซึ่งวัตถุดิบส่วนใหญ่ในการทำแบบหล่อเป็นทรายที่นำเข้ามาจากประเทศออสเตรเลีย เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมาะสมคือ ขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกันและขนาดผลที่ได้มาตรฐานทำให้มีของเสียมักมีลักษณะเป็นผงฝุ่น ในปีๆ หนึ่งนับหลายพันตัน ผงฝุ่นทรายได้แบบดังกล่าวสามารถจำแนกตามสายการผลิตออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่คือ ผงฝุ่นทรายได้แบบจากกระบวนการทำแบบหล่อภายนอกได้ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW) จากการทำแบบหล่อภายในได้ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) และจากการตบแต่งชิ้นส่วนได้ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม Finishing Waste ซึ่งมีปริมาณโดยเฉลี่ยที่เก็บรวบรวมจำนวน 240 ตันต่อเดือน แต่ในปัจจุบันทางบริษัทได้ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของการผลิตจนทำให้ทรายกลุ่มที่มาจาก การตบแต่งชิ้นส่วนมีจำนวนลดลงมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำผงฝุ่นทรายได้แบบใน 2 กลุ่มแรก เนื่องจากมีปริมาณที่มากซึ่งได้แก่ Green Sand and Molding Waste (GSW) และ Shell Sand Waste (SSW) มาทำการศึกษาผลกระทบที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จ

1.2 ประเด็นปัญหา

ในปัจจุบันผงฝุ่นทรายได้แบบจากโรงงานหล่อชิ้นส่วนเครื่องยนต์ของบริษัท โตโยต้าอุตสาหกรรม (จำกัด) ทั้ง GSW และ SSW จะถูกนำไปกำจัดโดยการนำเข้าสู่กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ และนำไปใช้ในการถมที่ (Landfill) ซึ่งไม่ได้ก่อให้เกิดประโยชน์เท่าที่ควรและอาจก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากสารพิษที่สะสมในธรรมชาติ จึงควรมีแนวทางที่ดีกว่าในการนำกลับมาใช้ในรูปแบบอื่น ซึ่งควรเป็นอุตสาหกรรมคอนกรีตผสมเสร็จ แต่ในปัจจุบันยังขาดงานวิจัยที่สนับสนุนการนำผงฝุ่นทรายได้แบบในประเทศไทยมาใช้กับงานด้านคอนกรีตผสมเสร็จซึ่งโดยคุณสมบัติของตัววัตถุดิบมีศักยภาพที่จะนำมาใช้งานได้

ในการนำผงฝุ่นทรายได้แบบมาใช้นั้นจำเป็นที่จะต้องพิจารณาใน 2 ประเด็นหลัก คือ

1. สารพิษที่ตกค้างในผงฝุ่นทรายได้แบบซึ่งมีผลต่อสุขภาพของผู้ใช้เมื่อนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จผสมเสร็จ แต่จากการทดสอบของทางบริษัท พบว่าสารพิษที่ตกค้างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรม
2. สิ่งที่ต้องคำนึงในการนำผงฝุ่นทรายได้แบบแต่ละกลุ่มมาใช้เป็นส่วนประกอบในคอนกรีตผสมเสร็จคือ โดยปกติผงฝุ่นทรายได้แบบจะผ่านกระบวนการที่ต่างกัน เช่น ความร้อนที่ทรายแบบ

