

มหาวิทยาลัยแพทยศาสตร์
คณะแพทยศาสตร์
ภาควิชาเภสัชวิทยา

วิชา

เภสัชวิทยา

วิชาเภสัชวิทยา
ภาควิชาเภสัชวิทยา

ศาสตราจารย์ ดร. เภสัชกร

พ.ศ. ๒๕๔๗

ผลของผงฝุ่นทรายใส่แบบจากโรงหล่อเครื่องยนต์ต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จ
Effects of Foundry Sand Powder from Engine Foundry on Ready-mixed Concrete Properties

โดย

ณรงค์ศักดิ์ มากุล
Mr. Narongsak Makul

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
พ.ศ. 2547

ISBN 974-9722-56-6

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

นายณรงค์ศักดิ์ มากุล

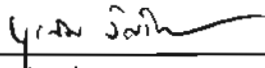
เรื่อง

ผลของผงฝุ่นทรายใส่แบบจากโรงหล่อเครื่องยนต์ต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จ

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

เมื่อ วันที่ 24 เดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2548

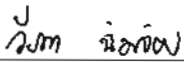
ประธานกรรมการ และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์


(รองศาสตราจารย์ ดร.ปฐพัตร ลัตรวีระ)

กรรมการวิทยานิพนธ์


(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดนัย วันทนากร)

กรรมการวิทยานิพนธ์


(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรยา จิมช้อย)

คณบดี


(รองศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ บุญญฤทธิง)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบ (Foundry Sand Powder) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการกระบวนการหล่อขึ้นส่วนเครื่องยนต์ของบริษัท สยามโตโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย โดยผงฝุ่นทรายที่ทำการศึกษามี 2 กลุ่มคือ ผงฝุ่นทรายกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW) ที่ได้จากกระบวนการทำแบบหล่อภายนอก และจากการทำแบบหล่อภายในได้ผงฝุ่นทรายกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) คุณสมบัติที่ทำการทดสอบประกอบด้วย องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของผงฝุ่นทรายไส้แบบ คุณสมบัติของคอนกรีตสด ได้แก่ ค่าความต้องการน้ำที่ทำให้คอนกรีตมีค่าการยุบตัวเริ่มต้นตามที่กำหนด การสูญเสียค่าการยุบตัว หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสด และระยะเวลาในการก่อตัว คุณสมบัติทางกลของคอนกรีต ได้แก่ ค่าลึงอัด ค่าลึงดึงแบบผ่าซีก และโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน ส่วนคุณสมบัติทางด้านความทนทานของคอนกรีตประกอบด้วย การขยายตัวในน้ำ การหดตัวแบบแห้ง ความทนทานต่อการละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในรูปของการยืดและ/หรือหดตัว และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และอะซิติก (CH_3COOH) ซึ่งกำหนดความเข้มข้นเท่ากับ 1 นอร์มอลิตี (N) โดยมีตัวแปรหลักได้แก่ ปริมาณการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 ส่วนผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ถูกนำมาใช้แทนที่ในทรายแม่น้ำโดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 ตามลำดับ โดยคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จเป็นคอนกรีตปกติและไม่มีส่วนประกอบของสารเคมีผสมเพิ่ม รวมทั้งกำหนดปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีตผสมเสร็จเท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม.³ และค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. ตามลำดับ

จากผลการทดสอบ พบว่าเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนัก มีปริมาณเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 มีผลให้คอนกรีตผสมเสร็จมีความต้องการน้ำซึ่งทำให้คอนกรีตมีค่าการยุบตัวเริ่มต้นตามที่กำหนดไว้ หน่วยน้ำหนักในสภาวะสด ค่าลึงอัด ค่าลึงดึงแบบผ่าซีก โมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน การขยายตัวในน้ำ การหดตัวแบบแห้งและการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ ในขณะที่ความต้านทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟิวริกและอะซิติก การสูญเสียค่าการยุบตัวและระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น

สำหรับคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW) โดยการใช้ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW แทนที่ในทรายแม่น้ำโดยน้ำหนัก ที่ปริมาณเพิ่มขึ้น จากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 5, 10 และ 15 ตามลำดับ มีผลให้คอนกรีตมีความต้องการน้ำที่ทำให้เกิด ค่ายุบตัวเริ่มต้นตามที่กำหนด หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสด การสูญเสียค่าการยุบตัว การขยายตัว ในน้ำ การหดตัวแบบแห้งและการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตเพิ่มขึ้น ในขณะที่กำลังอัดและ กำลังดึงแบบผ่าซีก โมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน และความต้านทานต่อการกัดกร่อนของกรดลดลง

จากการศึกษาสรุปแนวโน้มเบื้องต้นในการใช้งานว่า สามารถนำผงฝุ่นทรายได้แบบ จากกระบวนการทำให้แบบของอุตสาหกรรมการหล่อเครื่องยนต์มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตคอนกรีต ผสมเสร็จซึ่งเป็นคอนกรีตปกติที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม.³ และค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. และไม่ใส่ สารผสมเพิ่ม โดยใช้ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) แทนที่ในปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้ถึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก หรือใช้ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW) แทนที่ในทรายแม่น้ำ โดยน้ำหนัก ได้ถึงร้อยละ 15 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ กำลังอัดที่กำหนด

Abstract

The objective of this research was to study the properties of ready-mixed concrete containing foundry sand powder, a main by-product from the automobile engine casting process of Siam Toyota Manufacturing Co., Ltd. in Chonburi province, Thailand. 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. The tested properties included the chemical compositions and physical properties of foundry sand powder. Fresh concrete properties were the water requirement of concrete for the specified slump, slump loss, unit weight in fresh state, and setting time. The mechanical properties such as compressive strength, splitting tensile strength and modulus of elasticity at the age of 28 days, were investigated. The durability properties of concrete were the expansion in water, drying shrinkage, and resistance of sodium sulfate (Na_2SO_4) at 5% concentration by monitoring the expansion and/or shrinkage of concrete. The other properties were the weight loss due to sulfuric (H_2SO_4) and acetic acid (CH_3COOH) attacks. The concentration of both acids was equal 1.0 Normality (N). The main variables were the percentage replacements of SSW foundry sand by weight of ordinary Portland cement type I (0%, 10%, 20%, 30%, and 40%) and the percent replacements of GSW foundry sand by weight of natural sand were 0%, 5%, 10%, and 15% respectively. The ready-mixed concrete tested were normal concrete without chemical admixture. In addition, the ordinary Portland cement type I contents of 300, 350, and 400 kg/m^3 and the initial slumps of concrete equal 5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 , and 15 ± 0.5 centimeters were controlled.

The test results indicated that when increasing the proportions of Shell Sand Waste (SSW) foundry sand powder in Portland cement type I (0%, 10%, 20%, 30%, and 40 % by weight) it was found that, the water requirement of concrete at the specified slump, unit weight in fresh state, compressive and splitting tensile strengths, modulus of elasticity at the age of 28 days, expansion in water, drying shrinkage, and expansion in sulfate solution decreased compared with those of the conventional concrete. Whereas, the resistance due to sulfuric and acetic acids attacks, slump loss, and setting time of concrete increased.

For the properties of concrete containing Green Sand and Molding Waste (GSW) foundry sand powder, by replacing the GSW foundry sand in river sand increased with the

proportion of 0%, 5%, 10%, and 15% by weight, the water requirement of concrete at the specified slump, unit weight, slump loss, expansion in water, drying shrinkage, and expansion in sulfate solution increased, whereas the compressive and splitting tensile strengths, modulus of elasticity at the age of 28 days, and the percentage of weight loss increased.

From the study, it can be concluded the preliminary tendency to use the foundry sand form cast forming process of engine foundry industry as raw materials for producing ready-mixed concrete which is conventional concrete for the cement content (300, 350, and 400 kg/m³) and initial slump loss (5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 , and 5 ± 0.5 cm), without admixtures were specified. It was found that the SSW foundry sand can be used as an ordinary Portland cement type I replacement for up to 40% by weight, and the GSW foundry sand can replace the river sand for up to 15% by weight, depending on the specified compressive strength of concrete.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงด้วยดี ผู้วิจัยใคร่กราบขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. บุรฉัตร ฉัตรวิระ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คณัย วันทนากุล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีรยา ฉิมอภัย ในฐานะกรรมการที่ได้ให้ความกรุณาเป็นอย่างสูงในการ แนะนำสิ่งที่มีประโยชน์แก่การทำวิจัยนี้ นอกจากนี้ขอขอบพระคุณผู้ให้การสนับสนุนดังมี รายนามต่อไปนี้ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยภายใต้ สัญญาเลขที่ RGD4650019 โดยเฉพาะ ศาสตราจารย์ ดร. ปิยะวัติ บุญหลง (ผู้อำนวยการ สกว.) รองศาสตราจารย์ ดร. สุธีระ ประเสริฐทรัพย์ (ผู้อำนวยการสกว. ฝ่าย 5) คุณวิชชากร จามิกร และ คุณธนพงศ์ กลั่นอุทัย ผู้ประสานงานชุดโครงการสนับสนุนผู้ปฏิบัติการวิจัยในภาคอุตสาหกรรม (IRAS) และเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องทุกท่าน นอกจากนี้มีฝ่ายอุตสาหกรรมที่เข้าร่วมโครงการและให้การสนับสนุนเป็นอย่างดีตั้งแต่บริษัท สยามโตโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด โดยคุณมิโนรุ โยชิยะ (กรรมการผู้จัดการ) คุณบันชัย จันทชีวกุล (ผู้จัดการฝ่ายผลิตเหล็กหล่อ) และบริษัท เอเซียผลิตภัณฑ์ ซีเมนต์ จำกัด โดยคุณโตเกียรติ ภาอาภรณ์ (กรรมการผู้จัดการ) คุณวิระศักดิ์ ทองทา (ผู้จัดการฝ่าย ควบคุมคุณภาพ) คุณธนกร ธนุสร (หัวหน้าห้องปฏิบัติการ) และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทุกคน สำหรับความช่วยเหลือและกำลังใจในการทำวิจัยที่โรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ (ดอนเมือง)

ท้ายสุดทางคณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้มีส่วนช่วยอื่นๆ ที่ทำให้งานวิจัยครั้งนี้ก้าวหน้า มาโดยตลอดจนประสบความสำเร็จทุกท่าน และกราบแทบเท้าขอบพระคุณ คุณสนธยา และ คุณทองคำ มากุล บิดามารดา และคุณสุกัญญา มากุล ที่เป็นกำลังในการทำงานมาตลอด หากมีท่านใด ที่ไม่ได้เอ่ยนามไว้ ณ ที่นี้ ต้องกราบขออภัยเป็นอย่างสูง

ณรงค์ศักดิ์ มากุล
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
พ.ศ. 2548

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	(1)
Abstract.....	(3)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(14)
สารบัญภาพประกอบ.....	(17)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(27)
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของการศึกษา.....	1
1.2 ประเด็นปัญหา.....	2
1.3 การประเมินศักยภาพเบื้องต้นและสัดส่วนการใช้งานของผงฝุ่นทรายไร้แบบ.....	2
1.4 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	9
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษา.....	10
1.6 ขอบเขตของการศึกษา.....	10
2. ข้อมูลเกี่ยวกับการกระบวนการผลิต ปริมาณของผงฝุ่นทรายไร้แบบและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
2.1 ข้อมูลเกี่ยวกับการผลิต.....	12
2.1.1 กระบวนการผลิตของโรงงานหล่อชิ้นส่วนรถยนต์.....	12
2.1.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต.....	12
2.1.1.2 ผลิตภัณฑ์.....	12
2.1.1.3 กระบวนการผลิต.....	12
2.1.2 ปริมาณสารพิษจากฝุ่นในกระบวนการผลิต.....	19
2.2 ปริมาณของผงฝุ่นทรายไร้แบบ.....	20

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	25
3.1 ความหมายของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	25
3.2 สารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	25
3.2.1 สารประกอบหลัก.....	25
3.2.2 สารประกอบรอง.....	26
3.3 ปฏิริยาไฮเดรชัน.....	27
3.3.1 ปฏิริยาของสารประกอบ.....	27
3.3.2 กลไกของปฏิริยาไฮเดรชัน.....	29
3.4 ปฏิริยาปอซโซลานิก.....	31
3.4.1 ความหมายของสารปอซโซลาน.....	31
3.4.2 ปฏิริยาปอซโซลานิกของสารปอซโซลาน.....	32
3.4.3 กลไกของปฏิริยาไฮเดรชันที่มีสารปอซโซลาน.....	32
3.5 ทฤษฎีเกี่ยวกับคุณสมบัติที่มีการทดสอบ.....	34
3.5.1 การกระจายขนาดผลึกของอนุภาค.....	34
3.5.2 ทฤษฎีความเป็นผลึกของสาร.....	35
3.5.3 คุณสมบัติของคอนกรีตในสภาพสด.....	35
3.5.3.1 ค่าการยุบตัว (Slump) และการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss)....	35
3.5.3.2 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต.....	36
3.5.4 คุณสมบัติทางกลของคอนกรีต.....	37
3.5.4.1 กำลังรับแรงของคอนกรีต.....	37
3.5.4.2 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต.....	39
3.5.5 คุณสมบัติทางด้านความทนทานของคอนกรีต.....	39
3.5.5.1 การหดตัวแบบแห้ง.....	39
3.5.5.2 การกระทำเนื่องจากซัลเฟต.....	40

3.5.5.3 การกระทำเนื่องจากกรด.....	41
4. วิธีการศึกษา.....	44
4.1 แผนการทดสอบ.....	44
4.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....	44
4.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....	45
4.1.2.1 เครื่องมือวัด.....	45
4.1.2.2 อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม.....	45
4.1.2.3 อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต.....	45
4.1.3 สถานที่ที่ใช้ในการทดสอบ.....	46
4.1.4 รายละเอียดวิธีการทดสอบ.....	46
4.1.4.1 การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ.....	46
4.1.4.2 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต.....	47
4.1.4.3 สัดส่วนที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต.....	49
4.1.4.4 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ.....	49
4.1.4.5รายละเอียดการผสมคอนกรีตผสมเสร็จ (Ready-mixed Concrete) ผสมผงฝุ่นทรายได้แบบ.....	60
5. ผลการทดสอบและวิจารณ์ผลกระทบจากการใช้ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม <u>Shell Sand Waste</u> (SSW) ผสมคอนกรีต.....	63
5.1 คุณสมบัติพื้นฐานของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม <u>Shell Sand Waste</u> (SSW).....	63
5.1.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ.....	63
5.1.2 ลักษณะของอนุภาค.....	69
5.1.2.1 ทรายจากประเทศออสเตรเลีย (Australia Sand).....	69
5.1.2.2 ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม <u>Shell Sand Waste</u> (SSW).....	70

5.1.3 การกระจายขนาดผลึกของอนุภาคผงปูนทรายไล้แบบ.....	71
5.1.4 ความเป็นผลึกของอนุภาค.....	73
5.2 คุณสมบัติของคอนกรีตผสมผงปูนทรายไล้แบบกลุ่ม SSW ในสถานะสด.....	75
5.2.1 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตในสภาพสด (Unit Weight).....	75
5.2.2 ปริมาณน้ำที่ทำให้เกิดค่าการยุบตัวของคอนกรีต (Water Requirement).....	77
5.2.3 ค่าการยุบตัวเริ่มต้นและการสูญเสียค่าการยุบตัว (Initial Slump and Slump Loss).....	79
5.2.4 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตสด (Setting Time).....	85
5.3 คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตผสมผงปูนทรายไล้แบบกลุ่ม SSW	88
5.3.1 กำลังอัดของคอนกรีต (Compressive Strength).....	88
5.3.2 กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต (Splitting Tensile Strength).....	92
5.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเสร็จ.....	94
5.3.4 โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity).....	96
5.4 คุณสมบัติทางด้านความทนทานของคอนกรีตผสมผงปูนทรายไล้แบบกลุ่ม SSW...	100
5.4.1 การขยายตัวในน้ำ (Expansion in Water).....	100
5.4.2 การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage).....	103
5.4.2.1 การเปลี่ยนแปลงความยาวของคอนกรีต (Length Change).....	103
5.4.2.2 การหดตัวแบบแห้งเนื่องจากการสูญเสียน้ำหนักการระเหยของน้ำ (Drying Shrinkage due to Weight Loss from Water Evaporation)....	106
5.4.3 การกระทำเนื่องจากซัลเฟต (Sulfate Attack).....	109
5.4.4 การกระทำเนื่องจากกรด (Acid Attack).....	113
5.4.4.1 การกระทำเนื่องจากกรดซัลฟูริก (Sulfuric Acid Attack)	113
5.4.4.2 การกระทำเนื่องจากกรดอะซิติก (Acetic Acid Attack)	116
5.5 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบจากการใช้ผงปูนทรายไล้แบบกลุ่ม SSW ที่มีต่อคอนกรีต.....	119
5.5.1 คุณสมบัติพื้นฐานของผงปูนทรายไล้แบบ.....	119

5.5.2 คุณสมบัติของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW).....	119
6. ผลการทดสอบและวิจารณ์ผลกระทบจากการใช้ผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW) ผสมคอนกรีต.....	123
6.1 คุณสมบัติพื้นฐานของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW).....	123
6.1.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ.....	123
6.1.2.1 ทรายจากประเทศออสเตรเลีย (Australia Sand) ทรายแม่น้ำ และผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW).....	127
6.1.3 การกระจายขนาดคละของอนุภาคผงฝุ่นทรายใต้แบบ.....	128
6.1.4 ความเป็นผลึกของอนุภาค.....	129
6.2 คุณสมบัติของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW ในสถานะสด.....	131
6.2.1 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตในสภาพสด (Unit Weight).....	131
6.2.2 ปริมาณน้ำที่ทำให้เกิดค่าการยุบตัวของคอนกรีต (Water Requirement).....	133
6.2.3 ค่าการยุบตัวเริ่มต้นและการสูญเสียค่าการยุบตัว (Initial Slump and Slump Loss).....	135
6.2.4 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตสด (Setting Time).....	141
6.3 คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW	143
6.3.1 กำลังอัดของคอนกรีต (Compressive Strength).....	143
6.3.2 กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต (Splitting Tensile Strength).....	146
6.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเสร็จ.....	148
6.3.4 โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity).....	150
6.4 คุณสมบัติทางด้านความทนทานของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW...	153
6.4.1 การขยายตัวในน้ำ (Expansion in Water).....	153

6.4.2 การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage).....	156
6.4.2.1 การเปลี่ยนแปลงความยาวของคอนกรีต (Length Change).....	156
6.4.2.2 การหดตัวแบบแห้งเนื่องจากการสูญเสียน้ำหนักการระเหยของน้ำ (Drying Shrinkage due to Weight Loss from Water Evaporation)....	158
6.4.3 การกระทำเนื่องจากซัลเฟต (Sulfate Attack).....	160
6.4.4 การกระทำเนื่องจากกรด (Acid Attack).....	162
6.4.4.1 การกระทำเนื่องจากกรดซัลฟูริก (Sulfuric Acid Attack)	162
6.4.4.2 การกระทำเนื่องจากกรดอะซิติก (Acetic Acid Attack)	164
6.5 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบจากการใช้ผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW ที่มีต่อคอนกรีต.....	166
6.5.1 คุณสมบัติพื้นฐานของผงฝุ่นทรายใต้แบบ.....	166
6.5.2 คุณสมบัติของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม <u>Green Sand and</u> <u>Molding Waste (GSW)</u>	166
7. สรุปผลการศึกษา.....	170
7.1 สรุปผลการศึกษา.....	170
7.1.1 คอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม <u>Shell Sand Waste (SSW)</u>	170
7.1.2 คอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม <u>Green Sand and</u> <u>Molding Waste (GSW)</u>	171
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	173
บรรณานุกรม.....	174
ภาคผนวก.....	171
ก. คุณสมบัติของมวลรวมและการคำนวณสารละลายยกรวดที่ใช้ในการทดสอบ.....	178

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ก.1 คุณสมบัติของมวลรวม.....	178
ก.2 การกระจายของขนาดอนุภาคทรายที่ใช้ในการทดสอบ.....	180
ก.3 การคำนวณสารละลายกรดที่ใช้ในการทดสอบ.....	187
ข. ผลการทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสด.....	190
ข.1 ผลการทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตในสภาพสด.....	190
ข.2 ผลการทดสอบหาค่าการยุบตัว (Slump) และการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss)...	193
ข.3 ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต.....	198
ค. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต.....	201
ค.1 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต.....	201
ค.2 ผลการทดสอบกำลังดึงผ่าซีกของคอนกรีต.....	206
ค.3 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต.....	211
ง. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านความทนทานของคอนกรีต.....	214
ง.1 ผลการทดสอบการขยายตัวในน้ำ (Expansion in Water).....	214
ง.2 ผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง.....	219
ง.3 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักอันเนื่องมาจากการหดตัวแบบแห้ง.....	235
ง.4 ผลการทดสอบการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟต (Expansion in Sodium Sulfate)...	251
ง.5 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริก.....	267
ง.6 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดอะซิติก.....	271
จ. ภาพที่ได้จากการศึกษา.....	275
จ.1 โรงงานหล่อชิ้นส่วนรถยนต์ของบริษัท โตโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด จังหวัดชลบุรี.....	275
จ.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....	277
จ.3 การทดสอบการกระจายขนาดผลของอนุภาคผงฝุ่นทรายได้แบบ.....	278
จ.4 การปรับเทียบถังสำหรับใช้ในการทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนัก.....	285
จ.5 ภาพแสดงการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จในโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จของ บริษัท เอเซียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์จำกัด.....	280
จ.6 การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตในสภาพสด (Unit Weight).....	281

จ.7 การทดสอบค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) และการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss).....	282
* จ.8 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว.....	283
จ.9 ตัวอย่างคอนกรีตผสมเสร็จหลังจากการถอดแบบ.....	283
จ.10 การทดสอบหาค่ากำลังอัดของคอนกรีต.....	284
จ.11 การทดสอบกำลังดึงแบบผ่าสี่ของคอนกรีต.....	284
จ.12 การทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน.....	285
จ.13 การทดสอบหาค่าหาคัดตัวแบบแห้งของคอนกรีต.....	286
จ.14 การทดสอบความทนทานต่อโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีต.....	287
จ.15 การทดสอบการกัดกร่อนของคอนกรีตเนื่องจากกรด.....	288
ประวัติการศึกษา.....	290

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ค่าการขยายตัวของเพสต์ซีเมนต์ที่ผ่านการเร่งด้วยเทคนิคอโตแคล์ฟ.....	4
1.2 ค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) ของมวลรวมผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW.....	6
1.3 ปริมาณปูนซีเมนต์ขั้นต่ำในคอนกรีตตามมาตรฐาน American Concrete Institute (ACI)...	7
1.4 ค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) ที่ควรมีค่าเพียงพอสำหรับการเทคอนกรีตเข้าแบบ โดยแบ่งตามชนิดขององค์อาคาร.....	8
2.1 ชนิดของวัสดุที่ใช้ในกระบวนการผลิต.....	12
2.2 ปริมาณสารพิษที่ทำการตรวจวัดจากของเสียจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์.....	19
2.3 ข้อกำหนดของขนาดละเอียดของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C 33.....	24
3.1 การแบ่งกลุ่มความสามารถในการละลายของเกลือแคลเซียมในกรดอินทรีย์ (หน่วยเป็นกรัมในน้ำ 100 กรัม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส).....	42
3.2 การแบ่งกลุ่มความสามารถในการละลายของเกลือแคลเซียมในกรดอนินทรีย์ (หน่วยเป็นกรัมในน้ำ 100 กรัม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส).....	43
4.1 คุณสมบัติผงฝุ่นทรายไส้แบบที่ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1.....	46
4.2 สัดส่วนผสมของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ด้วย Shell Sand Waste (SSW) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1.....	50
4.3 สัดส่วนผสมของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ด้วย Green Sand Waste (GSW) ในทรายธรรมชาติ.....	51
4.4 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จผสม Shell Sand Waste (SSW).....	52
5.1 องค์ประกอบเคมีของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) เปรียบเทียบกับ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1.....	65
5.2 ค่าสถิติแสดงความผันแปรขององค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของ ผงฝุ่นทรายไส้แบบ.....	66

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.3 คุณสมบัติทางกายภาพของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม <u>Shell Sand Waste</u> (SSW) เปรียบเทียบกับ กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1.....	67
5.4 องค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม <u>Shell Sand Waste</u> (SSW) ที่ได้จากการการเก็บตัวอย่างในครั้งที่ 1 กับประเภทของสารปอชโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618.....	68
5.5 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW.....	86
5.6 ระยะเวลาการก่อตัวที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW.....	121
6.1 องค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม <u>Green Sand and</u> <u>Molding Waste</u> (GSW) เปรียบเทียบกับทรายแม่น้ำ.....	125
6.2 ค่าสถิติแสดงความผันแปรขององค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของ ผงฝุ่นทรายใต้แบบ.....	126
6.3 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW.....	141
6.4 ระยะเวลาการก่อตัวที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW.....	168
ภาคผนวก.....	178
ก.1.1 ความถ่วงจำเพาะและร้อยละการดูดซับของมวลรวม.....	179
ก.2.1 การกระจายของขนาดอนุภาคทรายวัดดูดึบ.....	180
ก.2.2 การกระจายของขนาดอนุภาคทรายผงฝุ่นทรายใต้แบบชนิด GSW.....	183
ก.2.3 การกระจายของขนาดอนุภาคทรายผงฝุ่นทรายใต้แบบชนิด SSW.....	185
ข.1.1 ผลการทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตในสภาพสด.....	190
ข.2.1 ผลการทดสอบหาค่าการยุบตัว (Slump) และการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss).....	193
ข.3.1 ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต.....	198
ค.1 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต.....	201
ค.2 ผลการทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต.....	206
ค.3.1 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน.....	211
ง.1.1 ผลการทดสอบการขยายตัวในน้ำ (Expansion in Water).....	214

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
จ.2.1 ผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage).....	219
จ.3.1 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักอันเนื่องมาจากการหดตัวแบบแห้ง.....	235
จ.4.1 ผลการทดสอบการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟต (Expansion in Sodium Sulfate)....	251
จ.5.1 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริกของคอนกรีต.....	267
จ.6.1 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดอะซิติกของคอนกรีต.....	271

สารบัญภาพประกอบ

ภาพที่	หน้า
1.1 การกระจายขนาดคละของทรายธรรมชาติและที่ผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW.....	4
2.1 รายละเอียดขั้นตอนกระบวนการผลิต.....	16
2.2 แบบหล่อภายในและแบบหล่อภายนอก.....	17
2.3 แผนผังแสดงตำแหน่งกระบวนการผลิตและของเสียที่เกิดขึ้น.....	18
2.4 ปริมาณของผงฝุ่นทรายได้แบบที่เกิดขึ้น.....	20
2.5 ขั้นตอนการเตรียมทรายในการผลิตได้แบบหล่อและขนาดคละของทรายได้แบบ.....	21
3.1 ปฏิริยาของแคลเซียมซัลไฟด์ (C_3S , C_2S).....	27
3.2 ลักษณะของเอทริงไกต์ (Ettringite) มีรูปทรงอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับเข็มผลึก.....	28
3.3 การพัฒนาของปฏิริยาไฮเดรชันในแต่ละสารประกอบหลัก.....	31
3.4 ปริมาณของผลิตภัณฑ์จากปฏิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นที่เวลาต่างๆ.....	31
3.5 ปฏิริยาไฮเดรชันที่เกิดร่วมกับปฏิริยาปอซโซลานิก.....	33
3.6 เครื่อง Laser Particle Size Analyzer.....	34
3.7 แบบจำลองสำหรับการแทรกสอดของคลื่นตามสมการ $2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda$	35
3.8 ระยะเวลาการก่อตัวของตัวอย่างคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM 403.....	37
3.9 การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต.....	38
3.10 การสูญเสียความชื้นผ่านทางโพลคาพิวารีและเจล.....	39
4.1 การติดตั้งเครื่องทดสอบแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 496.....	48
4.2 กระบวนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงฝุ่นทรายได้แบบ.....	61
5.1 ลักษณะของอนุภาคทรายจากประเทศออสเตรเลีย จากเทคนิคการถ่ายภาพ (ก) SEM ที่กำลังขยาย 150 เท่า และ (ข) BEI ที่กำลังขยาย 150 เท่า.....	69
5.2 ลักษณะของอนุภาคทรายจากประเทศออสเตรเลีย จากเทคนิคการถ่ายภาพ (ก) SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า และ (ข) BEI ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า.....	70
5.3 ลักษณะของอนุภาคผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW จากเทคนิคการถ่ายภาพ (ก) SEM ที่กำลังขยาย 150 เท่า และ (ข) BEI ที่กำลังขยาย 150 เท่า.....	71

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.4 ลักษณะของอนุภาคผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW จากเทคนิคการถ่ายภาพ	
(ก) SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า และ (ข) BEI ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า.....	71
5.5 การกระจายขนาดผลึกของอนุภาคทรายทำใ้แบบหล่อ (จากออสเตรเลีย) และ ผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1.....	72
5.6 ผลการตรวจวัดความเป็นผลึกด้วยด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction ของผงฝุ่นทรายใต้แบบ กลุ่ม SSW.....	74
5.7 หน่วยน้ำหนักในสถานะสดของคอนกรีต โดยมีปริมาณวัสดุผง (ปูนซีเมนต์ล้วน (ร้อยละ 0) หรือปูนซีเมนต์ซึ่งถูกแทนที่ด้วยผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW โดยน้ำหนัก (ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40)) ในคอนกรีตเท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม. ³	76
5.8 ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมในคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW เทียบเท่าปริมาณน้ำที่ใช้ ผสมในคอนกรีตซึ่งผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน.....	78
5.9 ค่าการสูญเสียการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณวัสดุผงเท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใต้แบบ กลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก.....	79
5.10 ค่าการสูญเสียการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณวัสดุผงเท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใต้แบบ กลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก.....	80
5.11 การสูญเสียการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณวัสดุผงเท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใต้แบบ กลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก.....	81
5.12 การสูญเสียการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณวัสดุผงเท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใต้แบบ กลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก.....	81
5.13 การสูญเสียการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณวัสดุผงเท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใต้แบบ กลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก.....	82

