บทที่ 5

ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

5.1 คุณสมบัติของผงฝุ่นทรายไส้แบบ

ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของผงฝุ่นทรายไส้แบบประกอบด้วย องค์ประกอบทางเคมีของของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และกลุ่ม **G**reen **S**and and Molding **W**aste (GSW) กับกลุ่ม **S**hell **S**and **W**aste (SSW) คุณสมบัติทางกายภาพได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) พื้นที่ผิวจำเพาะในรูปของความละเอียดด้วยวิธีเบลน (Blaine Fineness) ปริมาณความชื้น (Moisture Content) Size Distribution Microscopic Analysis ได้แก่ **S**canning **E**lectron **M**icroscope (SEM) และ X-Ray Diffraction และค่าดัชนีกำลัง (**S**trength **A**ctivity **I**ndex, SAI)

5.1.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างผงฝุ่นทรายไส้แบบที่ได้จากการเก็บตัวอย่างที่ขณะเริ่มต้นงานวิจัย (ครั้งที่ 1) เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แสดงได้ในตาราง ที่ 5.1 พบว่าผงฝุ่นทรายไส้แบบมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) โดยผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW มีปริมาณน้อยกว่ากลุ่ม SSW ในขณะที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่จะสังเกตเห็นว่าผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW มีปริมาณของไอรอนออกไซด์มากกว่ากลุ่ม SSW เล็กน้อย ทั้งนี้เพราะผงฝุ่นทรายไส้แบบดังกล่าวมาจากการทำแบบหล่อภายนอกซึ่งต้องมีความแข็งแรงมากจึงมีความจำเป็นต้องใส่ส่วนผสมที่เป็นเหล็กมากขึ้น

สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญได้แก่ การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ที่มีค่าน้อย อันเนื่องมาจากในกระบวนการทำแม่แบบดังที่แสดงในภาพที่ 2.1 จะเห็นว่าแม่แบบจะผ่านกระบวนการทำแบบโดยจะใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,400 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถพิจารณาในสองประเด็นคือ ประการแรกที่อุณหภูมิดังกล่าวปริมาณของคาร์บอนได้ถูกกำจัดไปแล้วบางส่วน ประการที่สองคือ การทดสอบหาร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้จะเผาวัสดุที่อุณหภูมิ 950 ± 50 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าสภาพความเป็นจริงที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบ

กลุ่ม GSW แต่เนื่องจากสารปรับปรุงคุณสมบัติของแม่แบบเพิ่มเติมทำให้ปรากฏค่าขึ้น ในทำนองผงฝุ่นทรายไส้แบบชนิด SSW จะมีค่าดังกล่าวปรากฏขึ้น อันเนื่องมาจากในกระบวนผลิตแบบหล่อภายใน ทรายจะได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส ทำให้ส่วนผสมบางอย่างที่ใส่เข้าไปเพื่อปรับปรุงคุณภาพของแบบหล่อยังคงตกค้างอยู่ เมื่อนำมาเผาที่อุณหภูมิ 950 ± 50 องศาเซลเซียส ส่วนผสมที่ตกค้างจะสลายไปดังที่ปรากฏเป็นค่าของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ขึ้น สำหรับค่าความละเอียดของ SSW จะมีค่าสูงกว่าความละเอียดในปูนซีเมนต์เล็กน้อย ในขณะที่ GSW จะมีความละเอียดต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาก

เมื่อพิจารณาศักยภาพในการผงฝุ่นทรายไส้แบบมาใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยดูได้จากค่าดัชนีกำลังที่ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ พบว่าค่าดัชนีกำลังที่ได้เมื่อเปรียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW มีค่าร้อยละ 78 และกลุ่ม GSW มีค่าร้อยละ 55 ที่อายุ 7 วัน ในขณะที่อายุ 28 วัน ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW มีค่าร้อยละ 82 และผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW จะมีค่าร้อยละ 60 โดยเมื่อนำไปเปรียบเทียบกันเกณฑ์มาตรฐานในการนำสารปอซโซลานมาแทนที่ในปูนซีเมนต์ (ASTM C 618 (Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete)) ดังแสดงในตารางที่ 5.2 พบว่าคุณสมบัติของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดค่าดัชนีกำลังที่ 7 และ 28 วัน ซึ่งจะต้องมีไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ในขณะที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ซึ่งมีแนวโน้มที่สามารถนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้

สำหรับการเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาพิจารณาความแปรปรวนในส่วนคุณสมบัติของผงฝุ่นทรายไส้แบบ โดยกระทำทุกๆ 2 เดือน เป็นระยะเวลา 12 เดือน (ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2546 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ. 2546) พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของผงฝุ่นทรายไส้แบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณมากเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่เก็บและนำมาใช้ในผสมเป็นคอนกรีตผสมเสร็จ (ตัวอย่างในที่เก็บครั้งที่ 1) ดังจะเห็นได้จากปริมาณซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีปริมาณในช่วงร้อยละ 88 ถึง 90 สำหรับผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW และร้อยละ 70 ถึง 75 สำหรับกลุ่ม GSW เป็นต้น ในขณะที่ด้านคุณสมบัติทางกายภาพมีลักษณะความแปรปรวนคล้ายกัน โดยเฉพาะค่าความต้องการน้ำที่ต้องการเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนมีค่าคงที่ร้อยละ 102 และ 106 สำหรับผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW และ GSW ตามลำดับ ตลอดช่วงการเก็บตัวอย่าง เป็นต้น

