

คุณสมบัติของวัสดุผงต่อระดับความเข้มที่เหมาะสมในการผสมคอนกรีต

นายคม บัวคลี่



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1346-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PROPERTIES OF POWDER ON OPTIMUM  
MIXING INTENSITY FOR CONCRETE MIXING

Mr.Khom Buaklee

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering Chulalongkorn University

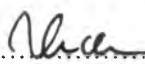
Academic Year 2001

ISBN 974-03-1346-9


หัวข้อวิทยานิพนธ์      คุณสมบัติของวัสดุผงต่อระดับความเข้มที่เหมาะสมในการผสมคอนกรีต  
โดย                              นายคม บัวคลี่  
สาขาวิชา                      วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา              รองศาสตราจารย์ ดร.บุญไชย สถิตมั่นในธรรม


---


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญไชย สถิตมั่นในธรรม)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พูลศักดิ์ เพียรสุขสม)

คม บัวคลี : คุณสมบัติของวัสดุผงต่อระดับความเข้มที่เหมาะสมในการผสมคอนกรีต  
(PROPERTIES OF POWDER ON OPTIMUM MIXING INTENSITY FOR CONCRETE MIXING)  
อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.บุญไชย สถิตมั่นในธรรม 158 หน้า ISBN: 974-03-1346-9

กระบวนการผสมคอนกรีตถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการควบคุมคุณภาพของคอนกรีต จากการศึกษาพบว่า ระดับความเข้มของการผสมซึ่งเป็นผลรวมระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผสมกับระยะเวลาการผสมจะส่งผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของคอนกรีต โดยเฉพาะค่าการยุบตัว โดยการผสมที่ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจะทำให้คอนกรีตมีค่าการยุบตัวมากที่สุด งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของคุณสมบัติของวัสดุผงที่เกี่ยวกับรูปร่างและความละเอียดรวมไปถึงผลของสารลดน้ำอย่างมากที่มีต่อระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในการผสมคอนกรีต โดยเลือกใช้วัสดุผง 5 ชนิดคือ ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ซีเมนต์ผสม ฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยจากแม่เมาะที่มีขนาดแตกต่างกัน 3 ขนาดและใช้สารลดน้ำอย่างมากชนิดเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสท

สำหรับผลของคุณสมบัติของวัสดุผง พบว่า การใช้วัสดุผงที่มีรูปร่างกลมจะช่วยลดทั้งพลังงานการผสมและระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมลงได้ทั้งนี้เนื่องจากรูปร่างที่กลมจะช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาครวมไปถึงมีความสามารถในการกระจายตัวที่ดีกว่ารูปร่างที่เป็นเหลี่ยมมุม ในด้านผลของความละเอียด พบว่า วัสดุผงที่มีรูปร่างเหมือนกันแต่มีความละเอียดมากขึ้นจะทำให้ค่าพลังงานการผสมมีแนวโน้มที่สูงขึ้น ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจะไม่ขึ้นกับปริมาณน้ำในส่วนผสมแต่จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับรูปร่างของวัสดุผงที่ใช้ งานวิจัยนี้จึงเสนอแบบจำลองที่ใช้ทำนายค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจากผลของรูปร่างของวัสดุผงดังนี้  $E_{in} = (2.44 \psi - 1.44) E_{in, sphere}$  โดย  $E_{in, sphere}$  จะเป็นค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากวัสดุผงรูปร่างกลม เช่น เถ้าลอยซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.10 วัตต์-ชั่วโมงต่อปริมาตรของแข็งของวัสดุผสมที่มีหน่วยเป็นลิตร นอกจากนี้ยังเสนอแบบจำลองที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ ซึ่งให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง

สำหรับผลของสารลดน้ำอย่างมาก จากการศึกษาพบว่า การใส่สารลดน้ำอย่างมากจะช่วยลดทั้งพลังงานการผสมและระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมลงได้ โดยจะขึ้นกับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดและปริมาณสารลดน้ำอย่างมาก คุณสมบัติของวัสดุผงที่เข้าร่วมไปถึงปริมาณน้ำอิสระในส่วนผสม

สำหรับค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของมอร์ตาร์และคอนกรีตทั้งที่ใส่และไม่ใส่สารลดน้ำอย่างมากพบว่า เป็นสัดส่วนโดยตรงกับสัดส่วนปริมาตรวัสดุผงต่อปริมาตรของแข็งทั้งหมดและค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมที่ได้จากเพสต์ แต่ในกรณีของคอนกรีตจะมีผลของการเคลื่อนที่ของหินที่จะช่วยกระจายอนุภาควัสดุผงได้อีกทางหนึ่งซึ่งลดค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมได้อีกประมาณ 20% ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมที่ได้นี้ไม่ขึ้นกับชนิดของเครื่องผสม ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้เป็นดัชนีวัดคุณภาพการผสมได้เป็นอย่างดีซึ่งเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตที่จะสามารถควบคุมกระบวนการผสมได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่อนิติ.....คม บัวคลี.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา.....2544.....