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.14 การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณวัสดุผงเท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบ กลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก.....	82
5.15 การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณวัสดุผงเท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบ กลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก.....	83
5.16 การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณวัสดุผงเท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบ กลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก.....	83
5.17 การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณวัสดุผงเท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบ กลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก.....	84
5.18 กำลังอัดเทียบเท่าของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW เปรียบเทียบกับ คอนกรีตปกติ.....	91
5.19 กำลังดึงแบบผ่าซีกเทียบเท่าของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW เปรียบเทียบ กับคอนกรีตปกติ.....	93
5.20 ความสัมพันธ์และค่าเปรียบเทียบระหว่างกำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกของ คอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW.....	95
5.21 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ที่อายุ 28 วัน โดยกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 5 ± 0.5 ซม.	97
5.22 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ที่อายุ 28 วัน โดยกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 10 ± 0.5 ซม.	98
5.23 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ที่อายุ 28 วัน โดยกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 15 ± 0.5 ซม.	98
5.24 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ที่อายุ 28 วัน เปรียบเทียบกับมาตรฐาน ACI 318.....	99

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.25 ค่าการขยายตัวในน้ำของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW เปรียบเทียบกับ คอนกรีตปกติ.....	102
5.26 ค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW เปรียบเทียบกับ คอนกรีตปกติ.....	105
5.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวแบบแห้งและค่าการสูญเสียน้ำหนัก (ร้อยละ) ของ คอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW.....	108
5.28 ค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ของคอนกรีตผสมผงฝุ่น ทรายได้แบบกลุ่ม SSW.....	112
5.29 อัตราการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริกเทียบเท่าคอนกรีตปกติของคอนกรีตผสม ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW.....	115
5.30 อัตราการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดกรดอะซิติกเทียบเท่าคอนกรีตปกติของคอนกรีต ผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW.....	118
6.1 ลักษณะของอนุภาคทรายจากประเทศออสเตรเลีย (Australia Sand) ทรายแม่น้ำ และ ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW) ที่กำลังขยาย 150 เท่า.....	127
6.2 การกระจายขนาดผลของอนุภาคทรายทำแบบหล่อจากออสเตรเลียและผงฝุ่นทรายได้แบบ กลุ่ม GSW เปรียบเทียบกับทรายแม่น้ำ.....	128
6.3 ผลการตรวจวัดความเป็นผลึกด้วยรังสี X-Ray ของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW.....	130
6.4 หน่วยน้ำหนักในสถานะสดของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW และมี ปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตเท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม. ³	132
6.5 ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมในคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW เทียบเท่าปริมาณน้ำ ที่ใช้ผสมในคอนกรีตซึ่งผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน.....	134
6.6 การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก.....	135

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
6.7 การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก.....	136
6.8 การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก.....	138
6.9 การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก.....	137
6.10 การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก.....	138
6.11 การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก.....	138
6.12 การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฟูนทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก.....	139

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
6.13 การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก.....	139
6.14 การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก.....	140
6.15 กำลังอัดเทียบเท่าของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW เปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ.....	145
6.16 กำลังดึงแบบผ่าซีกเทียบเท่าของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW เปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ.....	147
6.17 ความสัมพันธ์และค่าเปรียบเทียบระหว่างกำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW.....	149
6.18 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ที่อายุ 28 วัน โดยกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 5 ± 0.5 ซม.	150
6.19 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ที่อายุ 28 วัน โดยกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 10 ± 0.5 ซม.	151
6.20 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ที่อายุ 28 วัน โดยกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) เท่ากับ 15 ± 0.5 ซม.	151
6.21 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ที่อายุ 28 วัน เปรียบเทียบกับมาตรฐาน ACI 318.....	152
6.22 ค่าการขยายตัวในน้ำของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW เปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ.....	155
6.23 ค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW เปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ.....	157

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
จ.3.2 การชั่งตะแกรง.....	278
จ.3.3 การชั่งตัวอย่างทดสอบจำนวน 500 กรัม.....	278
จ.3.4 การเขย่าในเครื่องเขย่า (Sieve).....	278
จ.4.1 การชั่งน้ำหนักถึง.....	279
จ.4.2 การเทน้ำลงในถัง.....	279
จ.4.3 ถังที่ใส่น้ำหลังจากนำกระกมาปรับระดับน้ำให้เสมอขอบถังรวมทั้งวัดอุณหภูมิ ของน้ำเป็นที่เรียบร้อย.....	279
จ.5.1 โรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จของบริษัท เอเซียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัด.....	280
จ.5.2 แบบหล่อที่ใช้ในการตัวอย่างคอนกรีตผสมเสร็จ.....	280
จ.5.3 เครื่องผสมคอนกรีตผสมเสร็จ.....	280
จ.5.4 การชั่งผงฝุ่นทรายใส่แบบก่อนนำไปใส่ในเครื่องผสมคอนกรีตผสมเสร็จ.....	280
จ.5.5 การบรรจุคอนกรีตผสมเสร็จลงรถโม.....	280
จ.5.6 การขนถ่ายคอนกรีตผสมเสร็จลงจากรถโม.....	280
จ.5.7 การเติมน้ำในรถผสม คอนกรีตเพื่อให้คอนกรีตมีค่าการยุบตัว (Slump) ของคอนกรีตได้ตามกำหนดไว้.....	281
จ.5.8 การบรรจุคอนกรีตลงในแบบหล่อ.....	281
จ.5.9 คอนกรีตหลังจากการถอดแบบ.....	281
จ.5.10 การบ่มคอนกรีตในบ่อบ่มที่สร้างในโรงงานของบริษัท.....	281
จ.6.1 คอนกรีตผสมเสร็จ.....	281
จ.6.2 การใส่คอนกรีตลงในถังทดสอบ.....	281
จ.6.3 การกระทุ้งคอนกรีตในถังทดสอบ.....	282
จ.6.4 การเคาะที่บริเวณด้านข้างของถังเพื่อไล่ฟองอากาศ.....	282
จ.6.5 การปาดหน้าคอนกรีต.....	282
จ.6.6 การชั่งน้ำหนักของคอนกรีต.....	282
จ.7.1 คอนกรีตผสมเสร็จ.....	282
จ.7.2 การตัดคอนกรีตลงในกรวยทดสอบ.....	282

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
จ.7.3 การดำคอนกรีตในกรวยทดสอบ.....	283
จ.7.4 การวัดค่าการยุบตัว.....	283
จ.8.1 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต.....	283
จ.9.1 คอนกรีตผสม SSW.....	283
จ.9.2 คอนกรีตผสม GSW.....	283
จ.10.1 การวัดตัวอย่างคอนกรีต.....	284
จ.10.2 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตอัด.....	284
จ.10.3 การติดตั้งตัวอย่างคอนกรีต.....	284
จ.10.4 สภาพของคอนกรีตหลังการทดสอบ.....	284
จ.11.1 การติดตั้งตัวอย่างคอนกรีต.....	284
จ.11.2 สภาพของคอนกรีตหลังการทดสอบ.....	284
จ.12.1 การเคັปหัวคอนกรีต.....	285
จ.12.2 คอนกรีตที่ทำการเคັปหัวเป็นที่เรียบร้อย.....	285
จ.12.3 เครื่องทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น.....	285
จ.12.4 การติดตั้งตัวอย่างคอนกรีตเข้ากับอุปกรณ์วัดการยืด/หดตัว.....	285
จ.12.7 สภาพของคอนกรีตหลังการทดสอบ.....	285
จ.13.1 การบ่มคอนกรีตในน้ำ.....	286
จ.13.2 คอนกรีตขณะทำการทดสอบ.....	286
จ.13.3 เครื่องทดสอบชนิด Digital Length Comparator.....	286
จ.13.4 การวัดค่าการหดตัวของคอนกรีต.....	286
จ.14.1 การหล่อตัวอย่างคอนกรีตผสม GSW.....	287
จ.14.2 การหล่อตัวอย่างคอนกรีตผสม SSW.....	287
จ.14.3 การบ่มตัวอย่างในน้ำ.....	287
จ.14.4 การบ่มตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซิลิเฟต.....	287
จ.14.5 การวัดการขยายตัว.....	287

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
จ.15.1 การบ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำ.....	288
จ.15.2 คอนกรีตก่อนการแช่กรด.....	288
จ.15.3 การชั่งน้ำหนักเริ่มต้น.....	288
จ.15.4 การเรียงตัวอย่างในถังแช่กรด.....	288
จ.15.5 ตัวอย่างคอนกรีตที่เรียงเสร็จแล้ว.....	288
จ.15.6 กรดที่ใช้ในการทดสอบ (ก) ซัลฟูริก (H_2SO_4) (ข) อะซิติก (CH_3COOH).....	288
จ.15.7 การเทกรดในถังผสมสารละลาย.....	289
จ.15.8 การคนสารละลายกรด.....	289
จ.15.9 การเทสารละลายกรดในถังแช่ตัวอย่าง.....	289
จ.15.10 การเรียงถังแช่กรด.....	289
จ.15.11 ตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการบ่มในกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ซึ่งมีสีขาว.....	289
จ.15.12 ตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการบ่มในกรดอะซิติก (CH_3COOH) ซึ่งมีสีน้ำตาล.....	289

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

BEI	Back Scattered Image
C	แคลเซียมออกไซด์ (CaO)
C ₃ A	ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต
C ₄ AF	เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์
C-A-H	แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต
C ₄ ASH ₁₂	แคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต
CH	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH) ₂)
C-S-H	แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต
C ₂ S	ไดแคลเซียมซิลิเกต
C ₃ S	ไตรแคลเซียมซิลิเกต
H	น้ำ (H ₂ O)
GSW	Green Sand and Molding Waste
N	นอร์มอลิตี้ (Normality) คือ ปริมาณเนื้อสารที่มีหน่วยเป็นกรัมสมมูลต่อปริมาตรสารละลาย 1 ลิตร หรือเรียกย่อว่า นอร์มอล (Normal, N) โดยสามารถเตรียมได้จากสารที่เป็นของแข็งหรือของเหลว
S	ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂)
SD	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)
SSW	Shell Sand Waste
SEM	Scanning Electron Microscope(y)
X(Y)SSW(Z)	คอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณวัสดุผงเท่ากับ X กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้น Y ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ Z โดยน้ำหนัก
X(Y)GSW(Z)	คอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ X กก./ม. ³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้น Y ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติที่ร้อยละ Z โดยน้ำหนัก

บทที่ I

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของการศึกษา

ในปัจจุบันวิสัยทัศน์ของการทำวิจัยในประเทศไทยได้เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมที่สถาบันการศึกษาซึ่งมีบุคลากรที่มีความรู้ความสามารถจะเน้นศึกษาเพื่อหาองค์ความรู้ใหม่ (Academic Research) แต่เพียงอย่างเดียวมาเป็นการนำศักยภาพที่มีอยู่มาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาเพื่อตอบสนองกับผู้ใช้งานจริง (Applied Research) โดยเฉพาะกับภาคการเกษตรและอุตสาหกรรมซึ่งเป็นกลไกหลักที่สร้างความเจริญให้กับประเทศ

สำหรับภาคอุตสาหกรรมซึ่งมีกระบวนการเปลี่ยนวัตถุดิบประเภทต่างๆ ให้เป็นผลิตภัณฑ์หรือสินค้าออกมา แต่สิ่งที่เป็นปัญหาในขณะเดียวกันคือ ของเสีย (Waste) ทั้งที่เป็นพิษและไม่เป็นพิษ ดังเช่น อุตสาหกรรมการหล่อขึ้นส่วนเครื่องยนต์ซึ่งมีของเสียจากกระบวนการผลิตอยู่เป็นหลายประเภทและมีปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปีสูง โดยหากมีระบบการจัดการของเสียดังกล่าวไม่ดีพอจะทำให้เกิดปัญหาตามมา อาทิเช่น สารพิษที่ตกค้าง พื้นที่ในการฝังกลบ เป็นต้น ยกตัวอย่างในกรณีของบริษัท สยามโตโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด ซึ่งในปีๆ หนึ่งมีของเสียจากกระบวนการหล่อเครื่องยนต์เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากและต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียให้กับบริษัทที่ทำการกำจัดของเสียดังกล่าวซึ่งเกือบทั้งหมดมีลักษณะเป็นผงฝุ่นเช่น ผงฝุ่นทรายใต้แบบ (Foundry Sand Powder) จนถึงเป็นก้อนขนาดใหญ่เช่น ตะกรันจากเตาหลอมโลหะ (Slag) ผงเหล็ก (Steel Powder) เป็นต้น นับด้านบาท ปัจจุบันทางบริษัทได้ใช้วิธีการกำจัดของเสียจากกระบวนการผลิตโดยนำเข้ากระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ผ่านบริษัทผลิตปูนซีเมนต์และบางส่วนถูกนำไปถมที่ (Landfill) แต่ทั้งนี้การนำของเสียไปใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ก็ยังคงต้องเสียค่าใช้จ่ายในส่วนของการกำจัดมาก อยู่เช่นเดิมเพียงแต่เปลี่ยนรูปแบบของการกำจัดไปเท่านั้น อีกทั้งการนำไปถมที่เป็นภาระทั้งประ โยชน์จากของเหลือทิ้งและไม่ได้ก่อให้เกิดการพัฒนาที่มีความยั่งยืน ดังนั้นจึงได้มีแนวทางในการนำของเสียจากบริษัท สยามโตโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด กลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ให้งานคอนกรีตผ่านอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพในการเปลี่ยนของเสียหลายๆ ชนิด เช่น เถ้าลอย (Fly Ash) จากโรงผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินลิกไนต์ เถ้าตะกรัน (Slag) จากโรงงานหลอมโลหะ เป็นต้น มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตและก่อให้เกิด

ประโยชน์ได้มากขึ้น แต่การนำของเสียมาใช้จำเป็นต้องมีการพิจารณาในประเด็นของการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตที่ต้องมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นตามไปด้วย และการนำมาใช้ต้องสามารถนำมาใช้ได้โดยตรงและผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุคิบน้อยที่สุดเพื่อที่ลดต้นทุนของการผลิต

ในการนำของเสียจากกระบวนการทำแบบหล่อชิ้นส่วนเครื่องยนต์ของบริษัท สยาม โตโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด ซึ่งวัสดุคิบนในการทำแบบหล่อเป็นทรายที่นำเข้ามาจากประเทศออสเตรเลีย เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมาะสมคือ ขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกันทำให้มีของเสียส่วนใหญ่ลักษณะเป็นผงฝุ่นทราย โดยในปีๆ หนึ่งนับหลายพันตัน ผงฝุ่นทรายได้แบบดังกล่าวสามารถจำแนกตามสายการผลิตออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่คือ ผงฝุ่นทรายได้แบบจากกระบวนการทำแบบหล่อภายนอกได้ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW) จากการทำแบบหล่อภายในได้ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) และจากการคบแต่งชิ้นส่วนได้ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม Finishing Waste (FW) ซึ่งมีปริมาณโดยเฉลี่ยรวมผงฝุ่นทรายทั้ง 3 กลุ่มอยู่ที่ 240 ตันต่อเดือน แต่ในปัจจุบันทางบริษัทได้ทำการปรับปรุงสายการผลิตจึงทำให้ทรายกลุ่มที่มาจากคบแต่งชิ้นส่วนมีจำนวนลดลงมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำผงฝุ่นทรายได้แบบใน 2 กลุ่มคือ GSW และ SSW มาทำการศึกษาผลกระทบที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จ

1.2 ประเด็นปัญหา

ในปัจจุบันผงฝุ่นทรายได้แบบ (Foundry Sand Powder) จากโรงงานหล่อชิ้นส่วนเครื่องยนต์ของบริษัท โตโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด ทั้งกลุ่ม GSW และ SSW จะถูกนำไปกำจัดโดยใช้เป็นวัสดุคิบนในการผลิตปูนซีเมนต์และนำไปใช้ในการถมที่ (Landfill) ซึ่งไม่ได้ก่อให้เกิดประโยชน์เท่าที่ควรและอาจก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากสารพิษที่สะสมในธรรมชาติ จึงควรมีแนวทางที่ดีกว่าในการนำกลับมาใช้ในรูปแบบอื่น ซึ่งอุตสาหกรรมคอนกรีตผสมเสร็จนับเป็นทางเลือกที่ดีทางเลือกหนึ่งในการนำผงฝุ่นทรายได้แบบไปใช้งาน แต่ในปัจจุบันยังขาดงานวิจัยที่สนับสนุนการนำผงฝุ่นทรายได้แบบที่เกิดขึ้นในประเทศไทยมาใช้กับงานด้านคอนกรีตผสมเสร็จ

1.3 การประเมินศักยภาพเบื้องต้นและสัดส่วนการใช้งานของผงฝุ่นทรายได้แบบ

โดยในการนำผงฝุ่นทรายได้แบบซึ่งเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมมาใช้งานเพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ซึ่งในที่นี้คือ คอนกรีตผสมเสร็จนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาผลกระทบเบื้องต้นในหลายประเด็น ดังต่อไปนี้

1. ประเด็นทางด้านสุขภาพคือ ปริมาณสารพิษที่ตกค้าง

สารพิษที่ตกค้างในผงฝุ่นทรายไล่แบบซึ่งอาจมีผลต่อสุขภาพของผู้ใช้ผลิตภัณฑ์คอนกรีตผสมเสร็จ เมื่อนำผงฝุ่นทรายไล่แบบมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิต โดยจากการทดสอบของทางบริษัทฯ พบว่าสารพิษที่ตกค้างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ของกระทรวงอุตสาหกรรม

2. ศักยภาพของวัตถุดิบ

สิ่งที่ต้องคำนึงในการนำผงฝุ่นทรายไล่แบบแต่ละกลุ่มมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จคือ คุณสมบัติของคอนกรีตที่ดีขึ้น โดยปกติผงฝุ่นทรายไล่แบบจะผ่านกระบวนการที่ต่างกัน เช่น ความร้อนที่ทรายแบบหล่อได้รับ สารเคมีผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพของแบบหล่อ เป็นต้น ดังนั้นผงฝุ่นทรายไล่แบบที่ได้จึงมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน การนำมาใช้งานทางด้านซีเมนต์จึงควรมีการศึกษาเบื้องต้นว่า ทรายกลุ่มใดที่มีศักยภาพในการใช้เป็นส่วนประกอบในคอนกรีตผสมเสร็จซึ่งมีทั้งปูนซีเมนต์ มวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบ (หินปูน) โดยในที่นี้ได้พิจารณาเบื้องต้นในประเด็นของดัชนีกำลัง (*Strength Index, SI*) ที่อายุ 7 และ 28 วัน ซึ่งเป็นดัชนีเบื้องต้นที่นิยมใช้และทำการเปรียบเทียบกับข้อกำหนดที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C 618 (Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete) โดยนำมาใช้ประเมินความเป็นไปได้ของวัสดุในการนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนเป็นอันดับแรก ทั้งนี้เพราะการแทนที่ในปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีราคาสูงสุดในวัตถุดิบที่ใช้ผลิตคอนกรีต ดังนั้นจึงเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่ม (Value Added) ให้กับผงฝุ่นทรายไล่แบบที่นำมาใช้ในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จได้ดีที่สุด โดยจากผลทดสอบเบื้องต้น พบว่าค่าดัชนีกำลังของผงฝุ่นทรายไล่แบบกลุ่ม *SSW* ที่อายุ 7 และ 28 มีค่าร้อยละ 78 และ 82 ในขณะที่ผงฝุ่นทรายไล่แบบกลุ่ม *GSW* มีค่าร้อยละ 55 และ 60 ตามลำดับ ซึ่งในมาตรฐานดังกล่าวได้กำหนดว่าวัสดุที่จะนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์จะต้องมีค่าดัชนีกำลังที่อายุ 7 และ 28 วันตามลำดับ ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75 ของปูนซีเมนต์ล้วนทั้งที่อายุ 7 และ 28 วัน แต่กระนั้นคุณสมบัติที่สำคัญเพิ่มเติมและมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จคือ การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (Loss on Ignition, LOI) และความต้องการน้ำ (Water Requirement) ซึ่งผงฝุ่นทรายไล่แบบกลุ่ม *SSW* มีค่าร้อยละ 0.87 และร้อยละ 102 ของตัวอย่างควบคุม (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน) ตามลำดับ ส่วนกลุ่ม *GSW* มีค่าร้อยละ 1.00 และร้อยละ 106 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนตามลำดับ ดังนั้นจึงมีเพียงกลุ่ม *SSW* ที่มีแนวโน้มที่นำมาใช้ทดแทนในปูนซีเมนต์ ในขณะที่ทางเลือกของผงฝุ่นทรายไล่แบบกลุ่ม *GSW* ซึ่งมีคุณสมบัติไม่ผ่านข้อกำหนดจึงมีทางเลือกที่นำมาแทนที่ในทรายธรรมชาติ (ทรายแม่น้ำ) โดยต้องคำนึงถึงคุณสมบัติที่ต้องพิจารณาประกอบ อาทิเช่น

การกระจายขนาดผลของมวลรวมละเอียดที่ต้องเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 33 (Standard Specification for Concrete Aggregates)

3. การนำผงฝุ่นทรายใต้แบบไปใช้เป็นส่วนประกอบของคอนกรีต

จากผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW มีศักยภาพในการนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้บางส่วน (Using as Partially Cement Replacement) โดยพิจารณาจากหลักเกณฑ์ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ที่กำหนดองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพไว้ กล่าวคือ ผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่มดังกล่าวมีส่วนประกอบองค์ประกอบเคมี อาทิเช่น ปริมาณซิลิกอนออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และไอออนออกไซด์ ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) เกินกว่าร้อยละ 75 โดยมีค่าถึงร้อยละ 98.85 ในขณะที่องค์ประกอบอื่นไม่เกินกว่าข้อกำหนด และในส่วนของคุณสมบัติทางกายภาพและความต้องการน้ำมีค่าเป็นไปตามมาตรฐานรวมทั้งค่าของความคงตัว โดยการตรวจวัดในรูปของค่าการขยายตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมผงฝุ่นทรายใต้แบบซึ่งผ่านการเร่งด้วยเทคนิคออโตเคล์ฟเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ตาม มาตรฐาน ASTM C 150 (Standard Test Method for Autoclave Expansion of Portland Cement) ซึ่งเป็นดัชนีที่ใช้แสดงศักยภาพในการขยายตัวในระยะยาวอันเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) หรือแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) แสดงในตารางที่ 1.1 ซึ่งพบว่าค่าการขยายตัวมีค่าไม่เกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด (ค่าการขยายตัวไม่เกินร้อยละ 0.8) ประกอบกับจากการทดสอบค่าดัชนีกำลังโดยการแทนที่ผงฝุ่นทรายใต้แบบในปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักได้ค่าดัชนีกำลังอัดมากกว่าร้อยละ 75 ดังนั้นในการศึกษานี้จึงได้ขยายสัดส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

ตารางที่ 1.1

ค่าการขยายตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ผ่านการเร่งด้วยเทคนิคออโตเคล์ฟ

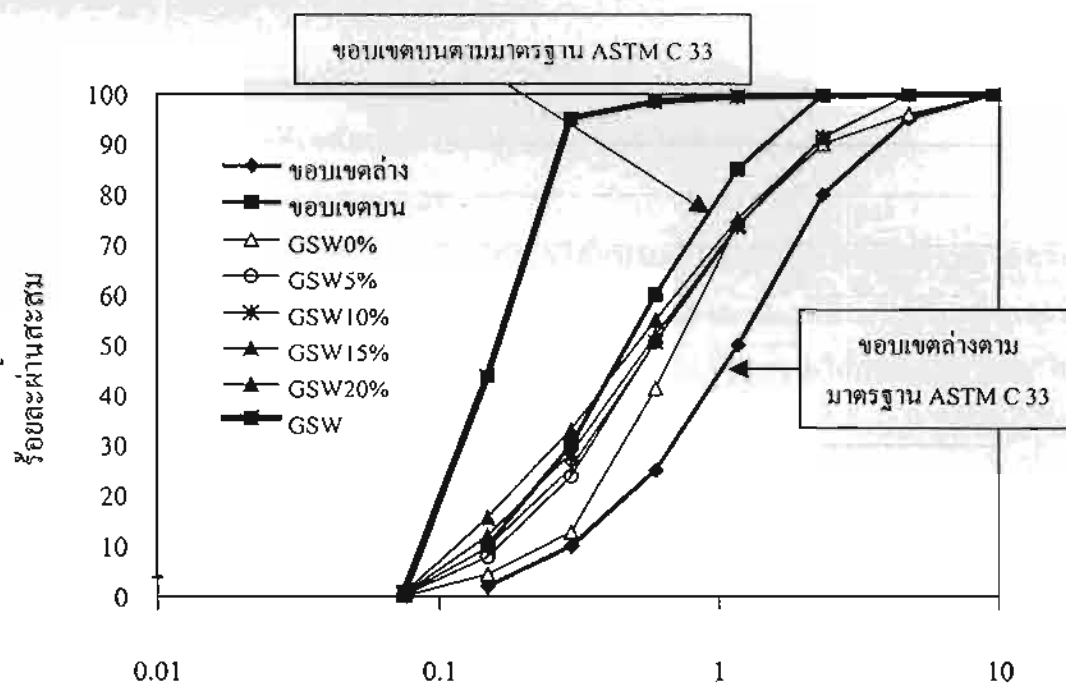
ร้อยละการแทนที่ของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนัก	ค่าการขยายตัว (ร้อยละ)
0 (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1)	0.00
10	0.00
20	0.01
30	0.01
40	0.01

สำหรับผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ที่ไม่ผ่านข้อกำหนดได้เลือกนำมาใช้ในการแทนที่ในมวลรวมละเอียด (ทรายธรรมชาติ) ดังนั้นจึงนำมาตรฐานของมวลรวมละเอียด (ASTM C 33 (Standard Specification for Concrete Aggregates)) มาพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

3.1 ขนาดคละ (Gradation)

จากผลการทดสอบหาการกระจายขนาดคละด้วยการร่อน (Sieve Analysis) ผ่านตะแกรงเบอร์ #3/8, #4, #8, #16, #30, #50 และ #100 ของทรายธรรมชาติ (GSW0%) พบว่าการกระจายขนาดคละอยู่ภายในขอบเขตตามมาตรฐาน ASTM C 33 ซึ่งต่างจากการกระจายขนาดของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ที่อยู่นอกขอบเขต โดยค่าร้อยละผ่านตะแกรง (Passing) ของอนุภาคมีค่ามากกว่าที่มาตรฐานกำหนด กล่าวคือ ค่าร้อยละผ่านสูงมากกว่าร้อยละ 90 จากตะแกรงเบอร์ #50 ซึ่งแสดงถึงอนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดเล็กมาก (น้อยกว่า 0.3 มิลลิเมตร) นอกจากนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับทรายแม่น้ำ พบว่าอนุภาคของผงฝุ่นทรายได้แบบมีขนาดเล็กกว่าทรายแม่น้ำ ในขณะที่เมื่อทำการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนร้อยละ 5 (GSW5%), 10 (GSW10%), 15 (GSW15%) และ 20 (GSW20%) ตามลำดับ มีผลทำให้การกระจายขนาดคละของมวลรวมผสมเปลี่ยนแปลงไปจากมาตรฐาน โดยการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW โดยน้ำหนักที่ร้อยละ 20 มีการกระจายขนาดคละเกินกว่าขอบเขตที่กำหนดตามมาตรฐาน กล่าวคือ มีค่าร้อยละผ่านของอนุภาคในช่วงตะแกรงเบอร์ 50 และ 100 มากกว่าที่กำหนด (ไม่เกินร้อยละ 10 ถึง 30 สำหรับตะแกรงเบอร์ 50 และไม่เกินร้อยละ 2 ถึง 10 สำหรับตะแกรงเบอร์ #50) แต่อย่างไรก็ตาม การกระจายขนาดคละของมวลรวมผสมของทรายธรรมชาติและผงฝุ่นทรายแบบกลุ่ม GSW ในช่วงตะแกรงเบอร์ #3/8 ถึง #16 พบว่าการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไม่มีผลกระทบต่อ การกระจายขนาดคละของทรายแม่น้ำ ในขณะที่อนุภาคในช่วงตะแกรงเบอร์ #16 ถึง #100 จะเห็นการเปลี่ยนแปลงของการกระจายขนาดคละของมวลรวมผสมอย่างชัดเจน อันเป็นผลเนื่องมาจากขนาดอนุภาคของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ส่วนใหญ่มีขนาดเล็กกว่าทรายแม่น้ำในช่วงดังกล่าว

3.2 ปริมาณของอนุภาคที่ขนาดเล็กกว่าขนาดตะแกรงเบอร์ 200 (75 ไมโครเมตร) ต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 3.0 โดยจากการทดสอบด้วยการร่อนผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW ผ่านตะแกรง พบว่าปริมาณของอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.95 ในขณะที่อัตราส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม GSW เท่ากับร้อยละ 0 (GSW0%), 5 (GSW5%), 10 (GSW10%), 15 (GSW15%) และ 20 (GSW20%) มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.14, 0.38, 0.49, 0.61 และ 0.81 ตามลำดับ



เบอรัของตะแกรง (ขนาดของช่องเปิด (Opening Size) หน่วยเป็น มิลลิเมตร)

ภาพที่ 1.1 การกระจายขนาดกละของทรายธรรมชาติและที่ผสมผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW

3.3 ค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) ซึ่งเป็นดัชนีที่เป็นปฏิภาคโดยประมาณกับขนาดเฉลี่ยของก้อนวัสดุในมวลรวม โดยในมาตรฐานได้กำหนดค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียดจะต้องมีอยู่ในช่วง 2.3 ถึง 3.1 ซึ่งผลจากการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 1.2 พบว่าค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียดซึ่งประกอบด้วยทรายแม่น้ำและผงฝุ่นทรายใส่แบบมีค่าอยู่ในขอบเขตที่มาตรฐานกำหนด

ตารางที่ 1.2

ค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) ของทรายแม่น้ำผสมผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW

ร้อยละการแทนที่ของผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติหรือทรายแม่น้ำ โดยน้ำหนัก	โมดูลัสความละเอียด (F.M.)
0 (ทรายธรรมชาติ)	2.81
5	2.53
10	2.50
15	2.43
GSW	1.40

3.4 ปริมาณของอัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมออกไซด์เทียบเท่า (Na_2O_e เท่ากับ $\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$) ในมวลรวมละเอียดต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 0.60 โดยผลการทดสอบพบว่าผงฝุ่นทราย ไล้แบบกลุ่ม GSW มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.24

ดังนั้นสัดส่วนการแทนที่ผงฝุ่นทรายไล้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติหรือทรายแม่น้ำ โดยตามข้อกำหนดของการกระจายขนาดกละ (Gradation) ที่มีค่าไม่เกินขอบเขตที่มาตรฐานกำหนด (ASTM C 33) พบว่าสัดส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไล้แบบกลุ่ม GSW ไม่เกินร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก โดยในการศึกษานี้ได้ทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไล้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 ตามลำดับ

4. สัดส่วนผสมคอนกรีตผสมเสร็จ

เนื่องจากการศึกษาผลกระทบของผงฝุ่นทรายไล้แบบที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตนั้น จำเป็นที่จะต้องเลือกตัวอย่างสัดส่วนของคอนกรีตผสมเสร็จที่ใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับประเทศไทย ประกอบการพิจารณาค่าที่กำหนดตามมาตรฐาน โดยรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 คอนกรีตผสมเสร็จที่ใช้เป็นคอนกรีตปกติ (Conventional Concrete) และไม่มีส่วนประกอบของสารเคมีผสมเพิ่ม (Chemical Admixture) เป็นบรรทัดฐานเบื้องต้นในการศึกษา

4.2 ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีตผสมเสร็จ โดยอ้างอิงข้อแนะนำจากมาตรฐานของ American Concrete Institute (ACI 211.1-77 (Recommended practice for selecting proportions for normal and heavy weight concrete)) ซึ่งกำหนดปริมาณปูนซีเมนต์ขั้นต่ำเพื่อให้คอนกรีตมีความทนทาน (Durability) เพียงพอ ดังแสดงในตารางที่ 1.3

โดยจากตารางแสดงปริมาณปูนซีเมนต์ขั้นต่ำในคอนกรีต จึงทำการเลือกปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตผสมเสร็จจากสภาพแวดล้อมที่มีความรุนแรงมากกระทำต่อคอนกรีตปกติ และคอนกรีตเสริมเหล็กและครอบคลุมในกรณีของคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรง ดังนั้นจึงใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตเท่ากับ 300 และ 350 กก./ม.³ และเพิ่มเติมปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.³ เพื่อใช้เป็นแนวทางเบื้องต้น สำหรับการใช้งานคอนกรีตในปัจจุบันที่ต้องการกำลังรับแรง (Strength) ที่สูงขึ้น

ตารางที่ 1.3

ปริมาณปูนซีเมนต์ขั้นต่ำในคอนกรีตตามมาตรฐานของ American Concrete Institute (ACI)

ความรุนแรงของสภาวะแวดล้อม ที่กระทำต่อคอนกรีต	ปริมาณปูนซีเมนต์ขั้นต่ำ ตามประเภทของคอนกรีต (กก./ม. ³)		
	คอนกรีตปกติ (Plain Concrete)	คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete)	คอนกรีตเสริมเหล็ก อัดแรง (Prestressed Concrete)
รุนแรงน้อย: ยกตัวอย่างเช่น คอนกรีตที่มีการป้องกันจากสภาพ อากาศอย่างสมบูรณ์ ยกเว้นในช่วง ระหว่างการก่อสร้าง	220	250	300
รุนแรงปานกลาง: ยกตัวอย่างเช่น คอนกรีตที่มีสิ่งป้องกันจากลมและ ฝนหนัก และสามารถต้านทานต่อ การแข็งตัวของน้ำ รวมทั้งคอนกรีต ที่อยู่ในดินและน้ำอย่างต่อเนื่อง	250	290	300
รุนแรงมาก: ยกตัวอย่างเช่น คอนกรีตที่อยู่ในน้ำทะเลซึ่งมี กระบวนการเปื่อยสลายแห้งเกิดขึ้น หรือคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะที่มี การกัดกร่อนสูง	310	360	360

4.3 ค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) ของคอนกรีต

ค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตที่ควรมีค่าพอเพียงสำหรับการเทคอนกรีตเข้าแบบได้ โดยกำหนดค่าตามมาตรฐานคอนกรีตของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ศ.ท.) แสดงใน ตารางที่ 1.4 และครอบคลุมชนิดขององค์อาคารที่เป็น โครงสร้างทั่วไป เสาหรือผนังบาง และ โครงสร้างที่เหล็กเสริมแน่น รวมทั้งโครงสร้างที่เป็นพื้นถนน (คิดจากค่าเฉลี่ยของช่วงค่าการยุบตัว ตามที่มาตรฐานกำหนด) จึงกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) ของคอนกรีตผสมเสร็จ เท่ากับ 5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. ตามลำดับ

ตารางที่ 1.4

ค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) ของคอนกรีตที่ควรมีพอเพียงสำหรับการเทคอนกรีตเข้าแบบ โดยแบ่งตามชนิดขององค์อาคาร

ชนิดขององค์อาคาร	ค่าการยุบตัวเริ่มต้น (ซม.)
พื้นถนน	3.0 - 8.0
โครงสร้างทั่วไป	5.0 - 10.0
เสาหรือผนังบาง	7.5 - 12.5
โครงสร้างที่เหล็กเสริมแน่น	10.0 - 15.0

ที่มาของข้อมูล: มาตรฐานคอนกรีต วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2546

1.4 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) และ Green Sand and Molding Waste (GSW) ที่ได้โรงหล่อเครื่องยนต์
2. ศึกษาผลกระทบของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW ที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จปกติที่ไม่ผสมสารเคมีผสมเพิ่ม (Admixtures) โดยทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
3. ศึกษาผลกระทบของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW ที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จปกติที่ไม่ผสมสารเคมีผสมเพิ่ม โดยทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติหรือทรายแม่น้ำ
4. นำผลการศึกษามาสรุปเพื่อหาแนวทางเบื้องต้นในการนำผงฝุ่นทรายใต้แบบจากอุตสาหกรรมหล่อเครื่องยนต์มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จในปริมาณที่เหมาะสม

หมายเหตุ นิยามประกอบการศึกษา

1. ผงฝุ่นทรายใต้แบบ (Foundry Sand) คือ ทรายซิลิกาซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการหล่อเครื่องยนต์โลหะ โดยใช้ทรายที่มีคุณสมบัติเฉพาะในการขึ้นเป็นใต้แบบก่อนเทส่วนผสมน้ำเหล็ก โดยหลังจากเคาะแบบออก ทรายที่มีลักษณะเป็นฝุ่นจะถูกดักจับด้วยเครื่องไซโคลนเก็บไว้

2. ผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW) คือผงฝุ่นทรายใต้แบบที่ได้จากกระบวนการทำแบบหล่อภายนอกเช่น เลื้อยสูบและเพลาสูกเบี้ยว เป็นต้น โดยปกติมีสีดำซึ่งเป็นสีของทรายใหม่เนื่องจากทรายกลุ่มนี้ได้รับอุณหภูมิสูงในขณะที่ขึ้นรูปประมาณ 1,400 องศาเซลเซียส

3. ผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) คือผงฝุ่นทรายใต้แบบที่ได้จากกระบวนการทำแบบหล่อภายในเช่น ลูกสูบ เป็นต้น โดยปกติมีสีเหลืองเข้มซึ่งเป็นผลจากการได้รับอุณหภูมิในขณะที่ขึ้นรูปประมาณ 600 องศาเซลเซียส

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษา

1. เป็นการนำผงฝุ่นทรายใต้แบบจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนเครื่องยนต์ทั้งกลุ่ม SSW และ GSW กลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด
2. เพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ อันเป็นการลดการใช้ทรัพยากรซึ่งได้แก่ หินปูนซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตปูนซีเมนต์
3. เป็นการรักษาสิ่งแวดล้อมจากการนำ SSW และ GSW ไปใช้ในการถมที่เป็นส่วนใหญ่ อันอาจก่อให้เกิดสภาพเป็นพิษสะสมจากปริมาณสารที่ตกค้างอยู่ในระยะยาว
4. เป็นการกระตุ้นให้โรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ที่มีของเหลือทิ้งและไม่ได้ใช้ประโยชน์อยู่เป็นจำนวนมากให้หันกลับมาใช้ของเหลือทิ้งแทนการปล่อยให้อยู่ในสิ่งแวดล้อมโดยเปล่าประโยชน์

1.6 ขอบเขตของการศึกษา

งานวิจัยนี้มีขอบเขตการศึกษาดังต่อไปนี้

1. แหล่งที่มาของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) และ Green Sand and Molding Waste (GSW) จากบริษัท สยามโตโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด จังหวัดชลบุรี
2. ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา คือ ปริมาณการแทนที่ของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 ตามลำดับ
3. ปริมาณการแทนที่ของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW ในทรายธรรมชาติหรือทรายแม่น้ำ ที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

4. คอนกรีตผสมเสร็จมีข้อกำหนดดังต่อไปนี้

4.1 คอนกรีตผสมเสร็จ เป็นคอนกรีตปกติที่ไม่มีสารเคมีผสมเพิ่มเป็นส่วนประกอบ

4.2 ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีตผสมเสร็จเท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม.³ ตามลำดับ

4.3 ค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) ของคอนกรีตผสมเสร็จเท่ากับ 5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. ตามลำดับ

5. ศึกษาคุณสมบัติของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW กับ GSW ประกอบด้วย องค์ประกอบทางเคมี อาทิเช่น ซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นต้น และคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) พื้นที่ผิวจำเพาะในรูปของความละเอียดด้วยวิธีเบลน (Blaine Fineness) ปริมาณความชื้น (Moisture Content) การกระจายขนาดของอนุภาค (Particle Size Distribution) ลักษณะและพื้นผิวของอนุภาคจากเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) และความเป็นผลึกด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction และดัชนีกำลัง (Strength Index, SI)

6. ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตในสถานะสดประกอบด้วย ค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) หน่วยน้ำหนัก (Unit Weight) และระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้าย (Initial and Final Setting Times)

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

8. ศึกษาคุณสมบัติทางด้านความทนทานของคอนกรีต ได้แก่ การขยายตัวในน้ำ (Expansion in Water) การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) ทั้งในรูปของการหดตัว (Shrinkage) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการระเหยของน้ำออกจากคอนกรีต (Weight Loss due to Water Evaporation) ความทนทานต่อการกระทำเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulfate, Na_2SO_4) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในรูปของการยัดและ/หรือหดตัว และความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และอะซิติก (CH_3COOH) ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 1 นอร์มอลิตี (Normality, N) ซึ่งมีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) เท่ากับ 0.66 และ 2.56 ตามลำดับ ในรูปของการสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss) ที่ อายุ 3, 7, 28, 60, 90 และ 120 วัน ตามลำดับ

บทที่ 2

ข้อมูลเกี่ยวกับการกระบวนการผลิต ปริมาณของผงฝุ่นทรายไส้แบบ
และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลเกี่ยวกับการผลิต

2.1.1 กระบวนการผลิตของโรงงานหล่อชิ้นส่วนรถยนต์

2.1.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต

วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตของบริษัท สยาม โคโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด แสดงใน
ตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1

ชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต

ผลิตภัณฑ์	วัตถุดิบ
ตัวเสื้อสูบและเพลาลูกเบี้ยว	เศษเหล็ก เหล็กถลุง และเศษเหล็กหมุนเวียน <u>สารปรับสภาพ</u> คาร์บอน (ถ่านโค้ก) เฟอร์โรซิลิคอน เฟอร์โรแมงกานีส และเฟอร์โรโครเมียม
แบบ (Mold)	ทราย เรซิน เบนโทไนท์ และซีโคล
ไส้แบบ (Core)	ทราย เรซิน เฮกซามีน และแคลเซียม

2.1.1.2 ผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ของโรงงานเหล็กหล่อ ได้แก่ เสื้อสูบเครื่องยนต์ดีเซล

2.1.1.3 กระบวนการผลิต

กระบวนการผลิตเหล็กหล่อแสดงในภาพที่ 2.1 มีรายละเอียดขั้นตอนดังต่อไปนี้ คือ

1. การเตรียมวัตถุดิบ (Raw Materials Preparation)

1.1 นำเศษเหล็กเหนียว (Steel Scrap) เหล็กถลุง (Pig Iron) และเศษเหล็กหมุนเวียน (Returned Scrap) มาจัดเก็บในพื้นที่จัดเก็บ

1.2 ทำความสะอาดเศษเหล็กโดยการพ่นทราย (Shot Blast) เพื่อกำจัดสนิมเหล็กและสิ่งสกปรกที่ติดมากับเศษเหล็ก

1.3 เตรียมเศษเหล็กเหนียว เหล็กถลุง และเหล็กหมุนเวียนในอัตราส่วนที่กำหนดเพื่อทำการหลอม ซึ่งขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบนี้จะควบคุมที่ห้องควบคุม (Control Room)

2. การหลอมเหล็ก (Melting)

2.1 เศษเหล็ก เหล็กถลุง และเหล็กหมุนเวียน จะถูกลำเลียงจากพื้นที่จัดเก็บโดย Basket เข้าสู่เตาหลอม โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมประมาณ 1500 องศาเซลเซียส

2.2 ที่อุณหภูมิประมาณ 1400 องศาเซลเซียส นำน้ำเหล็กไปตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ ถ้าคุณสมบัติไม่เป็นไปตามความต้องการก็ต้องทำการเติมสารปรับสภาพเพื่อปรับค่าให้ได้ตามที่กำหนด

2.3 ที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส ทำการถ่ายเทน้ำเหล็ก 4 ตัน จากเตาหลอมเข้าเตาอุ่น และปริมาณน้ำเหล็กที่เหลือในเตาหลอมอีก 4 ตัน จะใช้สำหรับอุ่นเศษเหล็กที่จะทำการหลอมในครั้งต่อไป

3. การเตรียมทรายเพื่อทำไส้แบบภายใน (Shell Sand) โดยแสดงตัวอย่างชิ้นส่วนที่ได้จากไส้แบบในภาพที่ 2.2

3.1 นำทรายมาทำให้แห้งโดยเข้าเตาอบ (Furnace) และแยกให้ได้ทรายละเอียด จากนั้นนำมาผสมเรซิน (Phenolic Resin) เฮกซามีน (Hexamine) และแคลเซียม (Calcium) เพื่อให้ทรายที่นำมาทำแบบยึดเกาะกันได้ดี และจับตัวกันแน่น ซึ่งการเตรียมทรายไส้แบบนี้จะมีการนำทรายและสารประกอบต่างๆ ใส่ลงในเครื่อง Muller ก่อน จากนั้นควบคุมกระบวนการเตรียมทรายด้วยระบบอัตโนมัติ (ทรายไส้แบบประกอบด้วยเรซินร้อยละ 3 และทรายร้อยละ 97)

4. การเตรียมทรายเพื่อทำแบบหล่อภายนอก (Green Sand) โดยแสดงตัวอย่างชิ้นส่วนที่ได้จากไส้แบบในภาพที่ 2.2

4.1 นำทรายมาแยกสิ่งเจือปนที่เป็นโลหะออก โดยใช้เครื่องแยกด้วยแม่เหล็ก (Magnetic Separator) เนื่องจากทรายที่นำมาใช้เป็นทรายหมุนเวียน (Return Sand) จากกระบวนการผลิตแบบหล่อ (Molding)

4.2 จากนั้นนำไปร่อนให้ได้ทรายละเอียดและนำไปผสมกับน้ำ Sea Coal และ Bentonite ซึ่งใช้เป็นตัวประสาน

(กระบวนการเตรียมทรายเพื่อทำแบบหล่อควบคุมด้วยระบบ Control เช่นเดียวกับกระบวนการของ Shell Sand)

5. การผลิตไส้แบบ (Coremaking)

5.1 พ่น Silicon ที่แม่พิมพ์ก่อน เพื่อเป็นการเคลือบผิวของแม่พิมพ์ และทุกๆ 25 ชุด ต้องพ่นซ้ำอีกครั้ง

5.2 นำทรายที่ได้จากกระบวนการ Shell Sand บรรจุในแม่พิมพ์ไส้แบบจนแน่น และให้ความร้อนจนอุณหภูมิประมาณ 280 ถึง 320 องศาเซลเซียส ขณะที่ทรายร้อนขึ้นเรซินเกิดการหลอมเหลว และเคลือบบริเวณผิวของทราย และยึดเกาะกัน ซึ่งเป็นลักษณะที่เรียกว่า โพลีเมอร์ไรเซชัน (Polymerization)

5.3 นำไส้แบบออกจากเครื่องจักร แล้วใช้ลมเป่าทำความสะอาดแม่พิมพ์ และกำจัดส่วนที่ไม่ต้องการของไส้แบบออก

5.4 เคลือบไส้แบบด้วยสารเคมี Rheotec หรือ WS 220 และ Bangara

6. การผลิตแบบหล่อและการหล่อ (Molding)

6.1 แบบหล่อ (Mold)

6.1.1 นำทรายจากกระบวนการ Green Sand ใส่ลงไปแม่พิมพ์แบบ (Pattern) เพื่อขึ้นแบบจากแม่พิมพ์ แบบหล่อจะทำเป็น 2 ซีก คือ แบบบน และแบบล่าง

6.1.2 เจาะช่องระบายอากาศของแบบบน และช่องสำหรับเทน้ำเหล็ก (กระบวนการผลิตแบบหล่อควบคุมด้วยระบบตู้ (Control))

6.2 การหล่อ (Pouring)

6.2.1 นำไส้แบบมาประกอบเข้ากับแบบหล่อ (Core Set) จากนั้นประกอบแบบล่าง กับแบบบนของแบบหล่อเข้าด้วยกัน (Flask) และลำเลียงผู้ขึ้นตอนการหล่อ

6.2.2 เทน้ำเหล็กจากเตาอุณหภูมิสูงในถังใส่น้ำเหล็กเพื่อทำการหล่อ

6.2.3 เติมสารเคมี Calbaloy, Antimony, Inoculin และ Slag Chusher ลงถังใส่น้ำเหล็ก จากนั้นนำไปตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ

6.2.4 นำน้ำเหล็กจากถังใส่น้ำเหล็กเทลงในช่องสำหรับเทน้ำเหล็กของ Flask และทิ้งให้เย็นประมาณ 30 นาที

6.2.5 นำชิ้นงานออกจาก Flask และทำการเขย่าทรายที่ติดกับชิ้นงาน ซึ่งควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ

6.2.6 ทำการกำจัดส่วนที่ไม่ต้องการของชิ้นงานออก

6.2.7 นำชิ้นงานไปทำให้เย็นที่ Cooling Shelf ประมาณ 2 ชั่วโมง และส่ง Shot Blast

7. การปรับแต่งผลิตภัณฑ์ (Finishing)

7.1 กำจัดทรายออกจากผลิตภัณฑ์โดยการเคาะ และนำเข้าเครื่องเขย่าทรายอีกครั้งหนึ่ง

7.2 นำชิ้นงานเข้าเครื่อง Shot Blast เพื่อขัดผิวผลิตภัณฑ์ และกำจัดทรายที่ติดอยู่บน

ผิวออก

7.3 ทำการขัดชิ้นงานบริเวณที่เป็นรูหรือช่อง (Shot Blow) เพื่อขัดผิวชิ้นงานในส่วนที่เป็นรูหรือช่อง รวมทั้งเป็นการกำจัดทรายที่ติดมาด้วย

7.4 ใช้ลมเป่าเม็ดเหล็กจากการขัดผิวชิ้นงานออกและทำการตรวจการรั่วด้วยสารเคมี Super Check UP-ST และ Super Check UD-ST

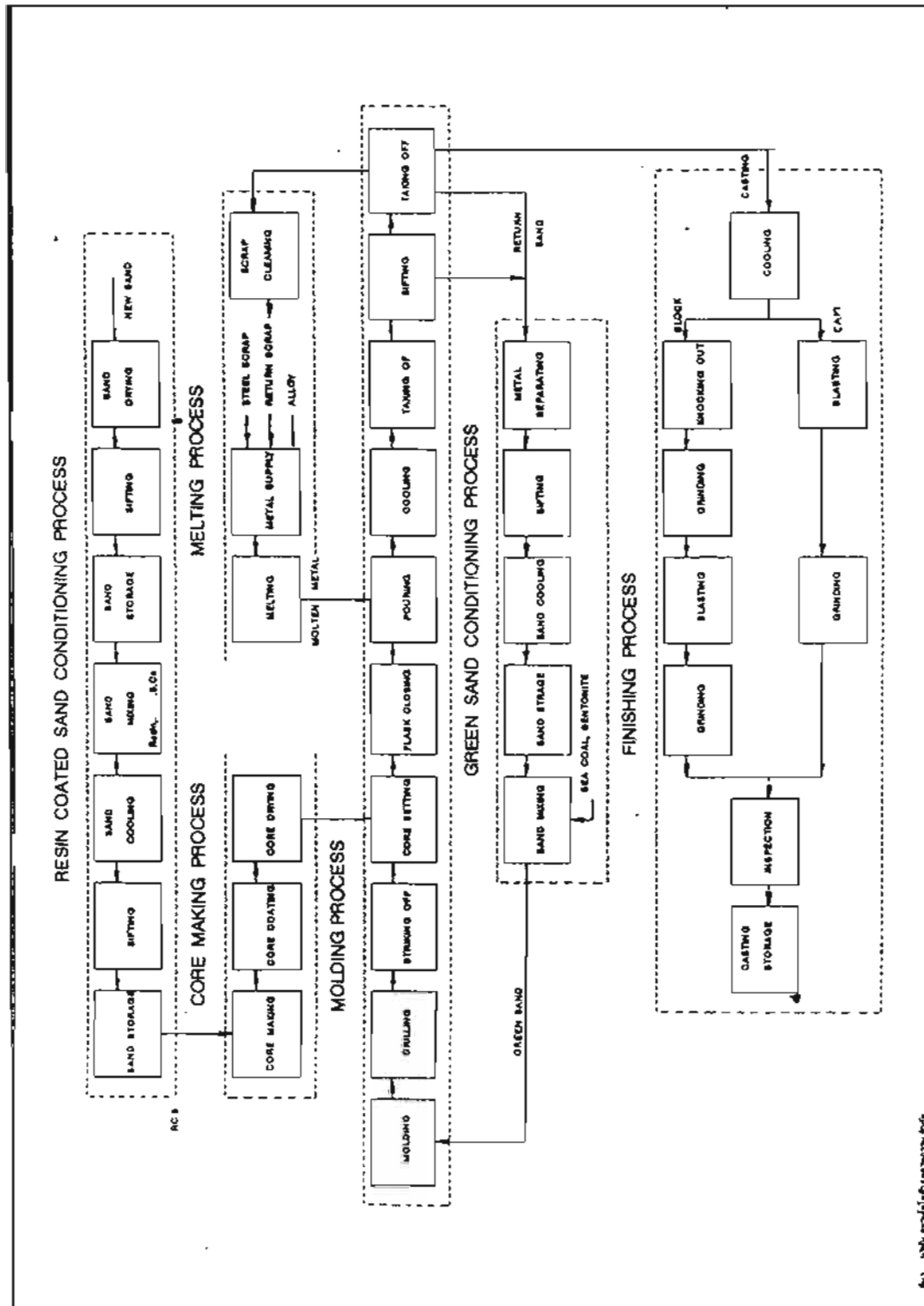
7.5 นำชิ้นงานเข้าเครื่องคัดแต่ง และใช้ค้อนกำจัดส่วนที่ยื่นออกมาออก

7.6 นำชิ้นงานเข้าเครื่อง Shot Blast เพื่อทำการขัดผิวชิ้นงานอีกครั้ง จากนั้นนำมาตรวจสอบคุณภาพที่จุด Inspection

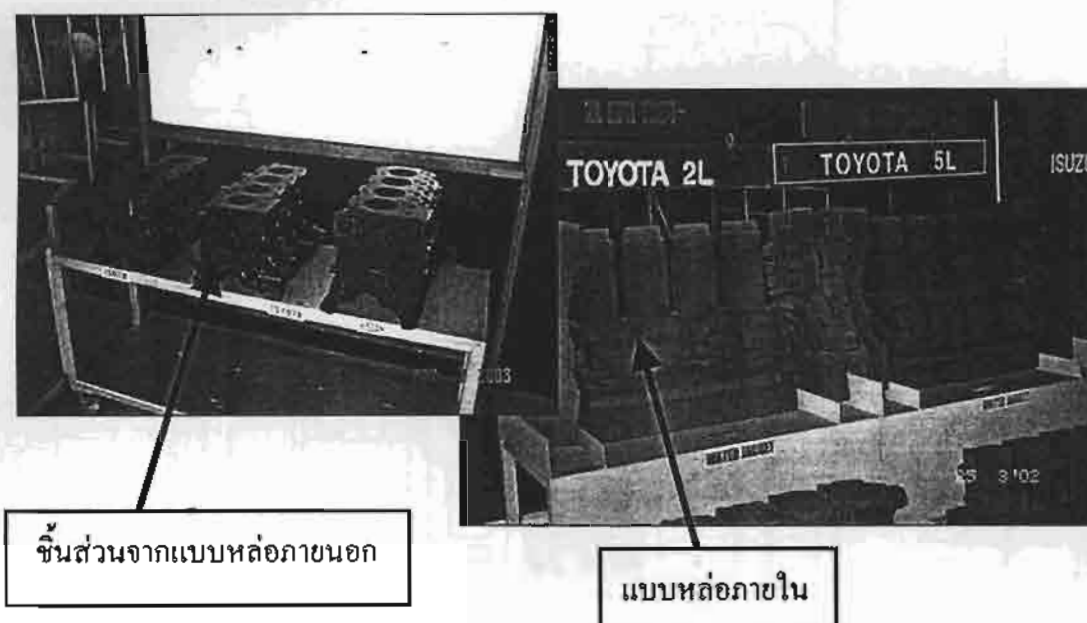
7.7 กำจัดส่วนที่ไม่ต้องการหรือส่วนที่ยื่นออกมาในรูหรือช่องของชิ้นงานออก และนำชิ้นงานลง Shaker Block เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่ติดมากับชิ้นงาน

7.8 นำชิ้นงานจัดลงใน Pallet เพื่อเตรียมจำหน่าย

7.9 ส่วนชิ้นงานที่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพแล้วทำการ Rework ต้องส่งเข้าจุด Metalikon เพื่อทำการซ่อมโดยการเชื่อมด้วยไฟฟ้าและแก๊ส กรณีรูหรือช่องชิ้นงานมีปัญหาต้องซ่อมด้วยการเจียร แล้วทำการตรวจสอบคุณภาพอีกครั้ง

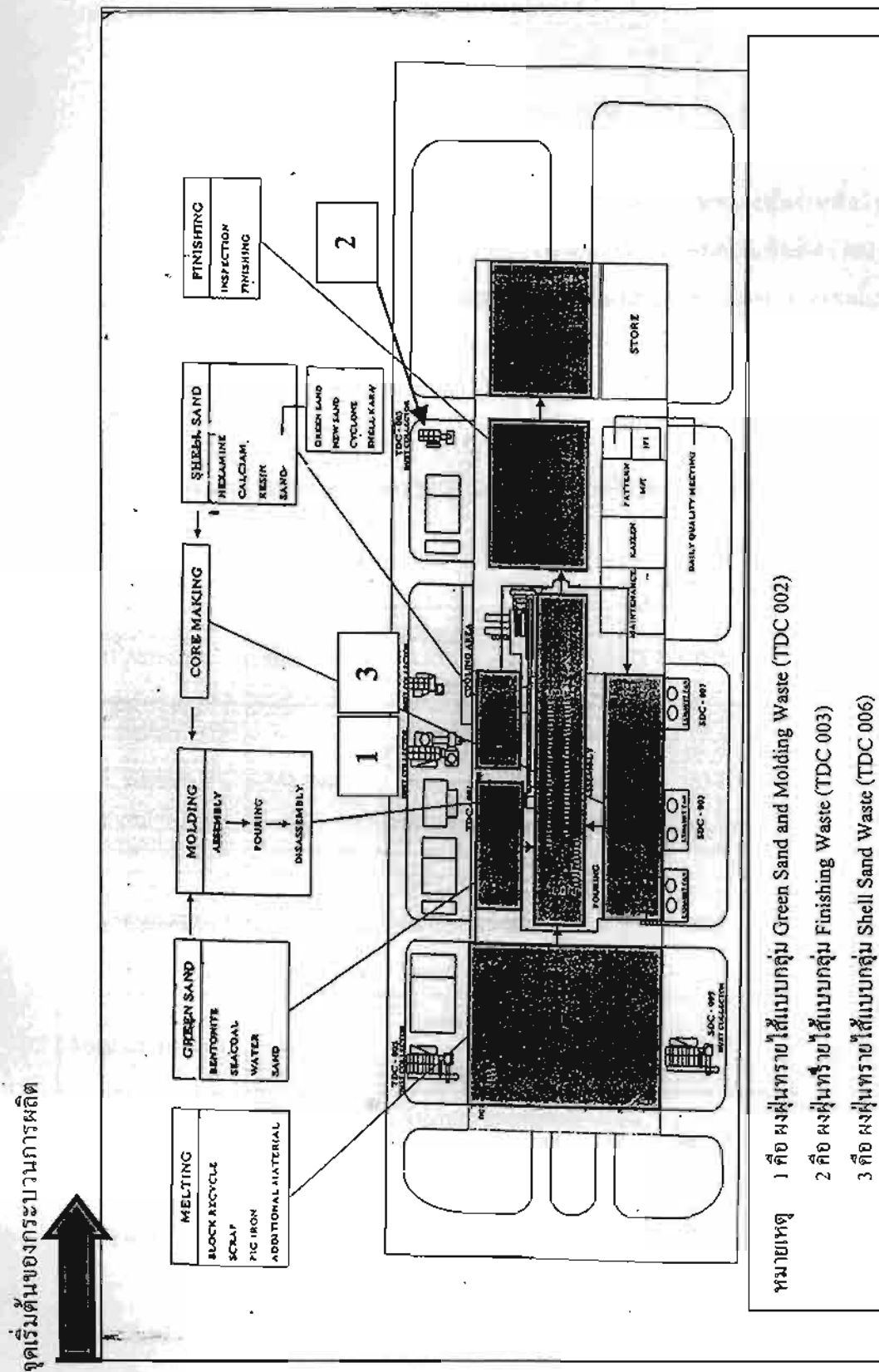


ภาพที่ 2.1 รายละเอียดขั้นตอนกระบวนการผลิต
(ที่มา : บริษัทสยามไดโอด้าอุตสาหกรรม จำกัด)