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบเคมีของผงฝุ่นทรายใส้แบบกลุ่ม SSW **G**reen **S**and and Molding **W**aste (GSW) และ **S**hell **S**and **W**aste (SSW) เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	1		2		3		4		5		6	
		SSW	GSW	SSW	GSW	SSW	GSW	SSW	GSW	SSW	GSW	SSW	GSW
1. ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)	20.84	83.35	77.05	88.78	70.46	89.65	73.19	90.07	75.22	87.35	73.46	88.77	74.59
2. อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	5.22	6.80	1.58	4.29	9.27	4.68	8.05	4.81	8.02	4.95	7.81	5.04	7.79
3. ไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3)	3.20	3.32	4.43	2.00	3.49	2.86	4.10	2.46	3.99	2.95	4.18	2.90	3.91
4. แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	66.28	1.73	0.45	2.70	3.12	1.32	2.70	1.09	1.84	1.32	2.63	1.31	2.58
5. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.24	1.02	0.13	0.75	1.89	0.70	1.96	0.66	1.19	0.94	1.59	0.95	1.69
6. โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.22	0.84	0.16	0.55	0.63	0.56	0.56	0.60	0.54	0.56	0.53	0.56	0.54
7. โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.10	0.93	0.17	0.84	1.97	0.85	1.78	0.89	1.62	0.96	1.48	1.00	1.59
8. ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	2.41	0.05	0.02	0.02	0.08	0.02	0.06	0.02	0.07	0.02	0.06	0.02	0.06
9. แคลเซียมออกไซด์อิสระ (free lime)	0.57	0.39	0.65	0.34	0.63	0.32	0.65	0.33	0.64	0.37	0.67	0.35	0.61
10. ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาไหม้ (LOI)	0.96	0.87	1.00	1.09	1.78	1.03	1.36	1.25	1.44	0.65	1.89	0.64	1.29

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

ตารางที่ 5.1 (ต่อ) คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม **G**reen **S**and and Molding **W**aste (GSW) และ **S**hell **S**and **W**aste (SSW) เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

คุณสมบัติทางกายภาพ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	1		2		3		4		5		6	
		SSW	GSW	SSW	GSW	SSW	GSW	SSW	GSW	SSW	GSW	SSW	GSW
1. ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	0.19	0.19	2.56	0.09	3.88	0.05	2.23	0.06	2.86	0.20	2.57	0.14	1.21
2. พื้นที่ผิวจำเพาะ (ความละเอียดด้วยวิธีเบลน (ตารางเซนติเมตรต่อกรัม))	3248	3974	745	3867	561	4160	877	4208	867	3555	592	4109	664
3. ความถ่วงจำเพาะ	3.14	2.58	2.57	2.28	2.57	2.25	2.59	2.22	2.60	2.24	2.56	2.24	2.57
4. ดัชนีการพัฒนากำลัง (SAI)													
ที่ 7 วัน (ร้อยละเทียบกับควบคุม)	100	78	55	77	46	75	44	78	58	79	54	78	51
ที่ 28 วัน (ร้อยละเทียบกับควบคุม)	100	82	60	80	55	84	54	85	60	80	62	80	57
5. ปริมาณน้ำที่ต้องการ (ร้อยละเทียบกับควบคุม)	100	102	106	102	106	102	106	102	106	102	106	102	106
6. ร้อยละค้างตะแกรง													
- 38 ไมโครเมตร	8.7	51.6	57.0	59.3	58.5	57.5	53.1	54.6	53.4	60.3	61.3	57.4	56.9
- 45 ไมโครเมตร	4.8	47.0	52.7	55.3	54.7	55	7	53.3	53.0	58.8	55.4	54.4	
- 90 ไมโครเมตร	0.2	31.5	25.3	41.2	27.5	42	1	30.7	20.9	45.2	30.8	39.9	[illegible]

ตารางที่ 5.2 สมบัติทางกายภาพและเคมีของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW) และกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW) กับหมายเหตุ ในการเก็บตัวอย่างผงฝุ่นทรายไส้แบบกระทำทุกๆ 2 เดือน เป็นระยะเวลา 1 ปี ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2546 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ. 2546

สารปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618-93 ที่ได้จากการประเมินจากการเก็บตัวอย่างในครั้งที่ 1

คุณสมบัติทางเคมี	วัสดุปอซโซลาน[1]	SSW	GSW

	N	F	C		
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$, min., %	70.0	70.0	50.0	93.47	83.06
Sulfer Trioxide (SO_3), max., %	4.0	5.0	5.0	0.05	0.02
Alkalis as Na_2O, Na_2O (%) + 0.658 K_2O (%), max., %	1.5	1.5	1.5	1.57	0.24
Loss on Ignition, max., %	10.0	6.0	6.0	0.87	1.00
คุณสมบัติทางกายภาพ	วัสดุปอซโซลาน[1]			SSW	GSW
	N	F	C		
Amount retained when wet sieved No. 325, max.,%	34	34	34	3.16	7.74
Water Requirement, max., %	115	105	105	102	106
Strength Activity Index					
At 7 days, min., %	75	75	75	78	55
At 28 days, min., %	75	75	75	82	60
Moisture Content, max., %	3.0	3.0	3.0	0.19	2.56

54

หมายเหตุ [1] จากมาตรฐาน ASTM C 618-93 ได้จัดประเภทของสารปอซโซลานไว้ 3 ประเภท คือ

ประเภท N คือ วัตถุดิบหรือสารปอซโซลานธรรมชาติที่มีส่วนประกอบของแคลเซียมและมีคุณสมบัติเป็นไปตามตารางที่ 5.2 ได้แก่ เชิร์ต (Cherts) ทัฟฟ์ (Tuffs) เป็นต้น

ประเภท F คือ เถ้าลอยปกติ (Fly Ash) ซึ่งได้จากการเผาถ่านหินจำพวกแอนทราไซด์ (Anthracite) หรือบิทูมินัส (Bituminous) และมีคุณสมบัติเป็นไปตามตารางที่ 5.2

ประเภท C คือ เถ้าลอยปกติ (Fly Ash) ซึ่งได้จากการเผาถ่านหินจำพวกลิกไนต์ (Lignite) หรือซับบิทูมินัส (Sub-bituminous) และมีคุณสมบัติเป็นไปตามตารางที่ 5.2

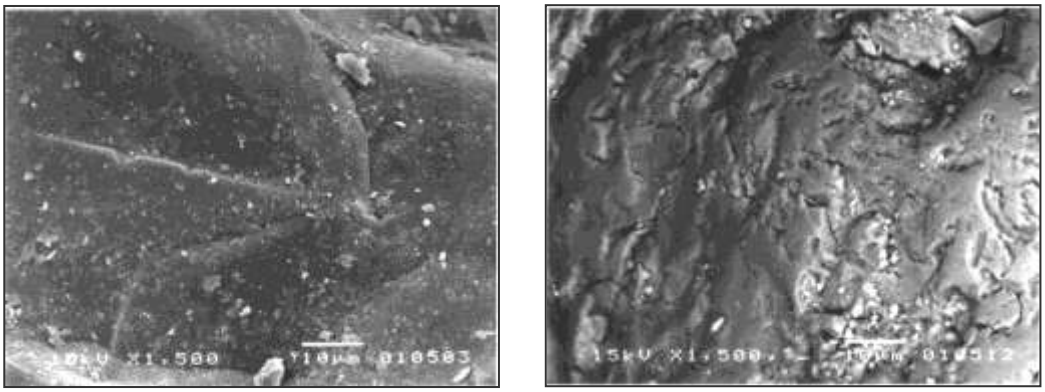
5.1.2 ลักษณะของอนุภาค

5.1.2.1 ทรายจากประเทศออสเตรเลีย (AUSTRALIA SAND)

