ผลของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW) จากการหล่อชิ้นส่วนเครื่องยนต์ต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต

ณรงค์ศักดิ์ มากุล [1] และ บุรฉัตร ฉัตรวีระ [2]

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต คลองหนึ่ง คลองหลวง ปทุมธานี 12121

รับเมื่อ 14 กุมภาพันธ์ 2550 ตอบรับเมื่อ 25 กรกฎาคม 2550

บทคัดย่อ

ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW) เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการหล่อชิ้นส่วนเครื่องยนต์ โดยทรายกลุ่มนี้มีการเปลี่ยนแปลงสภาพภายหลังได้รับอุณหภูมิสูงถึงประมาณ 1,400 °ซ ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปและมีความเป็นไปได้ในการใช้แทนที่มวลรวมละเอียดได้บางส่วน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีต โดยทดสอบองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของผงฝุ่นทรายไส้แบบ และผลกระทบที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดได้แก่ หน่วยน้ำหนัก ความต้องการน้ำ การสูญเสียค่าการยุบตัว และระยะเวลาการก่อตัว และคุณสมบัติเชิงกลได้แก่ กำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีก โดยควบคุมสัดส่วนคอนกรีตประกอบด้วย ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีตเท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5, 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. ตามลำดับ และสัดส่วนการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบในมวลรวมละเอียด (ทรายแม่น้ำ) ที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก

จากผลการทดสอบพบว่า ปริมาณของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 (คอนกรีตปกติ) เป็นร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ มีผลให้คอนกรีตมีความต้องการน้ำที่ทำให้เกิดค่ายุบตัวเริ่มต้นตามที่กำหนด หน่วยน้ำหนัก การสูญเสียค่าการยุบตัว และระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น ในขณะที่กำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตลดลง นอกจากนั้นยังพบว่าสามารถใช้ ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW แทนที่ในทรายแม่น้ำได้ถึงร้อยละ 15 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกำลังอัดที่กำหนด

[1] *นักวิจัยและนักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา*

[2] *รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา*

Effects of Foundry Sand Powder (Green Sand Molding Waste (GSW)) from Engine Parts Casting Upon Mechanical Properties of Concrete

Narongsak Makul [1] and Burachat Chatveera [2]

Thammasat University, Rangsit Center, Khlong Luang, Pathum Thani 12121

Received 14 February 2007 ; accepted 25 July 2007

Abstract

A group of foundry sand powder, green sand and molding waste (here-in-after referred to as GSW) was main by-products from engine parts casting process in which their status were transformed by heating to high temperature close to 1400 °c in the formation process. It has potential to be utilized to partially replace fine aggregate. Therefore, the objective of this research was to study the chemical compositions and physical properties of foundry sand. The studied properties of fresh concrete were unit weight, water requirement, slump loss, and setting time. Also, mechanical properties such as compressive strength and splitting tensile strength were investigated. The contents of ordinary Portland cement Type I (300, 350, and 400 kg/m^3), initial slumps of concrete (5 ± 0.5, 10 ± 0.5, and 15 ± 0.5 centimeters), and percentage replacements (0, 5, 10, and 15% by weight) of the GSW foundry sand in fine aggregate (river sand) were varied.

From test results, it was found that the increase of GSW proportions from 0 (normal concrete) to 5, 10, and 15% by weight respectively, increased unit weight, water requirement of concrete at the specified slump, slump loss, and setting time. Whereas, the compressive and splitting tensile strengths of the concrete decreased. Furthermore, it was found that the GSW foundry sand can be used to replace the river sand up to 15% by weight, depending on the specified compressive strength of concrete.

[1] *Researcher and Doctoral Student, Department of Civil Engineering.*

[2] *Associate Professor, Department of Civil Engineering.*

1. บทนำ

ในอดีตผงฝุ่นทรายไส้แบบ (Foundry Sand Powder) จากโรงงานหล่อชิ้นส่วนเครื่องยนต์ สามารถจำแนกตามสายการผลิตออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่คือ ผงฝุ่นทรายไส้แบบจากกระบวนการทำแบบหล่อภายนอกได้ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW) จากการทำแบบหล่อภายในได้ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) และจากการตบแต่งชิ้นส่วนได้ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม Finishing Waste (FW) ซึ่งมีปริมาณโดยเฉลี่ยรวมผงฝุ่นทรายทั้ง 3 กลุ่มอยู่ที่ 240 ตันต่อเดือน [1] แต่ในปัจจุบันทางบริษัทผู้ผลิตได้ปรับปรุงสายการผลิต จึงทำให้ทรายกลุ่มที่มาจากการตบแต่งชิ้นส่วนมีจำนวนลดลงมาก และการกำจัดผงฝุ่นทรายไส้แบบจะถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์และนำไปใช้ในการถมที่ (Landfill) ซึ่งไม่ได้ก่อให้เกิดประโยชน์เท่าที่ควร จึงควรมีแนวทางที่ดีกว่าในการนำกลับมาใช้ในรูปแบบอื่น อาทิเช่น อุตสาหกรรมคอนกรีตผสมเสร็จ แต่ในปัจจุบันยังขาดงานวิจัยที่สนับสนุนการนำผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ที่เกิดขึ้นในประเทศไทยมาใช้กับงานคอนกรีต ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW มาทำการศึกษาผลกระทบที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต

สำหรับการนำผงฝุ่นทรายไส้แบบซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมหนักมาใช้อาจทำให้ผู้ใช้คอนกรีตมีประเด็นที่ว่าจะนำผงฝุ่นทรายไส้แบบซึ่งเป็นของเสียมีพิษจากอุตสาหกรรมมาใช้ผสมทำคอนกรีตหรือไม่ ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาผลกระทบในประเด็นดังกล่าวและความเป็นไปได้เบื้องต้นให้ชัดเจนดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. ประเด็นเกี่ยวกับปริมาณสารพิษที่ตกค้าง โดยจากการตรวจสอบของทางบริษัทฯ พบว่าสารพิษที่ตกค้างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ของกระทรวงอุตสาหกรรม ดังแสดงในตารางที่ 1