หล่อได้รับ สารเคมีผสมเพิ่ม เป็นต้น ดังนั้นผงฝุ่นทรายใต้แบบจึงมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน การนำมาใช้ในงานทางด้านซีเมนต์จึงควรมีการศึกษาเบื้องต้นว่า ทรายกลุ่มใดที่มีศักยภาพในการใช้เป็น ส่วนประกอบใดในคอนกรีตผสมเสร็จซึ่งมีทั้งปูนซีเมนต์ มวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบ โดยในที่นี้ได้พิจารณาเบื้องต้น ในประเด็นของดัชนีการพัฒนากำลัง (Strength Activity Index, SAI) ที่อายุ 7 และ 28 วัน ซึ่งเป็นดัชนีเบื้องต้นที่นิยมใช้และทำการเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C 618 ซึ่งใช้ในประเมินความเป็นไปได้ในการนำมาใช้แทนที่ (Replacement) ในปูนซีเมนต์เป็นอันดับแรก ทั้งนี้เพราะการแทนที่ในปูนซีเมนต์เป็นการสร้างมูลค่าเพิ่ม (Value Added) ให้กับของเสียที่นำมาใช้ในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยจากการทดสอบเบื้องต้น พบว่าค่าดัชนีการพัฒนากำลังของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW ที่อายุ 7 และ 28 จะมีค่าร้อยละ 78 และ 82 ในขณะที่ผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW มีค่าร้อยละ 55 และ 60 ตามลำดับ ซึ่งในมาตรฐานดังกล่าวได้กำหนดว่าวัสดุที่นำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์จะต้องมีค่าดัชนีการพัฒนากำลังที่อายุ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75 ของปูนซีเมนต์ล้วน แต่กระนั้นคุณสมบัติที่สำคัญและมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จคือ การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (Loss on Ignition, LOI) และความต้องการน้ำ (Water Requirement) ซึ่งผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW มีค่าร้อยละ 0.87 และร้อยละ 102 ของตัวอย่างควบคุม (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน) ตามลำดับ ส่วนกลุ่ม GSW มีค่าร้อยละ 1.00 และร้อยละ 106 ของตัวอย่างควบคุม ตามลำดับ ดังนั้นจึงมีเพียง SSW ที่มีแนวโน้มที่จะนำมาใช้ทดแทนในปูนซีเมนต์ ในขณะที่ GSW ซึ่งมีคุณสมบัติไม่ผ่านข้อกำหนดก็มีทางเลือกในการนำมาแทนที่ในทรายธรรมชาติ โดยคำนึงถึงคุณสมบัติที่ต้องพิจารณา อาทิเช่น การกระจายขนาดผลของมวลรวมละเอียดที่ต้องเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33 (Standard Specification for Concrete Aggregates)

1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของผงฝุ่นทรายใต้แบบ
2. ศึกษาผลกระทบของผลฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW และ SSW ที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จที่ไม่มีสารผสมเพิ่ม โดยทำการแทนที่ SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และทำการแทนที่ GSW ในมวลรวมละเอียด (ทรายธรรมชาติ)
3. นำผลการศึกษามาประเมินเพื่อเลือกหาลักษณะและปริมาณการใช้ผงฝุ่นทรายใต้แบบการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษา

1. เป็นการนำผงฝุ่นทรายได้แบบจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนเครื่องยนต์ทั้งกลุ่ม GSW และ SSW กลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด
2. จากการศึกษาเบื้องต้น พบว่าคุณสมบัติเฉพาะของผงฝุ่นทรายได้แบบ อาทิเช่น ความละเอียด ซึ่งอาจมีส่วนช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จ
3. เพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ อันเป็นการลดการใช้ทรัพยากรซึ่งได้แก่ หินปูนที่จะนำมาทำปูนซีเมนต์
4. เป็นการรักษาสภาพสิ่งแวดล้อมจากการนำ GSW และ SSW ไปใช้ในการถมที่เป็นส่วนใหญ่ อันอาจก่อให้เกิดสภาพเป็นพิษสะสมจากปริมาณสารที่ตกค้างอยู่
5. เป็นการกระตุ้นให้โรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ที่มีของเหลือทิ้งและไม่ได้ใช้ประโยชน์อยู่เป็นจำนวนมากให้หันกลับมาใช้ของเหลือทิ้งแทนการปล่อยให้อยู่ในสิ่งแวดล้อมโดยเปล่าประโยชน์

1.5 ขอบเขตของการศึกษา

งานวิจัยนี้มีขอบเขตการศึกษาดังต่อไปนี้

1. แหล่งที่มาของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW) และ Shell Sand Waste (SSW) จากบริษัท สยามโคโยต้าอุตสาหกรรม (จำกัด) จังหวัดชลบุรี
2. ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา คือ ปริมาณการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 และปริมาณการแทนที่ GSW ในทรายธรรมชาติที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ
3. คุณสมบัติคอนกรีตผสมเสร็จมีขอบเขตดังต่อไปนี้
 - 3.1 คอนกรีตผสมเสร็จ เป็นคอนกรีตปกติที่ไม่มีสารผสมเพิ่มเป็นส่วนประกอบ
 - 3.2 ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีตหนึ่งลูกบาศก์เมตร เท่ากับ 300, 350 และ 400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ
 - 3.3 ค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) ของคอนกรีตเท่ากับ 5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 เซนติเมตร ตามลำดับ
4. การวิเคราะห์คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ GSW กับ SSW ประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมี อาทิเช่น ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมไดออกไซด์ (Al_2O_3) ไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นต้น และคุณสมบัติทางกาย-