จากลักษณะอนุภาคของทรายที่ใช้ทำแบบหล่อภายในและภายนอกซึ่งเข้าจากประเทศออสเตร-เลียด้วยเทคนิค SEM (**S**canning **E**lectron **M**icroscope) และ BEI (**B**ack **S**cattered **I**mage) ในภาพที่ 5.1(ก) และ 5.2(ก) พบว่าพื้นผิวของอนุภาคทรายมีลักษณะค่อนข้างเรียบ และจากภาพถ่าย BEI ในภาพที่ 5.1(ข) และ 5.2(ข) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ช่วยแยกความแตกต่างของธาตุที่อยู่ภายในวัสดุ โดยอาศัยหลักการสะท้อนของอิเล็คตรอนที่ตกกระทบธาตุที่เป็นองค์ประกอบในวัสดุ ซึ่งจะเห็นว่าสีของก้อนตัวอย่างเป็นสีเดียวกันแสดงว่าเป็นธาตุชนิดเดียวกัน

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

ภาพที่ 5.1 ลักษณะของอนุภาคทรายจากประเทศออสเตรเลีย โดยใช้เทคนิค
(ก) SEM ที่กำลังขยาย 150 เท่า และ (ข) BEI ที่กำลังขยาย 150 เท่า

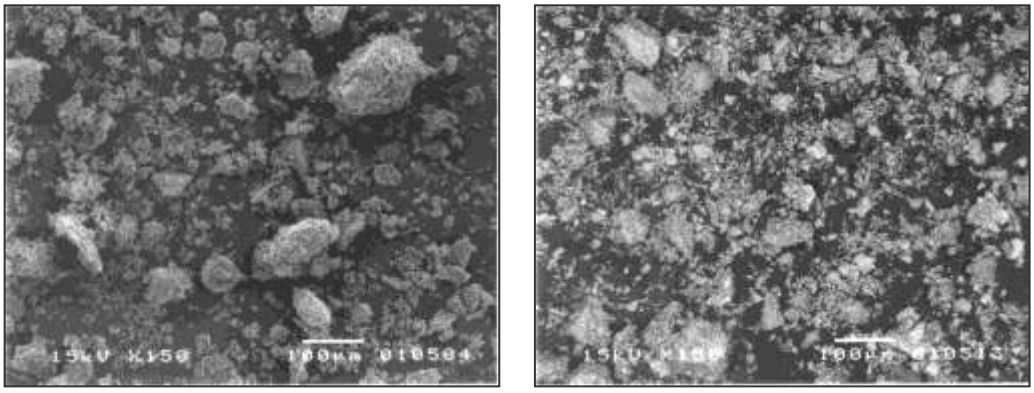


(ก) SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า (ข) BEI ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

ภาพที่ 5.2 ลักษณะของอนุภาคทรายจากประเทศออสเตรเลีย โดยใช้เทคนิค
(ก) SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า และ (ข) BEI ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

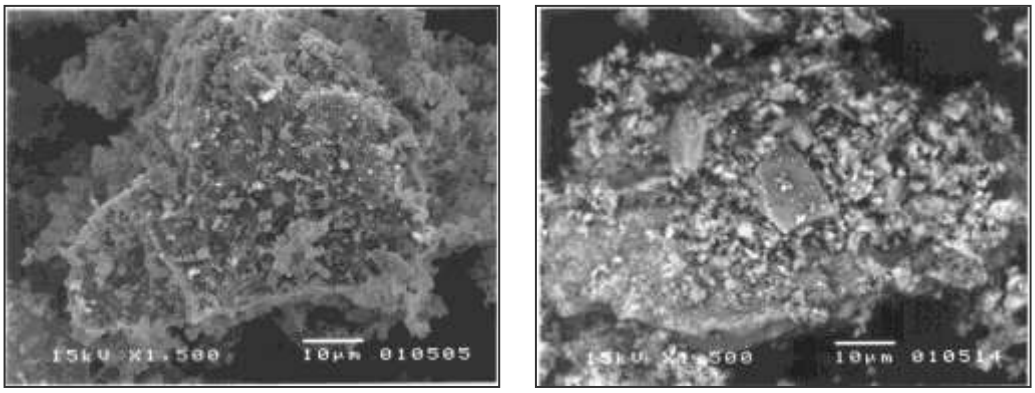
5.1.2.2 ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม Shell Sand Waste (SSW)

จากการทดสอบอนุภาค **S**hell **S**and **W**aste (SSW) ด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 150 เท่า ในภาพที่ 5.3(ก) พบว่าอนุภาคของทรายดังกล่าวจะเล็กกว่าทรายจากประเทศออสเตรเลีย อันเนื่องมาจากในกระบวนการทำแบบหล่อและเทส่วนผสมจากเตาหลอม ทรายดังกล่าวจะได้รับความร้อนถึง 600 องศาเซลเซียส อันจะส่งผลให้พันธะภายในถูกทำงานทำให้อนุภาคแตกออกเป็นชิ้นเล็กลงและพื้นผิวของอนุภาคจากกำลังขยาย 1,500 เท่า ในภาพที่ 5.3(ข) อนุภาคผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW มีความขรุขระเพิ่มขึ้นและมีเป็นเหลี่ยมมุมกว่าทรายวัตถุดิบอันมีผลต่อความต้องการน้ำที่เพิ่มขึ้น เนื่องพื้นผิวที่ขรุขระเป็นเหลี่ยมมุมจะทำให้การดูดซับน้ำดีกว่าอนุภาคเรียบ และเมื่อใช้เทคนิค BEI พบว่าอนุภาคมีสีเข้มมากกว่าที่เป็นสีขาว ดังภาพที่ 5.4 ซึ่งโดยหลักการของเทคนิคนี้จะพบว่าเมื่ออิเล็คตรอนพุ่งชนธาตุที่น้ำหนักอะตอมสูงในวัสดุจะทำให้อิเล็คตรอนสะท้อนกลับได้เร็วและมีจำนวนที่เครื่องดักจับไว้มีจำนวนมากขึ้น จึงให้สีของอนุภาคออกมาเป็นสีขาว ในขณะที่ธาตุที่มีน้ำหนักอะตอมน้อยอิ-เล็คตรอนจะสะท้อนกลับไปยังเครื่องดักจับน้อยจึงให้สีออกมาเป็นสีเทา