# # 4170242221: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORDS: MIXING ENERGY/MIXING INTENSITY/OPTIMUM MIXING INTENSITY/SHAPE FACTOR/FINENESS/POWDER/HIGH RANGE WATER REDUCING ADMIXTURE (HRWRA) KHOM BUAKLEE, MR: PROPERTIES OF POWDER ON OPTIMUM MIXING INTENSITY FOR CONCRETE MIXING, THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. BOONCHAI STITMANNAITHUM, Ph.D., 158 pp., ISBN: 974-03-1346-9

Mixing process is a major factor that greatly influences to the quality control of producing concrete. The previous research found that mixing intensity which is the total electrical power consumed by mixer greatly affects to the properties of ordinary concrete after mixing especially the slump value. Mixing at optimum intensity will produce the greatest slump. This research will study on the effects of properties of powder on optimum mixing intensity of concrete with and without HRWRA. Five types of powder have been used in this study which are cement portland type I, cement portland type III, mixed cement, limestone powder and three sizes of Mac-Moh fly ash.

For the effects of powder properties, the study has shown that powder with spherical shape can reduce both mixing energy and optimum mixing intensity this is because it shows less friction between particles and has ability to be easier dispersed than angular shape. In case of the same shape, particles with higher fineness tend to increase mixing energy. The optimum mixing intensity of mixture without HRWRA is independent to the water-cement ratio but is greatly dependent on the shape of powder. This research will propose the experimental model for predicting optimum mixing intensity from the effect of powder shape that is  $E_{in} = (2.44 \psi - 1.44)E_{in,sphere}$  where  $E_{in,sphere}$  is the lowest optimum mixing intensity given by spherical shape such as Mac-Moh fly ash and equals to 2.10 watt-hour per solid volume of mixture in litre unit. The other prediction models from this study have also shown good agreement with corresponding experimental results.

For the effect of HRWRA, it has been found that HRWRA will reduce both mixing energy and optimum mixing intensity which depends on many factors such as type and quantity of HRWRA, type of powder and free water content in the mixture.

The study has also indicated that the optimum mixing intensity of mortar and concrete both with and without HRWRA vary linearly to the ratio of solid volume fraction of powder to total solid volume in the mixture and the optimum mixing intensity of paste. But in case of concrete, the optimum mixing intensity will reduce about 20% because of the movement of coarse aggregate during mixing. The optimum mixing intensity does not depend on type of mixer therefore it can be used as an indicator to specify the mixing adequacy.

Department..... Civil Engineering ..... Student's signature..... *aw uas*  
Field of study..... Civil Engineering ..... Advisor's signature..... *Boonchai*  
Academic year..... 2001 .....

## กิตติกรรมประกาศ



ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยที่มีประโยชน์ รวมทั้งช่วยตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พูลศักดิ์ เพียรสุดสม คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ที่ช่วยแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สำหรับวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ผู้เขียนขอขอบคุณหน่วยงานต่าง ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ ดังนี้

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	จากกรมไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3	จากบริษัท ที พี ไอ โพลิน จำกัด(มหาชน)
สารลดน้ำอย่างมาก (SIKAMENT FF)	จากบริษัท ซิก้า(ประเทศไทย) จำกัด

ผู้เขียนขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และนักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้งานเครื่องแยกความละเอียดละเอียด รวมทั้งคำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์

ผู้เขียนยังขอขอบคุณอย่างสุดซึ้งต่อ รุ่นพี่ เพื่อน ๆ รุ่นน้องและเจ้าหน้าที่ที่ห้องปฏิบัติการคอนกรีตและหน่วยทดสอบวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกคน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทำงาน และเป็นกำลังใจที่ตีเสมอมา โดยเฉพาะ พี่นิพนธ์ พงษ์ถิมาพันธ์ นิสิตปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง ที่ได้คำปรึกษา รวมถึงการตรวจสอบ แก้ไขต้นฉบับวิทยานิพนธ์บางส่วน