ภาพได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) พื้นที่ผิวจำเพาะในรูปของความละเอียดด้วยวิธีเบลน (Blaine Fineness) ปริมาณความชื้น (Moisture Content) การกระจายขนาดผลของอนุภาค (Particle Size Distribution) ลักษณะของอนุภาคจากเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) และความเป็นผลึกด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction และดัชนีพัฒนากำลัง (Strength Activity Index, SAI)

5. การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสดประกอบด้วย ค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตในสภาวะสด (Unit Weight) และระยะเวลาในการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้าย (Initial and Final Setting Times)

6. การทดสอบคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต ได้แก่ กำลังรับแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีก (Compressive and Splitting Tensile Strengths) ที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน ตามลำดับ และ โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ที่อายุ 28 วัน

7. การทดสอบคุณสมบัติด้านความทนทานของคอนกรีตได้แก่ การขยายตัวในน้ำ (Expansion in Water) การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) ทั้งในรูปของการหดตัวและการสูญเสียน้ำหนัก ความทนทานต่อการกระทำเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulfate, Na_2SO_4) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (แนวทางจากมาตรฐาน ASTM C 1012 (Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortar Exposed to A Sulfate Solution)) ในรูปของการยืค/หดตัว และความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) และอะซิติก (CH_3COOH) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 นอร์มอลิตี (Normality, N) ซึ่งมีค่าความเป็นกรดค่า (pH) เท่ากับ 0.66 และ 2.56 ตามลำดับ ในรูปของการสูญเสียน้ำหนักที่อายุของการบ่มในสารละลายกรดเท่ากับ 3, 7, 28, 60, 90 และ 120 วัน ตามลำดับ