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

ภาพที่ 5.3 ลักษณะของอนุภาคทรายจากกลุ่ม SSW โดยใช้เทคนิค
(ก) SEM ที่กำลังขยาย 150 เท่า และ (ข) BEI ที่กำลังขยาย 150 เท่า



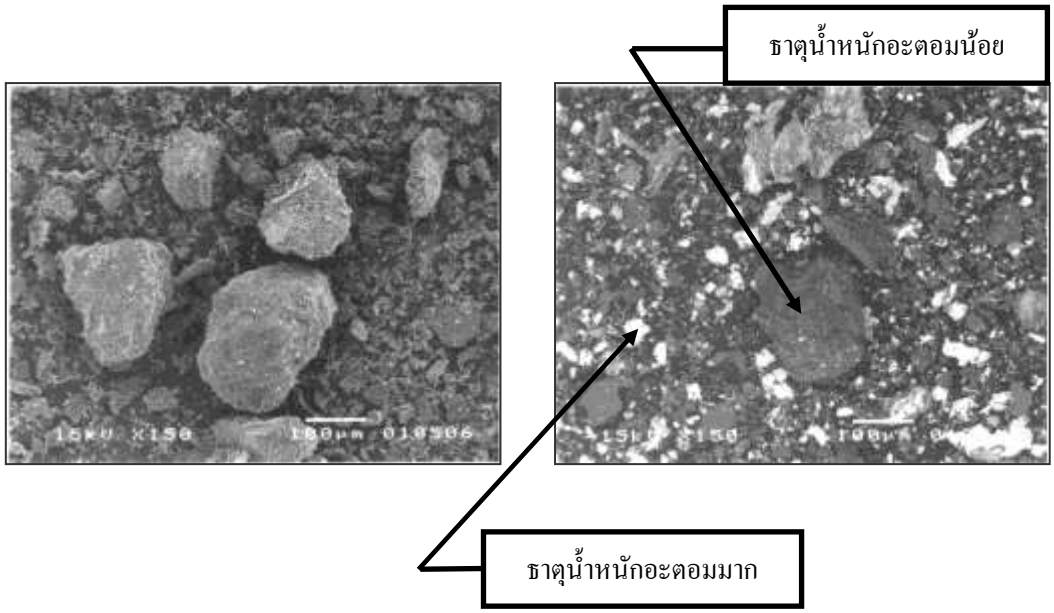
(ก) SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า (ข) BEI ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

รูปที่ 5.4 ลักษณะของอนุภาคผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW โดยใช้เทคนิค
(ก) SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า และ (ข) BEI ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

5.1.2.3 ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม Green Sand and Molding Waste (GSW)

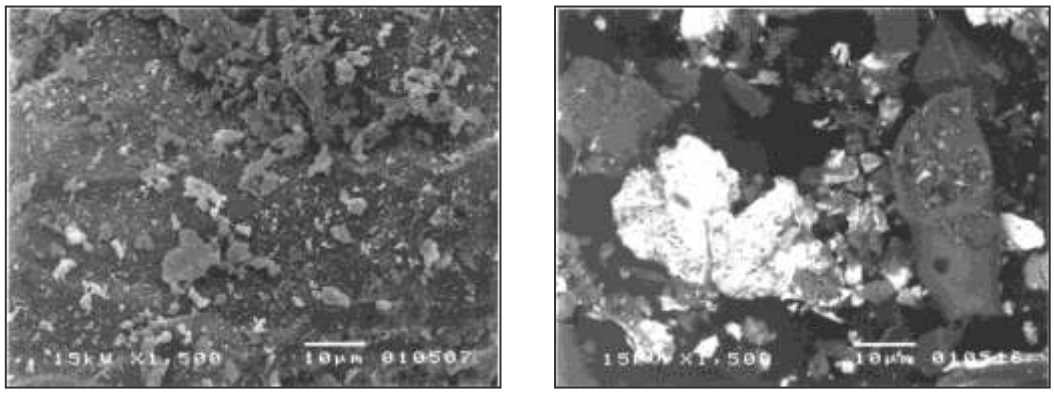
ด้วยเทคนิคเดียวกันกับที่ใช้ในผงฝุ่นทรายไส้แบบสองกลุ่มข้างต้น พบว่าผงฝุ่นทรายไส้แบบในกลุ่มนี้จะมีขนาดเล็กกว่าทรายจากประเทศออสเตรเลียอันแสดงว่าอนุภาคทรายมีการแตกออกเป็นชิ้นเล็กลงมากกว่า SSW อันเนื่องจากในกระบวนการทำแบบหล่อทรายดังกล่าวต้องผ่านอุณหภูมิถึง 1,400 องศาเซลเซียส ซึ่งมากกว่า SSW ทำให้ผงฝุ่นทรายไส้แบบมีสีคล้ำออกเทาจนถึงเป็นสีทรายไหม้และพื้นผิวมีความขรุขระ ดังแสดงในภาพที่ 5.5(ก) และ 5.6(ก) ตามลำดับ แต่จาก

การทดสอบโดย BEI จะพบว่าปริมาณของส่วนที่เป็นสีขาวมีปริมาณมากกว่าที่มีใน SSW อันบ่งชี้ว่าในผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW เมื่อผ่านกระบวนการทำแบบหล่อภายนอกจะมีปริมาณของโลหะหนักมากกว่าผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW



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

ภาพที่ 5.5 ลักษณะของอนุภาคผงฝุ่นทรายไส้แบบจากกลุ่ม GSW โดยใช้เทคนิค
(ก) SEM ที่กำลังขยาย 150 เท่า และ (ข) BEI ที่กำลังขยาย 150 เท่า