ภาพที่ 2.2 แบบหล่อภายในและแบบหล่อภายนอก

จากกระบวนการผลิตดังกล่าวข้างต้นจะเกิดของเสียประเภทต่างๆ ดังแสดงตำแหน่งตามสายการผลิตในภาพที่ 2.3 ถ้าจัดกลุ่มตามแหล่งของการผลิตออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มจากกระบวนการหลอมและกลุ่มจากกระบวนการทำแบบหล่อ โดยในกลุ่มแรกจะเป็นตะกรันเตาหลอม (Slag) ผนังเตาหลอม (Lining) และฝุ่นจากเตาหลอม (Slag Dust) รวมทั้งเศษหลังจากการหล่อซึ่งได้แก่ ผงเหล็ก (Steel Powder) ส่วนกลุ่มหลังซึ่งเป็นกลุ่มที่มีปริมาณมากที่สุดได้แก่ ผงฝุ่นทรายได้แบบซึ่งสามารถแบ่งย่อยตามสายการผลิตออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ คือ จากการทำแบบหล่อภายในได้ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste จากการทำแบบหล่อภายนอกได้ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste และการตกแต่งชิ้นส่วนได้ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม Finishing Waste (TDC 003) โดยจากการสำรวจในปี พ.ศ. 2545 มีปริมาณโดยเฉลี่ยเท่ากับ 81, 20 และ 5 ตันต่อเดือน ตามลำดับ แต่ในปัจจุบันทางบริษัทได้ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของการผลิตใหม่จนทำให้ทรายกลุ่มที่มาจากการตกแต่งมีปริมาณลดลงตามลำดับ



ภาพที่ 2.3 แผนผังแสดงของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต

2.1.2 ปริมาณสารพิษจากฝุ่นในกระบวนการผลิต

จากการตรวจสอบปริมาณของสารพิษที่มีอยู่ในผงฝุ่นทรายใต้เบบทั้งโรงงานของบริษัท สยามโคโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด โดยบริษัท อีสเทิร์นไทยคอนกรีต 1992 จำกัด เมื่อ กุมภาพันธ์ 2545 ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2.2 พบว่าปริมาณสารพิษน้อยกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดไว้

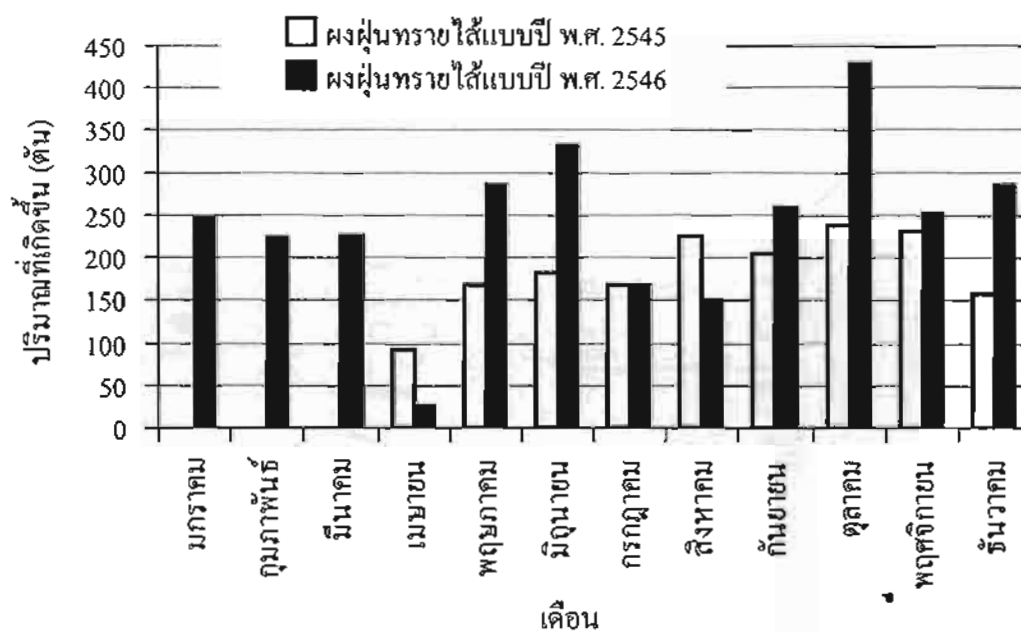
ตารางที่ 2.2

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 ปริมาณของผงฝุ่นทรายใต้แบบ

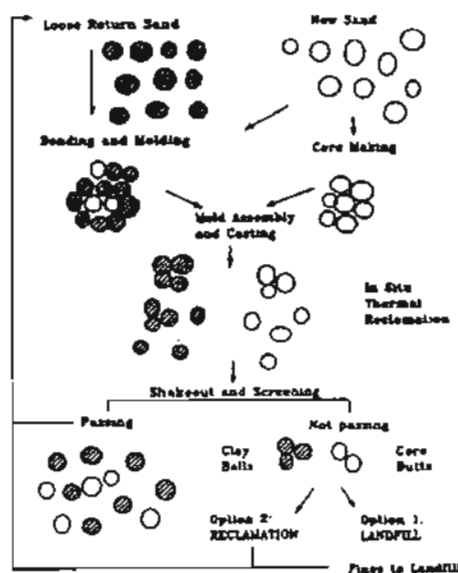
ผลจากการเก็บรวบรวมข้อมูลปริมาณของผงฝุ่นทรายใต้แบบที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตของบริษัท สยามโตโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด ตั้งแต่เดือน เมษายน พ.ศ. 2545 ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2546 แสดงในภาพที่ 2.4 พบว่าในช่วงปี พ.ศ. 2545 ถึง 2546 ปริมาณของผงฝุ่นทรายใต้แบบที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มที่ไม่แน่นอน อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตที่เป็นไปตามความต้องการของตลาดและการซ่อมแซมระบบการผลิตในบางช่วง แต่เมื่อพิจารณาปริมาณเฉลี่ยรวมตลอดทั้งปีของผงฝุ่นทรายใต้แบบพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้น โดยในปี พ.ศ. 2545 และ พ.ศ. 2546 อยู่ที่ 185 และ 240 ตันต่อเดือน ตามลำดับ



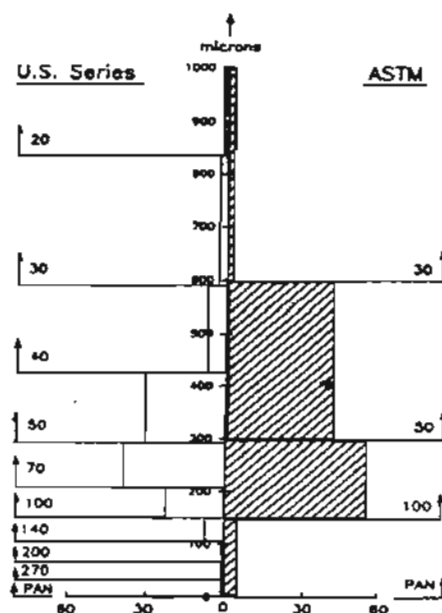
ภาพที่ 2.4 ปริมาณของผงฝุ่นทรายใต้แบบ

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

McIntyre, S. W. et al. (1992) ได้สรุปในรายงานเบื้องต้นเกี่ยวกับการนำทรายใต้แบบที่ผ่านการงานใช้งาน (Spent Sand) มาใช้แทนที่ในมวลรวมละเอียดบางส่วนเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตคอนกรีต โดยทรายดังกล่าวได้จากระบวนการทำทรายใต้แบบดังแสดงในภาพที่ 2.5(ก) และมีการกระจายขนาดคละดังภาพที่ 2.5 (ข) โดยสัดส่วนคอนกรีตที่ใช้ซึ่งออกแบบด้วยวิธีการของ ACI มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5 และอัตราส่วนการแทนที่ของทรายใต้แบบในช่วงร้อยละ 15 ถึง 20 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ได้ทำการควบคุมค่าการยุบตัว (Slump) เท่ากับ 7.5 ซม. และปริมาตรอากาศ (Air Content) เท่ากับร้อยละ 6 และทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตทรงกระบอกขนาดมาตรฐาน (ϕ 15 x 30 ซม.) ที่อายุ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ พบว่าค่าการสูญเสีย น้ำหนักเนื่องจากเผาไหม้ (LOI) ของทรายใต้แบบที่ผ่านการใช้งานมีค่าในช่วงร้อยละ 0.99 ถึง 3.53 ในขณะที่ค่าความถ่วงจำเพาะและค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) มีค่าในช่วง 2.35 ถึง 2.60 และ 1.7 ถึง 1.9 ตามลำดับ สำหรับกำลังของคอนกรีตผสมทรายใต้แบบมีค่าสูงกว่าคอนกรีตปกติ โดยมีค่าในช่วงร้อยละ 12 ถึง 35 ของคอนกรีตที่ใช้ทรายปกติ



(ก) ขั้นตอนการเตรียมทรายในการผลิต
ใต้แบบหล่อ



(ข) ขนาดคละของทรายใต้แบบที่ผ่านการใช้งาน
เปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM และ
American Foundry Sand (AFS)

ภาพที่ 2.5 ขั้นตอนการเตรียมทรายในการผลิตใต้แบบหล่อและขนาดคละของทรายใต้แบบ

Naik, T. et al. (1992) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของคอนกรีตทั้งในสภาวะสดและแข็งตัว เมื่อทำการแทนที่ทรายใส่แบบ (Foundry Sand) จากกระบวนการหล่อโลหะทั้งที่ไม่ผ่านการใช้งาน และผ่านการใช้งานในมวลรวมละเอียด (ทรายแม่น้ำ) โดยน้ำหนัก ที่ร้อยละ 25 และ 35 โดยกำหนด สัดส่วนผสมของคอนกรีตปกติให้มีความแข็งแรงที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 38 เมกะปาสกาล (5,500 ปอนด์ต่อ ตารางนิ้ว) เป็นมาตรฐานเปรียบเทียบ พบว่าคอนกรีตที่ผสมทรายใส่แบบที่ผ่านการใช้งานมีความแข็งแรง ความคงทนและโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน ต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมทรายใส่แบบที่ไม่ผ่านการใช้งาน ร้อยละ 20 ถึง 30 ในขณะที่ความแข็งแรงของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ทรายใส่แบบที่ไม่ผ่านการใช้งาน ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 25 และ 35 มีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ผสมทรายปกติ

Naik T. and Kraus, R. (1995) ได้ศึกษาผลกระทบของทรายใส่แบบจากกระบวนการ หล่อโลหะที่มีต่อการควบคุมกำลังของคอนกรีตที่มีความแข็งแรง พบว่าความหนาแน่นของคอนกรีตสดมี ค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของทรายใส่แบบที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความต้องการน้ำ (Water Requirement) มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณทรายใส่แบบเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามร้อยละการแทนที่ทรายใส่แบบที่เพิ่มขึ้น สำหรับความแข็งแรงของคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน ในส่วนผสมที่ทำการแทนที่ทรายใส่แบบในสัดส่วนร้อยละ 30 และ 60 ในมวลรวม ละเอียด มีค่าเกินกว่า 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ในขณะที่การแทนที่ทรายใส่แบบในมวลรวมละเอียด เท่ากับร้อยละ 70 ทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรงเท่ากับ 120 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

Wang S.Y. and Vipulanandan C. (1995) ได้ทำการศึกษาการใช้ประโยชน์จากทรายใส่ แบบจากกระบวนการหล่อโลหะในด้านวิศวกรรมโยธา พบว่าทรายใส่แบบประกอบด้วยทราย ซิลิกา ดินและสารผสมเพิ่ม และจากการทดสอบการชะล้าง (Leachate) พบว่าทรายใส่แบบเป็น วัสดุที่ไม่มีอันตราย นอกจากนั้นการแทนที่ทรายใส่แบบในลักษณะการเพิ่ม (Adding) ใน ปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 6 ทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากกว่า 250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

Cho S. and Vipulanandan C. (1995) ได้นำทรายใส่แบบเหลือทิ้งซึ่งเป็นผลพลอยได้จาก อุตสาหกรรมการหล่อโลหะมาประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมทาง (Highway Engineering) และได้ ทำการทดสอบคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องอันประกอบด้วย คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางกลของ ทรายใส่แบบ รวมทั้งความสามารถในการไหลแผ่เป็นระยะเวลา 1 ปี พบว่า ทรายดังกล่าวสามารถ นำมาใช้แทนที่ทั้งในปูนซีเมนต์และทรายธรรมชาติได้

U.S Department of Transportation (2003) ได้สรุปข้อมูลการใช้ประโยชน์ของทรายได้แบบในงานทางด้านวิศวกรรมโยธาดังต่อไปนี้

1. ทรายได้แบบ (Foundry Sand) มีนิยามคือ ทรายซิลิกาที่มีคุณภาพสูงซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตโลหะและหล่อโลหะ โดยคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีขึ้นอยู่กับส่วนประกอบที่เป็นไปตามชนิดของกระบวนการหล่อ

2. ชนิดของทรายได้แบบในทางปฏิบัติจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

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

2.2 Chemical Bonded Sand ประกอบไปด้วยซิลิการ้อยละ 93 ถึง 99 และมีสารเชื่อมประสานอีกร้อยละ 1 ถึง 3 โดยทรายซิลิกาจะผสมรวมกับสารเคมีประเภทตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการแข็งตัวในช่วงดันได้ดี

3. การใช้ประโยชน์และข้อกำหนดในการนำทรายได้แบบมาใช้ในการผลิตคอนกรีต

3.1 ขนาดคละ (Gradation) ของอนุภาค โดยพบว่ามวลรวมละเอียดที่นำมาใช้เป็นส่วนประกอบคอนกรีตจะต้องมีขนาดคละเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 33 (Standard Specification for Concrete Aggregates) ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งโดยทั่วไปทรายได้แบบมีความละเอียดมากทำให้จำนวนทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 30, 50 และ 100 มีปริมาณมาก ดังนั้นการใช้งานควรที่ทดสอบผงฝุ่นทรายได้แบบที่ทำให้ขนาดคละของมวลรวมละเอียดไม่เกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด นอกจากนี้ในมาตรฐานได้กำหนดค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) ของมวลรวมละเอียดต้องมีค่าอยู่ในช่วง 2.3 ถึง 3.1

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

3.3 ความหนาแน่น (Density) ตามมาตรฐาน ASTM C 33 สำหรับมวลรวมละเอียดต้องมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.20 ถึง 1.76 ก./ซม.³

4. สำหรับการนำทรายได้แบบประเภท Green Sand ซึ่งมีสีดามาใช้แทนที่ในมวลรวมละเอียดนั้น โดยปกติจะมีสัดส่วนการแทนที่ไม่เกินร้อยละ 15 อันเนื่องมาจากมีผลต่อสีของคอนกรีต

ตารางที่ 2.3

ข้อกำหนดของขนาดคละของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C 33

เบอร์ตะแกรงร่อน	ขนาดช่องเปิด (Opening) ของตะแกรง (มม.)	ร้อยละผ่านตะแกรง (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

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ความหมายของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หมายถึง ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) ชนิดหนึ่ง ซึ่งได้จากการบดปูนเม็ด (Clinker) กับแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) เมื่อผสมกับน้ำสารประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัวได้

3.2 สารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยสารประกอบหลัก 2 กลุ่มใหญ่ คือ

3.2.1 สารประกอบหลัก

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยมมีสีเทาเข้ม คุณสมบัติของ C_3S จะเหมือนกับคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2 – 3 ชั่วโมง และจะสามารถพัฒนากำลังอัดในช่วงสัปดาห์แรก การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะให้ความร้อน 500 จูลต่อกรัม ปริมาณของไตรแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีประมาณร้อยละ 35 – 55

2. ไดแคลเซียมซิลิเกต เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม โดยไดแคลเซียมซิลิเกตสามารถมีได้หลายรูปแบบ แต่มีเพียง β - C_2S เท่านั้นที่สามารถคงตัวอยู่ได้ที่อุณหภูมิทั่วไป เนื่องจากเลขโคออดิเนชันของแคลเซียม (Ca^{2+}) มีลักษณะที่ผิดปกติ (Irregular) เป็นผลให้เกิดความไม่เสถียรจึงสามารถทำปฏิกิริยาได้ β - C_2S มีคุณสมบัติในการยึดเกาะ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยปล่อยความร้อนประมาณ 250 จูลต่อกรัม มีการพัฒนากำลังในระยะยาวในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีไดแคลเซียมซิลิเกตอยู่ประมาณร้อยละ 15 – 35

3. ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน C_3A จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันที ทำให้เกิดความร้อนจำนวนมาก ประมาณ 850 จูลต่อกรัม กำลังอัด

ของ C_3A จะพัฒนาขึ้นภายใน 1 – 2 วัน แต่จะมีค่าค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มี C_3A อยู่ในปริมาณร้อยละ 7 – 15

4. เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์ (C_4AF) จะทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมาก และก่อตัว ภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดขึ้นประมาณ 420 จูลต่อกรัม ค่าลึงซ์ของ C_4AF ค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_4AF อยู่ในปริมาณร้อยละ 5 – 10

3.2.2 สารประกอบรอง

1. ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (Sulfur Trioxide, SO_3) โดยในการผลิตปูนซีเมนต์ปูนเม็ด (Clinker) จะถูกบดรวมกับยิปซัม (Gypsum, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ หรือ CSH_2) เพื่อป้องกันการก่อตัวที่เร็วเกินไป ในทางกลับกันปริมาณของยิปซัมจะต้องมีปริมาณที่ไม่มากเกินไปเพราะจะทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วเกิดการแตกร้าวได้ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างไตรแคลเซียมอะลูมินกับยิปซัม ทำให้เกิดเอทริงไกต์ (Ettringite) ซึ่งมีปริมาตรที่เพิ่มขึ้น เมื่อยิปซัมผสมอยู่น้อยปฏิกิริยาระหว่าง C_3A กับยิปซัมจะเกิดเมื่อซีเมนต์เพสต์อยู่ในสภาพที่เป็นพลาสติก การขยายตัวของปริมาตรเกิดก่อนที่ซีเมนต์เพสต์จะแข็งตัว แต่เมื่อยิปซัมผสมอยู่ในปริมาณที่มากปฏิกิริยาจะเกิดต่อเนื่องไปหลังจากที่ซีเมนต์เพสต์แข็งตัวแล้ว และอาจทำให้เกิดการแตกร้าวได้

2. ปูนขาวอิสระ (Free Lime, CaO) จะเกิดขึ้นเนื่องจากวัตถุดิบที่มีปูนขาวมากเกินไป สำหรับการทำปฏิกิริยากับ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมไดออกไซด์ (Al_2O_3) และไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3) ในเตาเผาปูนขาวอิสระสามารถรวมตัวกับน้ำ ซึ่งการรวมตัวดังกล่าวหลังจากที่ซีเมนต์เพสต์แข็งตัวแล้ว ผลที่ได้คือปริมาตรที่เพิ่มขึ้น ถ้าปูนขาวอิสระมีปริมาณมากพออาจทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่ก่อตัวแล้วขยายตัวและแตกร้าวได้

3. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) โดยวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ส่วนใหญ่ จะมีแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) ซึ่งเมื่อเผาแล้วจะเกิดการแยกตัวให้ MgO และ CO_2 แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนหลอมตัวเป็นปูนเม็ดที่เหลือจะอยู่ในรูปของ MgO และเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเหมือนกับ CaO คือ มีปริมาตรที่เพิ่มขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดความไม่อยู่ตัว (Unsoundness)

4. ออกไซด์ของอัลคาไลด์ (Alkali Oxide, K_2O และ Na_2O) ออกไซด์ของอัลคาไลด์มีบทบาทสำคัญเมื่อวัสดุผสม (Aggregate) สามารถทำปฏิกิริยากับอัลคาไลด์ เรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยา อัลคาไลด์มวลรวม ซึ่งทำให้เกิดการขยายตัวและอาจทำให้คอนกรีตแตกร้าวได้

5. ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (Phosphorous Pentaoxide, P_2O_5) ส่วนมากมาจากหินปูน สารนี้ทำให้ปูนซีเมนต์แข็งตัวช้า เนื่องจาก P_2O_5 ทำให้ C_3S สลายตัวเป็น C_2S กับ CaO

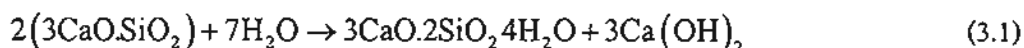
3.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction)

3.3.1 ปฏิกิริยาของสารประกอบ

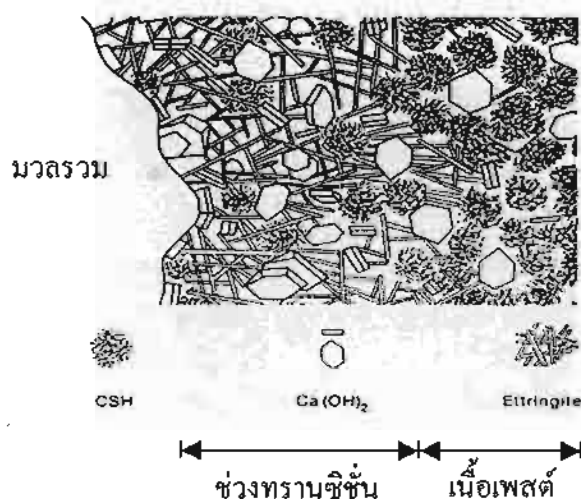
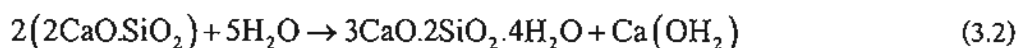
ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะให้เกิดการก่อตัว และแข็งตัว โดยจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารประกอบในปูนซีเมนต์ สารประกอบนี้จะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลซึ่งกันและกัน ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำสามารถเริ่มต้นด้วยปฏิกิริยาของแต่ละสารประกอบในปูนซีเมนต์

1. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S, C_2S)

แคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิด $Ca(OH)_2$ และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, C-S-H) ดังสมการที่ (3.1) และ (3.2) โดยมีลักษณะดังภาพที่ 3.1



และ

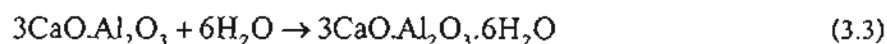


ภาพที่ 3.1 ปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S, C_2S)

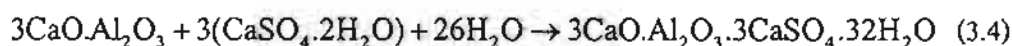
จากภาพจะเห็นได้ว่า C-S-H จะอยู่ในภาพของอนุภาคเล็กๆ มีขนาดเท่ากับสารแขวนลอย (เล็กกว่า $1\text{ }\mu\text{m}$) มีลักษณะปรากฏเป็นอสัณฐาน (Amorphous) และมีผลึกที่หยาบมาก (Poorly Crystalline) โดยอัตราส่วนของแคลเซียมต่อซิลิกาใน C-S-H ไม่คงที่ขึ้นอยู่กับอายุ อุณหภูมิและปริมาณน้ำ สัญลักษณ์ทางเคมีของไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีอัตราส่วน $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ เป็นเพียงค่าเฉลี่ยเท่านั้น

2. ปฏิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนตและยิปซัม

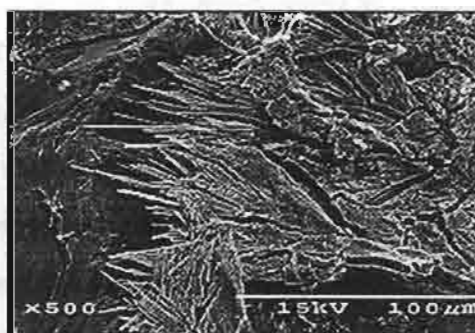
ปฏิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) จะเกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการที่ (3.3)



เพื่อหน่วงไม่ให้ปฏิกิริยาเกิดอย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิปซัมเข้าไปในระหว่างขบวนการบดปูนเม็ด ยิปซัมจะเข้าไปทำปฏิกิริยาก่อให้เกิดชั้นของเอ็ททริงไกต์ (Ettringite) ในภาพที่ 3.2 บนผิวของอนุภาค C_3A ดังสมการที่ (3.4)



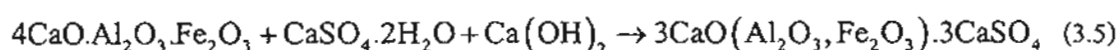
ชั้นของเอ็ททริงไกต์ (Ettringite) ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C_3A และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S , C_2S)



ภาพที่ 3.2 ลักษณะของเอ็ททริงไกต์ (Ettringite) มีรูปทรงอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับเข็มผลึก

3. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียม อะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF)

ปฏิกิริยาของ C_4AF คล้ายกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นใน C_3A แต่ปฏิกิริยาจะเกิดช้ากว่าและมีความร้อนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า ขีปนํจะหน่วงปฏิกิริยาของ C_4AF มากกว่าที่หน่วงใน C_3A ปฏิกิริยาระหว่าง C_4AF และขีปนํจะทำให้เกิดแคลเซียมซัลโฟอะลูมินेट (Calcium Sulfoaluminate) และแคลเซียมซัลโฟเฟอร์ไรต์ (Calcium Sulfoferrite) ดังสมการที่ (3.5)



3.3.2 กลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยปฏิกิริยาเคมีของแต่ละองค์ประกอบแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) และน้ำที่ต่อเนื่องกัน โดยปกติสารประกอบที่เข้าทำปฏิกิริยาได้แก่ เอไลต์ (ไตรแคลเซียมซิลิเกตซึ่งโครงสร้างถูกแทนที่ไอออนอื่น) เบไลต์ (ไดแคลเซียมซิลิเกตซึ่งโครงสร้างถูกแทนที่ไอออนอื่น) ไตรแคลเซียมอะลูมินेट แคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ แคลเซียมออกไซด์อิสระ ซัลเฟตของอัลคาไลด์ แคลเซียมซัลเฟต และน้ำ

ปฏิกิริยาของเพสต์ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่สิ่งอุณหภูมิแวดล้อมประกอบด้วย 4 ขั้นตอน พบว่ามีลักษณะที่คล้ายกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในไตรแคลเซียมซิลิเกต ดังต่อไปนี้

1. ระยะ Pre-induction (นาที่แรก)

โดยเมื่อปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำจะมีการแตกตัวอย่างรวดเร็วของไอออนบางชนิดไปยังสถานะของเหลวและมีการก่อตัวของไฮเดรต ซัลเฟตของอัลคาไลด์จะแตกตัวอย่างสมบูรณ์ภายในไม่กี่วินาทีทำให้ในสารละลายมีทั้งไอออนของโพแทสเซียม (K^+) โซเดียม (Na^+) และซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ในขณะที่แคลเซียมซัลเฟตก็มีการแตกตัวจนกระทั่งอิ่มตัวด้วยไอออนแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) เช่นเดียวกัน

ไตรแคลเซียมซิลิเกตจะมีการแตกตัวอย่างต่อเนื่องและมีชั้นของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเกิดขึ้นบนผิวของอนุภาคปูนซีเมนต์ เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ (CaO/SiO_2) ของผลิตภัณฑ์ไฮเดรตนี้มีค่าต่ำกว่าในไตรแคลเซียมซิลิเกตซึ่งปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สภาวะนี้จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ในขณะที่ไตรแคลเซียมอะลูมินेटจะแตกตัวและทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอ็ททริงไกท์ (Ettringite) ซึ่ง

ปริมาณของไตรแคลเซียมอะลูมิเนตที่ทำปฏิกิริยาค้างกันตามชนิดของปูนซีเมนต์ เช่นเดียวกับเฟอร์ไรต์ที่ให้ผลิตภัณฑ์อย่างเดียวกัน ส่วนเบต้าไดแคลเซียมซลิเกต (β - C_2S) จะให้แคลเซียมซลิเกตไฮเดรต

2. ระยะ Induction หรือ ระยะดอร์แมนท์ (Dormant) (ในช่วงโมงแรก)

หลังจากช่วงสั้นๆของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ผ่านไปอย่างรวดเร็ว อัตราเร็วของปฏิกิริยาโดยรวมจะลดลงในช่วงช่วงโมงแรก สาเหตุที่ปฏิกิริยาลดลงเป็นผลเนื่องมาจากความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ในของเหลวที่เริ่มเข้าสู่จุดสูงสุดและกำลังจะลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) อยู่ในระดับที่คงที่ตามสัดส่วนที่ใช้ในการเกิดของเอ็ทริงไกท์ (Ettringite)