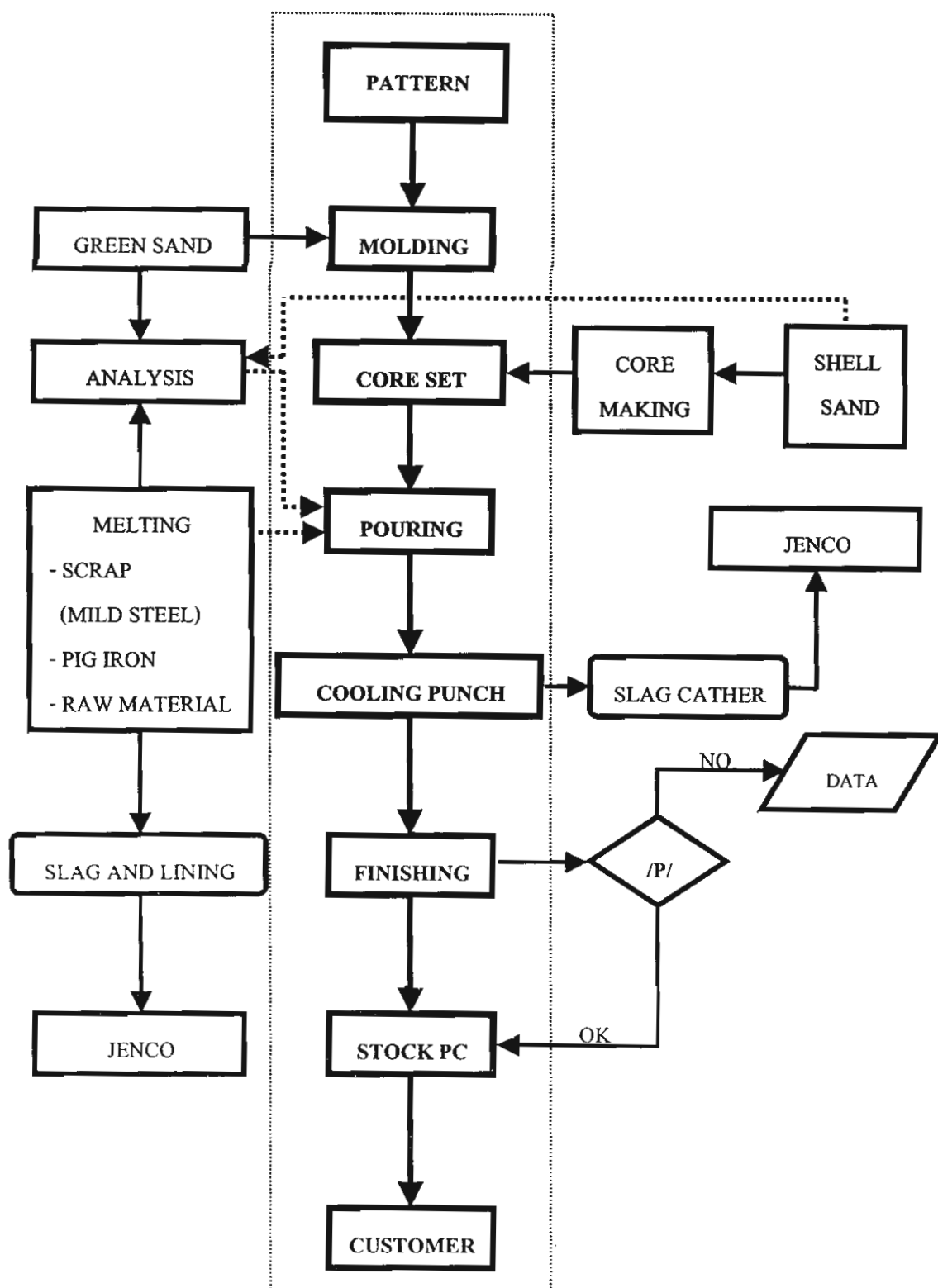
บทที่ 2

ข้อมูลเกี่ยวกับการกระบวนการผลิตและปริมาณของผงฝุ่นทรายใต้แบบที่เกิดขึ้น
รวมทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