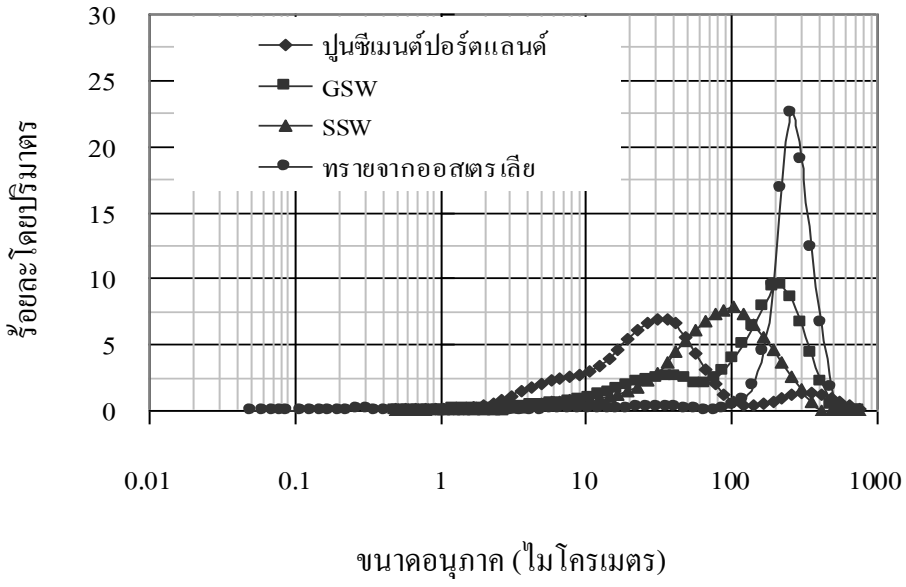


(ก) SEM ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า (ข) BEI ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

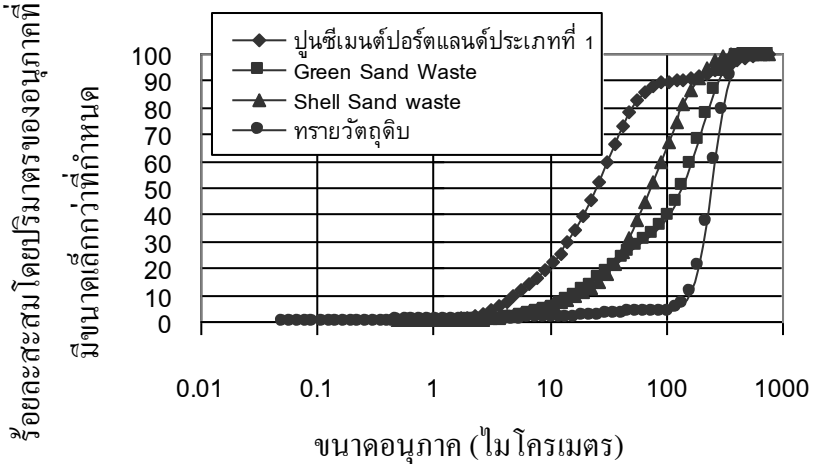
ภาพที่ 5.6 ลักษณะของอนุภาคผงฝุ่นทรายไส้แบบจากกลุ่ม GSW โดยใช้เทคนิค
(ก) SEM ที่กำลังขยาย 150 เท่า และ (ข) BEI ที่กำลังขยาย 150 เท่า

5.1.3 การกระจายขนาดคละของอนุภาคผงฝุ่นทรายไส้แบบ

ผลการทดสอบการกระจายขนาดคละของอนุภาคของปูนซีเมนต์และผงฝุ่นทรายไส้แบบทั้งกลุ่ม **S**hell **S**and **W**aste (SSW) และ **G**reen **S**and and Molding **W**aste (GSW) แสดงในภาพที่ 5.7 และ 5.8 พบว่าขนาดอนุภาคของทรายวัตถุดิบที่นำเข้าจากประเทศออสเตรเลีย ผงฝุ่นทรายไส้แบบชนิด SSW และ GSW มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 283.69, 102.85 และ 165.41 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (63.44 ไมโครเมตร) และจะเห็นว่าทรายวัตถุดิบจะมีอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 100 ถึง 1000 ไมโครเมตร แต่เมื่อผ่านกระบวนการทำทรายไส้แบบแล้วได้ผงฝุ่นทรายไส้แบบเป็นของเหลือทิ้งจะพบว่าตั้งแต่ช่วงอนุภาคใหญ่กว่า 40 ไมโครเมตร ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW จะมีค่าขนาดใหญ่กว่าผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในขณะที่ขนาดอนุภาคของผงฝุ่นทรายไส้แบบทั้งสองกลุ่มในช่วงที่เล็กกว่า 40 ไมโครเมตร มีค่าไม่แตกต่างกัน



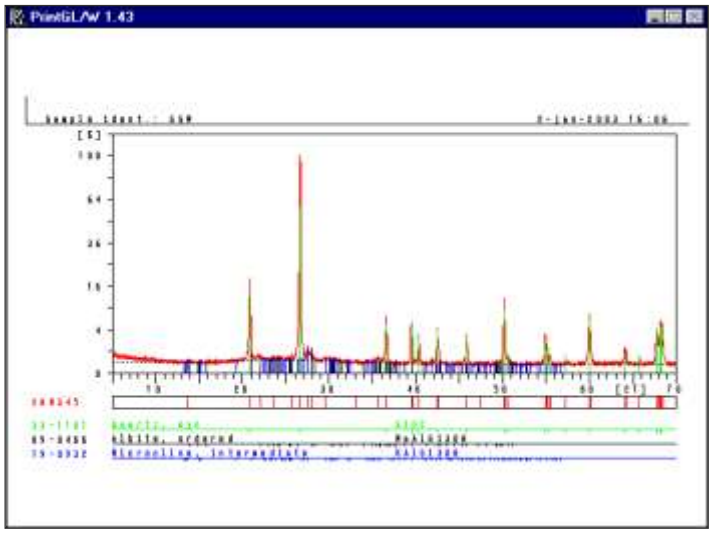
ภาพที่ 5.7 การกระจายขนาดคละของอนุภาคผงฝุ่นทรายไส้แบบเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