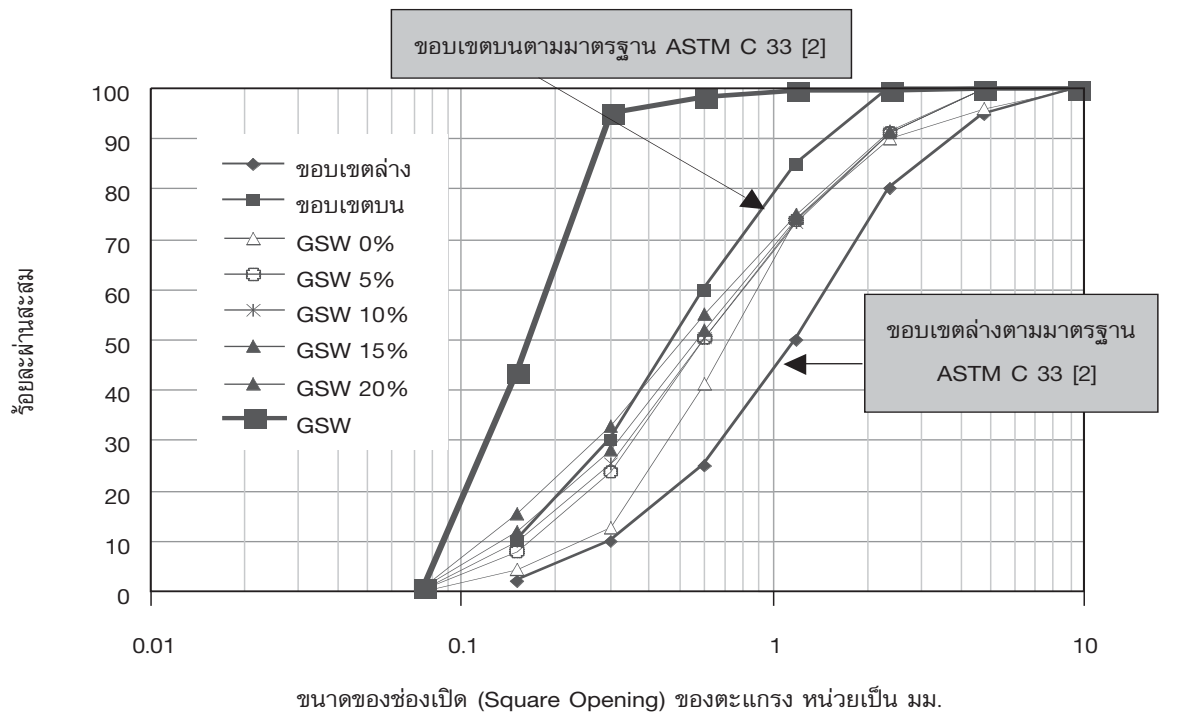
ตารางที่ 1 ปริมาณสารพิษที่ทำการตรวจวัดกากของเสียของโรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์

สารพิษ	หน่วย	วิธีการทดสอบ	ผงฝุ่นทรายไส้แบบ	เกณฑ์มาตรฐาน
Total Arsenic	Mg/l as As	Atomic Absorption Spectrometric Method	0.019	≤ 5.0
Total Cadmium	Mg/l as Cd	Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometric Method	0.020	≤ 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. ศักยภาพของวัตถุดิบในงานคอนกรีต โดยทางเลือกหนึ่งคือ การนำผงฝุ่นทรายไส้แบบมาใช้แทนที่มวลรวมละเอียด (ทรายแม่น้ำ) โดยต้องคำนึงถึงคุณสมบัติที่สำคัญประกอบด้วย การกระจายขนาดคละ (Gradation) ของมวลรวมละเอียดต้องเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 33 [2] ซึ่งกำหนดไว้ดังต่อไปนี้

2.1 การกระจายขนาดคละ พบว่าอนุภาคของผงฝุ่นทรายไส้แบบมีขนาดเล็กกว่าทรายแม่น้ำ ในขณะที่เมื่อทำการแทนที่ทรายแม่น้ำด้วยผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนร้อยละ 5 (GSW5%), 10 (GSW10%), 15 (GSW15%) และ 20 (GSW20%) ตามลำดับ มีผลทำให้การกระจายขนาดคละของมวลรวมผสมเปลี่ยนแปลงไป โดยการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบโดยน้ำหนักที่ร้อยละ 20 มีการกระจายขนาดคละเกินกว่าขอบเขตที่กำหนดตามมาตรฐาน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการกระจายขนาดคละของมวลรวมผสมของทรายแม่น้ำและผงฝุ่นทรายแบบในช่วงตะแกรงเบอร์ #3/8 (9.5 มม.) ถึง #16 (1.18 มม.) จะเห็นได้ว่าการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไม่มีผลกระทบต่อการกระจายขนาดคละของทรายแม่น้ำ ในขณะที่อนุภาคในช่วงตะแกรงเบอร์ #16 (1.18 มม.) ถึง #100 (150 ไมโครเมตร) จะเห็นการเปลี่ยนแปลงของการกระจายขนาดคละของมวลรวมผสมอย่างชัดเจน อันเป็นผลเนื่องมาจากขนาดอนุภาคของผงฝุ่นทรายไส้แบบส่วนใหญ่มีขนาดเล็กกว่าทราย

2.2 ปริมาณของอนุภาคที่ขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 200 (75 ไมโครเมตร) ต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 3.0 [2] โดยจากการทดสอบด้วยการร่อนผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ผ่านตะแกรง พบว่าปริมาณของอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.95 ในขณะที่อัตราส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW เท่ากับร้อยละ 0 (GSW0%), 5 (GSW5%), 10 (GSW10%), 15 (GSW15%) และ 20 (GSW20%) มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 0.14, 0.38, 0.49, 0.61 และ 0.81 ตามลำดับ



รูปที่ 1 การกระจายขนาดคละของทรายและผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW

2.3 ค่าโมดูลัสความละเอียด (FM) ซึ่งเป็นดัชนีที่เป็นปฏิภาคโดยประมาณกับขนาดเฉลี่ยของก้อนวัสดุในมวลรวม โดยในมาตรฐานได้กำหนดค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียดต้องอยู่ในช่วง 2.3 ถึง 3.1 [2] ซึ่งผลจากการทดสอบในตารางที่ 2 พบว่าค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียดซึ่งประกอบด้วยทรายแม่น้ำและผงฝุ่นทรายไส้แบบมีค่าอยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนด

ตารางที่ 2 ค่าโมดูลัสความละเอียด (FM) ของทรายแม่น้ำผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW

ร้อยละการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบในทรายแม่น้ำ โดยน้ำหนัก	โมดูลัสความละเอียด (FM)
0 (ทรายแม่น้ำ)	2.81
5	2.53
10	2.50
15	2.43
GSW	1.40

จากสัดส่วนการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบในทราย โดยตามข้อกำหนดของการกระจายขนาดคละที่มีค่าไม่เกินช่วงที่มาตรฐานกำหนด [2,3] พบว่าสัดส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ไม่เกิน ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ดังนั้นในการศึกษานี้จึงทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบในทรายแม่น้ำที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และศึกษาผลกระทบของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตปกติในสภาวะสดและเชิงกลที่ไม่ผสมสารเคมี ผสมเพิ่มเป็นส่วนประกอบ

2. ขอบเขตการศึกษาและกระบวนการวิจัย

2.1 ขอบเขตการศึกษา

2.1.1 ปริมาณการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

2.1.2 คอนกรีตที่นำมาศึกษามีข้อกำหนดดังต่อไปนี้

1. คอนกรีตปกติที่ไม่มีสารเคมีผสมเพิ่มเป็นส่วนประกอบ

2. ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีตเท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม.^{3} ตามลำดับ

3. ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเท่ากับ 5 ± 0.5, 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. ตามลำดับ

2.1.3 คุณสมบัติเบื้องต้นของผงฝุ่นทรายไส้แบบประกอบด้วย องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ