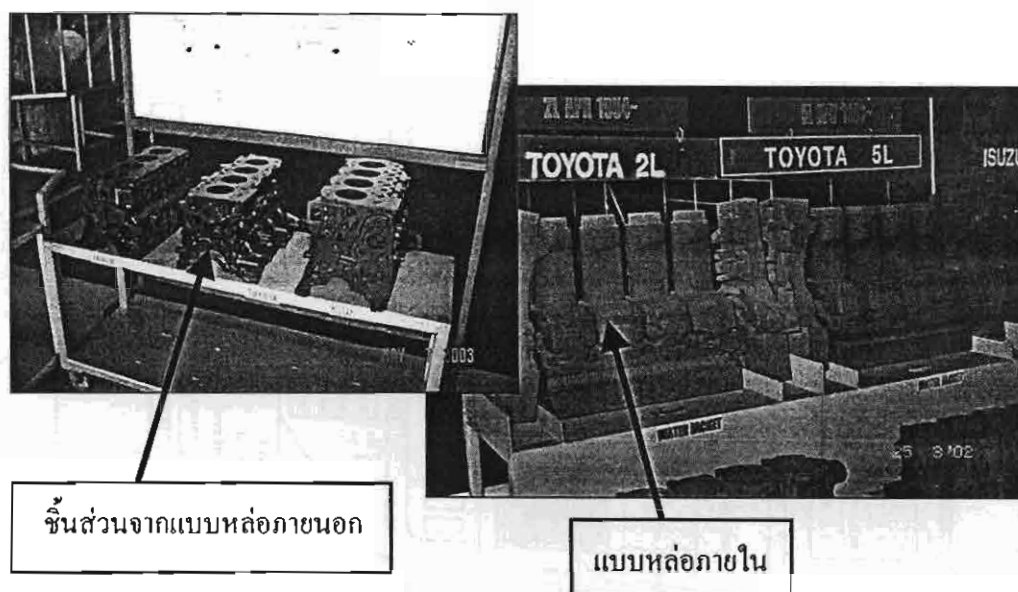
2.1 ข้อมูลเกี่ยวกับการผลิต

2.1.1 กระบวนการผลิตของโรงงานหล่อขึ้นส่วนรถยนต์

จากแผนผังแสดงกระบวนการผลิตของโรงงานหล่อขึ้นส่วนรถยนต์ของบริษัท โตโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด ในภาพที่ 2.1 โดยเริ่มต้นจากกระบวนการหลัก (ในกรอบประ) โดยเมื่อแบบหล่อ (Pattern) ได้รับการออกแบบเรียบร้อยแล้วจะเข้าสู่กระบวนการทำแบบหล่อจริง (Molding) ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนคือ แบบหล่อภายในและแบบหล่อภายนอก ดังแสดงในภาพที่ 2.2 โดยแบบหล่อทั้งสองส่วนจะใช้วัสดุดิบเป็นทรายที่นำเข้ามาจากประเทศออสเตรเลีย เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในเรื่องของขนาดที่ใกล้เคียงกัน แต่สิ่งที่แตกต่างกันของแบบหล่อทั้งสองคือ วัสดุที่ใส่เพิ่มเติมเพื่อปรับปรุงคุณภาพของทราย และอุณหภูมิในการขึ้นรูปซึ่งโดยปกติจะเรียกทรายที่ใช้ทำแบบหล่อภายนอกว่า Green Sand ได้รับอุณหภูมิประมาณ 1,400 องศาเซลเซียส ในขณะที่แบบหล่อภายในจะเรียกว่า Dust Shell Sand ได้รับอุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส เมื่อได้แบบหล่อทั้งสองส่วนแล้วจึงประกอบรวมกันเป็นแบบรวม (Core Set) ค่อยจากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนการเทส่วนผสมจากเตาหลอม (Pouring) โดยส่วนผสมจะประกอบด้วย Scrap ซึ่งเป็นเหล็กกล้าละมุน (Mild Steel) แร่เหล็ก (Pig Iron) และวัสดุดิบอื่นๆ ที่ช่วยปรับปรุงคุณภาพของส่วนผสมและในกระบวนการหลอมส่วนผสมนี้จะได้กากของเสียเป็นตะกั่วเตาหลอม (Slag) เศษผนังเตาหลอม (Lining) และฝุ่นจากเตาหลอม (Slag Dust) ที่หมดอายุการใช้งาน โดยกากดังกล่าวจะให้จัดส่งบริษัท เจน โก้ (JENCO) เป็นผู้ดำเนินการกำจัดต่อไป หลังจากการเทส่วนผสมเรียบร้อยแล้วจะมาถึงกระบวนการลดอุณหภูมิตามลำดับ โดยในขั้นตอนนี้จะมีตะกั่วเศษเหลือที่ติดกับแบบและหลุดร่อนออกในขณะที่มีการลดอุณหภูมิ และขั้นตอนท้ายสุดจะมาถึงกระบวนการตกแต่ง (Finishing) แล้วให้ได้ตรงตามแบบกำหนด ถ้าผ่านเกณฑ์ที่ควบคุมแล้วจึงทำการจัดเก็บ (Stock PC) เพื่อรอส่งมอบให้กับลูกค้า (Customer) แต่ในกรณีที่ไม่ผ่านจะจัดเก็บเป็นข้อมูลในการปรับปรุงคุณภาพต่อไป ในกระบวนการผลิตจะมีวิเคราะห์คุณภาพของขั้นตอนการทำแบบหล่อทั้งสองส่วนและการเทอย่างละเอียด



ภาพที่ 2.1 กระบวนการผลิตของโรงงานหล่อชิ้นส่วนรถยนต์



ภาพที่ 2.2 แบบหล่อภายในและแบบหล่อภายนอก

จากกระบวนการผลิตดังกล่าวของดินจะเกิดของเสียประเภทต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.3 ถ้าจัดกลุ่มตามแหล่งของการผลิตออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มจากกระบวนการหลอมและกลุ่มจากกระบวนการทำแบบหล่อ โดยในกลุ่มแรกจะเป็นตะกรันเตาหลอม (Slag) ผนังเตาหลอม (Lining) และฝุ่นจากเตาหลอม (Slag Dust) รวมทั้งเศษหลังจากการหล่อซึ่งได้แก่ ผงเหล็ก (Steel Powder) ส่วนกลุ่มหลังซึ่งเป็นกลุ่มที่มีปริมาณมากที่สุดได้แก่ ผงฝุ่นทรายใส่แบบซึ่งสามารถแบ่งย่อยตามสายการผลิตออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ คือ จากการทำแบบหล่อภายในได้ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม Shell Sand Waste จากการทำแบบหล่อภายนอกได้ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste และการตบแต่งชิ้นส่วนได้ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม Finishing Waste ซึ่งมีปริมาณโดยเฉลี่ยที่สำรวจในปี พ.ศ. 2545 จากมากไปน้อยเป็น 81, 20 และ 5 ตันต่อเดือน ตามลำดับ แต่ในปัจจุบันทางบริษัทได้ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของการผลิตใหม่จนทำให้ทรายกลุ่มที่มาจากการตบแต่งมีจำนวนลดลงเป็นอย่างมาก