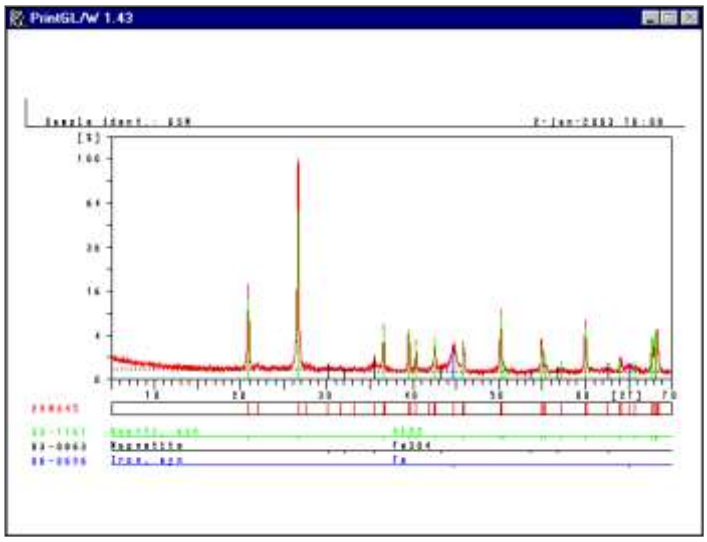
ภาพที่ 5.8 การกระจายขนาดคละสะสมของอนุภาคผงฝุ่นทรายไส้แบบเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

5.1.4 ความเป็นผลึกของอนุภาค

ผลจากการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของผงฝุ่นทรายไส้แบบทั้ง **S**hell **S**and **W**aste (SSW) และ **G**reen **S**and and Molding **W**aste (GSW) ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction แสดงในภาพที่ 5.9 และ 5.10 ตามลำดับ พบว่าผงฝุ่นทรายไส้แบบทั้งสองชนิดมีส่วนประกอบที่ชัดเจนเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ ในขณะที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบชนิด GSW จะมีไอรอนออกไซด์และเหล็กเป็นองค์ประกอบเพิ่มเติม



ภาพที่ 5.9 ผลการตรวจวัดความเป็นผลึกด้วยด้วยรังสี X-Ray ของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW



ภาพที่ 5.10 ผลการตรวจวัดความเป็นผลึกด้วยด้วยรังสี X-Ray ของผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW

5.1.5 การนำผงฝุ่นทรายไส้แบบไปใช้เป็นส่วนประกอบของคอนกรีต

จากผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของผงฝุ่นทรายไส้แบบทั้งกลุ่ม SSW และ GSW พบว่าผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW มีศักยภาพในการนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้บางส่วน (Using as Partially Cement Replacement) โดยพิจารณาจากหลักเกณฑ์ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete) ที่กำหนดองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพไว้กล่าวคือ ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่มดังกล่าวมีสัดส่วนขององค์ประกอบเคมีอาทิเช่น ปริมาณซิลิคอนออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์และไอออนออกไซด์ $(SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3)$ เกินกว่าร้อยละ 75 โดยมีค่าถึงร้อยละ 93.47 ในขณะที่องค์ประกอบอื่นไม่เกินกว่าข้อกำหนด และในส่วนของดัชนีพัฒนากำลัง (Strength Activity Index) และความต้องการน้ำ (Water Requirement) มีค่าเป็นไปตามมาตรฐาน รวมทั้งค่าของความคงตัว (Soundness) โดยวิธีการวัดค่าการขยายตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ผ่านการเร่งด้วยเทคนิคออโตเคล์ฟตามมาตรฐาน ASTM C 150 (Standard Test Method for Autoclave Expansion of Portland Cement) ซึ่งเป็นดัชนีที่ใช้แสดงศักยภาพในการขยายตัวในระยะยาวอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) หรือแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) แสดงในตารางที่ 5.3 ซึ่งพบว่ามีค่าไม่เกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด (ค่าการขยายตัวไม่เกินร้อยละ 0.8) โดยในการศึกษานี้ได้ทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในสัดส่วนไม่เกินร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

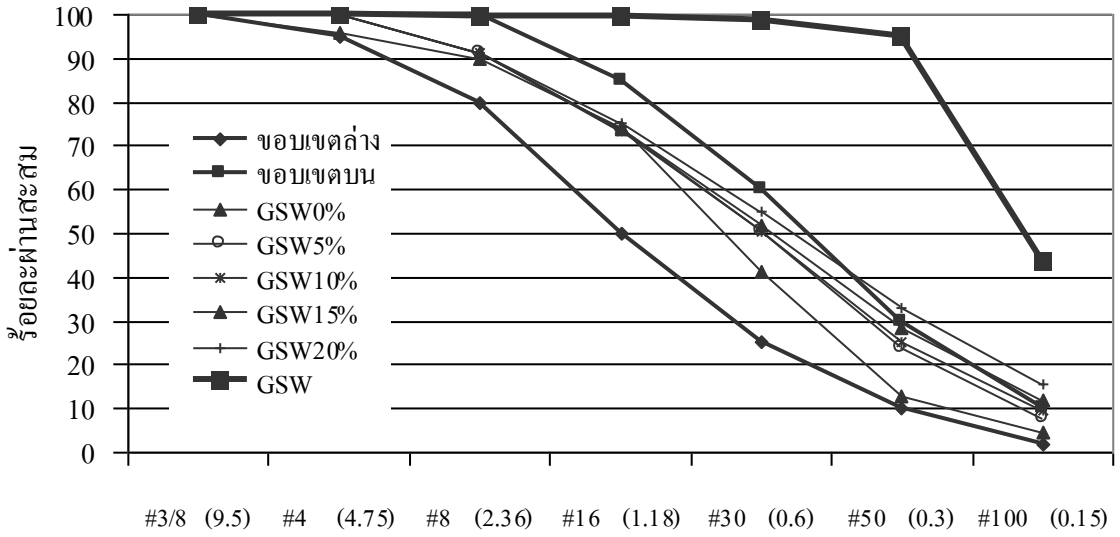
ตารางที่ 5.3
ค่าการขยายตัวของเพสต์ซีเมนต์ที่ผ่านการเร่งด้วยเทคนิคออโตเคล์ฟ

การแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบทั้งกลุ่ม SSW ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนัก (ร้อยละ)	การขยายตัว (ร้อยละ)
0 (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์)	0.00
10	0.00
20	0.01
30	0.01
40	0.01

สำหรับผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ที่ไม่ผ่านข้อกำหนดได้ปรับมาใช้ในการแทนที่ในมวลรวมละเอียด (ทรายธรรมชาติ) ดังนั้นจึงนำมาตรฐานของมวลรวมละเอียด (ASTM C 33 (Standard Specification for Concrete Aggregates)) มาพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

1. ขนาดคละ (Gradation)

จากผลการทดสอบหาการกระจายขนาดคละด้วยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/8, 4, 8, 16, 30, 50 และ100 ของทรายธรรมชาติ (GSW0%) พบว่าการกระจายอยู่ภายในขอบเขตตามมาตรฐาน (พิจารณาจากขอบเขตบนและล่าง) ในขณะที่เมื่อทำการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW โดยน้ำหนัก ที่ร้อยละ 5 (GSW5%), 10 (GSW10%), 15 (GSW15%) และ 20 (GSW20%) จะมีผลทำให้การกระจายขนาดคละของมวลรวมผสมเปลี่ยนแปลง โดยการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW โดยน้ำหนัก ที่ร้อยละ 20 ทำให้การกระจายขนาดคละเกินกว่าข้อกำหนดตามมาตรฐานกล่าวคือ มีปริมาณร้อยละผ่านที่ตะแกรงเบอร์ 50 และ 100 มากกว่าที่กำหนด (ไม่เกินร้อยละ 10 ถึง 30 สำหรับตะแกรงเบอร์ 50 และไม่เกินร้อยละ 2 ถึง 10 สำหรับตะแกรงเบอร์ 50) นอกจากนั้นจากกราฟความสัมพันธ์ของมวลรวมผสมของทรายธรรมชิติและผงฝุ่นทรายแบบกลุ่ม GSW สามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ ในช่วงตะแกรงเบอร์ 3/8 ถึง 16 พบว่าเมื่อสัดส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไม่มีผลกระทบต่อการกระจายขนาดคละ ในขณะที่ช่วงตะแกรงเบอร์ 16 ถึง 100 จะเห็นการเปลี่ยนแปลงของขนาดคละของมวลรวมผสมอย่างชัดเจน อันเป็นผลเนื่องมาจากขนาดอนุภาคของผงฝุ่นทรายไส้แบบส่วนใหญ่มีขนาดเล็ก



เบอร์ของตะแกรง (ขนาดของช่องเปิด (Opening) หน่วยเป็น มิลลิเมตร)

ภาพที่ 5.11 การกระจายขนาดคละของทรายธรรมชาติและที่ผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW

2. ปริมาณของอนุภาคที่ขนาดเล็กกว่าขนาดตะแกรงเบอร์ 200 (75 ไมโครเมตร) จะต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 3.0 โดยจากการทดสอบด้วยการร่อนผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW ผ่านตะแกรง พบว่าปริมาณของอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.95

3. ค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) ซึ่งเป็นดัชนีที่เป็นปฏิภาคโดยประมาณกับขนาดเฉลี่ยของก้อนวัสดุในมวลรวม โดยในมาตรฐานได้กำหนดค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียดจะต้องมีอยู่ในช่วง 2.3 ถึง 3.1 ซึ่งผลจากการทดสอบแสดงในตารางที่ 5.4 พบว่ามีค่าอยู่ในเกณฑ์

ตารางที่ 5.4

ค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) ของมวลรวมผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW

ร้อยละการแทนที่ของผงฝุ่นทรายไส้แบบทั้งกลุ่ม SSW ในทรายธรรมชาติประเภทที่ 1 โดยน้ำหนัก	โมดูลัสความละเอียด (F.M.)
0 (ทรายธรรมชาติ)	2.81
5	2.53
10	2.50
15	2.43
GSW	1.40

4. ปริมาณของอัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมออกไซด์เทียบเท่า ($Na_2O_e, Na_2O + 0.658K_2O$) ในมวลรวมละเอียดจะต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 0.60 โดยจากทดสอบและแสดงผลในตารางที่ 5.2 พบว่าผงฝุ่นทรายไส้แบบกลุ่ม GSW มีค่าร้อยละ 0.24

ดังนั้นในการศึกษานี้จึงทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายไส้แบบในทรายธรรมชาติในสัดส่วนไม่เกินร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก กล่าวคือ ทำการแทนที่ที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 ตามลำดับ

5.1.6 รายละเอียดการผสมคอนกรีตผสมเสร็จ (Ready-mixed Concrete) ผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบ

กระบวนผลิตคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบแสดงในภาพที่ 5.12 โดยทำการผสมคอนกรีตที่โรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จของบริษัท เอเซียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัด (ภาพ (ก)) โดยมีกระบวนการเริ่มจากการชั่งผงฝุ่นทรายไส้แบบซึ่งมีทั้งกลุ่ม SSW (แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ต-แลนด์ประเภทที่ 1) หรือ GSW (แทนที่ในทรายธรรมชาติ) ตามสัดส่วนของคอนกรีตที่ได้ออกแบบไว้ (ภาพ (ข)) จากนั้นจึงนำผงฝุ่นทรายไส้แบบขึ้นไปยังเครื่องผสมคอนกรีต (ภาพ (ค)) และเริ่มทำการผสมด้วยระบบอัตโนมัติซึ่งควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ในการชั่งส่วนผสมและเวาในการผสม โดยใช้เวลาในการผสมเท่ากับคอนกรีตปกติคือ ใช้เวลาประมาณ 5 นาที ต่อไปจึงเริ่มปล่อยคอนกรีตผสมเสร็จจากเครื่องผสมลงบนรถขนย้ายคอนกรีต จากนั้นรถขนย้ายคอนกรีตจะวิ่งไปยังส่วนปฏิบัติการทดสอบคุณภาพของคอนกรีตซึ่งอยู่ในบริเวณโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จแล้วจึงเทตัวอย่างคอนกรีตสดปริมาณที่เพียงพอต่อการทำการทดสอบหาค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) ลงรถเข็น (ภาพ (ง)) ซึ่งกำหนดไว้เท่ากับ 5 ± 0.5, 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม. ตามลำดับ (ภาพ (จ)) สำหรับกรณีที่ค่าการยุบตัวของคอนกรีตไม่ได้ตามที่กำหนดจึงส่งคนขึ้นไปเติมน้ำเพิ่มเติม (ภาพ (ฉ)) เพื่อปรับค่าการยุบตัวของคอนกรีตและทำการเดินเครื่องโม่หมุนเป็นเวลา 5 นาที เสร็จแล้วจึงทำการตรวจสอบหาค่าการยุบตัวอีกครั้ง (ภาพ (ช)) หากค่าการยุบตัวไม่ได้ตามกำหนดจะดำเนินการเพิ่มปริมาณน้ำและทำตามกระบวนการเดิมจนกว่าจะได้ค่าการยุบตัวตามที่กำหนด เมื่อค่าการยุบตัวมีค่าตามกำหนดแล้วจึงนำคอนกรีตที่ได้มาทำการทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักในสภาพสด (Unit Weight) (ภาพ (ซ)) และบรรจุลงแบบหล่อที่จัดเตรียมไว้ (ภาพ (ฌ)) เมื่อครบที่อายุ 1 วัน นับจากการผสมจึงทำการถอดแบบ (ภาพ (ญ)) และนำไปทำการบ่มในน้ำจนกระทั่งถึงอายุที่ทำการทดสอบ (ภาพ (ฏ))