2.1.4 ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตในสภาวะสดประกอบด้วย หน่วยน้ำหนัก ค่าการยุบตัว และระยะเวลาการก่อตัว

2.1.5 คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตได้แก่ กำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน ตามลำดับ

2.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW น้ำประปาที่มีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) เท่ากับ 7.0 ทรายแม่น้ำที่มีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33 [2] หินมีขนาดใหญ่สุดเท่ากับ 20 มม. และขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33 [2]

2.3 วิธีการทดสอบ

2.3.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ อาทิเช่น ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นต้น ด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence และคุณสมบัติทางกายภาพได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่นรวมพื้นที่ผิวจำเพาะในรูปของความละเอียดด้วย

วิธีเบลน ปริมาณความชื้น การกระจายขนาดคละของอนุภาคลักษณะและพื้นผิวของอนุภาคด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) และความเป็นผลึกด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction และดัชนีกำลัง

2.3.2 คุณสมบัติของคอนกรีตดังต่อไปนี้

1. หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสด ตามมาตรฐาน ASTM C 138 [4]

2. ค่าการยุบตัวเริ่มต้น ตามมาตรฐาน ASTM C 143 [5]

3. ระยะเวลาการก่อตัว ตามมาตรฐาน ASTM C 403 [6]

4. กำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 สูง 20 ซม. โดยถอดแบบที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำไปบ่มในน้ำจนถึงเวลาทดสอบที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90 และ 120 วัน ตามลำดับ ขั้นตอนการทดสอบกำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 39 [7] และ ASTM C 496 [8] ตามลำดับ

2.4 สัดส่วนที่ใช้ในการทดสอบ

สัดส่วนผสมของคอนกรีตแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งได้มาจากการทดสอบจากหน้างานจริง

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ทรายแม่น้ำด้วยผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5, 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. (หน่วยเป็น กก./ม.^{3})

สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์	น้ำ	ทราย	GSW	หิน
300(5)GSW0	300	196	785	0	1117
300(5)GSW5	300	198	744	39	1114
300(5)GSW10	300	200	702	78	1110
300(5)GSW15	300	202	661	117	1106
350(5)GSW0	350	200	758	0	1091
350(5)GSW5	350	202	718	38	1086
350(5)GSW10	350	207	675	75	1078
350(5)GSW15	350	209	636	113	1075
400(5)GSW0	400	209	695	0	1090
400(5)GSW5	400	210	659	35	1087
400(5)GSW10	400	213	621	69	1082
400(5)GSW15	400	215	585	103	1078
300(10)GSW0	300	207	798	0	1108
300(10)GSW5	300	215	725	38	1086
300(10)GSW10	300	218	684	76	1081
300(10)GSW15	300	226	638	113	1068
350(10)GSW0	350	209	749	0	1077
350(10)GSW5	350	215	705	38	1066
350(10)GSW10	350	216	666	74	1065
350(10)GSW15	350	223	622	110	1052
400(10)GSW0	400	229	674	0	1057
400(10)GSW5	400	229	640	34	1056

ตารางที่ 3 (ต่อ)สัดส่วนผสมของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ทรายแม่น้ำด้วยผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5, 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. (หน่วยเป็น กก./ม.^{3})

สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์	น้ำ	ทราย	GSW	หิน
400(10)GSW10	400	229	606	67	1055
400(10)GSW15	400	232	569	100	1050
300(15)GSW0	300	220	759	0	1080
300(15)GSW5	300	222	718	38	1075
300(15)GSW10	300	225	677	75	1071
300(15)GSW15	300	225	638	113	1068
350(15)GSW0	350	231	724	0	1041
350(15)GSW5	350	233	686	37	1037
350(15)GSW10	350	235	647	72	1034
350(15)GSW15	350	238	608	108	1028
400(15)GSW0	400	238	667	0	1042
400(15)GSW5	400	240	628	33	1037
400(15)GSW10	400	242	594	66	1034
400(15)GSW15	400	245	557	98	1028

หมายเหตุ : X(Y)GSWZ คือ คอนกรีตที่ปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ X กก./ม.^{3} และมีค่าการยุบตัวเริ่มต้นที่ Y ซม. นอกจากนั้นยังทำการแทนที่ทรายแม่น้ำด้วยผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในอัตราส่วนร้อยละ Z โดยน้ำหนัก

3. ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

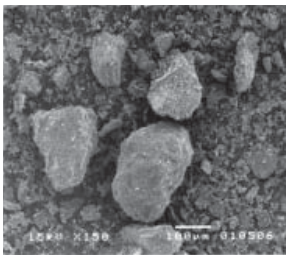
3.1 คุณสมบัติพื้นฐานของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW

ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เนื่องจากวัตถุดิบในการผลิตเป็นทรายของประเทศออสเตรเลียซึ่งมีสารประกอบดังกล่าวถึงร้อยละ 85.9 [1] นอกจากนั้นผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW เป็น ผลพลอยได้จากการทำแบบหล่อภายนอกซึ่งต้องการความแข็งแรง ดังนั้นจึงต้องเติมสารผสมเพิ่มซึ่งเป็นสารประกอบของเหล็กจำพวกเฟอร์โรแมงกานีสและเฟอร์โรโครเมียมในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น [1] อีกทั้งจากการที่ทรายไส้แบบแบบหล่อภายนอกต้องทนความร้อนของน้ำเหล็กในกระบวนการเทลงไส้แบบถึง 1,400 °ซ ทำให้ต้องเติมสารเชื่อมประสาน จำพวกเรซินเพิ่มขึ้นอีก จึงส่งผลให้ปริมาณของซิลิคอนไดออกไซด์ลดลง และจะเห็นว่าผงฝุ่นทรายไส้แบบมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 2.2 ดังแสดงในตารางที่ 4

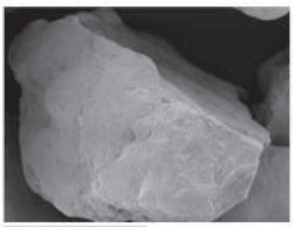
สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญซึ่งได้แก่ ความละเอียดด้วยวิธีเบลน ผงฝุ่นทรายไส้แบบมีค่าความละเอียดเท่ากับ 710 ซม.^{2}/ก. ซึ่งเป็นผลจากการปรับปรุงคุณภาพของไส้แบบในขณะทำการหล่อ ซึ่งและเมื่อหลังจากเคาะทรายไส้แบบจึงทำให้เศษทรายส่วนใหญ่อยู่ในสภาวะที่มีการเกาะยึดกันเป็นกลุ่มเม็ดทรายส่งผลให้ความละเอียดต่ำและจากลักษณะอนุภาคของทรายที่ใช้ทำแบบหล่อดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่าอนุภาคทรายมีผิวค่อนข้างขรุขระเช่นเดียวเมื่อเปรียบเทียบกับทรายแม่น้ำ

