

อิทธิพลของผงฝุ่นทรายได้แบบจากการหล่อชิ้นส่วนเครื่องยนต์ต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จ

Influence of Foundry Sand Powder from Automobile Engine Casting on
Properties of Ready-mixed Concreteณรงค์ศักดิ์ มากุล^[1] และ นุรฉัตร นัทรวิระ^[2]^[1] วิศวกร, บริษัท เอเชียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัด และ บริษัท ชลประทานคอนกรีต จำกัด, ซอยศูนย์วิจัย ถนนพระรามที่ 9

แขวงบางกะปิ เขตห้วยขวาง กรุงเทพฯ 10320 โทรศัพท์: 0-2641-5600 ต่อ 1523

^[2] รองศาสตราจารย์ ดร., ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12121

โทรศัพท์: 0-2564-3001-9 ต่อ 3105 โทรสาร: 0-2564-3010

E-mail: ^[1] shinomomo7@hotmail.com and ^[2] cburacha@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ:

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จผสมผงฝุ่นทรายได้แบบซึ่งเป็นผลพลอยหลักที่ได้จากกระบวนการหล่อชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ โดยคุณสมบัติที่ศึกษาได้แก่ กำลังอัด การหดตัวแบบแห้งและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกักตัวของกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ซึ่งมีความเข้มข้นเท่ากับ 1.0 นอร์มอลลิตี (N) โดยคอนกรีตผสมเสร็จที่ใช้มีสัดส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับ 300, 350 และ 400 กก./ม.³ และค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5.0 ± 0.5 , 10.0 ± 0.5 และ 15.0 ± 0.5 ซม. ตามลำดับ จากผลการทดสอบ พบว่าอัตราส่วนการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้คอนกรีตมีค่ากำลังอัดช่วงต้นลดลง อย่างไรก็ตาม คอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายได้แบบมีอัตราการพัฒนากำลังอัดในช่วงหลังสูงกว่าคอนกรีตปกติ ส่วนการหดตัวแบบแห้งมีค่าลดลง ในขณะที่ความต้านทานต่อการกักตัวของกรดซัลฟิวริกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ

Abstract:

The objective of this research was to study the properties of ready-mixed concrete containing foundry sand powder which was a main by-product from the automobile engine casting process. The studied properties were the compressive strength, drying shrinkage and weight loss in sulfuric acid (H_2SO_4). The concentration of acid was 1.0 Normality (N). The main variables were the percentage replacements of foundry sand by weight of ordinary Portland cement type I (0%, 10%, 20%, 30%, and 40%). In addition, the ordinary Portland cement type I contents of 300, 350, and 400 kg/m³ and the initial slump of concrete

equals 5.0 ± 0.5 , 10.0 ± 0.5 , and 15.0 ± 0.5 centimeters were controlled.

The test results showed that when the replacements of foundry sand powder in Portland cement type I increased, the early age compressive strength decreased, however, the rates of long term compressive strength development of SSW concrete higher than those of the normal concrete. The drying shrinkage decreased, whereas the resistance against acid attack of concrete increased when compared with those of the normal concrete.

1. บทนำ

ด้วยกลไกของภาคอุตสาหกรรมซึ่งประกอบด้วยกระบวนการเปลี่ยนวัตถุดิบให้เป็นสินค้าออกมา แต่สิ่งที่เป็นปัญหาในกระบวนการผลิตคือของเสีย ดังเช่น อุตสาหกรรมการหล่อชิ้นส่วนเครื่องยนต์ซึ่งมีของเสียจากกระบวนการผลิตอยู่หลายประเภทและมีปริมาณในแต่ละปีที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งหากมีระบบการจัดการไม่ดีพอจะทำให้เกิดปัญหาตามมา ยกตัวอย่าง ในกรณีของบริษัท สยามโตโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด ซึ่งในปีที่ผ่านมา มีของเสียจากกระบวนการหล่อเครื่องยนต์เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากและต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียซึ่งเกือบทั้งหมดมีลักษณะเป็นฝุ่นผงเช่น ผงฝุ่นทรายได้แบบ (Foundry Sand Powder) จนถึงเป็นก้อนขนาดใหญ่ เช่น ตะกรันจากเตาหลอมโลหะ (Slag) ผงเหล็ก (Steel Powder) เป็นต้น โดยปัจจุบันทางบริษัทได้ใช้วิธีการกำจัดของเสียจำพวกทรายจากกระบวนการผลิตโดยนำเข้ากระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ผ่านบริษัทผลิตปูนซีเมนต์ แต่ทั้งนี้การนำของเสียไปกำจัดด้วยวิธีดังกล่าวก็ยังคงต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัด ดังนั้นจึงได้ริเริ่มสร้างแนวทางในการนำของเสียจากบริษัทดังกล่าวกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ให้งานคอนกรีตผ่านอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพในการใช้ของเสียหลายๆ ชนิด เช่น เถ้าลอย (Fly Ash) จากโรงผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินลิกไนต์มาใช้เป็นวัตถุดิบใน

การผลิต แต่การนำของเสียมาใช้ต้องพิจารณาในเรื่องของการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตที่ดีขึ้นตามไปด้วย

สำหรับกระบวนการหล่อชิ้นส่วนเครื่องดนตรีในส่วนของขั้นตอนการเตรียมทรายเพื่อให้ได้แบบภายใน (Shell Sand) เริ่มจากนำทรายมาทำให้แห้งโดยเข้าเตาอบ (Furnace) และแยกให้ได้ทรายละเอียด จากนั้นนำมาผสมเรซิน (Phenolic Resin) เฮกซามีน และแคลเซียมเพื่อให้ทรายยึดเกาะกันได้ดีและจับตัวกันแน่น โดยหลังจากการเทน้ำเหล็กและปล่อยให้เย็นตัวลงจึงทำการเคาะแบบหล่อออก ทรายที่มีลักษณะเป็นฝุ่นผงจะถูกคัดจับด้วยเครื่องไซโคลนเก็บไว้