ท้ายสุดนี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ซึ่งคอยให้กำลังใจ สนับสนุนการทำงานเป็นอย่างดีตลอดมา ครูบาอาจารย์ทุก ๆ ท่านที่เคยสั่งสอน อบรม ให้ความรู้ในสาขาวิชาต่าง ๆ พระคุณของท่านเหล่านี้ ผู้เขียนจะระลึกถึงจนกว่าชีวิตจะหาไม่

คม บัวคลี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ทัวไป.....	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	8
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	8
1.5 การดำเนินการวิจัย.....	9
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	12
บทที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผง	
2.1 บทนำ.....	19
2.2 การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผง.....	19
2.3 ค่าสัมประสิทธิ์เกี่ยวกับลักษณะรูปร่างของวัสดุผง.....	20
2.4 แบบจำลองทำนายค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผง.....	22
2.5 ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าทำนายและผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผง.....	24
2.6 ผลของสารลดน้ำอย่างมากต่อค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผง.....	25
2.7 ผลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่อค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผง.....	27
2.8 สรุป.....	28
บทที่ 3 ผลของคุณสมบัติของวัสดุผงต่อพลังงานการผสมของเพสต์ มอร์ตาร์และคอนกรีต	
3.1 บทนำ.....	49
3.2 ปริมาณน้ำอิสระ.....	49
3.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค.....	52
3.4 แบบจำลองทำนายพลังงานการผสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผงที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ.....	57

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.5 แบบจำลองทำนายพลังงานการผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุผงที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ.....	62
3.6 แบบจำลองทำนายพลังงานการผสมของคอนกรีตที่ใช้วัสดุผงที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ.....	64
3.7 แบบจำลองทำนายพลังงานการผสมของส่วนผสมที่ใส่สารลดน้ำอย่างมาก.....	67
3.8 สรุป.....	70
บทที่ 4 ผลของคุณสมบัติของวัสดุผงต่อค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์	
4.1 บทนำ.....	95
4.2 ผลการทดลองหาค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของส่วนผสมที่ใช้วัสดุผงที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ .....	97
4.3 แบบจำลองที่ใช้ทำนายค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของส่วนผสมที่ใช้วัสดุผงที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ .....	102
4.4 ผลการทดลองหาค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของส่วนผสมที่ใส่สารลดน้ำอย่างมาก(HRWRA).....	104
4.5 แบบจำลองที่ใช้ทำนายค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของส่วนผสมที่ใส่สารลดน้ำอย่างมาก(HRWRA).....	106
4.6 ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและน้ำยาผสมเพิ่มจากโรงงานผสม.....	109
4.7 สรุป.....	111
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	
5.1 ทั่วไป.....	136
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	139
รายการอ้างอิง.....	141
ภาคผนวก ก. รายละเอียดสมการที่อ้างอิง.....	146
ภาคผนวก ข. รายการคำนวณ.....	150
ภาคผนวก ค. ผลการทดลอง.....	153
ภาคผนวก ง. มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง.....	157
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	158