ตารางที่ 4 องค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ผงฝุ่นทรายไส้แบบ
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)	74.0
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	7.1
ไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3)	4.0
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	2.2
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.4
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.5
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	1.4
ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาไหม้	1.5
คุณสมบัติทางกายภาพ	**ผงฝุ่นทรายไส้แบบ**
ปริมาณความชื้น (%)	2.2
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ความละเอียดด้วยวิธีเบลน (ซม.^{2}/ก.))	710
ความถ่วงจำเพาะ	2.58
ร้อยละค้างตะแกรงร่อน	
- ขนาด 38 µm	57.20
- ขนาด 45 µm	54.67
- ขนาด 90 µm	27.27



(ก) ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW

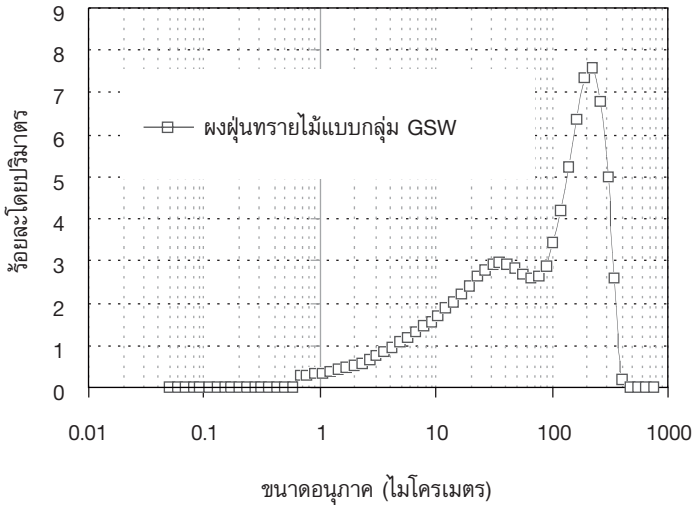


(ข) ทรายแม่น้ำ

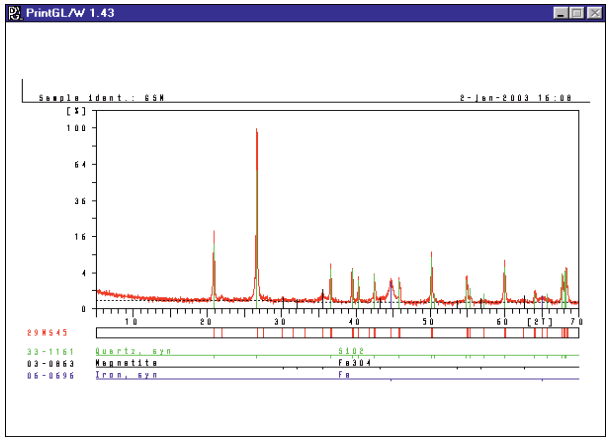
รูปที่ 2 ลักษณะของอนุภาคผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW และทรายแม่น้ำที่กำลังขยาย 150 เท่า

ผลการทดสอบการกระจายขนาดคละของอนุภาคผงฝุ่นทรายไส้แบบทั้งกลุ่ม GSW แสดงในรูปที่ 3 พบว่าขนาดอนุภาคของผงฝุ่นทรายไส้แบบมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 165.4 ไมโครเมตร

จากการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่า ผงฝุ่นทรายไส้แบบมีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยผลึกของซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) มากที่สุด [9,10]



รูปที่ 3 การกระจายขนาดคละของอนุภาคผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW

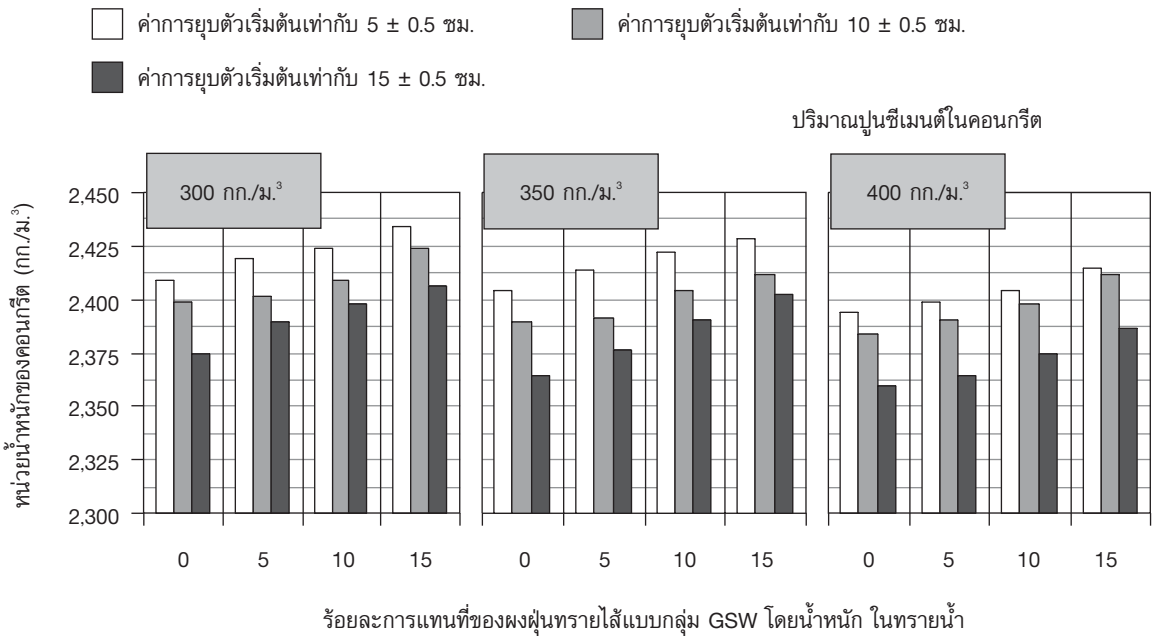


รูปที่ 4 ผลการตรวจวัดความเป็นผลึกด้วยรังสี X-Ray ของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW

3.2 คุณสมบัติของคอนกรีตในสภาวะสดผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW

3.2.1 หน่วยน้ำหนัก

ผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตแสดงในรูปที่ 5 พบว่าผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำมีผลทำให้หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่ไม่ถือว่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ คอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 300 กก./ม.^{3} และค่ายุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. พบว่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 0.4, 0.6 และ 1.0 เมื่อสัดส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบในทรายเท่ากับร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เป็นต้น ทั้งนี้เพราะจากผลการกระจายขนาดคละของผงฝุ่นทรายไส้แบบ จะเห็นว่าผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่มดังกล่าวมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับทรายแม่น้ำ ดังแสดงการกระจายขนาดคละในรูปที่ 3 ทำให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กของผงฝุ่นทรายไส้แบบสามารถแทรกเข้าไประหว่างอนุภาคของทรายหรือการเติมแทรก (Filling effect) [11] ซึ่งอาจส่งผลให้ลดปริมาณช่องว่างภายในคอนกรีตได้บางส่วนทำให้คอนกรีตมีหน่วยน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นได้