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการนำทรายได้แบบที่ผ่านการใช้งานและมียาค่าความถ่วงจำเพาะและค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) มีค่าในช่วง 2.35 ถึง 2.60 และ 1.70 ถึง 1.90 ตามลำดับ มาใช้แทนที่ในมวลรวมละเอียดบางส่วนเพื่อใช้เป็นวัสดุฉนวนในการผลิตคอนกรีตได้ [1] โดยคอนกรีตที่ผสมทรายได้แบบที่ผ่านการใช้งานมีกำลังอัด กำลังดึงและโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน ต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมทรายได้แบบที่ไม่ผ่านการใช้งานร้อยละ 20 ถึง 30 [2] นอกจากนี้ทรายได้แบบจากกระบวนการหล่อโลหะยังนำมาใช้ในการควบคุมกำลังของคอนกรีตที่มีกำลังต่ำ โดยทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตสดมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของทรายได้แบบที่เพิ่มขึ้น [3,4,5] ซึ่งจะเห็นว่าในปัจจุบันยังไม่มีงานวิจัยมากพอที่จะบ่งชี้ถึงการนำทรายได้แบบกลับมาใช้งาน โดยเฉพาะการนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ (จากการทดสอบเบื้องต้น พบว่าค่าดัชนีกำลังโดยการแทนที่ผงฝุ่นทรายได้แบบในปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ได้ค่าดัชนีกำลังมากกว่าร้อยละ 75 (ASTM C 618) [6])

2. ขอบเขตของการศึกษา

งานวิจัยนี้มีขอบเขตดังต่อไปนี้

2.1 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา คือ ปริมาณการแทนที่ของผงฝุ่นทรายได้แบบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

2.2 คอนกรีตผสมเสร็จจากโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จมีข้อกำหนดดังต่อไปนี้

2.2.1 คอนกรีตปกติที่ไม่ใส่สารเคมีผสมเพิ่ม

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

2.2.3 ค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตเท่ากับ 5.0 ± 0.5 ซม., 10.0 ± 0.5 ซม. และ 15.0 ± 0.5 ซม.

3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.1 ปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.1.2 ผงฝุ่นทรายได้แบบที่ใช้ เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการหล่อชิ้นส่วนภายใน (Shell Sand) จากจังหวัดชลบุรี

3.1.3 น้ำ ใช้ น้ำประปา

3.1.4 ทราย ทรายที่ใช้เป็นทรายแม่น้ำที่มีขนาดละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C 33 [7]

3.1.5 หิน เป็นหินปูนมีขนาดใหญ่สุด 25 มม. และขนาดละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C 33 [7]

3.2 วิธีการทดสอบ

3.2.1 กำลังอัดของคอนกรีต โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. โดยทำการหล่อ 3 ตัวอย่างต่อหนึ่งสัดส่วนผสม หลังจากถอดแบบที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำไปทำการบ่มในน้ำจนถึงเวลาทดสอบที่ 3, 7, 28, 60, 90 และ 120 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C 39 [8]

3.2.2 การหาค่าความยาวโดยทำการผสมคอนกรีตแล้วนำมาเทลงแบบหล่อขนาด $75 \times 75 \times 285$ มม. ถอดแบบที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน ระหว่างนั้นให้นำมาวัดด้วยเครื่อง Digital Length Comparator ทุกๆ 3 วัน เมื่อครบกำหนด 28 วัน ให้นำขึ้นจากน้ำมาบ่มในตู้บ่มที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 60 ± 5 ทำการวัดเช่นเดียวกับขณะที่ทำการบ่มในน้ำ โดยความยาวเริ่มต้น (L_0) คือ ความยาวหลังจากบ่มน้ำที่ 28 วัน และความยาวของแท่งตัวอย่าง ณ วันที่ทำการวัดต่อไป (L_t) แล้วจึงนำค่าดังกล่าวมาคำนวณหาความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม ดังสมการที่ (1) ทำการวัด จนกระทั่งความยาวที่เปลี่ยนไปมีแนวโน้มคงที่

$$\text{Length Change} = \frac{L_t - L_0}{L_0} \quad (1)$$

3.2.3 ความทนทานการกัดกร่อนโดยกรดซัลฟูริก โดยผสมคอนกรีตแล้วนำมาเทลงแบบหล่อลูกบาศก์ขนาด $10 \times 10 \times 10$ ซม. ถอดแบบหล่อเมื่อคอนกรีตมีอายุ 1 วัน จึงนำไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นจึงนำคอนกรีตมาฝั่งจนมีน้ำหนักคงที่แล้วจึงนำมาชั่งหาน้ำหนักเริ่มต้น จากนั้นนำไปแช่ในสารละลายกรดที่มีความเข้มข้น 1.0 นอร์มอลิตี (N) เมื่อแช่ครบที่อายุ 7, 28, 60, 90 และ 120 วัน ตามลำดับ จึงนำมาชั่งน้ำหนักตัวอย่างคอนกรีตแล้วชั่งน้ำหนักที่เหลืออยู่ แล้วนำมาคำนวณหาร้อยละของการสูญเสีย น้ำหนักเปรียบเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น

3.3 สัดส่วนของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวอย่างสัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบแสดงในตารางที่ 1 สำหรับสัดส่วนคอนกรีตอื่นๆ สามารถดูได้จากเอกสารอ้างอิง [9]

ตารางที่ 1 ตัวอย่างสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบหน่วย
เป็น กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์	ผงฟูทราย ไร้แบบ	น้ำ	ทราย ปกติ	หิน
300(10)SSW0	300	0	251	840	1195
300(10)SSW10	270	30	253	840	1195
300(10)SSW20	240	60	254	840	1195
300(10)SSW30	210	90	255	840	1195
300(10)SSW40	180	120	255	840	1195
350(10)SSW0	350	0	218	810	1165
350(10)SSW10	315	35	219	810	1165
350(10)SSW20	280	70	220	810	1165
350(10)SSW30	245	105	220	810	1165
350(10)SSW40	210	140	221	810	1165
400(10)SSW0	400	0	226	740	1160
400(10)SSW10	360	40	226	740	1160
400(10)SSW20	320	80	227	740	1160
400(10)SSW30	280	120	227	740	1160
400(10)SSW40	240	160	228	740	1160

หมายเหตุ X(Y)SSWZ คือ คอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดปริมาณปูนซีเมนต์
เท่ากับ X กก./ม.³ และค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ Y $\pm$ 0.5 ซม. และทำการ
แทนที่ผงฟูทรายไร้แบบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ Z โดยน้ำหนัก