2.1.2 ปริมาณสารพิษจากฝุ่นในกระบวนการผลิต

จากการตรวจสอบปริมาณของสารพิษที่มีอยู่ในผงฝุ่นทรายใต้แบบทั้งโรงงานของบริษัท สยาม โดยค้าอุตสาหกรรม จำกัด โดยบริษัท อีสเทิร์นไทยคอนสตรัคติง 1992 จำกัด เมื่อวันที่ 4 กุมภาพันธ์ 2545 ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2.1 พบว่าปริมาณสารพิษน้อยกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดไว้

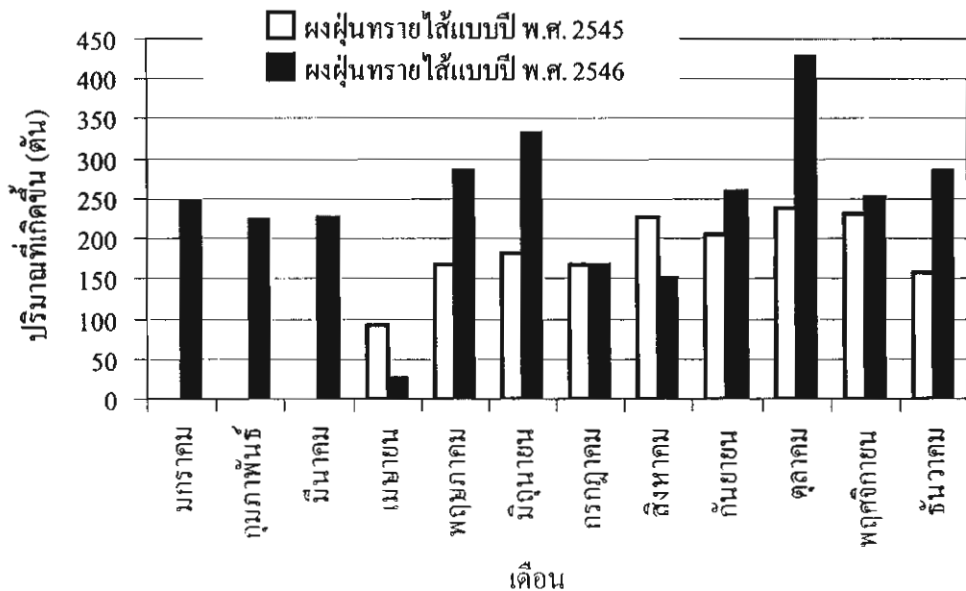
ตารางที่ 2.1

ปริมาณสารพิษที่ทำการตรวจวัดจากของเสียจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์

สารพิษ	หน่วย	วิธีทดสอบ	เศษทราย	เกณฑ์มาตรฐาน
Total Arsenic	Mg/l as As	Atomic Absorption Spectrometric Method	0.019	≤ 5.0
Total Barium	Mg/l as Ba	Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometric Method	0.17	≤ 100
Total Cadmium	Mg/l as Cd	Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometric Method	0.02	≤ 1.0
Total Chromium	Mg/l as Cr	Atomic Absorption Spectrometric Method	< 0.10	≤ 5.0
Total Copper	Mg/l as Cu	Atomic Absorption Spectrometric Method	< 0.10	-
Total Iron	Mg/l as Fe	Atomic Absorption Spectrometric Method	0.70	-
Total Lead	Mg/l as Pb	Atomic Absorption Spectrometric Method	< 0.10	≤ 5.0
Total Mercury	Mg/l as Hg	Atomic Absorption Spectrometric Method	0.002	≤ 0.2