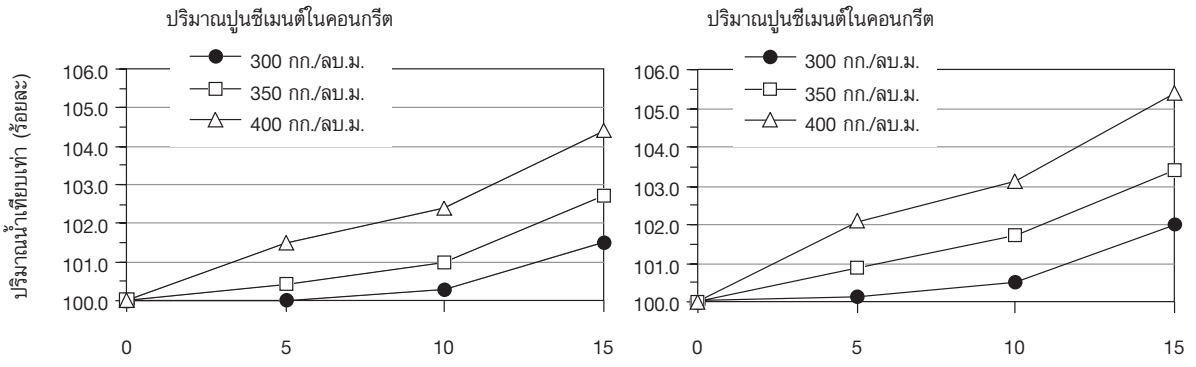
รูปที่ 5 หน่วยน้ำหนักในสภาวะสดของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW

3.2.2 ปริมาณน้ำที่ทำให้เกิดค่าการยุบตัว

จากผลการทดสอบความต้องการน้ำซึ่งกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้นแสดงในรูปที่ 6 พบว่าคอนกรีตที่ทุกๆ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นได้รับผลกระทบจากการแทนที่ในลักษณะเดียวกันกล่าวคือ ทำให้ความต้องการน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำที่เพิ่มขึ้นด้วยเหตุผลเช่นเดียวกันกับหัวข้อหน่วยน้ำหนักกล่าวคือ ผงฝุ่นทรายไส้แบบมีส่วนละเอียดเพิ่มขึ้นจึงทำให้ต้องการน้ำเพิ่มเติมหรือต้องการเพิ่มน้ำอิสระเพื่อช่วยหล่อลื่นให้อนุภาคของมวลรวมละเอียดสามารถไหลตัวได้ซึ่งคือ คอนกรีตเกิดค่าการยุบตัว (Slump) นอกจากนั้นจากกระบวนการทำแบบหล่อทรายดังกล่าวต้องผ่านอุณหภูมิถึง 1,400 °ซ ทำให้ผงฝุ่นทรายไส้แบบมีสีคล้ำออกเทาจนถึงเป็นสีทรายไหม้และพื้นผิวมีความขรุขระมากกว่าทรายแม่น้ำเป็นผลให้ความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

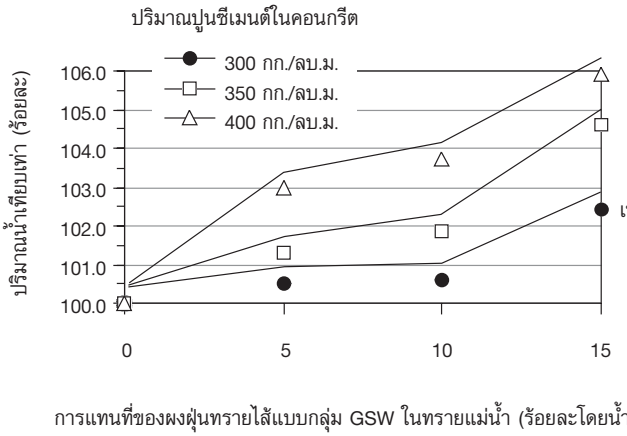
สำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวจาก 5 ± 0.5 ซม. (รูปที่ 6(ก)) เป็น 10 ± 0.5 ซม. (รูปที่ 6(ข)) และ 15 ± 0.5 ซม. (รูปที่ 6.5(ค)) พบว่าแนวโน้มของความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผงฝุ่นทรายไส้แบบในทรายเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบค่าการเพิ่มขึ้นของหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบ พบว่าคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นสูงกว่ามีการเพิ่มขึ้นของค่าหน่วยน้ำหนักคอนกรีตสดมากกว่าคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวต่ำกว่า



(ก) คอนกรีตที่ค่าการยุบตัวเริ่มต้น เท่ากับ 5 ± 0.5 ซม.

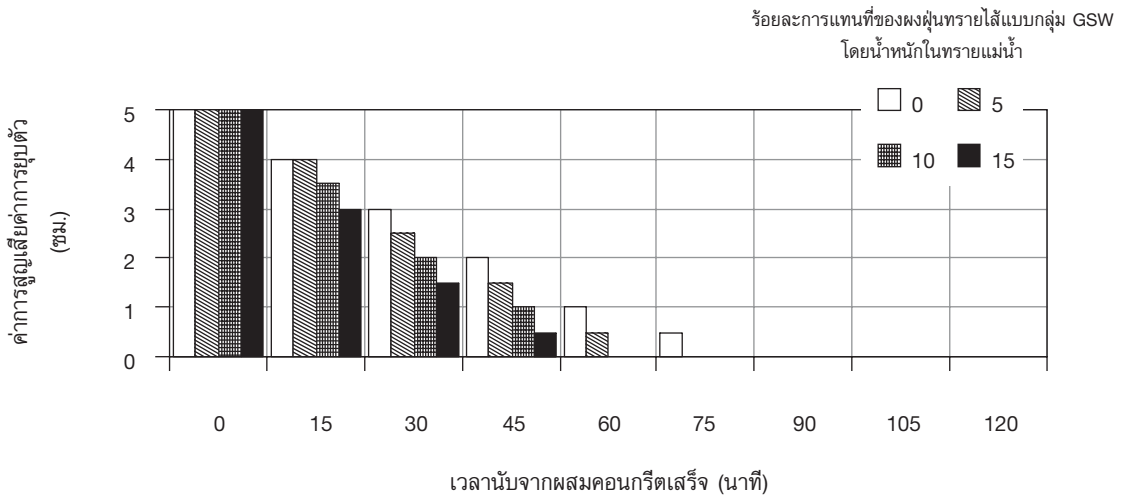
(ข) คอนกรีตที่ค่าการยุบตัวเริ่มต้น เท่ากับ 10 ± 0.5 ซม.