4. ผลการทดสอบ

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของผงฟูทรายไร้แบบ

4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของผงฟู ทรายไร้แบบปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 2 พบว่าผงฟูทรายไร้แบบมี
องค์ประกอบหลักเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) สูงถึงร้อยละ 88
ในขณะที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) น้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

เมื่อพิจารณาการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) ของ
ผงฟูทรายไร้แบบที่มาจากกระบวนการผลิตแบบหล่อภายใน ทรายที่ใช้
จะได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส ทำให้สาร
ผสมเพิ่มจำพวกเรซินและแคลเซียมที่ใส่เข้าไปเพื่อปรับปรุงคุณภาพของ
ไร้แบบหล่อยังคงตกค้างอยู่ ในขณะที่พื้นที่ผิวจำเพาะในรูปของค่าความ
ละเอียดด้วยวิธีเบลน ของผงฟูทรายไร้แบบมีค่าสูงกว่าความละเอียด
ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

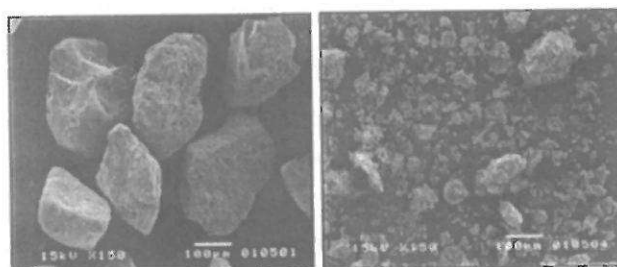
จากหลักเกณฑ์การประเมินศักยภาพของผงฟูทรายไร้แบบที่จะ
นำมาใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้บางส่วน โดยใช้ดัชนีกำลังที่
อายุ 7 และ 28 วัน พบว่าผงฟูทรายไร้แบบมีค่าดัชนีร้อยละ 78.3 ที่อายุ 7
วัน ในขณะที่อายุ 28 วัน มีค่าร้อยละ 81.7

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของ
ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และผงฟูทรายไร้แบบ

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	LOI
ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	20.8	5.2	3.2	66.3	1.2	0.2	0.1	2.4	1.0
ผงฟูทรายไร้แบบ	88.0	5.1	2.8	1.6	0.8	0.6	0.9	0.0	0.9
คุณสมบัติทางกายภาพ					ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1			ผงฟูทราย ไร้แบบ	
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)					0.19			0.13	
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ชม. ² /ก.)					3,250			3,960	
ความถ่วงจำเพาะ					3.11			2.31	
ดัชนีกำลังเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม									
ที่อายุ 7 วัน (ร้อยละ)					100			78.3	
ที่อายุ 28 วัน (ร้อยละ)					100			81.7	
ความต้องการน้ำ (ร้อยละ)					100			102	
ความหนาแน่น (กก./ล.)					1.03			0.89	

4.1.2 ลักษณะของอนุภาคของทรายจากประเทศออสเตรเลียและ ผงฟูทรายไร้แบบ

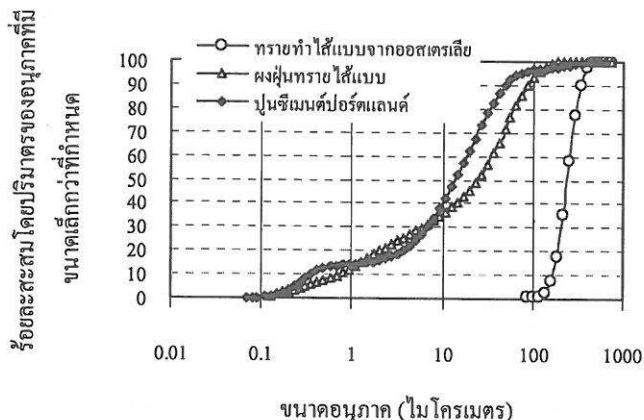
จากลักษณะอนุภาคของทรายที่ใช้ทำแบบหล่อซึ่งนำเข้าจากประเทศ
ออสเตรเลียดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) พบว่าพื้นผิวของอนุภาคทรายมี
ลักษณะค่อนข้างเรียบและเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 1 (ข) พบว่าอนุภาค
ของผงฟูทรายไร้แบบดังกล่าวมีขนาดเล็กกว่าทรายจากประเทศ
ออสเตรเลีย อันเนื่องมาจากในกระบวนการทำแบบหล่อและเทส่วนผสม
จากเตาหลอม ทรายดังกล่าวได้รับความร้อนสูงถึง 600 องศาเซลเซียส
ส่งผลให้พื้นระภายในถูกทำลาย [10] ทำให้อนุภาคแตกออกเป็นชิ้น
เล็กกลังพื้นผิวมีความขรุขระและเป็นเหลี่ยมมุมมากกว่า



(ก) ทรายจากประเทศออสเตรเลีย (ข) ผงฟูทรายไร้แบบ
รูปที่ 1 ลักษณะของอนุภาค โดยใช้เทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 150 เท่า

4.1.3 การกระจายขนาดผลของอนุภาคผงฟูทรายไล้แบบ

ผลการทดสอบการกระจายขนาดผลของอนุภาคผงฟูทรายไล้แบบแสดงในรูปที่ 2 พบว่าทรายวัดจากประเทศออสเตรเลียมีอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในช่วงขนาด 100 ถึง 1000 ไมโครเมตร มีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย เท่ากับ 283.7 ไมโครเมตร ในขณะที่ผงฟูทรายไล้แบบมีอนุภาคกระจายตัวกว้างกว่าทรายที่เป็นวัดจาก โดยผงฟูทรายไล้แบบ มีอนุภาคในช่วงขนาด 0.05 ถึง 200 ไมโครเมตร มีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยเท่ากับ 102.9 ไมโครเมตร



รูปที่ 2 การกระจายขนาดผลของอนุภาคทรายวัดจากประเทศออสเตรเลีย ผงฟูทรายไล้แบบ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