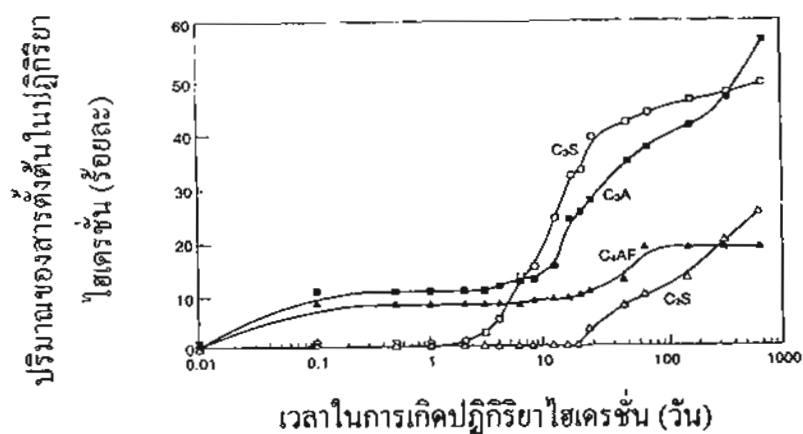
3. ระยะเร่ง (Acceleration Stage) (3 – 12 ชั่วโมงหลังการผสม)

ในช่วงนี้จะมีการพัฒนาของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เพิ่มขึ้นอีกครั้งและถูกควบคุมโดยการเกิดและพัฒนาโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะเริ่มตกผลึกทำให้ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ลดลง ในขณะที่แคลเซียมซัลเฟตจะกลับมาแตกตัวอย่างสมบูรณ์แต่ความเข้มข้นของซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) จะลดลงเนื่องจากการฟอร์มตัวของเอ็ทริงไกท์

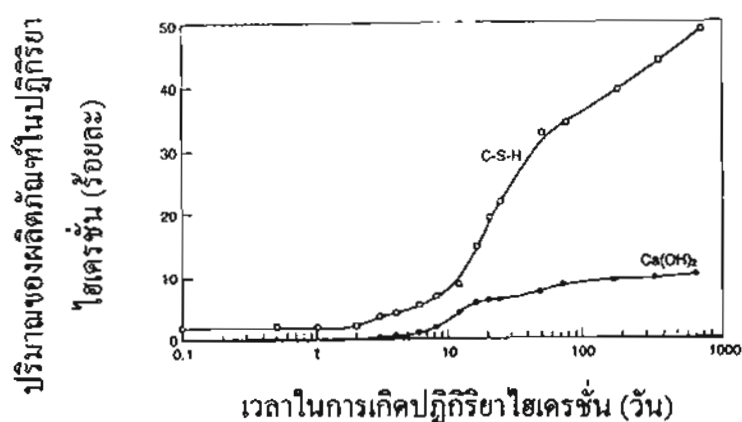
4. ระยะหลังการเร่ง (Post – Acceleration Period)

ในระยะนี้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลงตามปริมาณของสารตั้งต้นของปฏิกิริยาที่ลดลง ในขณะที่แคลเซียมซลิเกตไฮเดรต ($C-S-H$) มีการก่อตัวอย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ต่อเนื่องของไตรแคลเซียมซลิเกตและเบต้าไดแคลเซียมซลิเกต และเมื่อแคลเซียมซัลเฟตถูกใช้หมดไปมีผลทำให้ความเข้มข้นของซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ลดลง ตามมาด้วยเอ็ทริงไกท์จะก่อตัวขึ้นเริ่มทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) และไดแคลเซียมซิงมีโมเลกุลของอะลูมิเนียมและ/หรือเฟอร์ไรต์ไดโมโนซัลเฟต

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แสดงได้ในภาพที่ 3.3 และ 3.4



ภาพที่ 3.3 การพัฒนาของปฏิกิริยาไฮเดรชันในแต่ละสารประกอบหลัก



ภาพที่ 3.4 ปริมาณของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นที่เวลาต่างๆ

3.4 ปฏิกิริยาปอซโซลานิก

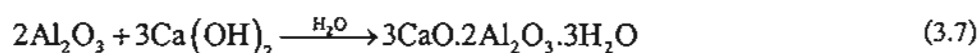
3.4.1 ความหมายของสารปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Material) ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ได้ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า วัสดุที่มีส่วนประกอบเป็นซิลิคอน (Siliceous) หรือมีทั้งซิลิคอน

และอะลูมินา (Siliceous and Alumineous) ซึ่งที่อุณหภูมิจะไม่ทำปฏิกิริยาแต่เมื่อทำการบดให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ได้

3.4.2 ปฏิกิริยาปอซโซลานิกของสารปอซโซลาน

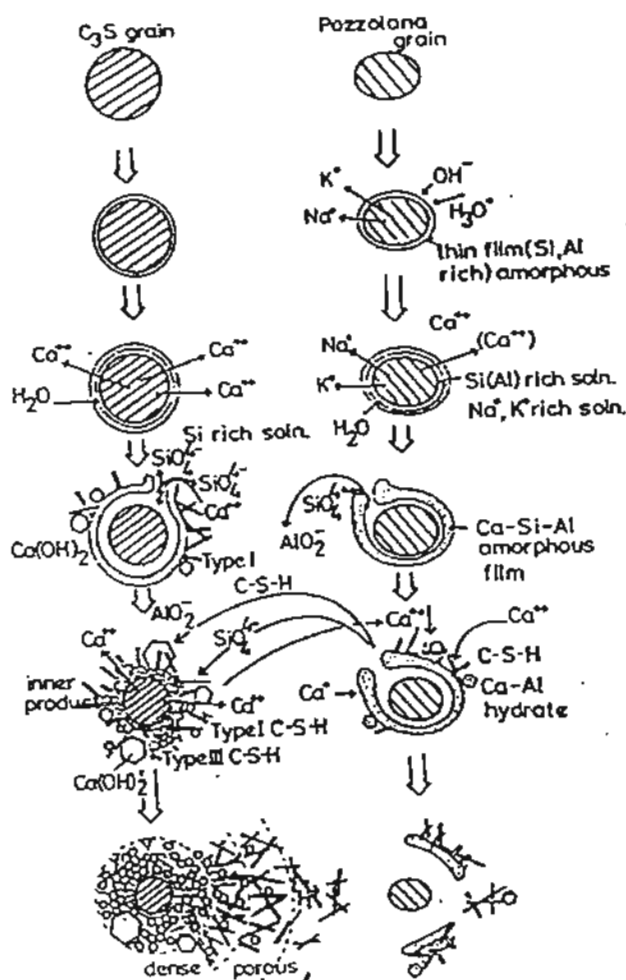
ปฏิกิริยาปอซโซลานิกคือ ปฏิกิริยาของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และ/หรืออะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ในสารปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต และไดแคลเซียมซิลิเกต โดยที่ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิกอนไดออกไซด์ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ในขณะที่ปฏิกิริยาปอซโซลานิกของอะลูมิเนียมออกไซด์ได้แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ($\text{C}_3\text{A}_2\text{H}_6$) ดังสมการที่ (3.6) และ (3.7) ตามลำดับ



3.4.3 กลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีสารปอซโซลาน

จากภาพที่ 3.5 กลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชันในระบบซึ่งมีทั้งไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และสารปอซโซลานเริ่มขึ้นจากไอออนของแคลเซียม (Ca^{2+}) จะละลายออกจากสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) อย่างอิสระลงไปในช่วงเหลว แต่ไอออนดังกล่าวจะถูกดักจับด้วยอนุภาคที่มีประจุลบจากสารปอซโซลานโดยอาศัยการชนกันและถูกดูดซับที่ผิวที่ผิวของอนุภาคปอซโซลาน แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะเกิดการตกตะกอนที่อัตราส่วนแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ (CaO/SiO_2) สูง ในขณะที่บนผิวของสารปอซโซลานจะเกิดขึ้นเช่นเดียวกันแต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ต่ำและมีความพรุนสูง โดยปกติเมื่ออนุภาคปอซโซลานสัมผัสกับน้ำผิวของสารปอซโซลานมีคุณสมบัติเป็นประจุบวกอันเนื่องมาจากการดึงดูดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำไว้และจะทำให้มีการแตกตัวของโซเดียมไอออน (Na^+) และโพแทสเซียมไอออน (K^+) และไอออนอื่นๆ ที่ละน้อยตามมาเป็นผลให้เกิดชั้นที่ผิวของอนุภาคปอซโซลานซึ่งมีส่วนประกอบของซิลิกอนและ/หรืออะลูมิเนียมเป็น

ส่วนใหญ่ การละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะช่วยเร่งการแตกตัวของน้ำให้มีปริมาณของไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นการเร่งการแตกตัวของซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (SiO_2) และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (AlO_2) ด้วยและเมื่อรวมกับผลของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จึงทำให้ความหนาของชั้นบนอนุภาคปอซโซลานเพิ่มขึ้นและแตกออกในที่สุด



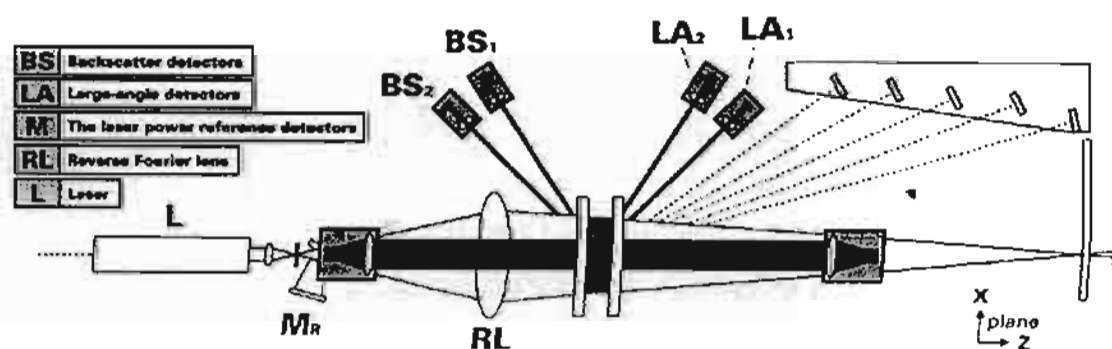
ภาพที่ 3.5 ปฏิกริยาไฮดรชันที่เกิดร่วมกับปฏิกิริยาปอซโซลานิก

3.5 ทฤษฎีเกี่ยวกับคุณสมบัติที่ทำการทดสอบ

3.5.1 การกระจายขนาดคละของอนุภาค (Particle Size Distribution)

การกระจายขนาดคละของอนุภาคเป็นคุณสมบัติทางกายภาพที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในสภาวะสดและแข็งตัวแล้ว โดยมีเทคนิคในการทดสอบการกระจายขนาดคละหลายวิธีอาทิเช่น วิธีการร่อน (Sieve) วิธีการตกตะกอน (Sedimentation Method) และการแทรกสอดของเลเซอร์ (Laser Diffraction Method) เป็นต้น ซึ่งในวิธีการแทรกสอดของเลเซอร์มีข้อได้เปรียบกว่าสองวิธีแรกหลายกล่าวคือ จำนวนตัวอย่างน้อยและทดสอบได้เร็ว ความแม่นยำสูง แต่ก็มีควมซับซ้อนมากตั้งแต่เครื่องมือดังแสดงในภาพที่ 3.6 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง ระบบการตรวจวัดระบบการกระจายอนุภาคตลอดจนกระจกและโปรแกรมในการวิเคราะห์ นอกจากนี้จะมีการเตรียมตัวอย่าง และการวิเคราะห์ผลการทดสอบ เป็นต้น

สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดสอบจะใช้ทฤษฎีทรงกลมเทียบเท่า (Equivalent Sphere Theory) ซึ่งมีหลักการการเปลี่ยนปริมาตรของรูปทรงต่างๆ (โดยปกติจะบอกขนาดด้วยความกว้าง ยาว และสูง) ให้มีปริมาตรเทียบเท่ากับทรงกลมแล้วแสดงขนาดในรูปของจำนวนเฉพาะ (Unique Number) ซึ่งก็คือ รัศมีหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม



ภาพที่ 3.6 เครื่อง Laser Particle Size Analyzer

3.5.2 ทฤษฎีความเป็นผลึกของสาร

การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิค X-Ray มีประโยชน์ในการระบุชนิดของผลึกของสารที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุ โดยจากหลักการที่ว่าธาตุหรือสารประกอบมีคุณสมบัติในการแทรกสอดต่างกันทำให้สามารถระบุธาตุหรือสารประกอบนั้นได้ นอกจากนั้นสามารถพิจารณาได้ว่าผลึกประกอบด้วยชั้นหรือระนาบของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขว่าลำคลื่นที่ตกกระทบต้องมีความเข้มสูงและความแตกต่างของระยะเดินทาง (Path Difference) ของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียงกันมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบดังแสดงในภาพที่ 3.7 และสมการที่ (3.8)

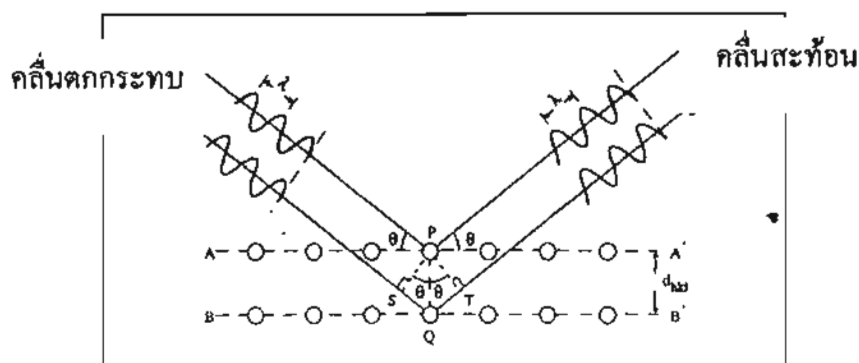
$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (3.8)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่น (เมตร)

n คือ ลำดับของการสะท้อนซึ่งมีค่าเท่ากับ 1, 2, 3, ..., n

d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ (เมตร)

θ คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนเมื่อวัดจากแนวระนาบที่กำลังพิจารณา



ภาพที่ 3.7 แบบจำลองสำหรับการแทรกสอดของคลื่นตามสมการ $2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda$

3.5.3 คุณสมบัติของคอนกรีตในสภาพสด

3.5.3.1 ค่าการยุบตัว (Slump) และการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss)

ความสามารถในการทำงานได้ (Workability) คือ คุณสมบัติของคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ ในสภาวะสด (Fresh State) ซึ่งคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกันตั้งแต่การผสม เทเข้าแบบ การยุบตัวและการตบแต่ง (ACI 116R-90) โดยสามารถทดสอบได้หลายวิธี แต่วิธีที่ง่ายในทางปฏิบัติคือการทดสอบค่าการยุบตัว (Slump) และปัจจัยที่มีผลต่อค่าการยุบตัวของคอนกรีต (สมนึก ตั้งเดิม สิริกุล, 2542) ประกอบด้วยปัจจัยดังต่อไปนี้

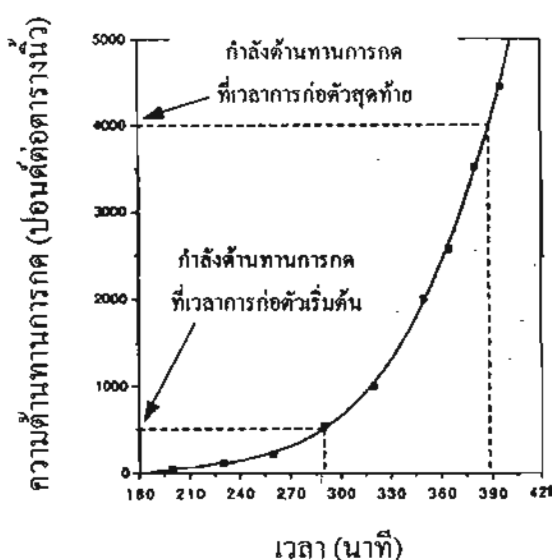
1. อัตราส่วนปริมาตรเพศต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น (γ) โดยคอนกรีตที่มีปริมาณเพศมากหรือค่า γ สูงมีค่าการยุบตัวมากกว่า γ ต่ำ
2. พื้นที่ผิวทั้งหมดของมวลรวม ซึ่งคอนกรีตที่มีพื้นที่ผิวทั้งหมดของมวลรวมมากมีความสามารถในการเทได้น้อยกว่าคอนกรีตที่มีพื้นที่ผิวทั้งหมดของมวลรวมน้อย ทั้งนี้เพราะการที่มีพื้นที่ผิวทั้งหมดของมวลรวมมากจะทำให้แรงเสียดทานระหว่างผิวอนุภาคมากขึ้น
3. พื้นที่ผิวทั้งหมดของปูนซีเมนต์และ/หรือสารปอซโซลาน โดยมีผลกระทบเช่นเดียวกับมวลรวม นอกจากนั้นอนุภาคดังกล่าวจะมีความสามารถในการกักเก็บน้ำอิสระได้ซึ่งจะเป็นผลให้ความสามารถในการเทได้ลดลง
4. ปริมาณน้ำอิสระ (Free Water) โดยปกติน้ำคอนกรีตจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ น้ำที่ถูกกักเก็บในอนุภาคซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่และน้ำอิสระ คอนกรีตมีค่าการยุบตัวมากต้องมีน้ำอิสระมาก

สำหรับการสูญเสียค่าการยุบตัว คือ การสูญเสียความชื้นเหลวของคอนกรีตสดเมื่อเวลาไป การสูญเสียค่าการยุบตัวเนื่องจากผลของการแข็งตัวของซีเมนต์เพศ การสูญเสียน้ำอิสระ (Free Water) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จากการดูดซึมของมวลรวมและการระเหย ดังนั้นเมื่อคอนกรีตถูกผสมขึ้นมาแล้ว ควรรีบดำเนินการ เท และแต่งผิวให้ทันกับเวลาที่คอนกรีตยังสามารถทำงานได้เพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียค่าการยุบตัว โดยมีปัจจัยที่มีผลต่อการสูญเสียน้ำอิสระค่าการยุบตัวคือ อุณหภูมิ ปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) หรืออัลคาไลน์สูงในปูนซีเมนต์ และสารผสมเพิ่ม

3.5.3.2 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

การก่อตัว (Setting) และการแข็งตัว (Hardening) ของคอนกรีตเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ โดยระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time) ของคอนกรีตตามนิยามของมาตรฐาน ASTM C 403 (Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixture by Penetration Resistance) ได้กำหนดด้วยค่าความต้านทานการกด (Penetration

Resistance) ของมอร์ตาร์ที่ได้จากการร่อนคอนกรีตผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เพื่อคัดแยกมวลรวมหยาบ (หิน) ออกเป็น 2 ช่วงคือ ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) คือระยะเวลาที่แรงต้านทานต่อพื้นที่เท่ากับ 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และ 4,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 3.8 โดยค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ชนิดของ ปูนซีเมนต์ อุณหภูมิ และน้ำยาผสมคอนกรีตเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อระยะเวลาการก่อตัว



ภาพที่ 3.8 ระยะเวลาการก่อตัวของตัวอย่างคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM 403

3.5.4 คุณสมบัติทางกลของคอนกรีต

3.5.4.1 กำลังรับแรงของคอนกรีต

กำลังรับแรงเป็นคุณสมบัติของคอนกรีตในสถานะแข็งตัวแล้ว (Hardened State) หมายถึงคอนกรีตที่พัฒนาการของกำลังรับน้ำหนักได้เต็มที่ตามที่ออกแบบไว้ โดยทั่วไปคือ คอนกรีตที่อายุ 28 วัน เป็นต้นไป คอนกรีตในสถานะแข็งตัวแล้วต้องมีกำลังที่ดี โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการคือ

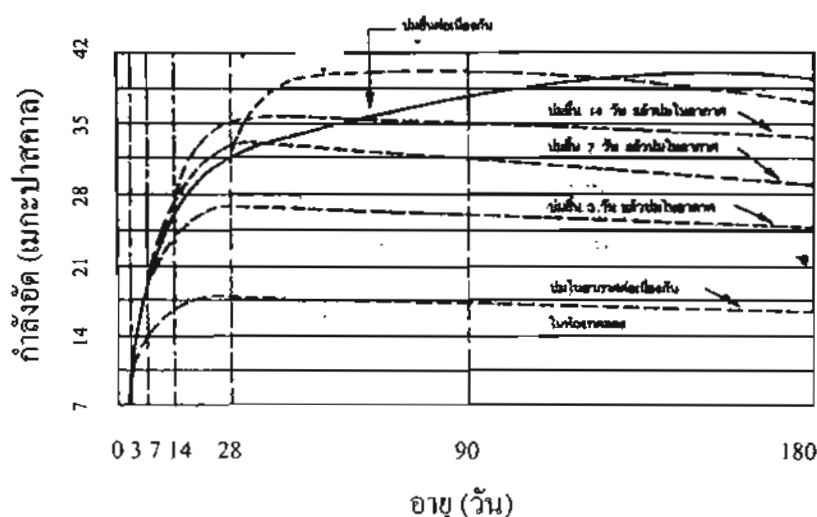
1. กำลังของมอร์ตาร์ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และระดับของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Degree of Hydration)

2. กำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวมซึ่งโดยทั่วไปกำลังของมวลรวมจะมากกว่า มอร์คาร์หลายเท่า ดังนั้นการเพิ่มปริมาณของมวลรวมลงในส่วนผสมจะเป็นการเพิ่มกำลังอัดของ คอนกรีต

3. แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ดาร์กับผิวของมวลรวม โดยแรงยึดเหนี่ยวดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพเช่น รูปร่าง ลักษณะผิวของมวลรวม และปฏิกิริยาเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับแร่ธาตุในเนื้อมวลรวม

ในทางปฏิบัติปัจจัยที่ผลต่อกำลังของคอนกรีตจะมีตั้งแต่ คุณสมบัติของวัสดุผสม การทำคอนกรีต และการบ่มคอนกรีต กล่าวคือ

1. คุณสมบัติของวัสดุผสมซึ่งประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ มวลรวม และน้ำที่จะต้องเป็นไปตามมาตรฐานกำหนดจึงจะได้คอนกรีตที่มีคุณภาพ
2. การทำคอนกรีตตั้งแต่การชั่งส่วนผสม การผสมคอนกรีตและการเทคอนกรีตเข้าแบบหล่อและการอัดแน่น
3. การบ่มคอนกรีต ซึ่งเป็นที่ทราบดีว่าความชื้นมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันต้องการน้ำอย่างต่อเนื่อง นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการบ่ม สำหรับการพัฒนากำลังของคอนกรีตแสดงในภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต

3.5.4.2 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

โมดูลัสยืดหยุ่นเป็นคุณสมบัติยืดหยุ่นของคอนกรีตมีความสำคัญต่อการเสีรูปของคอนกรีตภายใต้น้ำหนักกระทำ ทั้งนี้เพราะคอนกรีตเป็นวัสดุที่ไม่มีการยืดหยุ่นเมื่อรับน้ำหนักบรรทุก ดังนั้น การเสีรูปอย่างถาวรอาจเกิดขึ้นได้ภายใต้น้ำหนักกระทำ โดยปกติจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังอัดและขึ้นอยู่กับค่าโมดูลัสและปริมาณของมวลรวมในคอนกรีต จากการทดสอบพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นขึ้นอยู่กับกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต โดยแสดงความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.9) ดังต่อไปนี้

$$E_c = 4730(f'_c)^{0.5} \quad \text{หน่วย เมกะปาสกาล} \quad (3.9)$$

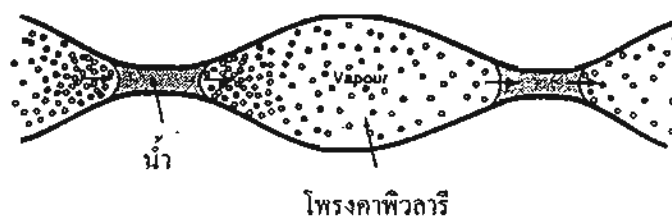
โดยที่ E_c คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตปกติ (เมกะปาสกาล)

f'_c คือ กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (เมกะปาสกาล)

3.5.5 คุณสมบัติทางด้านความทนทานของคอนกรีต

3.5.5.1 การหดตัวแบบแห้ง

การหดตัวแบบแห้งเป็นการหดตัวที่เกิดจากการสูญเสียน้ำของซีเมนต์เพสต์ไปสู่บรรยากาศที่มีสภาวะความชื้นต่ำ ซึ่งเกิดจากการสูญเสียน้ำทั้งจากโพรงคาพิลลารี (Capillary Pore) และโพรงเจล (Gel Pore) ในซีเมนต์เพสต์ดังแสดงในภาพที่ 3.10 ให้กับสิ่งแวดล้อมเนื่องจากความแตกต่างกันของความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างคอนกรีตและสิ่งแวดล้อมเพื่อทำให้ระบบอยู่ในภาวะสมดุล ซึ่งความชื้นที่สูญเสียไปไม่สามารถกลับคืนมาได้ (Irreversible Process) โดยที่ปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ที่หดตัวมีค่าไม่เท่ากับปริมาตรของน้ำที่สูญเสียไป อันเนื่องจากการยัดรีงของโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์



ภาพที่ 3.10 การสูญเสียความชื้นผ่านทางโพรงคาพิลลารีและเจล

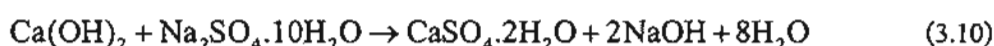
3.5.5.2 การกระทำเนื่องจากซัลเฟต

สภาวะแวดล้อมที่มีซัลเฟตจะมีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต โดยทั่วไปซัลเฟตพบในรูปของโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ซึ่งเมื่อเกลือซัลเฟตมีความเข้มข้นมากกว่า 1000 ส่วนในล้านส่วน (ppm) จะทำให้คอนกรีตเกิดความเสียหาย โดยซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับทุกๆ ผลิตภัณฑ์ของซีเมนต์เพสต์อันจะก่อให้เกิดการขยายตัว (Expansion) การแตกร้าว (Crack) และการหลุดร่อน (Spalling) ในระยะยาว

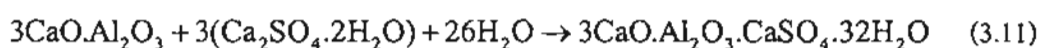
ปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และซีเมนต์เพสต์เป็นปฏิกิริยาที่มีความซับซ้อนและขึ้นอยู่กับเวลา อันเนื่องมาจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาเช่น ความเข้มข้นของซัลเฟตไอออน อุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม ชนิดและสัดส่วนของวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงและเวลาในการบ่ม เป็นต้น และเป็นปฏิกิริยาที่ขึ้นอยู่กับเวลาเพราะการแพร่กระจายของซัลเฟตไอออนมีอัตราค่อนข้างช้า ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาจะทำให้เกิดเอ็ททริงไกต์ (AFt-phase) ที่มีคุณสมบัติในขยายตัวมาก

สำหรับปฏิกิริยาของ โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) กับซีเมนต์เพสต์สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

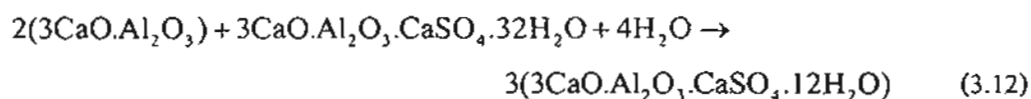
1. การเกิดยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) โดยโซเดียมซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เกิดผลิตภัณฑ์เป็นยิปซัม ดังแสดงในสมการที่ (3.10)



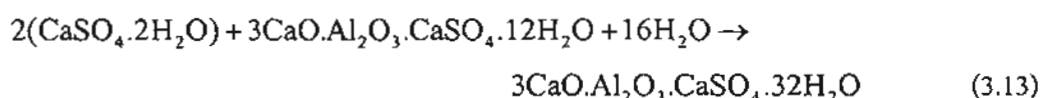
2. การเกิดเอ็ททริงไกต์ (AFt-phase) ซึ่งยิปซัมที่ได้จากปฏิกิริยาในสมการที่ (3.10) จะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) เกิดผลิตภัณฑ์เอ็ททริงไกต์ ดังแสดงในสมการที่ (3.11)



3. การเกิดโมโนซัลโฟอะลูมิเนต โดยเมื่อไตรแคลเซียมอะลูมิเนตทำปฏิกิริยากับซัลเฟตจะทำให้ปริมาณซัลเฟตในเพสต์ลดลง ส่งผลให้เอ็ททริงไกต์เปลี่ยนรูปไปอยู่ในสถานะกึ่งเสถียรที่เรียกว่าโมโนซัลโฟอะลูมิเนต (AFm-phase) ดังแสดงในสมการที่ (3.12)



4. การเกิดเอ็ททริงไกต์ซ้า (AFt-phase) เมื่อปริมาณซัลเฟตเพิ่มขึ้น โมโนซัลโฟอะลูมินตจะเปลี่ยนรูปไปเป็นเอ็ททริงไกต์ซ้า ดังแสดงในสมการที่ (3.13)



ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำลายโดยซัลเฟตมีดังต่อไปนี้

1. ปริมาณของไตรแคลเซียมอะลูมินต (C_3A) ในปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะยิ่งปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมินต (C_3A) น้อยจะมีความต้านทานต่อการกระทำเนื่องจากซัลเฟตได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ที่มีไตรแคลเซียมอะลูมินต (C_3A) มาก
2. ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ในเพสต์ ที่ยังมีปริมาณน้อยลงจะเพิ่มความต้านทานต่อการทำลายจากซัลเฟต
3. ความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต โดยความเข้มข้นที่มีปริมาณมากจะเป็นอันตรายต่อเพสต์มากขึ้น

3.5.5.3 การกระทำเนื่องจากกรด

ในหลายๆ กิจกรรมของมนุษย์จะมีกรดเกิดขึ้นและกรดสามารถกัดกร่อนโครงสร้างคอนกรีต โดยทั่วไปกรดจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