(ก) โรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ

(ข) การชั่งตวงผงฝุ่นทรายไส้แบบ

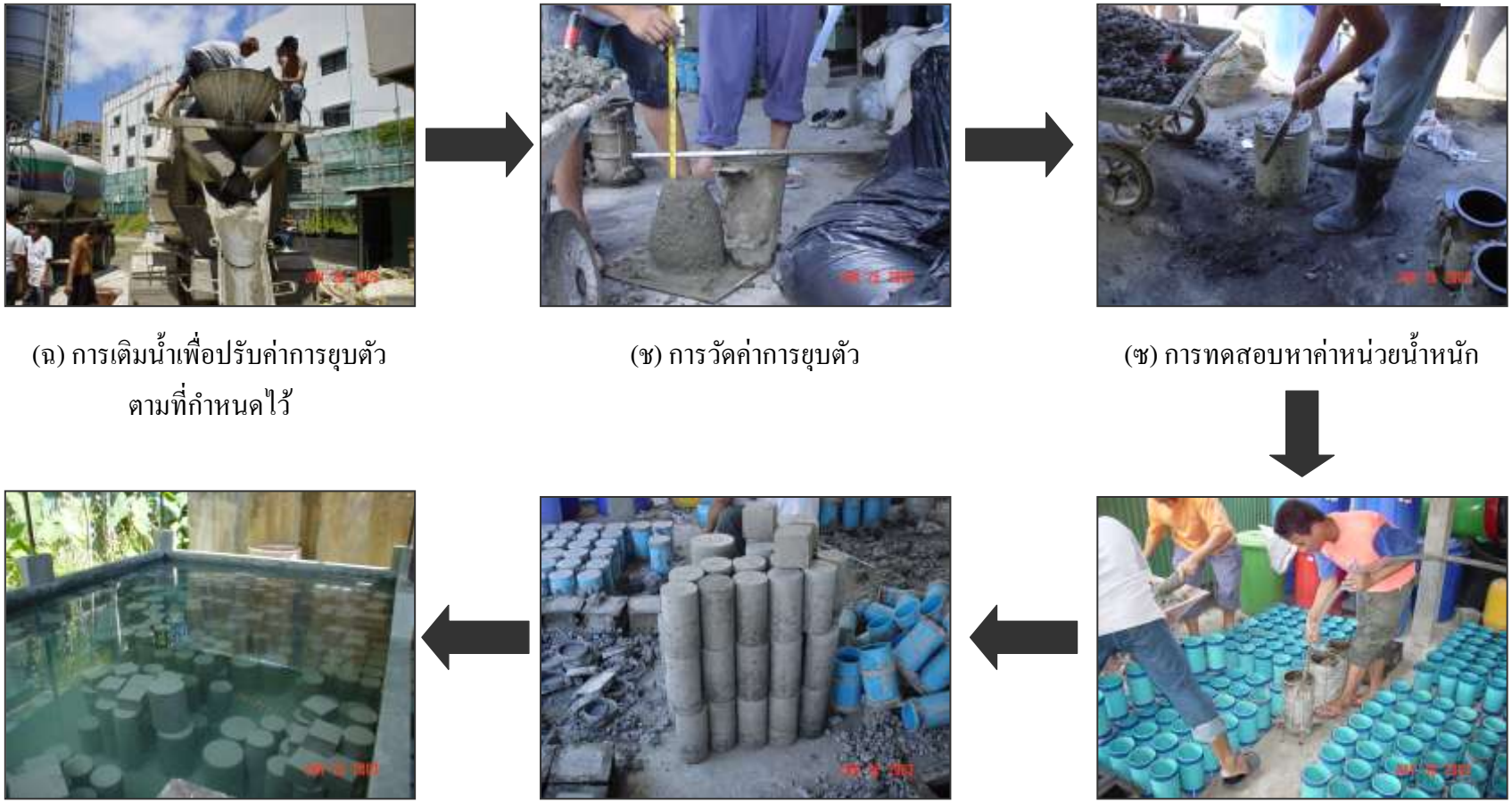
(ค) เครื่องผสมคอนกรีตผสมเสร็จ

(ง) การเทคอนกรีตออกจากรถผสม

(จ) การทดสอบค่าการยุบตัว

(ฉ) การเติมน้ำเพื่อปรับค่าการยุบตัว
ตามที่กำหนดไว้

ภาพที่ 5.12 กระบวนผลิตคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบ



(ฉ) การเติมน้ำเพื่อปรับค่าการยุบตัว ตามที่กำหนดไว้

(ช) การวัดค่าการยุบตัว

(ซ) การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนัก

(ฌ) การใส่คอนกรีตลงในแบบหล่อ

(ญ) คอนกรีตที่ถอดแบบเรียบร้อย

(ฎ) การบ่มคอนกรีตในน้ำ

ภาพที่ 5.12 (ต่อ) กระบวนผลิตคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงฝุ่นทรายไส้แบบ