4.2 คุณสมบัติทางกลของคอนกรีต

4.2.1 กำลังอัด

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเสร็จซึ่งแทนที่ผงฟูทรายไล้แบบแสดงในรูปที่ 3 ตามลำดับ พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่ากำลังอัดลดลงเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ของผงฟูทรายไล้แบบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพิ่มขึ้น อาทิเช่น กำลังอัดของคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 300 กก./ม.³ ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. ที่อายุ 3 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 83, 64, 57 และ 43 ของคอนกรีตปกติ เมื่อแทนที่ผงฟูทรายไล้แบบในปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักเท่ากับ 10, 20, 30 และ 40 ตามลำดับ อันเป็นผลจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงทำให้ปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (C-S-H) ซึ่งเป็นสารประกอบที่สร้างกำลังให้คอนกรีตลดลงทำให้กำลังอัดลดลงตามไปด้วย ประกอบกับศักยภาพของผงฟูทรายไล้แบบมีความถี่ในการทำปฏิกิริยา นอกจากนั้นในช่วงต้นของการทำปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮดรชันมีปริมาณไม่เพียงพอสำหรับการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน (ปฏิกิริยาของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และ/หรืออะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ของสารปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งเป็น

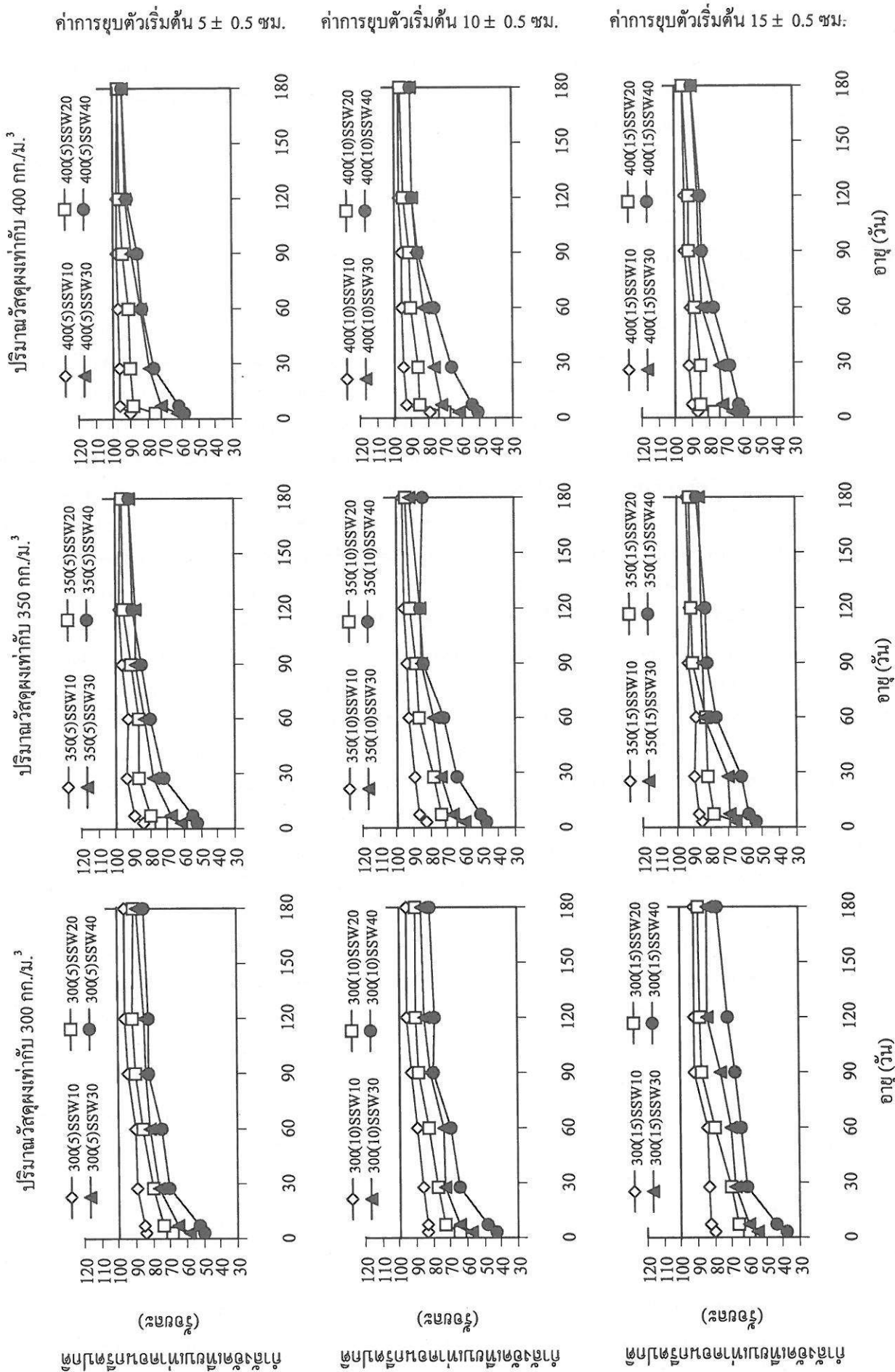
ผลิตภัณฑ์จากการไฮดรชันของแคลเซียมซิลิเกต โดยที่ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาปอซโซลานของซิลิกอนไดออกไซด์ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ที่ลดลงจากปริมาณ ปูนซีเมนต์ที่ลดลง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นมาจากการปฏิกิริยาไฮดรชันของปูนซีเมนต์เป็นหลัก ในขณะที่เมื่ออายุของคอนกรีตภายใต้การบ่มน้ำเพิ่มขึ้นทำให้กำลังอัดของคอนกรีตผสมผงฟูทรายไล้แบบมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเมื่อเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตซึ่งมีส่วนการแทนที่ของผงฟูทรายไล้แบบเท่ากับร้อยละ 40 ที่อายุ 180 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 81 ของคอนกรีตปกติ ซึ่งเพิ่มขึ้น มากกว่าคอนกรีตที่อายุ 3 วัน ถึงร้อยละ 38 แสดงว่าในช่วงหลังผงฟูทรายไล้แบบได้เริ่มทำปฏิกิริยาปอซโซลานร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์อย่างต่อเนื่องได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (C-S-H) ทำให้กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้น นอกเหนือจากแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮดรชัน

4.3 คุณสมบัติทางด้านการทนทานของคอนกรีต

4.3.1 การหดตัวแบบแห้ง

ผลการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมผงฟูทรายไล้แบบแสดงในรูปที่ 4 พบว่าสำหรับคอนกรีตปกติที่มีค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม.และปริมาณวัสดุผงเท่ากับ 300 กก./ม.³ มีค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามเวลา โดยในช่วง 30 วันแรก ค่าการหดตัวของคอนกรีตมีอัตราสูง อันเนื่องมาจากในช่วงแรกน้ำอิสระซึ่งมีปริมาณมากสามารถเคลื่อนที่ออกสู่ภายนอกโดยผ่านทางโพรงคาพิลลารีได้ง่าย จนกระทั่งเมื่อน้ำอิสระมีปริมาณลดลงจากนั้นน้ำที่อยู่ภายในโครงสร้างของเจลและแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (C-S-H) แทรกออกมา แต่กระนั้นความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำชนิด ดังกล่าวมีค่าต่ำมาก [11] เนื่องจากถูกโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามเวลาของการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นอีกครั้งไว้ทำให้โพรงคาพิลลารีมีขนาดเล็กลง น้ำหรือความชื้นจึงเคลื่อนที่ออกได้ยากขึ้นส่งผลให้การหดตัวแบบแห้งมีอัตราลดลงจนกระทั่งมีแนวโน้มคงที่

เมื่อพิจารณาการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมผงฟูทรายไล้แบบ พบว่ามีแนวโน้มของการหดตัวน้อยกว่าคอนกรีตปกติ ทั้งนี้เพราะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของผงฟูทรายไล้แบบทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น นั่นหมายถึงส่งผลให้ปริมาณและขนาดของโพรงคาพิลลารีลดลง ปริมาณของน้ำจะออกสู่ภายนอกได้น้อยลง ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์ทำให้ค่าการหดตัวของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากปริมาณที่เพิ่มขึ้นของซีเมนต์เฟสที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำปฏิกิริยาไฮดรชัน [12] ทำให้



วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่ 16 ฉบับที่ 4 พ.ศ. 2548
เกิดการหดตัวที่เพิ่มขึ้นแต่กระนั้น การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ทำให้ปริมาณน้ำเพื่อ
ทำให้ค่าการยุบตัวเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย
ด้วยปัจจัยที่ตรงกันข้ามจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นและปริมาณน้ำที่ขึ้นทำให้
การหดตัวของคอนกรีตผสมผงฟูทรายได้แบบมีการเปลี่ยนแปลงลดลง

สำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้นจาก 5 ± 0.5 ซม. เป็น 10 ± 0.5 และ
 15 ± 0.5 ซม. พบว่าแนวโน้มของค่าการหดตัวมีลักษณะเช่นเดียวกับคอนกรีตที่มี
ค่าการยุบตัวเริ่มต้นเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. กล่าวคือ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น คอนกรีตมีค่า
การหดตัวที่เพิ่มขึ้น โดยในช่วงแรกคอนกรีตมีอัตราการหดตัวสูงและมีค่า
ลดลงตามลำดับ จนการเปลี่ยนแปลงของอัตราการหดตัวมีค่าคงที่ เนื่องมาจาก
เหตุผลดังกล่าวข้างต้น นอกจากนั้นการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนปริมาณผงฟูทราย
ได้แบบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้คอนกรีตมีค่าการหดตัว
แบบแห้งลดลงตามลำดับ ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัว
เริ่มต้นมากขึ้นหรือปริมาณน้ำในส่วนผสมมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้น
ของปริมาณน้ำทำให้ปริมาณของมวลรวมทั้งมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด
ซึ่งทำหน้าที่ในการอัดรีดการหดตัวที่เกิดขึ้นภายในคอนกรีตลดลง ประกอบกับ
การเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำมีผลต่อความพรุนของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย
ความชื้นจึงสามารถเคลื่อนตัวออกจากคอนกรีตมีมากขึ้นทำให้ค่าการหดตัวมีค่า
เพิ่มขึ้น

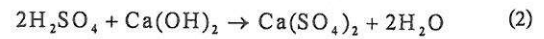
เมื่อพิจารณาในประเด็นการเพิ่มขึ้นของค่าการยุบตัวเริ่มต้น (ปริมาณน้ำ)
ที่เพิ่มขึ้น พบว่าการเพิ่มค่าการยุบตัวมีผลทำให้การหดตัวแบบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น
ทั้งนี้เพราะการเพิ่มปริมาณน้ำในคอนกรีตทำให้ความพรุนของคอนกรีตมีค่า
เพิ่มขึ้น ซึ่งก็คือปริมาณและขนาดโพรงคาพิวาลริที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณ
ความชื้นจากภายในคอนกรีตสามารถเคลื่อนที่ออกสู่ภายนอกผ่านปริมาณและ
ขนาดของโพรงที่เพิ่มขึ้น เมื่อความชื้นสูญเสียไปเพิ่มขึ้นทำให้การหดตัวแบบแห้ง
มีมากขึ้น

ในกรณีของคอนกรีตผสมเสร็จซึ่งแทนที่ผงฟูทรายได้แบบดังแสดงในรูปที่
5 พบว่าเมื่อพิจารณาที่ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำเดียวกัน คอนกรีตผสมผงฟูทราย
ได้แบบมีค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตลดลง ทั้งนี้ส่วนหนึ่งมาจากการปฏิกิริยา
ปอซโซลานของผงฟูทรายได้แบบทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นขึ้น ประกอบอนุภาค
ของผงฟูทรายได้แบบที่ละเอียดสามารถเติมเต็มช่องว่างภายในโครงสร้าง
คอนกรีตให้มีขนาดเล็กส่งผลให้ปริมาณและขนาดของโพรงคาพิวาลริลดลง
ดังนั้นปริมาณน้ำจะเคลื่อนที่ออกสู่ภายนอกได้จึงมีน้อยลง นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้น
ของปริมาณวัสดุผงจาก 300 กก./ม.³ เป็น 350 และ 400 กก./ม.³ ตามลำดับนั้น
โดยปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นทำให้ค่าการหดตัวของคอนกรีตผสมผงฟูทราย
ได้แบบมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากปริมาตรที่เพิ่มขึ้นของซีเมนต์เฟสที่เกิดจาก
การทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน [12] ทำให้เกิดการหดตัวที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งคอนกรีตมี
ปริมาณ มวลรวมซึ่งต้านทานการหดตัวลดลง

4.3.2 การกักกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริก

ผลการทดสอบความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกในรูปของ
อัตราการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติที่กำหนดค่า
การยุบตัวเริ่มต้นและปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตเท่ากับ 5 ± 0.5 ซม. และ 300
กก./ม.³ ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 6 พบว่าการแทนที่ของผงฟูทรายได้แบบใน
ปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นทำให้การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริกลดลง ซึ่ง