1. กรดอินทรีย์ (Organic Acid) ซึ่งมาจากกิจกรรมทางการเกษตร โดยการเผาไหม้กระบวนการย่อยสลายทั้งแบบใช้และแบบไม่ใช้ออกซิเจนในการทำปฏิกิริยา อาทิเช่น กรดอะซิติก (CH_3COOH) กรดฟอร์มิก (HCOOH) เป็นต้น โดยปกติกรดประเภทนี้จะมีความสามารถในการละลายต่ำและสามารถแบ่งกรดออกเป็น 3 กลุ่มตามความสามารถในการละลายของเกลือแคลเซียมในกรดอินทรีย์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1

การแบ่งกลุ่มความสามารถในการละลายของเกลือแคลเซียมในกรดอินทรีย์
(หน่วยเป็นกรัมในน้ำ 100 กรัม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

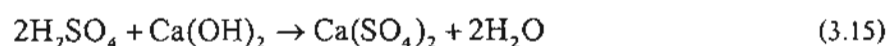
กลุ่ม	ชื่อกรด	ความสามารถในการละลาย ของเกลือแคลเซียม (Ca^{2+})
1. ละลายได้สูง	1. CH_3COOH (Acetic Acid)	52.0
	2. HCOOH (Formic Acid)	16.1
	3. $\text{CH}_3\text{CHOHCOOH}$ (Lactic Acid)	10.5
2. ละลายได้ปานกลาง	1. $(\text{CH}_2)_2\text{COH}(\text{COOH})_3$ (Cetric Acid)	0.085
	2. $(\text{CH}_2)_2(\text{OH})_2(\text{COOH})_2$ (Tartanic Acid)	0.037
3. ละลายได้น้อย	1. $(\text{COOH})_2$ (Oxalic Acid)	0.00067

โดยกรดที่นำมาทดสอบกับคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบเป็นกรดอะซิติก (CH_3COOH) ที่จัดอยู่ในกลุ่มที่ละลายน้ำสูง และสามารถทำให้คอนกรีตสลายตัวได้หลังจาก 2 เดือน ปฏิกิริยาของกรดดังกล่าวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (โดยปกติกรดจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบแคลเซียมที่มีในคอนกรีตทั้งหมด แต่เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีความไวในการปฏิกิริยาและอยู่สภาวะที่ละลายในรูปของไอออนจึงนำมาพิจารณาก่อน เมื่อแคลเซียมไฮดรอกไซด์ถูกใช้ในการทำปฏิกิริยาหมดจึงจะละลายสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตออกมา) แสดงในสมการที่ (3.14) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเกลือแคลเซียมซิลิเกต ($\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$) ที่มีความสามารถในการละลายได้สูงมากทำให้บริเวณผิวหน้าของคอนกรีตที่สัมผัสกับกรดมีการชะล้างออกไปและทำให้กรดสามารถกระทำต่อผิวหน้าใหม่ของคอนกรีตได้ต่อไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและการละลายของผลิตภัณฑ์



2. กรดอนินทรีย์ (Inorganic Acid) ที่ได้จากกระบวนการทางอุตสาหกรรม โดยกรดที่นำมาศึกษาคือ กรดซัลฟริก (H_2SO_4) ซึ่งปกติจะเกิดในน้ำเสียจากอุตสาหกรรม ปฏิกิริยาของกรดซัลฟริก กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) แสดงสมการที่ (3.15) โดยมีลักษณะการทำปฏิกิริยา 2 แบบคือ ไฮโดรเจนไอออน (H^+) จะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ (OH^-) ที่ละลายอยู่ใน

โพรงคาวีลารี ในขณะที่ไอออนของซัลเฟต (SO_4^{2-}) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ซึ่งมีความสามารถในการละลายต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และเมื่อปรากฏไอออนของอะลูมิเนียม (Al^{3+}) จะทำให้แคลเซียมซัลเฟตทำปฏิกิริยาต่อเนื่องเกิดเป็นเอ็ทริงไกท์ ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)



ตารางที่ 3.2

การแบ่งกลุ่มความสามารถในการละลายของเกลือแคลเซียมในกรดอินทรีย์
 (หน่วยเป็นกรัมในน้ำ 100 กรัม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

กลุ่ม	ชื่อกรด	ความสามารถในการละลาย ของเกลือแคลเซียม (Ca^{2+})
1. ละลายได้สูง	1. HCl (Hydrochloric Acid)	73.9
	2. HNO_3 (Nitric Acid)	127.0
2. ละลายได้ปานกลาง	1. H_2SO_4 (Sulfuric Acid)	0.256
3. ละลายได้น้อย	1. HF (Hydrogensulfide Acid)	0.00067

บทที่ 4

วิธีการศึกษา

4.1 แผนการทดสอบ

ในการศึกษานี้ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ดังต่อไปนี้

1. การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, Shell Sand Waste (SSW) และ Green Sand and Molding Waste (GSW)
2. การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสม Shell Sand Waste (SSW) และ Green Sand and Molding Waste (GSW)

การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตประกอบด้วย 3 ส่วนคือ คุณสมบัติของคอนกรีตในสถานะสดประกอบด้วย ค่าการยุบตัวเริ่มต้น การสูญเสียค่าการยุบตัว หน่วยน้ำหนัก และระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้าย คุณสมบัติทางกลได้แก่ ค่าการยุบตัวเริ่มต้น กำลังอัดและแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต โมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน และคุณสมบัติด้านความทนทานได้แก่ การหดตัวแบบแห้ง การกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และอะซิติก (CH_3COOH) และความทนทานต่อสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4)

4.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คราภูเขา ของบริษัทปูนซีเมนต์เอเชีย จำกัด (มหาชน)
2. ผงฝุ่นทรายไส้แบบที่ใช้ในการทดสอบ เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการหล่อ 2 ชนิดคือ Green Sand and Molding Waste (GSW) และ Shell Sand Waste (SSW) จากบริษัท โต โยต้า อุตสาหกรรม จำกัด จังหวัดชลบุรี
3. น้ำ ใช้น้ำประปาที่มีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7
4. ทราย ทรายที่ใช้เป็นทรายแม่น้ำที่มีขนาดกละตามมาตรฐาน ASTM C 33
5. หิน เป็นหินปูน (Crushed Limestone) มีขนาดใหญ่สุด 25 มม. และขนาดกละตามมาตรฐาน ASTM C 33
6. สารเคมีที่ใช้ดังต่อไปนี้

6.1 กรดซัลฟริก (H_2SO_4) มีค่าความถ่วงจำเพาะ 1.84 และปริมาณรีเอเจนต์ (เนื้อสาร) ร้อยละ 98 (โดยน้ำหนัก)

6.2 กรดอะซิติก (CH_3COOH) มีค่าความถ่วงจำเพาะ 1.05 และปริมาณรีเอเจนต์ (เนื้อสาร) ร้อยละ 99.5 (โดยน้ำหนัก)

6.3 โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก หรือคิดเป็นปริมาณเท่ากับ 50 มก./ล. ตามมาตรฐาน ASTM C 1012

4.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

4.1.2.1 เครื่องมือวัด ได้แก่

1. เครื่องชั่ง
2. เวอร์เนียคาลิเปอร์
3. เทอร์โมมิเตอร์

4.1.2.2 อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม

1. ชุดอุปกรณ์ทดสอบหาขนาดกะและ โมดูลัสความละเอียดของมวลรวม
2. ชุดอุปกรณ์ทดสอบหาความถ่วงจำเพาะและร้อยละการดูดซับน้ำ

4.1.2.3 อุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต

1. เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine ขนาด 200 ตัน
2. เครื่องวัดการหดตัวแบบดิจิตอล (Digital Length Comparator)
3. ห้องบ่มที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นได้
4. ชุดอุปกรณ์ทดสอบหาหน่วยน้ำหนัก
5. ชุดอุปกรณ์ทดสอบหาค่าการยุบตัว
6. แบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 สูง 20 ซม.
7. แบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 สูง 30 ซม.
8. แบบหล่อขนาด 7.5 x 7.5 x 28.5 ซม.
9. แบบหล่อลูกบาศก์ขนาด 10 และ 15 ซม.

4.1.3 สถานที่ใช้ในการทดสอบ

4.1.3.1 ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต)

4.1.3.2 โรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จของทางบริษัท เอเซียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัด

4.1.3.3 โรงฝึกงาน 1 โปรแกรมเทคโนโลยีก่อสร้าง มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

4.1.4 รายละเอียดวิธีการทดสอบ

4.1.4.1 การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ

การทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของ Green Sand and Molding Waste (GSW) และ Shell Sand Waste (SSW) เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทดสอบโดยบริษัท เอเซียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัด มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1

คุณสมบัติผงฝุ่นทรายได้แบบที่ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

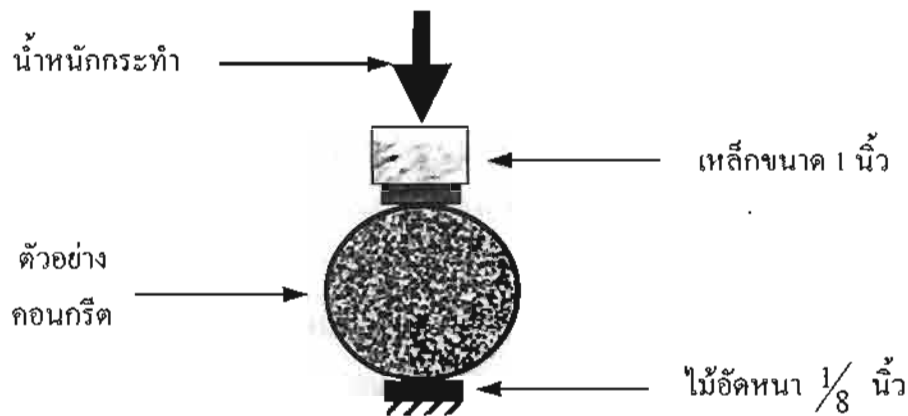
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	คุณสมบัติทางกายภาพ
1. ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	1. ความถ่วงจำเพาะ
2. อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	2. Bulk Density (กก./ล.)
3. ไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3)	3. ความละเอียด (ชม. ² /ก.)
4. แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	4. ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)
5. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	5. ดัชนีกำลัง (Strength Index, (SI))
6. โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	6. การกระจายขนาดคละ
7. โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	7. การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) (ร้อยละ)
8. ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	8. ความต้องการน้ำ (ร้อยละ)

การทดสอบลักษณะของอนุภาคด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) ความเป็นผลึกของ GSW กับ SSW ด้วยวิธี X-Ray Diffraction และการกระจายขนาดผลึกของอนุภาค (Particle Size Distribution) ทดสอบโดยศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.4.2 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต

คุณสมบัติของคอนกรีตปกติและคอนกรีตที่ผสม Shell Sand Waste (SSW) หรือ Green Sand Waste (GSW) โดยมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM) ดังต่อไปนี้

1. หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสดตามมาตรฐาน ASTM C 138 (Standard Method of Test for Weight per Cubic Foot, Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete)
2. ค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 143 (Standard Method for Slump of Portland Cement Concrete)
3. ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 403 (Standard Test Method of Time of Setting of Concrete Mixture by Penetration Resistance)
4. โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C 469 (Standard Method of Test for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression)
5. กำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 สูง 20 ซม. โดยทำการหล่อ 3 ตัวอย่างต่อหนึ่งสัดส่วนผสม หลังจากถอดแบบที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำไปทำการบ่มในน้ำจนถึงเวลาทดสอบที่ 3, 7, 28, 60, 90 และ 120 วัน ตามลำดับ ขั้นตอนการทดสอบกำลังอัดและแรงดึงใช้วิธีทดสอบแบบผ่าซีก (Splitting Tensile Test) ตามมาตรฐาน ASTM C 39 (Standard Method Test for Compressive Strength of Cylinder Concrete Specimens) และ ASTM C 496 (Standard Method Test for Splitting Tensile Test of Cylinder Concrete Specimens) ตามลำดับ โดยที่ลักษณะของการติดตั้งเครื่องมือทดสอบแสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 การติดตั้งเครื่องทดสอบแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 496

6. การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) โดยทำการผสมคอนกรีตแล้วจึงนำมาเทลงแบบหล่อขนาด 75 x 75 x 285 มม. ถอดแบบออกหลังจากผสม 1 วัน จากนั้นนำไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน ระหว่างนั้นให้นำมาทำการวัดด้วยเครื่อง Digital Length Comparator ทุกๆ 3 วัน เมื่อครบกำหนด 28 วันให้นำขึ้นจากน้ำมาทำการบ่มในตู้บ่มที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 60 ± 5 ทำการวัดเช่นเดียวกับขณะที่ทำการบ่มในน้ำ โดยความยาวเริ่มต้น L_0 และความยาวของแท่งตัวอย่าง ณ วันที่ทำการวัดคือไปเป็น L_t แล้วจึงนำค่าดังกล่าวมาคำนวณหาความยาวที่เปลี่ยนไปคือความยาวเดิม ดังสมการที่ (4.1) ทำการวัดไปจนกระทั่งความยาวที่เปลี่ยนไปมีแนวโน้มค่าคงที่

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

7. ความทนทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลฟูริกและอะซิดิก โดยทำการผสมคอนกรีตแล้วจึงนำมาเทลงแบบหล่อลูกบาศก์ขนาด 10 x 10 x 10 ซม. ถอดแบบหล่อเมื่อคอนกรีตมีอายุ 1 วัน จึงนำไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นจึงนำคอนกรีตมาทำการผึ่งจนมีน้ำหนักคงที่แล้วจึงนำมาชั่งน้ำหนักเริ่มต้น จากนั้นนำไปทำการแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริกและอะซิดิกที่มีความเข้มข้น 1 นอร์มอลิตี (N) โดยทำการควบคุมอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของสารละลายกรดเท่ากับ 1 ต่อ 3 เพื่อให้กรดสามารถกระทำต่อทุกผิวหน้าของคอนกรีตอย่างเพียงพอ เมื่อแช่ครบอายุที่ 7, 28, 60, 90 และ 120 วัน ตามลำดับ จึงนำมาทำการขัดผิวตัวอย่างคอนกรีตและผึ่งให้แห้งจนมีน้ำหนัก

คงที่ แล้วจึงนำมาชั่งน้ำหนักที่เหลืออยู่ นำผลการทดสอบมาคำนวณหาร้อยละของการสูญเสีย น้ำหนักจากน้ำหนักที่ลดลงเปรียบเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น

8. ความทนทานต่อซัลเฟตในรูปของการขยายตัวเชิงเส้นของตัวอย่างคอนกรีต ซึ่งอ้างอิงมาจากมาตรฐาน ASTM C 1012 เป็นแนวทางเบื้องต้น โดยเริ่มจากการหล่อแท่งตัวอย่างคอนกรีตขนาด $75 \times 75 \times 285$ มม. และทำการออกแบบที่อายุ $23\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมงหลังการผสมจึงวัดความยาวเริ่มต้นของตัวอย่าง จากนั้นจึงนำตัวอย่างไปทำการบ่มในน้ำปูนใสเป็นเวลา 28 วัน แล้วจึงนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่มีความเข้มข้นรวมเท่ากับ 50 ก./ล. ทำการวัดความยาวโดยใช้เครื่อง Digital Length Comparator วัดเป็นประจำทุกสัปดาห์และนำค่าที่ได้มาคำนวณหาหน่วยการยืดหดจากความยาวที่เปลี่ยนไปเทียบกับความยาวเริ่มต้น

4.1.4.3 สัดส่วนที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต

สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วย SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และอัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ทำการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วย GSW แสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

จากสัดส่วนผสมของคอนกรีตผสมเสร็จที่มีส่วนประกอบของ SSW และ GSW ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3 และจากขอบเขตของศึกษาที่กำหนดค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จเท่ากับ 5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. ตามลำดับ ทำให้ปริมาณน้ำที่ใช้ดังที่แสดงในตารางเพื่อทำให้คอนกรีตผสมเสร็จมีค่าการยุบตัวดังกล่าวมีปริมาณแตกต่างกัน โดยกำหนดให้ต้องมีการทดสอบจากหน้างานจริง ในขณะที่ตัวเลขดังที่แสดงในตารางได้มาจากการทดสอบแล้ว เบื้องต้นว่าคอนกรีตผสมเสร็จมีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 10 ± 2.5 ซม.

4.1.4.4 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

จำนวนตัวอย่างของคอนกรีตแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.2

สัดส่วนผสมของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ด้วย Shell Sand Waste (SSW) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ปริมาณปูนซีเมนต์ (กก./ม. ³)	สัญลักษณ์	$\frac{SSW}{C + SSW} (\%)$	ปูนซีเมนต์ (กก./ม. ³)	SSW (กก./ม. ³)	ทราย (กก./ม. ³)	หิน (กก./ม. ³)
300	300(10)SSW0	0	300	0	840	1195
300	300(10)SSW10	10	270	30	840	1195
300	300(10)SSW20	20	240	60	840	1195
300	300(10)SSW30	30	210	90	840	1195
300	300(10)SSW40	40	180	120	840	1195
350	350(10)SSW0	0	350	0	810	1165
350	350(10)SSW10	10	315	35	810	1165
350	350(10)SSW20	20	280	70	810	1165
350	350(10)SSW30	30	245	105	810	1165
350	350(10)SSW40	40	210	140	810	1165
400	400(10)SSW0	0	400	0	740	1160
400	400(10)SSW10	10	360	40	740	1160
400	400(10)SSW20	20	320	80	740	1160
400	400(10)SSW30	30	280	120	740	1160
400	400(10)SSW40	40	240	160	740	1160

หมายเหตุ : SSW คือ ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste, $\frac{SSW}{C + SSW}$ คืออัตราส่วน SSW โดยน้ำหนักของวัสดุผง (ปูนซีเมนต์ + SSW)

ตารางที่ 4.3
สัดส่วนผสมของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ด้วย Green Sand Waste (GSW) ในทรายแม่น้ำ

ปริมาณปูนซีเมนต์ (กก./ม. ³)	สัญลักษณ์	$\frac{GSW}{S + GSW} (\%)$	ปูนซีเมนต์ (กก./ม. ³)	ทราย (กก./ม. ³)	GSW (กก./ม. ³)	หิน (กก./ม. ³)
300	300(10)GSW0	0	300	840	0	1195
300	300(10)GSW5	5	300	798	42	1195
300	300(10)GSW10	10	300	756	84	1195
300	300(10)GSW15	15	300	714	126	1195
350	350(10)GSW0	0	350	810	0	1165
350	350(10)GSW5	5	350	770	41	1165
350	350(10)GSW10	10	350	729	81	1165
350	350(10)GSW15	15	350	689	122	1165
400	400(10)GSW0	0	400	740	0	1160
400	400(10)GSW5	5	400	703	37	1160
400	400(10)GSW10	10	400	666	74	1160
400	400(10)GSW15	15	400	629	111	1160

หมายเหตุ : GSW คือ ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม Green Sand Waste, $\frac{GSW}{S + GSW}$ คือ อัตราส่วนของ GSW ในมวลรวมละเอียด (ทรายแม่น้ำ, S) และ GSW

โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.4

จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จผสม Shell Sand Waste (SSW)

สำหรับคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³

รายละเอียดการแทนที่ SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	สัญลักษณ์	รายการทดสอบ	จำนวนตัวอย่างทดสอบ			รวม
			ค่าการยุบตัว (Slump) ซม.			
			5 ± 0.5	10 ± 0.5	15 ± 0.5	
0	SSW0	ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต	1	1	1	3
		ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัว	1	1	1	3
		กำลังอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน	21	21	21	63
		กำลังดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน ตามลำดับ	21	21	21	63
		โมดูลัสยืดหยุ่นที่ 28 วัน	3	3	3	9
		การหดตัวแบบแห้ง	3	3	3	9
		การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลเฟต	3	3	3	9
	4	ความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟริกและอะซิดิก	6	6	6	6

หมายเหตุ SSW0; SSW คือ ผงปูนทรายใช้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste

0 คือ ร้อยละการแทนที่โดยน้ำหนักของ Shell Sand Waste (SSW) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จผสม Shell Sand Waste (SSW)
สำหรับคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³

ร้อยละการแทนที่ SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	สัญลักษณ์	รายการทดสอบ	จำนวนตัวอย่างทดสอบ			รวม
			ค่าการยุบตัว (Slump) ซม.			
			5 ± 0.5	10 ± 0.5	15 ± 0.5	
10	SSW10	ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต	1	1	1	3
		ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัว	1	1	1	3
		กำลังอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน	21	21	21	63
		กำลังดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน ตามลำดับ	21	21	21	63
		โมดูลัสยืดหยุ่นที่ 28 วัน	3	3	3	9
		การหดตัวแบบแห้ง	3	3	3	9
		การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลเฟต	3	3	3	9
		ความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟริกและอะซิดิก	6	6	6	6

หมายเหตุ SSW0; SSW___ คือผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste

10___ คือ ร้อยละการแทนที่โดยน้ำหนักของ Shell Sand Waste (SSW) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จผสม Shell Sand Waste (SSW)

สำหรับคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³

ร้อยละการแทนที่ SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	สัญลักษณ์	รายการทดสอบ	จำนวนตัวอย่างทดสอบ			รวม
			ค่าการยุบตัว (Slump) ซม.			
			5 ± 0.5	10 ± 0.5	15 ± 0.5	
20	SSW20	ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต	1	1	1	3
		ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัว	1	1	1	3
		กำลังอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน	21	21	21	63
		กำลังดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน ตามลำดับ	21	21	21	63
		โมดูลัสยืดหยุ่นที่ 28 วัน	3	3	3	9
		การหดตัวแบบแห้ง	3	3	3	9
		การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลิเฟต	3	3	3	9
		ความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟริกและอะซิติก	6	6	6	6

หมายเหตุ SSW0; SSW___ คือ ผงปูนทรายใช้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste

20___ คือ ร้อยละการแทนที่โดยน้ำหนักของ Shell Sand Waste (SSW) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จผสม Shell Sand Waste (SSW)

สำหรับคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³

รายละเอียดการแทนที่ SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	สัญลักษณ์	รายการทดสอบ	จำนวนตัวอย่างทดสอบ			รวม
			ค่าการยุบตัว (Slump) ซม.			
			5 ± 0.5	10 ± 0.5	15 ± 0.5	
30	SSW30	ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต	1	1	1	3
		ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัว	1	1	1	3
		กำลังอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน	21	21	21	63
		กำลังดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน ตามลำดับ	21	21	21	63
		โมดูลัสยืดหยุ่นที่ 28 วัน	3	3	3	9
		การหดตัวแบบแห้ง	3	3	3	9
4		การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลิเฟต	3	3	3	9
		ความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริก และอะซิดิก	6	6	6	6

หมายเหตุ SSW0; SSW___ คือ ผงปูนทรายใช้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste

30___ คือ ร้อยละการแทนที่โดยน้ำหนักของ Shell Sand Waste (SSW) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จผสม Shell Sand Waste (SSW)
สำหรับคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³

รายละเอียดการแทนที่ SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	สัญลักษณ์	รายการทดสอบ	จำนวนตัวอย่างทดสอบ				รวม
			ค่าการยุบตัว (Slump) ซม.				
			5 ± 0.5	10 ± 0.5	15 ± 0.5		
40	SSW40	ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต	1	1	1	3	
		ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัว	1	1	1	3	
		กำลังอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน	21	21	21	63	
		กำลังดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน ตามลำดับ	21	21	21	63	
		โมดูลัสยืดหยุ่นที่ 28 วัน	3	3	3	9	
		การหดตัวแบบแห้ง	3	3	3	9	
		การขยายตัวในสารละลาย โซเดียมซิลิเฟต	3	3	3	9	
		ความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากการกรดซัลฟูริก และอะซิดิก	6	6	6	6	
		รวม	295	295	295	885	
		รวมคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม. ³	885	885	885	2,655	

หมายเหตุ SSW0, SSW ____ คือ ผงปูนทรายใช้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste

40 ____ คือ ร้อยละการแทนที่โดยน้ำหนักของ Shell Sand Waste (SSW) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จผสม Green Sand and Molding Waste (GSW)

สำหรับคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³

ร้อยละการแทนที่ GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	สัญลักษณ์	รายการทดสอบ	จำนวนตัวอย่างทดสอบ			รวม
			ค่าการยุบตัว (Slump) ซม.			
			5 ± 0.5	10 ± 0.5	15 ± 0.5	
5	GSW5	ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต	1	1	1	3
		ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัว	1	1	1	3
		กำลังอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน	21	21	21	63
		กำลังดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน ตามลำดับ	21	21	21	63
		โมดูลัสยืดหยุ่นที่ 28 วัน	3	3	3	9
		การหดตัวแบบแห้ง	3	3	3	9
		การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลิเฟต	3	3	3	9
		ความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟริกและอะซิติก	6	6	6	6

หมายเหตุ GSW0; GSW___ คือ ผงปูนทรายใส่แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW)

5___ คือ ร้อยละการแทนที่โดยน้ำหนักของ Green Sand and Molding Waste (GSW) ในทรายแม่น้ำ

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จผสม Green Sand and Molding Waste (GSW)

สำหรับคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³

รายละเอียดการแทนที่ GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	สัญลักษณ์	รายการทดสอบ	จำนวนตัวอย่างทดสอบ			รวม
			ค่าการยุบตัว (Slump) ซม.			
			5 ± 0.5	10 ± 0.5	15 ± 0.5	
10	GSW10	ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต	1	1	1	3
		ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัว	1	1	1	3
		กำลังอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน	21	21	21	63
		กำลังดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน ตามลำดับ	21	21	21	63
		โมดูลัสยืดหยุ่นที่ 28 วัน	3	3	3	9
		การหดตัวแบบแห้ง	3	3	3	9
		การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต	3	3	3	9
		ความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกและอะซิติก	6	6	6	6

หมายเหตุ GSW0; GSW___ คือ ผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW)

10___ คือ ร้อยละการแทนที่โดยน้ำหนักของ Green Sand and Molding Waste (GSW) ในทรายแม่น้ำ

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จผสม Green Sand and Molding Waste (GSW)
สำหรับคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³

รายละเอียดการแทนที่ GSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	สัญลักษณ์	รายการทดสอบ	จำนวนตัวอย่างทดสอบ			รวม	
			ค่าการยุบตัว (Slump) ซม.				
			5 ± 0.5	10 ± 0.5	15 ± 0.5		
15	GSW15	ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต	1	1	1	3	
		ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัว	1	1	1	3	
		กำลังอัดที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน	21	21	21	63	
		กำลังดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน ตามลำดับ	21	21	21	63	
		โมดูลัสยืดหยุ่นที่ 28 วัน	3	3	3	9	
		การหดตัวแบบแห้ง	3	3	3	9	
		การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต	3	3	3	9	
		ความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟริกและอะซิดิก	6	6	6	6	
		รวม			177	177	531
		รวมคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม. ³			531	531	1,593

หมายเหตุ GSW0; GSW___ คือ ผงปูนทรายใส่แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW)

15___ คือ ร้อยละการแทนที่โดยน้ำหนักของ Green Sand and Molding Waste (GSW) ในทรายแม่น้ำ

4.1.4.5 รายละเอียดการผสมคอนกรีตผสมเสร็จ (Ready-mixed Concrete) ผสมผงปูนทรายได้แบบ

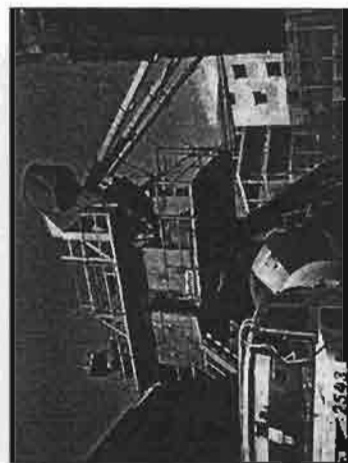
กระบวนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงปูนทรายได้แบบแสดงในภาพที่ 4.2 โดยทำการผสมคอนกรีตที่โรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จของบริษัท เอเซียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัด (ภาพ ก)) โดยมีกระบวนการเริ่มจากการชั่งผงปูนทรายได้แบบซึ่งมีทั้งกลุ่ม SSW (แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1) หรือ GSW (แทนที่ในทรายแม่น้ำ) ตามสัดส่วนของคอนกรีตที่ได้ออกแบบไว้ (ภาพ ข)) จากนั้นจึงนำผงปูนทรายได้แบบขึ้นไปยังเครื่องผสมคอนกรีต (ภาพ ค)) และเริ่มทำการผสมด้วยระบบอัดโนมิตีซึ่งควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ในการชั่งส่วนผสมและเวลาในการผสม โดยใช้เวลาในการผสมเท่ากับคอนกรีตปกติคือ ใช้เวลาประมาณ 5 นาที ค่อยๆเริ่มปล่อยคอนกรีตผสมเสร็จจากเครื่องผสมลงบนรถขนย้ายคอนกรีต จากนั้นรถขนย้ายคอนกรีตจะวิ่งไปยังส่วนปฏิบัติการทดสอบคุณภาพของคอนกรีตซึ่งอยู่ภายในบริเวณโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จแล้วจึงเทตัวอย่างคอนกรีตสดปริมาณที่เพียงพอต่อการทำการทดสอบหาค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) ลงรถเข็น (ภาพ ง)) ซึ่งกำหนดไว้เท่ากับ 5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. ตามลำดับ (ภาพ จ)) สำหรับกรณีที่ค่าการยุบตัวของคอนกรีตไม่ได้ตามที่กำหนดจึงส่งคนขึ้นไปเติมน้ำเพิ่มเติม (ภาพ ฉ)) เพื่อปรับค่าการยุบตัวของคอนกรีตและทำการเดินเครื่อง โม่หมุนเป็นเวลา 5 นาทีเสร็จแล้วจึงทำการตรวจสอบหาค่าการยุบตัวอีกครั้ง (ภาพ ช)) หากค่าการยุบตัวไม่ได้ตามที่กำหนดจะดำเนินการเพิ่มปริมาณน้ำและทำตามกระบวนการเดิมจนกว่าจะได้ค่าการยุบตัวตามที่กำหนด เมื่อค่าการยุบตัวมีค่าตามกำหนดแล้วจึงนำคอนกรีตที่ได้มาทำการทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักสด (Unit Weight) (ภาพ ซ)) และเทลงแบบหล่อที่จัดเตรียมไว้ (ภาพ ฌ)) เมื่อคอนกรีตมีอายุ 1 วันนับจากการผสมจึงทำการถอดแบบ (ภาพ ญ)) และนำไปทำการบ่มในน้ำจนกระทั่งถึงอายุที่ทำการทดสอบ (ภาพ ฎ))