2.2 ปริมาณของผงฝุ่นทรายใส่แบบ

ผลจากการสำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูลของผงฝุ่นทรายใส่แบบที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตของบริษัท สยามโคโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด ตั้งแต่เดือน เมษายน พ.ศ 2545 ถึง ธันวาคม พ.ศ 2546 แสดงในภาพที่ 2.4 พบว่าในช่วงปี พ.ศ. 2545 ปริมาณผงฝุ่นทรายใส่แบบมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ ในขณะที่ในปี พ.ศ. 2546 มีแนวโน้มที่ไม่แน่นอน อันเนื่องมาจากการแปรเปลี่ยนกำลังการผลิตที่เป็นไปตามความต้องการของตลาดและการซ่อมแซมระบบการผลิต โดยมีปริมาณเฉลี่ยของผงฝุ่นทรายใส่แบบในปี พ.ศ. 2545 และ พ.ศ. 2546 อยู่ที่ 185 และ 240 คันต่อเดือน ตามลำดับ



ภาพที่ 2.4 ปริมาณของผงฝุ่นทรายใส่แบบที่เกิดขึ้น

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Asgeirsson, H. and Gudmundsson, G.(1979) ได้ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของฝุ่นซิลิกา (Silica Dust) พบว่ามอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของฝุ่นซิลิกาจะมีการพัฒนากำลังในช่วงแรกคือ อันเนื่องมาจากผลของความแตกต่างในฝุ่นซิลิกาที่สูง

McIntyre, S. et al. (1992) ได้สรุปการใช้ประโยชน์จากทรายไล่แบบที่ได้จากอุตสาหกรรมการหล่อชิ้นส่วนโลหะ พบว่าทรายไล่แบบสามารถนำมาใช้แทนที่ในมวลรวมละเอียดในปริมาณการแทนที่ต่ำๆ ได้ โดยทรายไล่แบบสามารถทำหน้าที่เป็นวัสดุเติมแทรก (Filler Material) ในคอนกรีตซึ่งจะมีทำให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังในระยะยาวได้ดียิ่งขึ้น

Naik, T. et al. (1994) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของคอนกรีตในสถานะสดและแข็งตัวแล้ว เมื่อทำการแทนที่ทรายไล่แบบ (Foundry Sand) ทั้งที่ไม่ผ่านการใช้งานและผ่านการใช้งานในมวลรวมละเอียดโดยน้ำหนักที่ร้อยละ 25 และ 35 โดยกำหนดสัดส่วนผสมของคอนกรีตปกติให้มีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 38 เมกะปาสกาล (5,500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) พบว่าคอนกรีตที่ผสมทรายไล่แบบที่ผ่านการใช้งาน มีกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงและโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน ต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมทรายไล่แบบที่ไม่ผ่านการใช้งานร้อยละ 20 ถึง 30 ในขณะที่รับแรงอัดคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ทรายไล่แบบที่ไม่ผ่านการใช้งานในมวลรวมละเอียดร้อยละ 25 และ 35 มีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ

Naik T. and Kraus, R. (1995) ได้ศึกษาผลกระทบของทรายไล่แบบที่มีต่อการควบคุมกำลังของคอนกรีตที่มีค่าต่ำ พบว่าความหนาแน่นของคอนกรีตสดมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของการทรายไล่แบบที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่มีค่าความต้องการน้ำลดลง นอกจากนั้นระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตมีเพิ่มขึ้นตามร้อยละการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น สำหรับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ในส่วนผสมที่ทำการแทนที่ทรายไล่แบบในสัดส่วนร้อยละ 30 และ 60 ในมวลรวมละเอียดมีค่าเกินกว่า 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ในขณะที่การแทนที่ร้อยละ 70 จะทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 120 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

Shyh-Yau Wang and C. Vipulanandan (1995) ได้ทำการศึกษาการใช้ประโยชน์จากทรายไส้แบบในด้านวิศวกรรมโยธา พบว่าทรายไส้แบบประกอบด้วยทรายซิลิกา ดินและสารผสมเพิ่ม และจากการทดสอบการชะล้าง (Leachate) ทำให้ทราบว่าทรายไส้แบบเป็นวัสดุที่ไม่มีอันตราย นอกจากนั้นการแทนที่ทรายไส้แบบในลักษณะการเพิ่ม (Adding) ในปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 6 จะทำให้กำลังรับแรงเพิ่มขึ้นมากกว่า 250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