RESEARCH AND DEVELOPMENT JOURNAL VOLUME 16 NO.4, 2005
สามารถอธิบายได้จากสมการที่ (2) โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2)
ที่ลดลงตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง เมื่อปริมาณ
สารประกอบปฏิกิริยากับกรดได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ที่ทำให้
คอนกรีตเกิดการกัดกร่อนลดลงตามไปด้วย นอกจากนั้นจากองค์ประกอบหลัก
ของผงฟูทรายได้แบบที่ประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ทำให้ขี้ง
เป็นการลดสารประกอบแคลเซียมของคอนกรีตทั้งที่มาจากผลิตภัณฑ์ของ
ปฏิกิริยาไฮเดรชันและมวลรวมหยาบ (หินปูน) ให้ลดลงทำให้โดยรวมกรด
ทำปฏิกิริยาได้ลดลง



ในกรณีของการกัดกร่อนเนื่องจากกรด พบว่าในช่วงแรกการกัดกร่อนใน
รูปของอัตราการสูญเสียน้ำหนักมีค่าสูงและมีแนวโน้มลดลงเมื่ออายุของการแช่
ในสารละลายกรดมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะในช่วงแรกปริมาณของแคลเซียม
ไฮดรอกไซด์ (สารตั้งต้นของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับกรด) มีอยู่เป็นจำนวนมากและ
โดยปกติแคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถละลายออกมาสู่ภายนอกได้ดีใน
ช่วงแรก [13] ทำให้ไอออนของกรดเข้าทำปฏิกิริยาได้มาก ในขณะที่เมื่อเวลาใน
การแช่ในสารละลายกรดเพิ่มขึ้น ไอออนของแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ที่ละลาย
ออกสู่ภายนอกทำให้สารละลายอยู่ในสถานะอิ่มตัว (Saturated Solution) และใน
ช่วงแรกที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ละลายออกสู่ภายนอกจะเป็นแคลเซียม
ไฮดรอกไซด์อิสระที่แตกตัวแล้ว เมื่อสารประกอบดังกล่าวละลายออกหมดเหลือ
เพียงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อยู่ติดกับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งละลาย
ออกมาได้ยากกว่า ส่งผลให้การละลายลดลง กรดจึงทำปฏิกิริยาได้น้อยลง

เมื่อพิจารณาที่อายุของการแช่ในสารละลายกรดเพิ่มขึ้นทำให้การกัดกร่อนมี
ค่าเพิ่มขึ้น โดยสังเกตเห็นว่าตั้งแต่ที่อายุของการแช่ในกรดเท่ากับ 7 วัน คอนกรีต
ที่ผสมผงฟูทรายได้แบบมีค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าคอนกรีตปกติ และเมื่อ
เพิ่มสัดส่วนของวัสดุผงในคอนกรีตเป็น 350 และ 400 กก./ม.³ ทำให้การกัดกร่อน
ของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากปริมาณของปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นทำให้
เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ทำปฏิกิริยากับกรดได้เพิ่มขึ้น

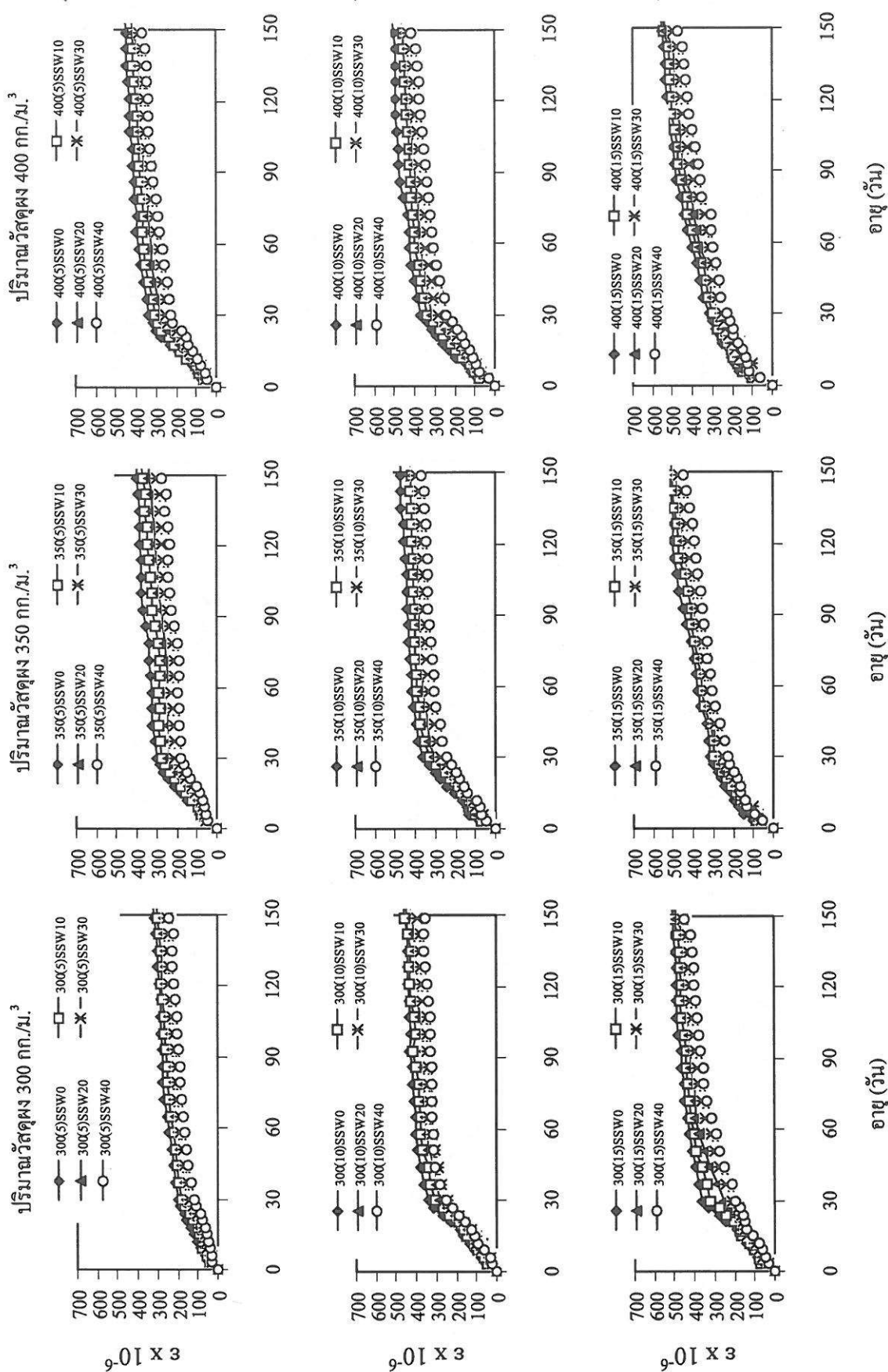
สำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้นเป็น 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม.
ตามลำดับ พบว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการ
เพิ่มปริมาณน้ำในคอนกรีตจะทำให้ความพรุนของคอนกรีตเพิ่มขึ้น อันจะส่งผล
ต่อจำนวนและปริมาณโพรงคาพิวาลริในคอนกรีตทำให้กรดสามารถผ่านเข้าไป
ทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น นอกเหนือจากการที่กระทำที่ผิวของคอนกรีตสัมผัสกับ
กรด และการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำทำให้ในคอนกรีตมีน้ำอิสระเพิ่มขึ้น จากการ
เพิ่มดังกล่าวทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีความสามารถในการแตกตัวได้
สูง โดยแตกตัวออกเป็นแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และไฮดรอกไซด์ (OH^-) อันจะ
ช่วยเสริมการทำปฏิกิริยากับไอออนของกรดได้ ดังนั้นค่าการกัดกร่อนจึงเพิ่มขึ้น

สำหรับคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น พบว่าคอนกรีตมีค่าการ
สูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามปริมาณผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (แคลเซียม
ไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2)) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่
การเพิ่มขึ้นของค่าการยุบตัวเริ่มต้น (ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น) ทำให้อัตราค่าการสูญเสีย
น้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นตามความพรุนของโครงสร้างของเฟสที่เพิ่มขึ้นทำให้กรด
สามารถเข้าทำลายโครงสร้างของคอนกรีตได้ดียิ่งขึ้น

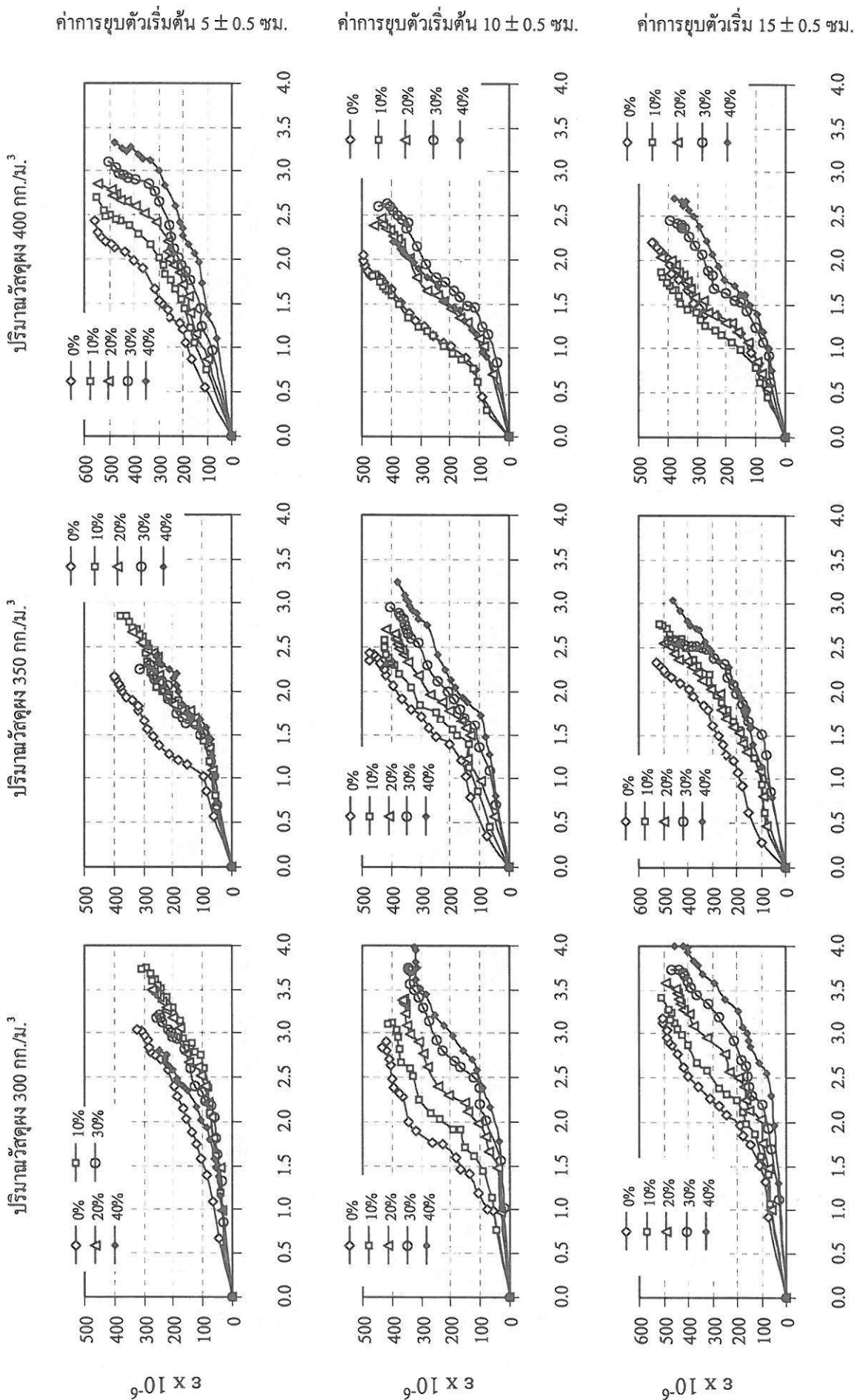
ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 5 ± 0.5 ซม.

ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 10 ± 0.5 ซม.

ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 15 ± 0.5 ซม.