(ก) โรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ



(ข) การซ่อมแซมผู้ทรงรายใต้แบบ



(ค) เครื่องผสมคอนกรีตผสมเสร็จ



(ง) การเติมน้ำเพื่อปรับค่าการยุบตัว
ตามที่กำหนดไว้



(จ) การทดสอบค่าการยุบตัว



(ฉ) การเทคอนกรีตออกจากกรวดผสม

ภาพที่ 4.2 กระบวนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงผู้ทรงรายใต้แบบ



(ฉ) การเติมน้ำเพื่อปรับค่าการยิบตัว
ตามที่กำหนดไว้



(ซ) การวัดค่าการยิบตัว



(ข) การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนัก



(ญ) การบ่มคอนกรีตในน้ำ



(ณ) คอนกรีตที่ถอดแบบเรียบร้อยแล้ว



(ด) การใส่คอนกรีตลงในแบบหล่อ

ภาพที่ 4.2 (ต่อ) กระบวนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงปูนทรายได้แบบ

บทที่ 5

ผลการทดสอบและวิจารณ์ผลกระทบจากการใช้ผงฝุ่นทรายไส้แบบ กลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) ผสมคอนกรีต

5.1 คุณสมบัติพื้นฐานของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW)

ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย องค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) พื้นที่ผิวจำเพาะในรูปของความละเอียดด้วยวิธีเบลน (Blaine Fineness) ปริมาณความชื้น (Moisture Content) การกระจายขนาดผลของอนุภาค (Particle Size Distribution) การวิเคราะห์ระดับจุลภาค (Microscopic Analysis) ได้แก่ ภาพขยายลักษณะของอนุภาคด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) และความเป็นผลึกด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction และคุณสมบัติทางคานซีเมนต์ ได้แก่ ความต้องการน้ำ (Water Requirement) และค่าดัชนีกำลัง (Strength Index, SI) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ

ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของผงฝุ่นทรายไส้แบบที่ได้จากการสุมเก็บตัวอย่างเมื่อเริ่มต้นทำการทดสอบ (ครั้งที่ 1: มกราคม พ.ศ. 2546) เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แสดงได้ในตารางที่ 5.1 พบว่าผงฝุ่นทรายไส้แบบมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เนื่องจากวัตถุดิบในการผลิตเป็นทรายซึ่งมีสารประกอบดังกล่าวถึงร้อยละ 83.35 ในขณะที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) น้อยมาก โดยมีค่าร้อยละ 1.73 เมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมีค่าร้อยละ 66.28 นอกจากนั้นสำหรับองค์ประกอบทางเคมีอื่นในผงฝุ่นทรายไส้แบบมีปริมาณใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

สำหรับการเก็บตัวอย่างตลอดช่วงระยะเวลาที่ทำการศึกษา (ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2546 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ. 2546) โดยกระทำทุกๆ 2 เดือน เป็นระยะเวลา 12 เดือน เพื่อนำมาตรวจสอบค่าความแปรปรวนขององค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติพื้นฐานในการนำมาใช้งาน

ทางด้านซีเมนต์ของผงฝุ่นทรายได้แบบในรูปของค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ดังแสดงในตารางที่ 5.2 สรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบทางเคมีของผงฝุ่นทรายได้แบบทั้งกลุ่ม SSW ไม่ต่างไปจากคุณสมบัติของผงฝุ่นทรายได้แบบที่ได้จากการเก็บตัวอย่างเมื่อเริ่มต้นการศึกษาและนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ อาทิเช่น ปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 88.00 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับร้อยละ 2.46 ในขณะที่ผงฝุ่นทรายได้แบบที่ใช้ผสมคอนกรีต (เก็บตัวอย่างครั้งที่ 1) มีค่าร้อยละ 83.35 เป็นต้น

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญซึ่งได้แก่ ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) ของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 0.92 ซึ่งใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ร้อยละ 0.96) ในขณะที่ค่า LOI ของผงฝุ่นทรายได้แบบชนิด SSW มีที่มาจากกระบวนการผลิตแบบหล่อภายในทรายที่ใช้ได้แบบจะได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส ทำให้ส่วนผสมบางอย่างที่เพิ่มเติมเข้าไปเพื่อปรับปรุงคุณภาพของได้แบบหล่อยังคงตกค้างอยู่ เมื่อนำมาเผาที่อุณหภูมิ 950 ± 50 องศาเซลเซียส ส่วนผสมที่ตกค้างอยู่ภายในจึงสลายตัวไปกับความร้อน

ในกรณีของพื้นที่ผิวจำเพาะในรูปของค่าความละเอียดด้วยวิธีเบลน (Blaine Fineness) ของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW มีค่าสูงกว่าความละเอียดของปูนซีเมนต์ (3,248 ซม.²/ก.) โดยมีค่าเท่ากับ 3,957 ซม.²/ก. ถึงแม้มีค่าความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ แต่เนื่องจากวัตถุดิบซึ่งเป็นทรายธรรมชาติหรือทรายแม่น้ำมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าปูนซีเมนต์จึงไม่ได้ทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะของเศษทรายได้แบบเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมาก

จากหลักเกณฑ์การประเมินศักยภาพของผงฝุ่นทรายได้แบบที่จะนำมาใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน โดยมีเกณฑ์การประเมินจากค่าดัชนีกำลัง (Strength Index) ของมอร์ตาร์ที่อายุ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ พบว่าค่ากำลังอัดผสมผงฝุ่นทรายได้แบบ 1 โดยจากมาตรฐานได้กำหนดอัตราส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบในปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 20 และเปรียบเทียบกับค่ากำลังของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้ผลคือ มอร์ตาร์ผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW มีค่าดัชนีกำลังร้อยละ 78.3 ที่อายุ 7 วัน ในขณะที่อายุ 28 วัน ผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW มีค่าดัชนีกำลังร้อยละ 81.7 และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 ในการจำแนกประเภทของสารปอซโซลาน ดังแสดงในตารางที่ 5.4 พบว่าผงฝุ่นทรายได้แบบมีความสามารถที่นำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้บางส่วน

สำหรับค่าความต้องการน้ำ (Water Requirement) เมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนมีค่าคงที่ตลอดช่วงที่ทำการทดสอบ โดยมีค่าร้อยละ 102 ซึ่งเป็นผลมาจากความละเอียดของผงฝุ่นทรายได้แบบที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5.1

องค์ประกอบเคมีของผงฝุ่นทรายใช้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	ครั้งที่ 1 (ม.ค. 2546 ถึง ก.พ. 2546)	ครั้งที่ 2 (มี.ค. 2546 ถึง เม.ย. 2546)	ครั้งที่ 3 (พ.ค. 2546 ถึง มิ.ย. 2546)	ครั้งที่ 4 (ก.ค. 2546 ถึง ส.ค. 2546)	ครั้งที่ 5 (ก.ย. 2546 ถึง ต.ค. 2546)	ครั้งที่ 6 (พ.ย. 2546 ถึง ธ.ค. 2546)
1. ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	20.84	83.35	88.78	89.65	90.07	87.35	88.77
2. อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	5.22	6.80	4.29	4.68	4.81	4.95	5.04
3. ไอรอนออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	3.20	3.32	2.00	2.86	2.46	2.95	2.90
4. แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	66.28	1.73	2.70	1.32	1.09	1.32	1.31
5. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.24	1.02	0.75	0.70	0.66	0.94	0.95
6. โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	0.22	0.84	0.55	0.56	0.60	0.56	0.56
7. โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	0.10	0.93	0.84	0.85	0.89	0.96	1.00
8. ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	2.41	0.05	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
9. แคลเซียมออกไซด์อิสระ (Free Lime)	0.57	0.39	0.34	0.32	0.33	0.37	0.35
10. ร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก จากการเผาไหม้ (LOI)	0.96	0.87	1.09	1.03	1.25	0.65	0.64

หมายเหตุ ในการเก็บตัวอย่างผงฝุ่นทรายใช้แบบกระทำทุกๆ 2 เดือน เป็นระยะเวลา 1 ปี ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2546 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ. 2546

ตารางที่ 5.2

ค่าสถิติแสดงความผันแปรขององค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของผงฝุ่นทรายใส่แบบ

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ผงฝุ่นทรายใส่แบบกลุ่ม SSW	
	ค่าเฉลี่ย	SD
1. ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)	88.00	2.460
2. อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	5.10	0.876
3. ไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3)	2.75	0.457
4. แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	1.58	0.587
5. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.84	0.151
6. โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.61	0.113
7. โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.91	0.063
8. ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	0.03	0.012
9. แคลเซียมออกไซด์อิสระ (Free Lime)	0.35	0.026
10. ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาไหม้	0.92	0.246
คุณสมบัติทางกายภาพ		
1. ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	0.13	0.070
2. พื้นที่ผิวจำเพาะ (ความละเอียดด้วยวิธีเบลน ($\text{cm}^2/\text{g.}$))	3957	352
3. ความถ่วงจำเพาะ	2.31	0.012
4. คำนีกำลัง (SI)		
ที่อายุ 7 วัน (ร้อยละเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม)	78.33	0.577
ที่อายุ 28 วัน (ร้อยละเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม)	81.67	2.887
5. ปริมาณน้ำที่ต้องการ (ร้อยละเทียบกับควบคุม)	102.00	0.000
6. ร้อยละค้ำตะแกรงร่อน		
- ขนาด 38 ไมโครเมตร	57.43	2.850
- ขนาด 45 ไมโครเมตร	55.50	2.991
- ขนาด 90 ไมโครเมตร	38.60	7.337

ตารางที่ 5.3

คุณสมบัติทางกายภาพของผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

คุณสมบัติทางกายภาพ	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	ครั้งที่ 1 (ม.ค. 2546 ถึง ก.พ. 2546)	ครั้งที่ 2 (มี.ค. 2546 ถึง เม.ย. 2546)	ครั้งที่ 3 (พ.ค. 2546 ถึง มิ.ย. 2546)	ครั้งที่ 4 (ก.ค. 2546 ถึง ส.ค. 2546)	ครั้งที่ 5 (ก.ย. 2546 ถึง ต.ค. 2546)	ครั้งที่ 6 (พ.ย. 2546 ถึง ธ.ค. 2546)
1. ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	0.19	0.19	0.09	0.05	0.06	0.20	0.14
2. พื้นที่ผิวจำเพาะ (ความละเอียดด้วย วิธีเบลน (ชม. ² /ก.))	3248	3974	3867	4160	4208	3555	4109
3. ความถ่วงจำเพาะ	3.14	2.58	2.28	2.25	2.22	2.24	2.24
4. ดัชนีกำลัง (SI) (ร้อยละเทียบกับมอร์สาร์ควบคุม) ที่อายุ 7 วัน ที่อายุ 28 วัน	100 100	78 82	77 80	75 84	78 85	79 80	78 80
5. ปริมาณน้ำที่ต้องการ (ร้อยละเทียบกับควบคุม)	100	102	102	102	102	102	102
6. ร้อยละกำลังตะแกรง - 38 ไมโครเมตร - 45 ไมโครเมตร - 90 ไมโครเมตร	8.7 4.8 0.2	51.6 47.0 31.5	59.3 55.3 41.2	57.5 55.9 42.5	54.6 53.3 30.7	60.3 58.8 45.2	57.4 54.4 39.9

หมายเหตุ ในการเก็บตัวอย่างผงปูนทรายได้แบบกระทำทุกๆ 2 เดือน เป็นระยะเวลา 1 ปี ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2546 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ. 2546

ตารางที่ 5.4

องค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) ที่ได้จากการเก็บตัวอย่างในครั้งที่ 1 กับประเภทของสารปอชโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618

องค์ประกอบทางเคมี	วัสดุปอชโซลาน ⁽¹⁾			ผงปูนทรายได้แบบกลุ่ม
	N	F	C	
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , min., %	70.0	70.0	50.0	93.47
Sulfur Trioxide (SO ₃), max., %	4.0	5.0	5.0	0.05
Alkalis as Na ₂ O, Na ₂ O (%) + 0.658 K ₂ O (%), max., %	1.5	1.5	1.5	1.57
Loss on Ignition, max., %	10.0	6.0	6.0	0.87
คุณสมบัติทางกายภาพ	วัสดุปอชโซลาน ⁽¹⁾			SSW
	N	F	C	
Amount retained when wet sieved No. 325, max., %	34	34	34	3.16
Water Requirement, max., %	115	105	105	102
Strength Activity Index				
At 7 days, min., %	75	75	75	78
At 28 days, min., %	75	75	75	82
Moisture Content, max., %	3.0	3.0	3.0	0.19

หมายเหตุ ⁽¹⁾ จากมาตรฐาน ASTM C 618 ได้จัดประเภทของสารปอซโซลานไว้ 3 ประเภท คือ
 ประเภท N คือ วัสดุดิบหรือสารปอซโซลานธรรมชาติทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการเผา
 จนเป็นผง โดยมีส่วนประกอบของแคลเซียมและมีคุณสมบัติเป็นไปตามตารางที่ 5.4 ได้แก่ เชิร์ต
 (Cherts) ทัฟฟ์ (Tuffs) เป็นต้น

ประเภท F คือ เถ้าลอยปกติ (Fly Ash) ซึ่งได้จากการเผาถ่านหินจำพวกแอนทราไซต์
 (Anthracite) หรือบิทูมินัส (Bituminous) และมีคุณสมบัติเป็นไปตามตารางที่ 5.4

ประเภท C คือ เถ้าลอยปกติ (Fly Ash) ซึ่งได้จากการเผาถ่านหินจำพวกลิกไนต์
 (Lignite) หรือซับบิทูมินัส (Sub-bituminous) และมีคุณสมบัติเป็นไปตามตารางที่ 5.4

5.1.2 ลักษณะของอนุภาค

5.1.2.1 ทรายจากประเทศออสเตรเลีย (Australia Sand)

จากลักษณะอนุภาคของทรายที่ใช้ทำแบบหล่อทั้งแบบหล่อภายในและภายนอกซึ่งเป็น
 ทรายที่นำเข้ามาจากประเทศออสเตรเลียด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) และ Back
 Scattered Image (BEI) ดังแสดงในภาพที่ 5.1(ก) และ 5.2(ข) ตามลำดับ พบว่าที่กำลังขยาย 150 เท่า
 (ภาพที่ 5.1(ก)) ทรายมีลักษณะเป็นก้อน มีเหลี่ยมมุม และในภาพที่ 5.1(ข) (กำลังขยาย 150 เท่า)
 พื้นผิวของอนุภาคทรายมีลักษณะค่อนข้างเรียบ และจากภาพถ่าย BEI ในภาพที่ 5.1(ข) และ 5.2(ข)
 ซึ่งเป็นเทคนิคที่ช่วยแยกความแตกต่างของธาตุที่อยู่ภายในวัสดุ โดยอาศัยหลักการสะท้อนของ
 อิเล็กตรอนที่ตกกระทบธาตุที่เป็นองค์ประกอบในวัสดุ ซึ่งจะเห็นว่าสีของก้อนตัวอย่างเป็น
 สีเดียวกันแสดงว่าเป็นธาตุชนิดเดียวกันซึ่งก็คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)



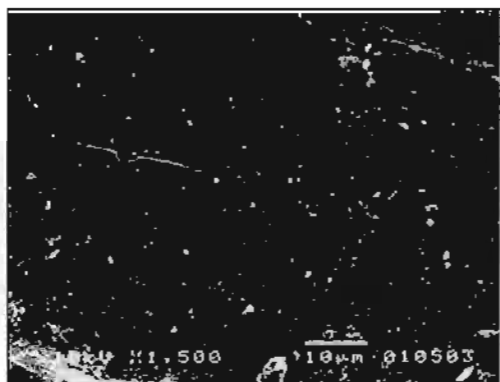
(ก) SEM ที่กำลังขยาย 150 เท่า



(ข) BEI ที่กำลังขยาย 150 เท่า

ภาพที่ 5.1 ลักษณะของอนุภาคทรายจากประเทศออสเตรเลีย จากเทคนิคการถ่ายภาพด้วย

(ก) SEM ที่กำลังขยาย 150 เท่า และ (ข) BEI ที่กำลังขยาย 150 เท่า



(ก) SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

(ข) BEI ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

ภาพที่ 5.2 ลักษณะของอนุภาครายจากประเทศออสเตรเลีย จากเทคนิคการถ่ายภาพ

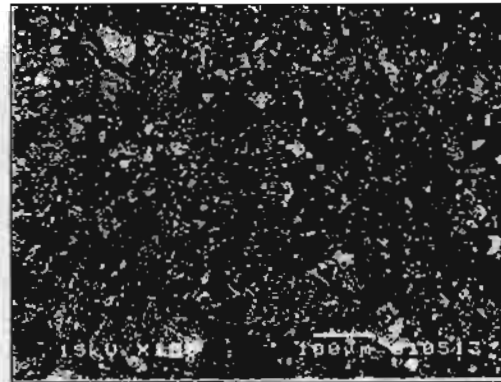
(ก) SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า และ (ข) BEI ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

5.1.2.2 ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW)

จากลักษณะอนุภาคของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) ด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 150 เท่า ในภาพที่ 5.3(ก) พบว่าอนุภาคของทรายดังกล่าวมีขนาดเล็กกว่าทรายจากประเทศออสเตรเลีย อันเนื่องมาจากในกระบวนการทำแบบหล่อและเทส่วนผสมจากเตาหลอม ทรายดังกล่าวจะได้รับความร้อนถึง 600 องศาเซลเซียส อันจะส่งผลให้พันธะภายในถูกทำลายทำให้อนุภาคแตกออกเป็นชิ้นเล็กและจากลักษณะพื้นผิวของอนุภาคที่กำลังขยาย 150 เท่า ในภาพที่ 5.3(ข) อนุภาคผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW มีความขรุขระเพิ่มขึ้นและเป็นเหลี่ยมมุมมากกว่าทรายวัตถุดิบซึ่งมีผลต่อความต้องการน้ำที่เพิ่มขึ้น เนื่องพื้นผิวที่ขรุขระเป็นเหลี่ยมมุมจะทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำดีกว่าอนุภาคที่มีพื้นผิวเรียบ และเมื่อใช้เทคนิค BEI พบว่าอนุภาคมีสีเข้มมากกว่าที่เป็นสีขาว ดังภาพที่ 5.4 ซึ่งโดยหลักการของเทคนิคนี้ พบว่าเมื่ออิเล็กตรอนพุ่งชนธาตุที่น้ำหนักอะตอมสูงในวัสดุจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนสะท้อนกลับได้เร็วและมีจำนวนที่เครื่องดักจับไว้มีจำนวนอิเล็กตรอนมากขึ้นจึงให้สีของอนุภาคออกมาเป็นสีขาว ในขณะที่ธาตุที่มีน้ำหนักอะตอมต่ำทำให้เกิดอิเล็กตรอนสะท้อนกลับไปยังเครื่องนับ (Counter) มีจำนวนน้อยจึงให้สีของภาพปรากฏเป็นสีเทา แสดงว่ามีองค์ประกอบของทรายเปลี่ยนแปลงไปจากทรายวัตถุดิบที่ใช้ เนื่องจากสารประกอบที่ใส่เพิ่มเติมเพื่อปรับปรุงคุณภาพของไส้แบบ



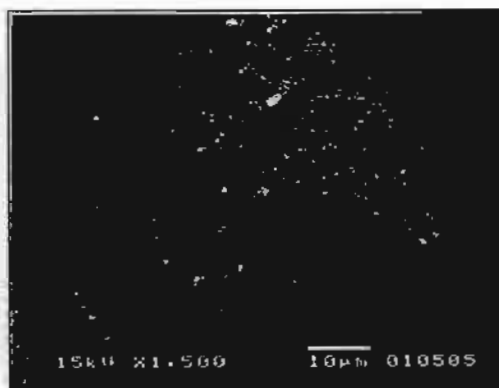
(ก) SEM ที่กำลังขยาย 150 เท่า



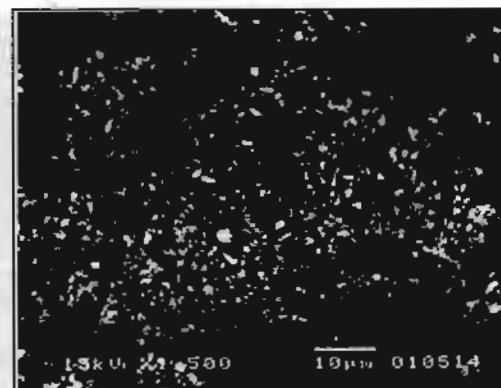
(ข) BEI ที่กำลังขยาย 150 เท่า

ภาพที่ 5.3 ลักษณะของอนุภาคผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW จากเทคนิคการถ่ายภาพด้วย

(ก) SEM ที่กำลังขยาย 150 เท่า และ (ข) BEI ที่กำลังขยาย 150 เท่า



(ก) SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า



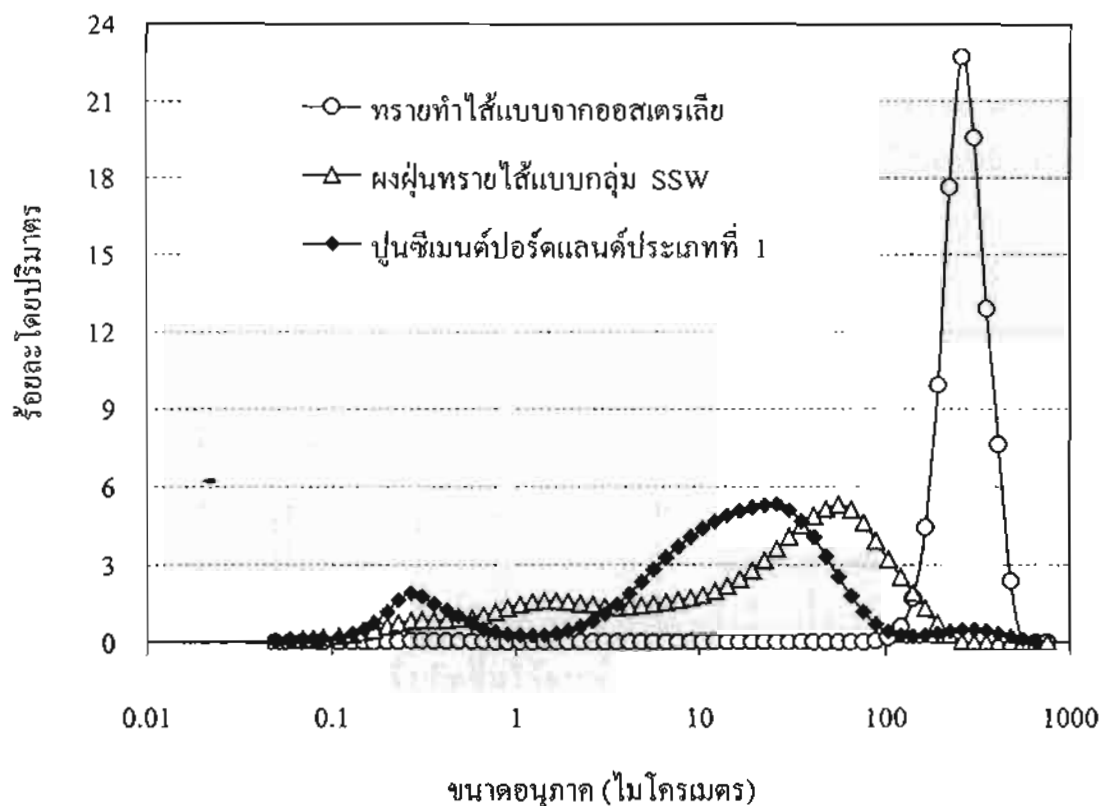
(ข) BEI ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

ภาพที่ 5.4 ลักษณะของอนุภาคผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW จากเทคนิคการถ่ายภาพด้วย

(ก) SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า และ (ข) BEI ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

5.1.3 การกระจายขนาดกละของอนุภาคผงฝุ่นทรายใต้แบบ

ผลการทดสอบการกระจายขนาดกละของอนุภาคของปูนซีเมนต์และผงฝุ่นทรายใต้แบบทั้งกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) แสดงในภาพที่ 5.5 ทรายวัดคุณภาพจากประเทศออสเตรเลีย มีอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในช่วงขนาด 100 ถึง 1000 ไมโครเมตร แต่เมื่อผ่านกระบวนการผลิตเกิดผลพลอยได้หลักเป็นผงฝุ่นทรายใต้แบบ พบว่าผงฝุ่นทรายใต้แบบมีอนุภาคกระจายตัวที่กว้างกว่าทรายที่เป็นวัตถุดิบ โดยผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม SSW มีอนุภาคในช่วงขนาด 0.05 ถึง 200 ไมโครเมตร ในขณะที่อนุภาคของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม GSW อยู่ในช่วงขนาด 0.05 ถึง 400 ไมโครเมตร



ภาพที่ 5.5 การกระจายขนาดผลของอนุภาคทรายทำไส้แบบหล่อ (จากออสเตรเลีย) และ
ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

เมื่อพิจารณาขนาดอนุภาค โดยเฉลี่ยเชิงปริมาตร (Volume Moment Mean) จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (5.1) พบว่าขนาดอนุภาคของทรายวัดดูดิบซึ่งนำเข้าจากประเทศออสเตรเลียและผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW มีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยเท่ากับ 283.69 และ 102.85 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (63.44 ไมโครเมตร)

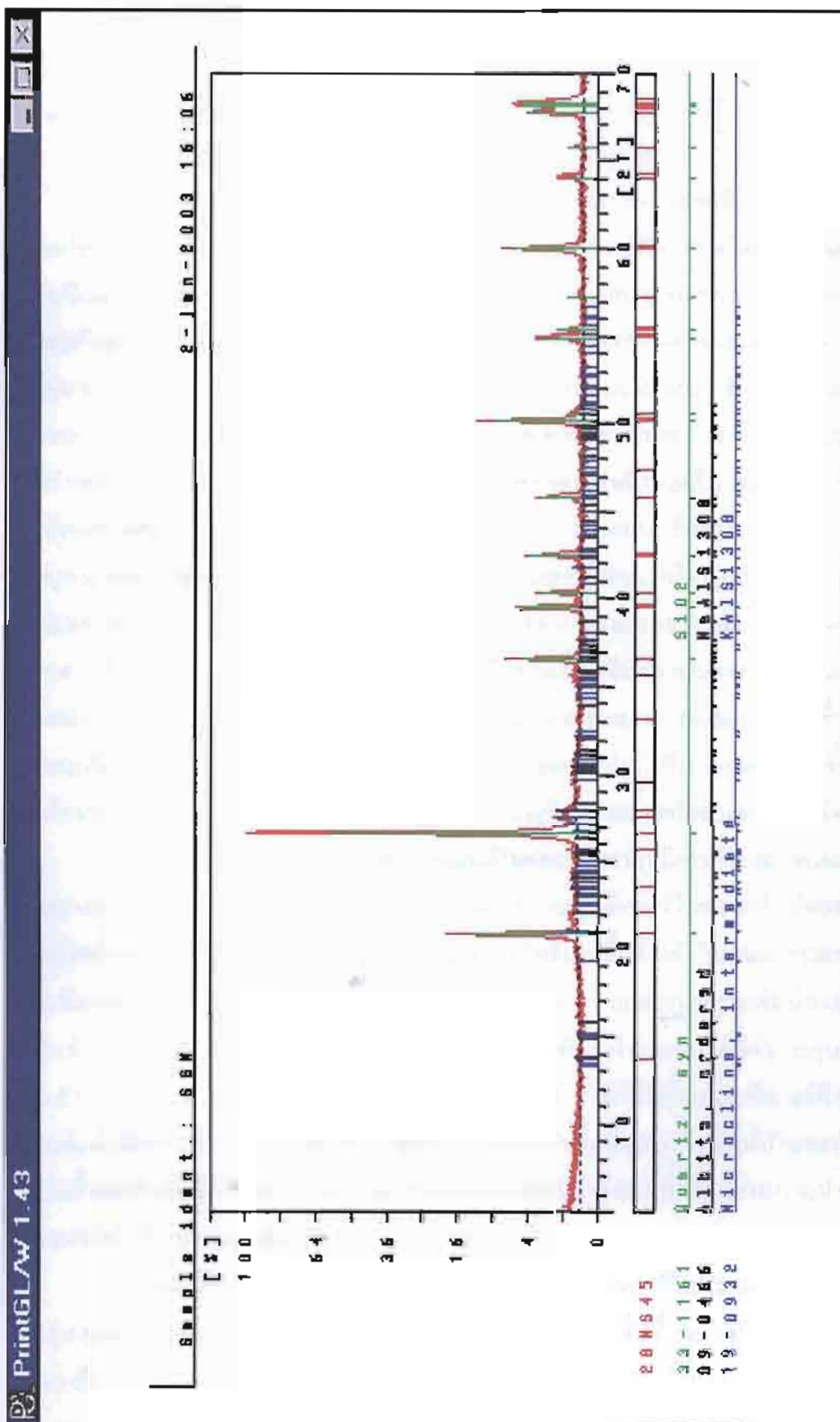
$$D[4,3] = \frac{\sum d^4}{\sum d^3} = \frac{d_1^4 + d_2^4 + d_3^4 + \dots + d_n^4}{d_1^3 + d_2^3 + d_3^3 + \dots + d_n^3} \quad (5.1)$$

เมื่อ $D[4,3]$ คือ ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยในเชิงปริมาตร (Volume Moment Mean)