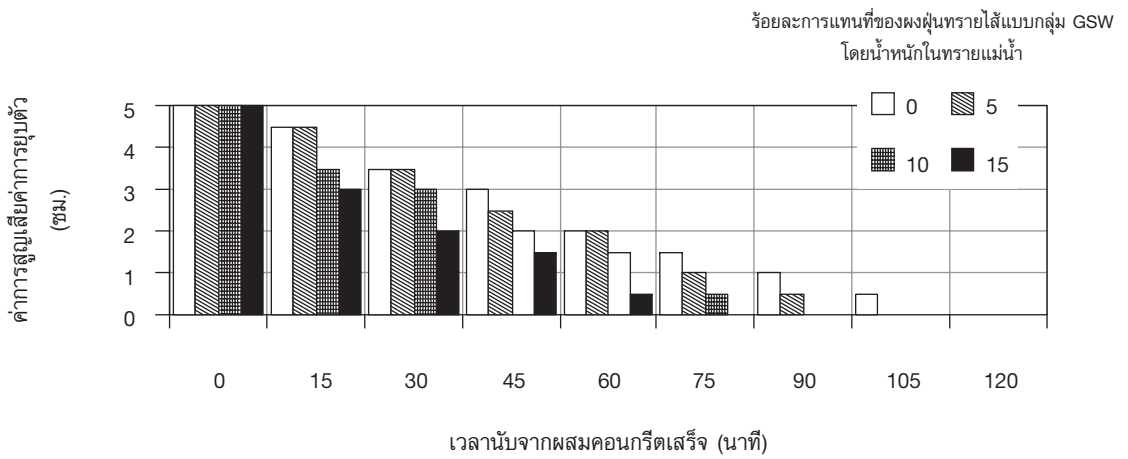
(ค) คอนกรีตที่ค่าการยุบตัวเริ่มต้น เท่ากับ 15 ± 0.5 ซม.

รูปที่ 6 ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมในคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW เทียบเท่าปริมาณน้ำที่ใช้ผสมในคอนกรีตซึ่งผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

ผลการทดสอบการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตซึ่งกำหนดค่าการยุบตัวเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. แสดงในรูปที่ 7 พบว่าคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบมีการสูญเสียค่าการยุบตัวที่เพิ่มขึ้นและมากกว่าคอนกรีตปกติ (ค่าการยุบตัวเมื่อเวลาผ่านไปลดลง) เมื่อร้อยละการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำมีค่าเพิ่มขึ้น โดยพิจารณาในกรณีของคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.^{3} คอนกรีตปกติมีเวลาที่ค่าการยุบตัวเท่ากับศูนย์เท่ากับ 90 นาที ในขณะที่คอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบมีค่าลดลงเป็น 75 และ 60 นาที เมื่อร้อยละการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบเท่ากับร้อยละ 5 และ 10 ตามลำดับ และเป็นเวลา 60 นาที ที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 15 ซึ่งกรณีที่ทำการแทนที่ในทรายแม่น้ำ พบว่าอนุภาคผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ส่วนใหญ่มีขนาดเล็กกว่า ทรายแม่น้ำทำให้คอนกรีตสูญเสียน้ำไปกับการดูดซับของอนุภาคส่วนที่ละเอียดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณน้ำโดยรวมของคอนกรีตลดลง และจากคุณสมบัติของผงฝุ่นทรายไส้แบบสามารถกักเก็บน้ำได้บางส่วนทำให้การสูญเสียน้ำอิสระลดลงตามไปด้วย [12] ผลคือ ค่าการยุบตัวมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตปกติที่เวลาเดียวกัน และเมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ทำให้คอนกรีตมีการสูญเสียค่าการยุบตัวเร็วขึ้นเนื่องจากน้ำอิสระถูกใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เพิ่มขึ้น

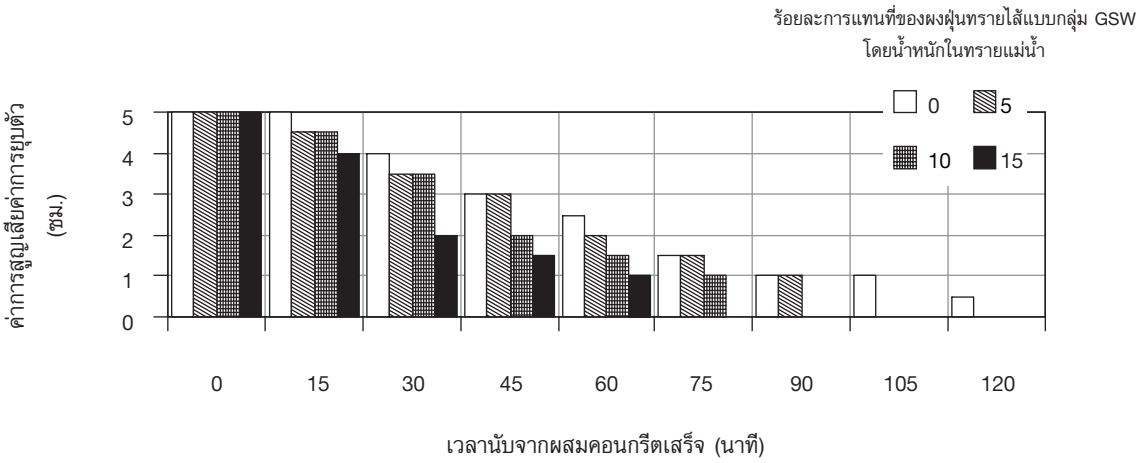


รูปที่ 7 (ก) ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม.



รูปที่ 7 (ข) ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม.

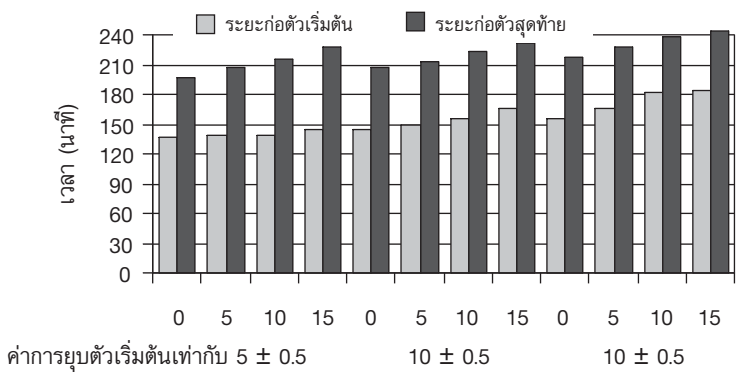
สำหรับคอนกรีตที่กำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 10 ± 0.5 ซม. และ 15 ± 0.5 ซม. พบว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตปกติ เนื่องมาจากสาเหตุดังกล่าวข้างต้น แต่จะสังเกตว่าอัตราการสูญเสียค่าการยุบตัวมีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. ทั้งนี้เพราะคอนกรีตมีปริมาณน้ำอิสระ (Free water) เพิ่มขึ้นทำให้ที่อัตราการดูดซับเดียวกัน คอนกรีตที่มีปริมาณน้ำอิสระเริ่มต้นมากกว่ามีอิสระมากกว่าเมื่อเวลาผ่านไป นอกจากนั้นจะเห็นว่าน้ำอิสระส่วนหนึ่งจะถูกกักเก็บไว้ด้วยอนุภาคที่ละเอียดของผงฝุ่นทรายไส้แบบ โดยการกักเก็บมีทั้งการกักเก็บที่ผิว (Surface retainability) และการดูดซึมน้ำ (Water absorption) เข้าไปในอนุภาคดังจะเห็นได้จากผลการที่ค่าความต้องการน้ำ (Water requirement) มีค่าร้อยละ 106 ซึ่งมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำในขณะที่การเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตทำให้อัตราในการสูญเสียค่าการยุบตัวมากขึ้น



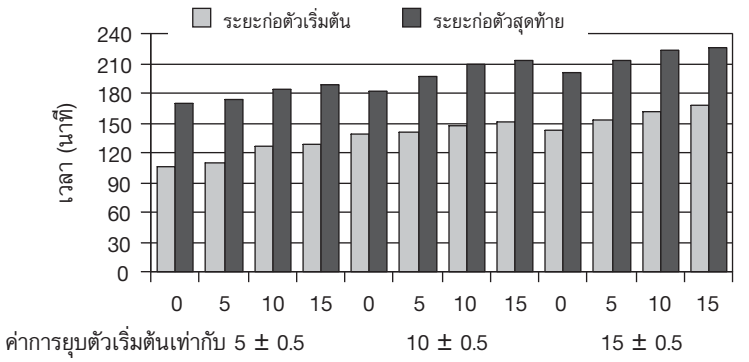
รูปที่ 7 (ค) ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.^{3} ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม.