Sung-ro Cho and C. Vipulanandan (1995) ได้นำทรายไส้แบบซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการหล่อโลหะมาประยุกต์ใช้ในงานทางและได้ทำการทดสอบคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องอันประกอบด้วย คุณสมบัติทางกายภาพ ทางกลของทรายไส้แบบ รวมทั้งความสามารถในการไหลเป็นระยะเวลา 1 ปี พบว่าทรายดังกล่าวสามารถนำมาใช้แทนที่ทั้งในปูนซีเมนต์และทรายธรรมชาติได้

U.S Department of Transportation (2003) ได้สรุปข้อมูลการใช้ประโยชน์ของทรายไส้แบบในงานทางด้านวิศวกรรมโยธาดังต่อไปนี้

1. นิยามของทรายไส้แบบ (Foundry Sand) คือ ทรายซิลิกาที่มีคุณภาพสูงซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตทั้งที่โลหะและอโลหะ โดยคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีจะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบที่เป็นไปตามชนิดของกระบวนการหล่อ

2. ชนิดของทรายไส้แบบในทางปฏิบัติจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

2.1 Green Sand ประกอบด้วยซิลิการ้อยละ 85 ถึง 89 ดินร้อยละ 1 ถึง 12 และสารผสมเพิ่มประเภทคาร์บอนหรือร้อยละ 2 ถึง 10 โดยปกติจะนำมาทำเป็นแบบหล่อ เนื่องจากทรายชนิดนี้มีความต้านทานต่ออุณหภูมิสูงได้ดี ในบางชนิดของการหล่อจะมีเพิ่มองค์ประกอบประเภทแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) โพแทสเซียมออกไซด์ (K₂O) และไทเทเนียมออกไซด์ (TiO₂)

2.2 Chemical bonded sand ประกอบด้วยซิลิการ้อยละ 93 ถึง 99 และมีสารเชื่อมประสานอีกร้อยละ 1 ถึง 3 โดยทรายซิลิกาจะผสมรวมกับสารเคมีประเภทตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการแข็งตัวในช่วงต้นได้ดี

3. การใช้ประโยชน์และข้อกำหนดในการนำทรายไส้แบบมาใช้ในการผลิตคอนกรีต

3.1 ขนาดคละ (Gradation) ของอนุภาค โดยพบว่ามวลรวมละเอียดที่นำมาใช้เป็นส่วนประกอบคอนกรีตจะต้องมีขนาดคละเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 33 (Standard Specification for Concrete Aggregates) ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งโดยทั่วไปทรายไส้แบบจะมีความละเอียดมาก ทำให้จำนวนทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 30, 50 และ 100 มีปริมาณมาก ดังนั้นการใช้งานควรที่

ทดสอบผงฝุ่นทรายได้แบบที่ทำให้ขนาดกะของมวลรวมละเอียดไม่เกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด นอกจากนั้นในมาตรฐานได้กำหนดค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) ของมวลรวมละเอียดจะต้องมีค่าอยู่ในช่วง 2.3 ถึง 3.1

3.2 ปริมาณฝุ่น (Dust Content) ซึ่งจากมาตรฐาน ASTM C 33 ได้กำหนดปริมาณฝุ่นที่ยอมให้ในมวลรวมละเอียดในรูปของปริมาณที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 จะต้องไม่เกินร้อยละ 5

3.3 ความหนาแน่น (Density) ตามมาตรฐาน ASTM C 33 สำหรับมวลรวมละเอียดจะต้องมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.20 ถึง 1.76 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

4. สำหรับการนำทรายได้แบบประเภท Green Sand ซึ่งมีสีดามาใช้แทนที่ในมวลรวมละเอียดนั้น โดยปกติจะมีสัดส่วนการแทนที่ไม่เกินร้อยละ 15 อันเนื่องมาจากจะมีผลต่อสีของคอนกรีต

ตารางที่ 2.2

ข้อกำหนดของขนาดกะของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C 33

เบอร์ตะแกรง	ขนาดของตะแกรง (มิลลิเมตร)	ร้อยละผ่านสะสม (โดยน้ำหนัก)
4	4.75	95 – 100
8	2.36	80 – 100
16	1.18	50 – 85
30	0.600	25 – 60
50	0.300	10 – 30
100	0.150	2 – 10