$d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

5.1.4 ความเป็นผลึกของอนุภาค

จากการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของผงฝุ่นทรายใต้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction ดังแสดงในภาพที่ 5.6 พบว่าผงฝุ่นทรายใต้แบบมีโครงสร้างประกอบไปด้วยผลึกของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) (ปรากฏค่าของพีค (Peak) ซึ่งแสดงจำนวนของอิเล็กตรอน (Counts) แบบสัมพันธ์เทียบกับสารประกอบที่มีจำนวนอิเล็กตรอนที่นับได้มากที่สุดซึ่งในที่นี้คือ ซิลิกอน ไดออกไซด์) โดยปกติซิลิกอนไดออกไซด์เป็นธาตุที่มีเสถียรภาพสูงที่อุณหภูมิปกติ (25 องศาเซลเซียส) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าซิลิกอนไดออกไซด์มีค่าจำนวนนับของอิเล็กตรอนที่สะท้อนและถูกนับด้วยเครื่องนับ (Counter) มากเป็นโครงสร้างที่มีความเป็นผลึกมากเนื่องจาก การจัดเรียงที่มีความเป็นระเบียบทำให้อิเล็กตรอนจากเครื่องกำเนิดตกกระทบและสะท้อนออกอย่างค่อนเนื่อง และจากลักษณะดังกล่าวจึงส่งผลให้ความสามารถในการทำปฏิกิริยาลดลง เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นผลึกจะมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบซึ่งมีผลต่อการสลายพันธะซึ่งต้องใช้พลังงานมาก ดังนั้นปฏิกิริยาจึงเกิดขึ้นได้ยากขึ้น แต่กระนั้นสารประกอบอื่นของซิลิกอนไดออกไซด์ที่ปรากฏในผงฝุ่นทรายใต้แบบคือ Albite และ Microcline Intermediate ซึ่งน่าจะมีส่วนให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้มากกว่า ทั้งนี้เพราะสารประกอบดังกล่าวมีส่วนประกอบของโซเดียม (Sodium, Na) และโพแทสเซียม (Potassium, K) ซึ่งปกติมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาสูงมากซึ่งจะส่งผลต่อการพัฒนากำล้างของคอนกรีตในระยะยาว



ภาพที่ 5.6 ผลการตรวจวัดความเป็นผลึกด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction ของผงฝุ่นทรายใช้แบบกลุ่ม SSW

5.2 คุณสมบัติของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในสภาวะสด

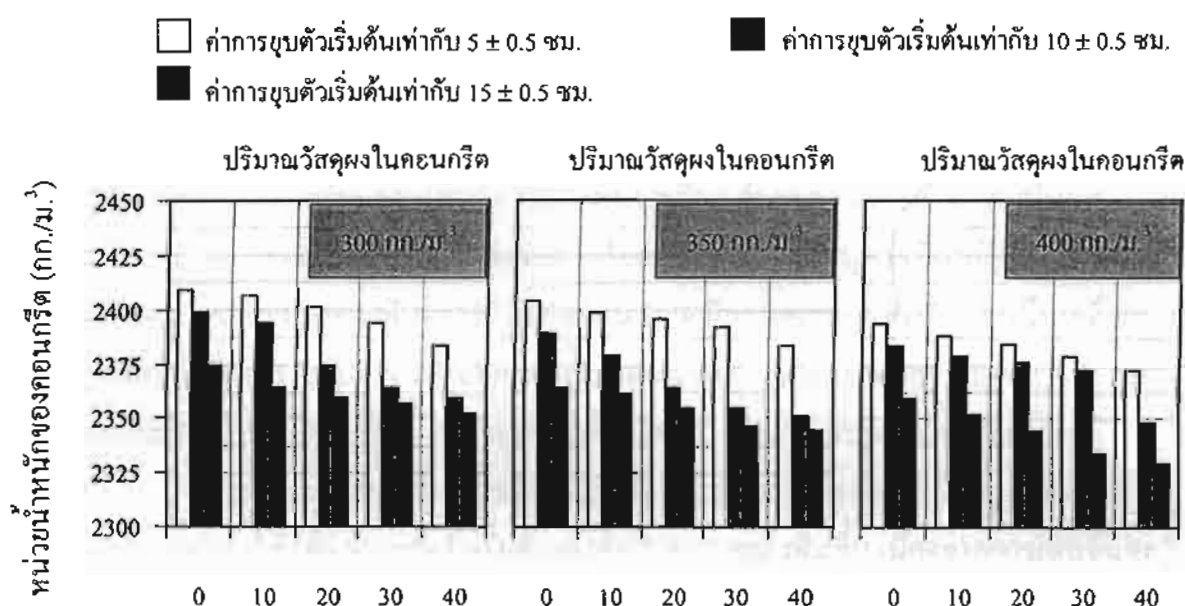
5.2.1 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสด (Unit Weight)

ผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสดแสดงในภาพที่ 5.7 พบว่าคอนกรีตที่ทุกปริมาณปูนซีเมนต์ (300, 350 และ 400 กก./ม.³) ซึ่งทำการแทนที่ผงทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 มีค่าหน่วยน้ำหนักลดลง เมื่อสัดส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่มดังกล่าวมีปริมาณเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตปกติซึ่งผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน อันเป็นผลมาจากค่าความถ่วงจำเพาะของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ที่มีค่าเท่ากับ 2.31 ซึ่งต่ำกว่าปูนซีเมนต์ที่มีค่าเท่ากับ 3.14 โดยเมื่อเปรียบเทียบคอนกรีตที่มีปริมาตรเท่ากัน จะเห็นว่าการแทนที่ฝุ่นทรายไส้แบบโดยน้ำหนักในปูนซีเมนต์ทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตต่ำลง ประกอบกับการที่อนุภาค ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW (102.85 ไมโครเมตร) มีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคปูนซีเมนต์ (63.44 ไมโครเมตร) ดังพิจารณาประกอบได้ในกระจายขนาดผล (Particle Size Distribution) ในภาพที่ 5.7 พบว่าอนุภาคผงฝุ่นทรายไส้แบบที่มีขนาดใหญ่มีปริมาณมากกว่าปูนซีเมนต์ทำให้คอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW มีปริมาณอากาศ (Air Content) ที่เกิดขึ้นมากกว่าคอนกรีตปกติ (Sidney, M. et al., 2002, p.172) ดังนั้นเมื่อคอนกรีตมีปริมาณอากาศเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลงตามลำดับ ซึ่งหมายถึงหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตจากที่มีเท่ากับ 300 กก./ม.³ เป็น 350 และ 400 กก./ม.³ ตามลำดับ พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตมีผลกระทบต่อหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ทั้งนี้เพราะปริมาณคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณมวลรวมหยาบและละเอียดซึ่งมีส่วนในคอนกรีตมากที่สุดลดลงตามลำดับ นอกจากนั้นการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์ทำให้ค่าความต้องการเพิ่มความตึงเครียดน้ำเพื่อทำให้คอนกรีตมีค่าการยุบตัวเริ่มต้น (5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม.) ตามที่กำหนด มีปริมาณเพิ่มขึ้น (ปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติดูดซับน้ำได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับมวลรวม) จากการเพิ่มขึ้นดังกล่าวจึงทำให้ปริมาณฟองอากาศเพิ่มขึ้นผลลัพธ์ที่ได้คือ ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตมีค่าลดลง ซึ่งก็คือค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตจึงมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน

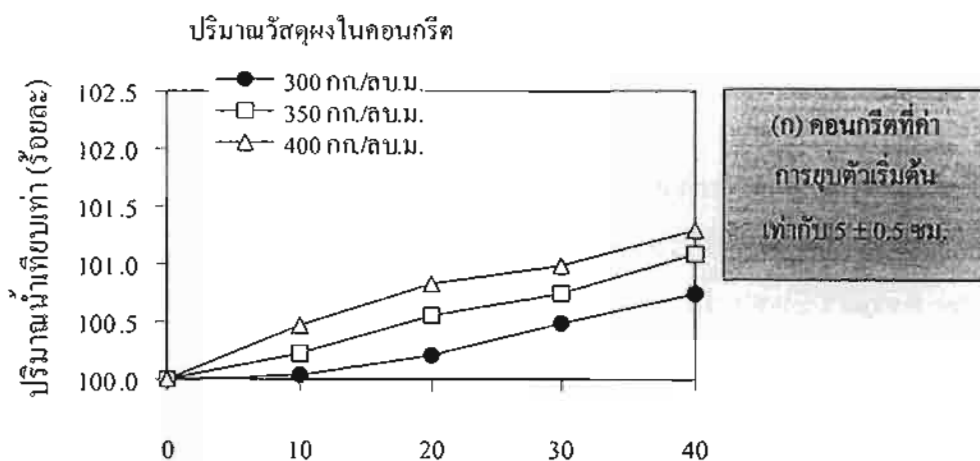
เมื่อเปรียบเทียบผลกระทบจากการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์กับปริมาณผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ที่มีต่อค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสด พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์จาก 300 เป็น 400 กก./ม.³ ทำให้หน่วยน้ำหนักลดลงเพียงร้อยละ 0.62 ทั้งคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัว

เริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. ในขณะที่คอนกรีตที่มีอัตราส่วนการแทนที่ของผงฟูทรายใส่แบบในปริมาณสูงสุด (ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก) ทำให้หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตลดลงขึ้นอยู่กับค่าขุดตัวเริ่มต้นกล่าวคือ คอนกรีตที่มีค่าการขุดตัวเริ่มต้น 5 ± 0.5 และ 10 ± 0.5 ซม. มีค่าลดลงร้อยละ 0.50 ในขณะที่คอนกรีตที่มีค่าการขุดตัวเริ่มต้นเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. มีค่าลดลงร้อยละ 0.97 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการที่ผงฟูทรายใส่แบบเพิ่มขึ้นมีผลกระทบน้อยกว่าปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะที่ต่างกัน ดังที่ได้อธิบายแล้วนั้น แต่ในกรณีของคอนกรีตค่าการขุดตัวเริ่มต้นเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. เป็นผลมาจากอิทธิพลร่วมของปริมาณฟองอากาศจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นมากทำให้คอนกรีตมีหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตลดลงในสัดส่วนที่มากขึ้นตามไปด้วย

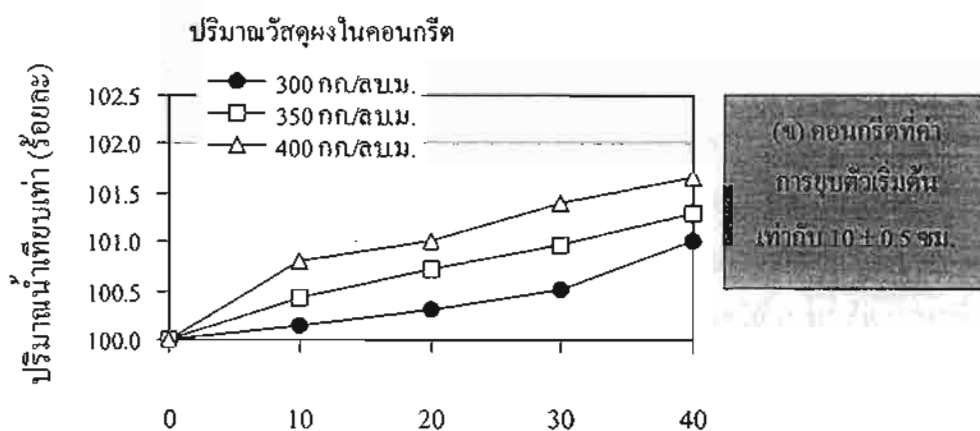


ร้อยละการแทนที่ของผงฟูทรายใส่แบบกลุ่ม SSW โดยน้ำหนัก ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1

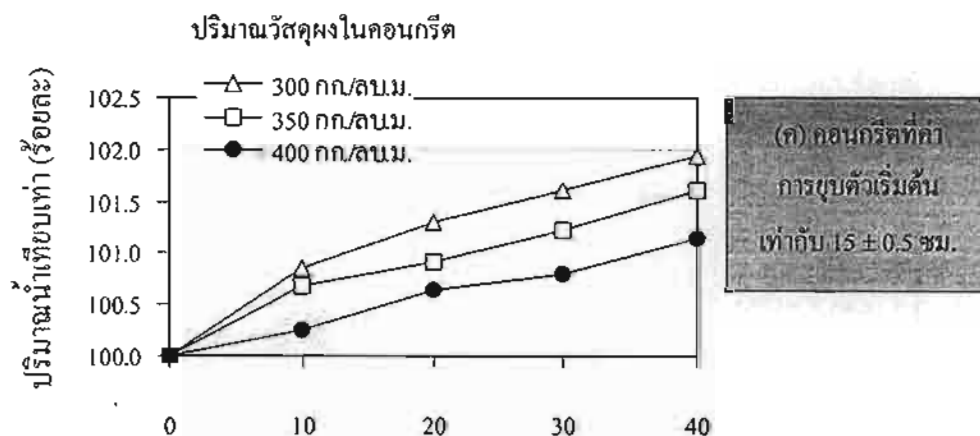
ภาพที่ 5.7 หน่วยน้ำหนักในสถานะสดของคอนกรีต โดยมีปริมาณวัสดุผง (ปูนซีเมนต์ล้วน (ร้อยละ 0) หรือปูนซีเมนต์ซึ่งถูกแทนที่ด้วยผงฟูทรายใส่แบบกลุ่ม SSW โดยน้ำหนัก (ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40)) ในคอนกรีตเท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม.³



การแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)



การแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)



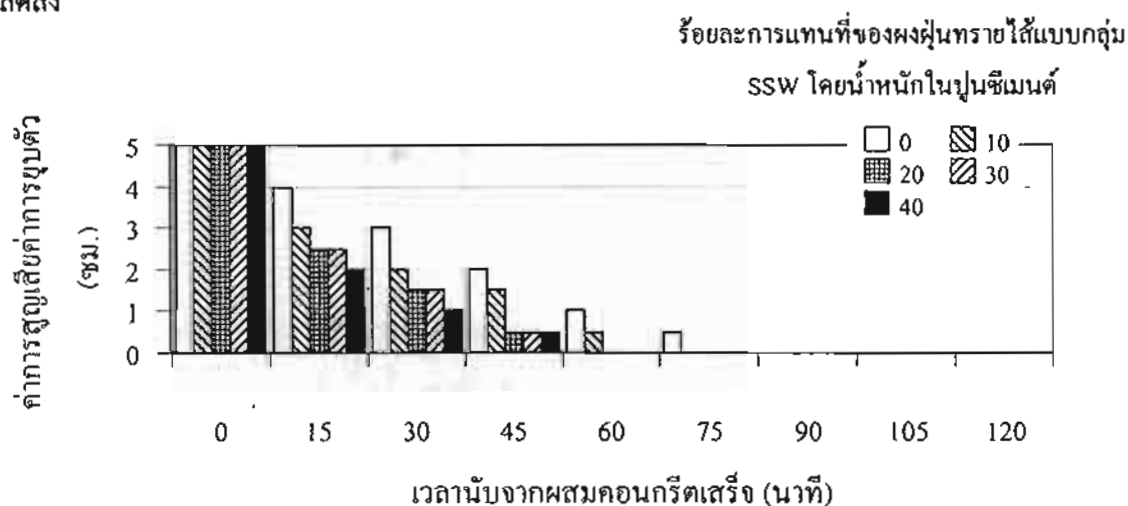
การแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)

ภาพที่ 5.8 ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมในคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบกลุ่ม SSW เทียบเท่าปริมาณน้ำที่ใช้ผสมในคอนกรีตซึ่งผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

5.2.3 ค่าการยุบตัวเริ่มต้นและการสูญเสียค่าการยุบตัว (Initial Slump and Slump Loss)

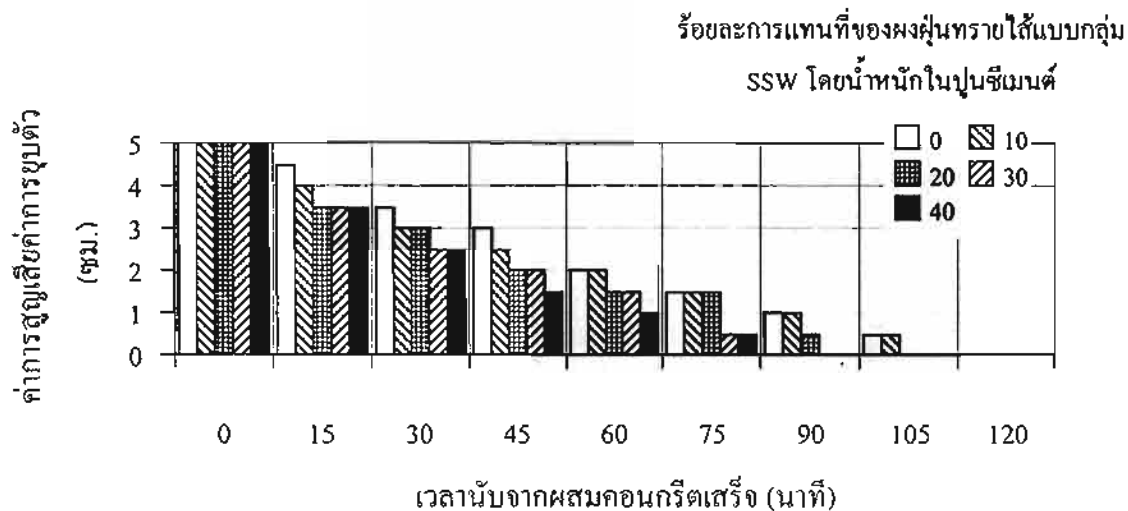
การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตเกิดขึ้นจาก 2 ส่วนคือ การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซัลเฟต (C_3S) และไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ซึ่งทำปฏิกิริยาในอัตราที่ต่ำในช่วงดอร์แมนท์ (Dormant Period) และอีกส่วนเกิดจากการระเหยของน้ำ (Water Evaporation) และการดูดซับน้ำ (Water Absorption) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงภายในอนุภาคของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Sidney, M. et al., 2002, p.199) โดยจากการทดสอบหาค่าการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ของคอนกรีตเริ่มจากการนำคอนกรีตที่ผสมเสร็จในโม้ม้าวัดอุณหภูมิและหาค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) หลังจากนั้นเทคอนกรีตลงในโม้ทิ้งไว้โดยปิดฝาโม้มือให้น้ำระเหยออก โดยเปิด โม้ผสมเป็นระยะๆ แล้วนำคอนกรีตมาทดสอบหาค่ายุบตัวทุกๆ 15 นาที จนถึงเวลาที่ 120 นาที หลังการผสม

จากค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตซึ่งกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. แสดงในภาพที่ 5.9 ถึง 5.11 พบว่าคอนกรีตซึ่งผสมผงปูนทรายใส่แบบกลุ่ม SSW มีอัตราของการสูญเสียค่าการยุบตัวมากกว่าคอนกรีตปกติ ทั้งนี้เนื่องจากสาเหตุที่เกิดการสูญเสียค่าการยุบตัวจากการสูญเสียน้ำจากการดูดซับน้ำเป็นสำคัญ เนื่องจากผงปูนทรายใส่แบบกลุ่ม SSW มีความขรุขระและมีอนุภาคเล็กๆ เกาะอยู่โดยรอบ และเป็นเหลี่ยมมุม (ภาพที่ 5.4(ก)) ทำให้สามารถในการดูดซับน้ำได้เป็นอย่างดี ถึงแม้ว่าผงปูนทรายใส่แบบกลุ่ม SSW มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมีผลทำให้อัตราของการสูญเสียค่าการยุบตัวลดลง

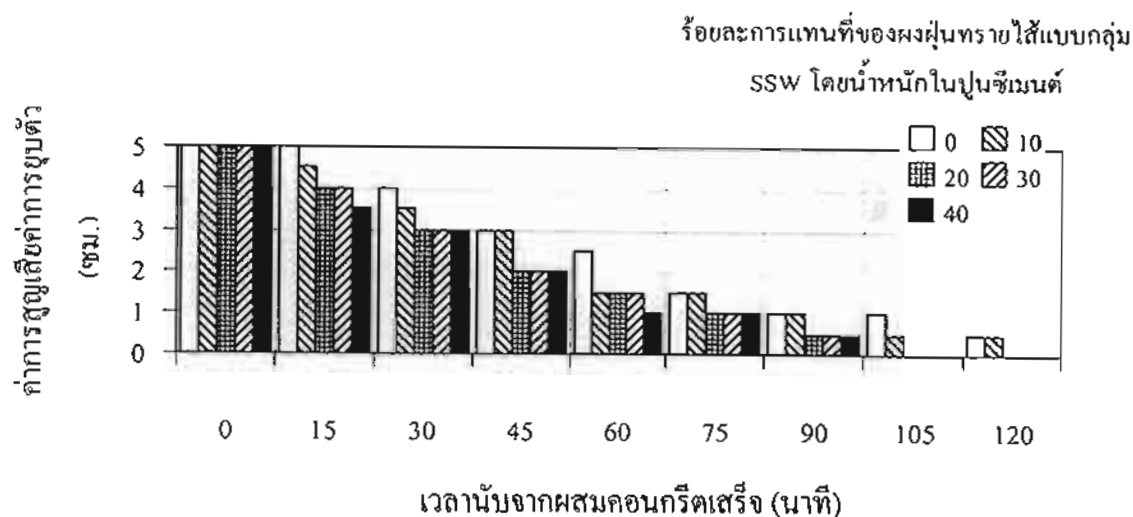


ภาพที่ 5.9 ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณวัสดุผงเท่ากับ 300 กก./ม.^3 ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงปูนทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาที่อัตราการสูญเสียค่าการยุบตัวเมื่อเวลาผ่านไป โดยคอนกรีตมีปริมาณวัสดุผง (ปูนซีเมนต์และผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW) ในคอนกรีตเพิ่มขึ้นจาก 300 เป็น 350 และ 400 กก./ม.³ ดังแสดงในภาพที่ 5.10 และ 5.11 ตามลำดับ พบว่าอัตราของการสูญเสียค่าการยุบตัวมีค่าเพิ่มขึ้น (Neville, A.M., 1999, pp. 202 – 203) โดยเมื่อคอนกรีตมีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากันคือที่ 5 ± 0.5 ซม. ซึ่งหมายถึงคอนกรีตมีปริมาณน้ำอิสระ (Free Water) เริ่มต้นเท่ากัน และการที่ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณน้ำอิสระถูกใช้ในปฏิกิริยาคับอัตราที่มากขึ้น ส่งผลให้เวลาที่ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเท่ากับศูนย์ใช้เวลาสั้นลงลงตามไปด้วย โดยคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.³ และร้อยละการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบเท่ากับ 0 และ 10 มีระยะเวลาที่ค่าการยุบตัว เท่ากับศูนย์เท่ากัน ในขณะที่ร้อยละการแทนที่เท่ากับ 20 และ 30 มีค่าต่างกัน 15 นาที ซึ่งแสดงว่าเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ผลกระทบเนื่องจากการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบจึงมีค่าลดลง ประกอบกับปูนซีเมนต์ซึ่งมีความละเอียดสูงมีปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้การดูดซับน้ำ (Water Absorption) เข้าไปภายในอนุภาคเพิ่มขึ้น และแนวโน้มของผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์มีลักษณะเช่นเดียวกันเมื่อคอนกรีตซึ่งปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตเท่ากับ 400 กก./ม.³

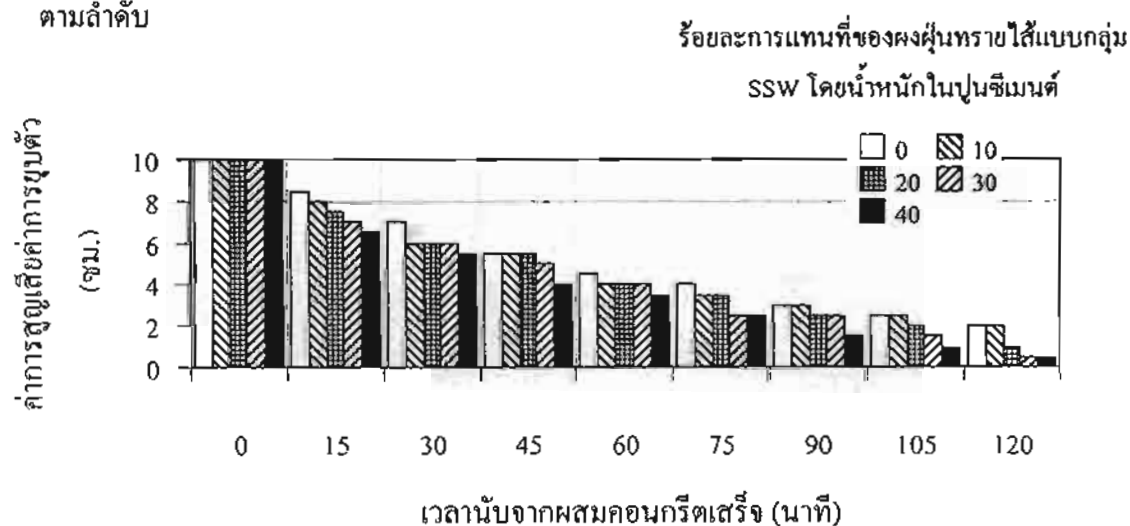


ภาพที่ 5.10 ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณวัสดุผงเท่ากับ 350 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก



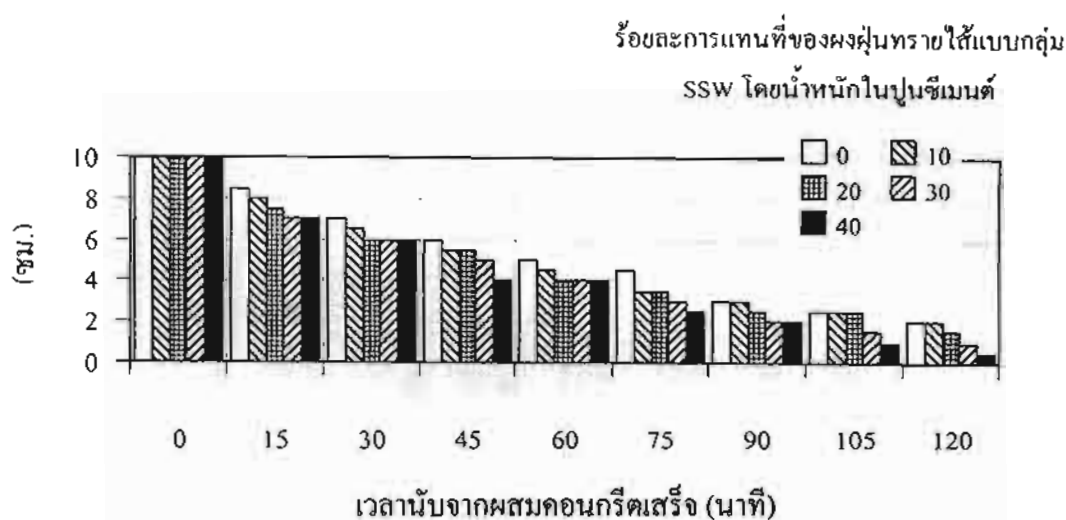
ภาพที่ 5.11 ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณวัสดุผงเท่ากับ 400 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฟูนทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเพิ่มขึ้นเป็น 10 ± 0.5 ซม. ดังแสดงในภาพที่ 5.12 ถึง 5.14 พบว่าแนวโน้มของเวลาที่เกิดการสูญเสียค่าการยุบตัวมีค่าลดลงเมื่อคอนกรีตมีอัตราส่วนการแทนที่ของผงฟูนทรายใส่แบบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น และเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามลำดับ



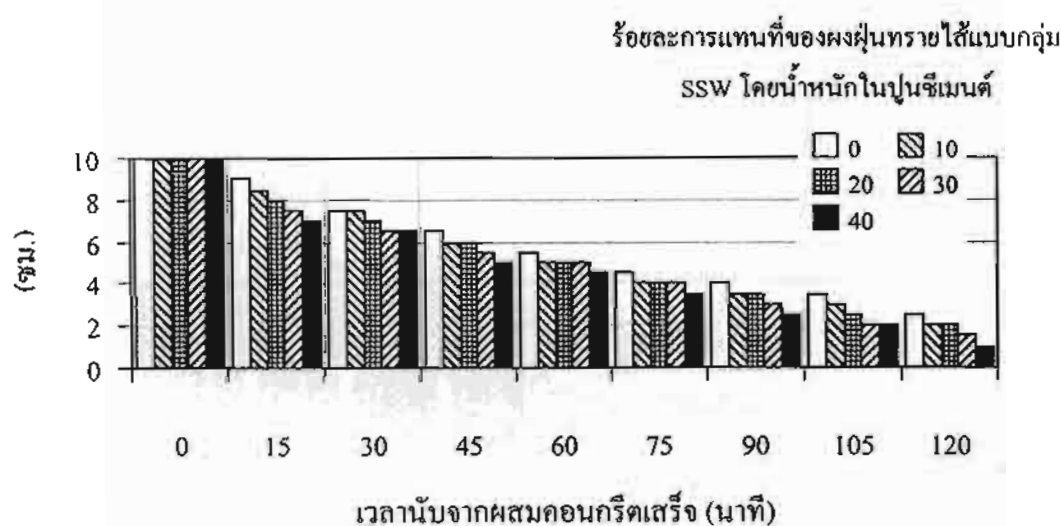
ภาพที่ 5.12 ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณวัสดุผงเท่ากับ 300 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฟูนทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัว



ภาพที่ 5.13 ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณวัสดุผงเท่ากับ 350 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฟูนทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัว



ภาพที่ 5.14 ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณวัสดุผงเท่ากับ 400 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และทำการแทนที่ผงฟูนทรายใส่แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

สำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 15 ± 0.5 ซม. และมีปริมาณวัสดุผงเท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม.³ แสดงในภาพที่ 5.15 ถึง 5.17 ตามลำดับ พบว่าการแทนที่ของผงฟูนทรายใส่แบบในปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตในทุกปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ตามลำดับ