3.2.4 ระยะเวลาการก่อตัว

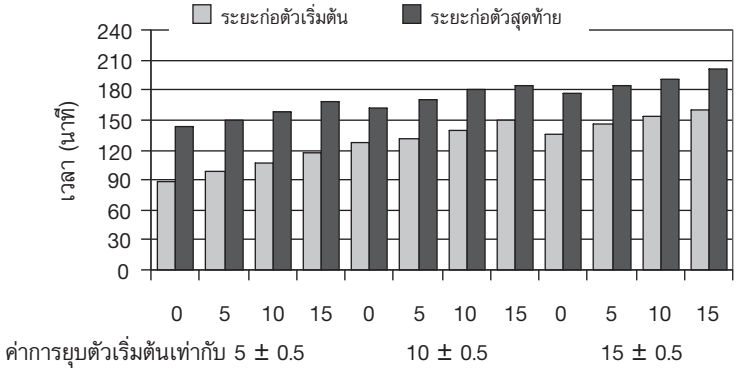
ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ซึ่งกำหนดค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5, 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. แสดงในรูปที่ 8 พบว่าการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบในทรายแม่น้ำเพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้น สำหรับคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบเท่ากับ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบในทรายแม่น้ำไม่ได้เป็นการเปลี่ยนแปลงปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตจึงทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไม่มาก แต่จะมีผลกระทบจากการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ เมื่อปริมาณของปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นเป็น 350 และ 400 กก./ม.^{3} คอนกรีตที่มีสัดส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำเพิ่มขึ้นมีระยะเวลาการก่อตัวทั้งเริ่มต้นและสุดท้ายเพิ่มขึ้น และในกรณีการเพิ่มขึ้นของค่าการยุบตัวเริ่มต้นเป็น 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. พบว่าคอนกรีตมีค่าระยะเวลาการก่อตัวทั้งเริ่มต้นและสุดท้ายเพิ่มขึ้นเมื่อร้อยละการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน



ร้อยละโดยน้ำหนัก ของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำ
(ก) คอนกรีตซึ่งมีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.^{3}



ร้อยละโดยน้ำหนัก ของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำ
(ก) คอนกรีตซึ่งมีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 350 กก./ม.^{3}



ร้อยละโดยน้ำหนัก ของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำ
(ก) คอนกรีตซึ่งมีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 400 กก./ม.^{3}

รูปที่ 8 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

3.3 คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW

3.3.1 กำลังอัด

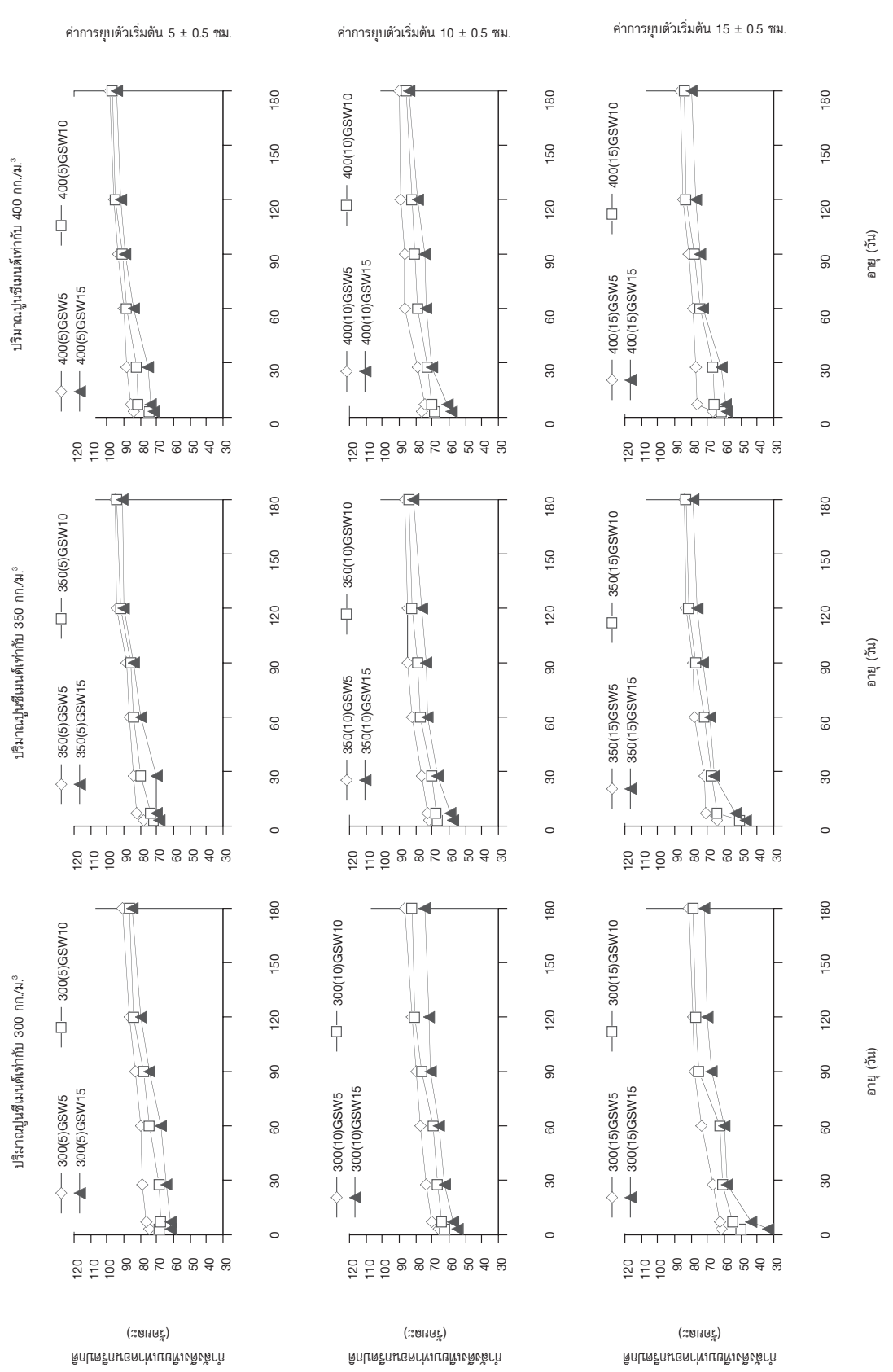
ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในทรายแม่น้ำที่อัตราส่วนร้อยละ 0 (ทราย), 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักโดยคอนกรีตซึ่งมีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม.^{3} และค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5, 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. แสดงในรูปที่ 9 พบว่าสัดส่วนของผงฝุ่นทรายไส้แบบในทรายที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ โดยการลดลงของกำลังอัดดังกล่าวมีความแตกต่างจากคอนกรีตปกติมากในช่วงแรก ในขณะที่ช่วงหลังมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติซึ่งในกรณีนี้เมื่อพิจารณาที่ปริมาณน้ำ (โดยนัยของค่าการยุบตัว) และปริมาณปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณเท่ากัน โดยการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบในทรายเท่ากับเป็นการเพิ่มส่วนที่ละเอียดให้กับคอนกรีต ดังนั้นอนุภาคของผงฝุ่นทรายไส้แบบจึงเข้าไปคละกับอนุภาคปูนซีเมนต์มากขึ้นทำให้เนื้อคอนกรีตน่าที่จะมีโครงสร้างไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous) มากขึ้น [11,13] กล่าวคืออนุภาคของผงฝุ่นทรายไส้แบบเป็นตัวกั้นความต่อเนื่องในระหว่างการ

ตกผลึกของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตดังกล่าว ในขณะที่เมื่อพิจารณาในส่วนของอนุภาคผงฝุ่นทรายไส้แบบที่สัมผัสกับเนื้อเพสต์จะมีการยึดแน่น (Bonding) ในช่วงทรานซิชั่น (Interfacial Transition Zone) น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับมวลรวมประเภทคาร์บอเนต [12-15] ทั้งนี้เพราะผงฝุ่นทรายไส้แบบเป็นมวลรวมประเภทซิลิกา

3.3.2 กำลังดึงแบบผ่าซีก

ผลการทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบ พบว่า ค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ในแม่น้ำแสดงในรูปที่ 10 โดยสำหรับคอนกรีตมีค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial slump) เท่ากับ 5 ± 0.5, 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. ตามลำดับ พบว่าเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบในทรายแม่น้ำเพิ่มขึ้นทำให้กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตมีค่าลดลงมาก อาทิเช่น กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และมีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.^{3} ที่อายุ 3 วัน มีค่าร้อยละ 72, 68 และ 62 ของคอนกรีตปกติที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 5, 10 และ 15 ตามลำดับ เนื่องจากผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW มีความสามารถในการยึดเหนี่ยวได้น้อย ดังนั้นค่ากำลังดึงจึงลดลงตามลำดับ ในขณะที่เมื่อค่าการยุบตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเป็น 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. พบว่าผลกระทบจากการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบในทรายแม่น้ำมีค่าลดลง ซึ่งแสดงว่าอิทธิพลของปริมาณน้ำอิสระที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่ากำลังรับแรงมีค่าลดลงมากกว่าการเพิ่มปริมาณผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW

รูปที่ 9 กำลังอัดเทียบเท่าของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW เปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ



รูปที่ 10 กำลังดึงแบบผ่าซีกเทียบเท่าของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW เปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ

4. สรุปผลการศึกษา

1. ผลกระทบของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสด โดยคอนกรีตที่ผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบในทรายแม่น้ำทำให้หน่วยน้ำหนักในสภาพสดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยคอนกรีตที่มีส่วนผสมของผงฝุ่นทรายไส้แบบมีค่าหน่วยน้ำหนักมากกว่าคอนกรีตปกติในช่วงร้อยละ 0.1 ถึง 1.4 และความต้องการน้ำของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงร้อยละ 0.3 ถึง 12.0 นอกจากนั้นอัตราการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบมีค่ามากกว่าคอนกรีตปกติ อีกทั้งระยะเวลาการก่อตัวทั้งเริ่มต้นและสุดท้ายของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW มีค่าเพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามสัดส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบในทรายที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ

2. คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW โดยการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบในทรายแม่น้ำมีผลทำให้กำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าความแตกต่างของกำลังอัดที่ลดลงจากคอนกรีตปกติมีมากในช่วงแรก ในขณะที่ช่วงหลังมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงลงด้วยดี ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยสัญญาเลขที่ RGD4650019 และฝ่ายอุตสาหกรรมที่ให้การสนับสนุนอย่างดียิ่งตั้งแต่บริษัท สยามโตโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด และบริษัท เอเซียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัด

6. เอกสารอ้างอิง

1. ณรงค์ศักดิ์ มากุล, 2547. ผลของผงฝุ่นทรายไส้แบบจากโรงหล่อเครื่องยนต์ต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จ, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

2. ASTM Committee, “ASTM C 33 Standard Specification for Concrete Aggregates”, Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Vol. 04.02 Concrete and Aggregate.

3. ASTM Committee, 2004, “ASTM C 94 Standard Specification for Ready-mixed Concrete”, Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Vol. 04.02 Concrete and Aggregate.

4. ASTM Committee, 2004, “ASTM C 138 Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete”, Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Vol. 04.02 Concrete and Aggregate.

5. ASTM Committee, 2004, “ASTM C 143 Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete”, Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Vol. 04.02 Concrete and Aggregate.

6. ASTM Committee, 2004, “ASTM C 403 Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance”, Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Vol. 04.02 Concrete and Aggregate.

7. ASTM Committee, 2004, “ASTM C 39 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”, Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Vol. 04.02 Concrete and Aggregate.

8. ASTM Committee, 2004, “ASTM C 496 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens”, Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Vol. 04.02 Concrete and Aggregate.

9. Asgeirsson, H. and Gudmunwon, G., 1779. “Pozzolanic Activity of Silica Dust”, Cement and Concrete Research , pp. 249-252.

10. บัญชา ธนบุญสมบัติ, 2544, การศึกษาวัสดุโดยเทคนิคดิฟแฟรกชัน, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

11. Bensted, J. and Barnes, P., 2002, Structure and Performance of Cements. Second Edition, New

York: Spon Press.

12. McIntyre, S., Rundman, K., Bailhood, C., Rush, P., Sandell, J., and Stillwell, B., 1992, "Benefication and Reuse of Foundry Sand Residuals: A Preliminary Report", AFS Transaction, No. 92, pp. 201 - 208.

13. Hewlett, P. C., 1998. Lea's Chemistry of Cement and Concrete. Fourth Edition. New York: John Wiley & Sons Inc.

14. Naik, T., and Kraus, R., 1995, "Development of Controlled Low Strength Materials", Report No. Rep - 274 Submitted to Kohler Company.

15. Naik, T., Patel, V. M., Parikh, D.M., and Tharaniyall, M.P., 1994, "Utilization of Used Foundry Sand in Concrete", Journal of Material in Civil Engineering, No. 2 : pp. 254 - 263.