รูปที่ 4 ค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมผงปูนทรายได้แบบเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ



ร้อยละการแทนที่ของผงฝุ่นทรายใส่แบบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยน้ำหนัก

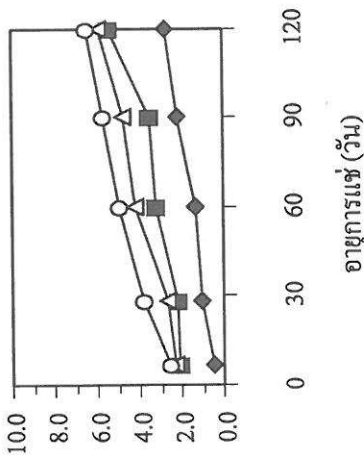
○ ร้อยละ 10 △ ร้อยละ 20 ■ ร้อยละ 30 ◆ ร้อยละ 40

ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 5 ± 0.5 ซม.

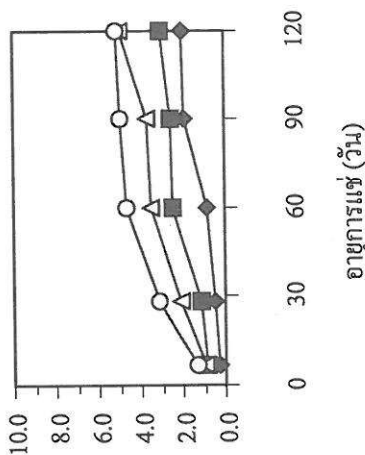
ค่าการยุบตัวเริ่มต้น 10 ± 0.5 ซม.

ค่าการยุบตัวเริ่ม 15 ± 0.5 ซม.

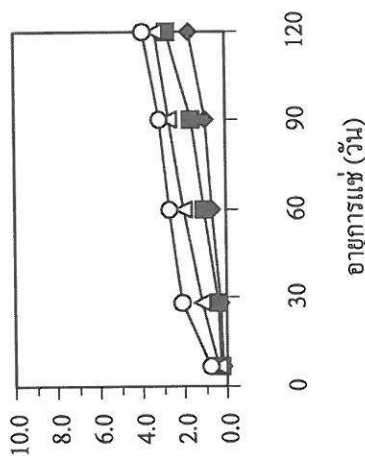
ปริมาณวัสดุผง 400 กก./ม.³



ปริมาณวัสดุผง 350 กก./ม.³



ปริมาณวัสดุผง 300 กก./ม.³



(ระบอบการ)

แบบผสมปูนซีเมนต์
แบบผสมปูนซีเมนต์

(ระบอบการ)

แบบผสมปูนซีเมนต์
แบบผสมปูนซีเมนต์

(ระบอบการ)

แบบผสมปูนซีเมนต์
แบบผสมปูนซีเมนต์

รูปที่ 6 อัตราการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากแรงดันของฝุ่นทรายใส่แบบ

5.1 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเสร็จที่ทุกค่าการยุบตัวเริ่มต้น (5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 และ 15 ± 0.5 ซม.) และปริมาณปูนซีเมนต์ (300, 350 และ 400 กก./ม.³) และมีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตปกติและมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณการแทนที่ของผงฝุ่นทรายใส่แบบในปูนซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่ออายุของคอนกรีตภายใต้การบ่มในน้ำเพิ่มขึ้นทำให้กำลังอัดของคอนกรีตผสมผงฝุ่นทรายใส่แบบมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

5.2 การหาค่าแบบแห้งของคอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบในปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้การหาค่าแบบแห้งมีค่าลดลง โดยค่าการหาค่าแบบแห้งของคอนกรีตที่มีปริมาณการแทนที่ของผงฝุ่นทรายใส่แบบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึงอัตราส่วนร้อยละ 40 โดยน้ำหนักมีค่าต่ำกว่า 530 ไมครอน

5.3 คอนกรีตซึ่งทำการแทนที่ผงฝุ่นทรายใส่แบบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีความทนทานต่อการกัดกร่อน เนื่องจากกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ที่ความเข้มข้น 1.0 นอร์มอลิตี (N) มากกว่าคอนกรีตปกติ

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงด้วยดี ผู้วิจัยใคร่กราบขอบพระคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยภายใต้สัญญาเลขที่ RGD4650019 และมีฝ่ายอุตสาหกรรมที่เข้าร่วมโครงการและให้การสนับสนุนเป็นอย่างดีทั้งจากบริษัท สยามโตโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด และบริษัท เอเซียผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ จำกัด

7. บรรณานุกรม

- [1] McIntyre, S., Rundman, K., Bailhood, C., Rush, P., Sandell, J., and Stillwell, B., "Benefication and Reuse of Foundry Sand Residuals: A Preliminary Report", AFS Transaction, 1992, No. 92, pp. 201 – 208.
- [2] Naik, T., and Kraus, R., "Development of Controlled Low Strength Materials", Report No. Rep – 274 Submitted to Kohler Company, 1995.
- [3] Naik, T., Patel, V. M., Parikh, D.M., and Tharaniyall, M.P., "Utilization of Used Foundry Sand in Concrete", Journal of Material in Civil Engineering, 1994, No. 2 : pp. 254 – 263.
- [4] Wang, S.Y. and Vipulanandan, C., "Foundry Sand for Highway Application", Transportation Research Record, 1995, No. 1486 : pp. 213 – 222.
- [5] U.S. Department of Transportation, "Foundry Sand Facts for Civil Engineers", A Report, 2003, pp. 1 – 68.
- [6] ASTM Committee, "ASTM C 618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete", Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.
- [7] ASTM Committee, "ASTM C 33 Standard Specification for Concrete Aggregates", Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

- [8] ASTM Committee, "ASTM C 39: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens", Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.
- [9] ณรงค์ศักดิ์ มากุล, ผลของผงฝุ่นทรายใส่แบบจากโรงหล่อเครื่องยนต์ต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเสร็จ, วิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2548.
- [10] Hewlett, P. C., Lea's Chemistry of Cement and Concrete. Fourth Edition. New York: John Wiley & Sons Inc., 1998.
- [11] Neville, A.M., Properties of Concrete. Fourth Edition, London: Pitman Books Limited, 1996.
- [12] Mindress, S., Young J. F., and Darwin, D., Concrete. Second Edition. United State of America: Prentice Hall, 2002.
- [13] Bensted, J. and Barnes, P., Structure and Performance of Cements. Second Edition, New York: Spon Press, 2002.