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1	การจำแนกกลุ่มของวัสดุผงที่ใช้ในการทดลอง.....	11
ตารางที่ 2.1	องค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยที่ใช้ในการทดลอง.....	29
ตารางที่ 2.2	การเปรียบเทียบของค์ประกอบของเถ้าลอยที่ใช้ในการทดลองและเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618.....	29
ตารางที่ 2.3	ค่าสัดส่วนช่องว่างและสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมของวัสดุผงประเภทต่าง ๆ ที่ใช้ใน งานวิจัย.....	30
ตารางที่ 2.4	ค่าตัวเลข โคออร์ดิเนชันและสัดส่วนช่องว่างของอนุภาคทรงกลมขนาดเดียว.....	30
ตารางที่ 2.5	สมการต่าง ๆ ที่ใช้คำนวณหาค่าตัวเลข โคออร์ดิเนชันของอนุภาคทรงกลมขนาดเดียว.....	31
ตารางที่ 2.6	คุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของวัสดุผงและค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำที่ได้จากการทดลอง....	31
ตารางที่ 2.7	คุณสมบัติของวัสดุผงและค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงที่ได้จากแบบจำลอง.....	32
ตารางที่ 2.8	ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงแต่ละชนิดที่ได้จากการทดลองเมื่อใส่สารลดน้ำ อย่างมากชนิดเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเสทในปริมาณต่าง ๆ .....	32
ตารางที่ 3.1	พลังงานการผสมในสภาวะแห้งและสภาวะอิมตัวของเพสต์ที่ใช้วัสดุผงต่าง ๆ .....	72
ตารางที่ 3.2	ขนาดคละของหินและทรายที่ใช้ในการทดลอง.....	72
ตารางที่ 3.3	คุณสมบัติพื้นฐานของหินและทรายที่ใช้ในการทดลอง.....	73
ตารางที่ 3.4	สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง.....	73
ตารางที่ 3.5	พลังงานการผสมส่วนผสมต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองและแบบจำลอง.....	74
ตารางที่ 3.6	ค่าตัวประกอบแรงผลัก ( $\phi_{rep}$ ) ของเพสต์ที่ใช้วัสดุผงต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองและ แบบจำลอง.....	74
ตารางที่ 4.1	ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมและระดับความเข้มของการผสมที่ได้จากการ ผสมตามมาตรฐาน ASTM C305-94 ของเพสต์ที่ใช้วัสดุผงต่าง ๆ .....	113
ตารางที่ 4.2	ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายของซีเมนต์เพสต์ชนิดต่าง ๆ เมื่อผสมตามมาตรฐาน ASTM C305 และผสมที่ระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม.....	113
ตารางที่ 4.3	สัดส่วนการผสมของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง.....	114
ตารางที่ 4.4	ระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองในแต่ละ ส่วนผสม.....	114
ตารางที่ 4.5	ค่าสัมประสิทธิ์ของผลการทดลองและค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมที่อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุผงและปริมาณสารลดน้ำอย่างมากต่าง ๆ .....	115
ตารางที่ 4.6	รายละเอียดเครื่องผสมและลำดับการใส่ส่วนผสมของแต่ละโรงงาน.....	115
ตารางที่ 4.7	สัดส่วนการผสมของคอนกรีตแต่ละประเภทจากโรงงานผสม.....	116
ตารางที่ 4.8	ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตแต่ละประเภทที่ได้จากโรงงานผสม....	116

## สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1	ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของคอนกรีตสดกับค่าระดับความเข้มของการผสม <sup>(2)</sup> .....	13
รูปที่ 1.2	ผลของพื้นที่ผิวจำเพาะต่อหน่วยแรงเฉือนคลากของซีเมนต์เพสต์ <sup>(5)</sup> .....	13
รูปที่ 1.3	ผลของปริมาณเพสต์ต่อค่าการไหลแผ่ของคอนกรีต <sup>(6)</sup> .....	14
รูปที่ 1.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดกับขนาดของวัสดุผงในส่วนผสม <sup>(7)</sup> .....	14
รูปที่ 1.5	ผลของเถ้าลอยที่มีความละเอียดสูงต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีต <sup>(19)</sup> .....	15
รูปที่ 1.6	ผลของพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยต่อความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก <sup>(24)</sup> .....	16
รูปที่ 1.7	โมเลกุลของสารลดน้ำอย่างมากและลักษณะการคูดคืดที่ผิวซีเมนต์ <sup>(28)</sup> .....	16
รูปที่ 1.8	โครงสร้างทางเคมีของสารลดน้ำอย่างมากประเภทต่าง ๆ <sup>(28)</sup> .....	17
รูปที่ 1.9	ค่าการไหลของซีเมนต์เพสต์เมื่อใช้สารลดน้ำอย่างมากชนิดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เดียวกัน <sup>(28)</sup> .....	18
รูปที่ 1.10	ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในส่วนของคอนกรีตและมอร์ตาร์ <sup>(35)</sup> .....	18
รูปที่ 2.1	ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของทราย แสล็ก(slag)และซีเมนต์โดยวิธี เซนตริฟิวส์ <sup>(35)</sup> .....	33
รูปที่ 2.2	ขั้นตอนการแยกเถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัย.....	34
รูปที่ 2.3	ค่าการยุบตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ .....	34
รูปที่ 2.4	ค่าการยุบตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ .....	35
รูปที่ 2.5	ค่าการยุบตัวของปูนซีเมนต์ผสมที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ .....	35
รูปที่ 2.6	ค่าการยุบตัวของเถ้าลอยขนาดดั้งเดิมที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ .....	36
รูปที่ 2.7	ค่าการยุบตัวของฝุ่นหินปูนที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ .....	36
รูปที่ 2.8	ค่าการยุบตัวของผงซิลิกาที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ .....	37
รูปที่ 2.9	ค่าการยุบตัวของเถ้าลอยแยกละเอียดครั้งที่ 1 ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ .....	37
รูปที่ 2.10	ค่าการยุบตัวของเถ้าลอยแยกละเอียดครั้งที่ 2 ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ .....	38
รูปที่ 2.11	ค่าการยุบตัวของเถ้าลอยที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 และค้ำเบอร์ 200 ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ .....	38
รูปที่ 2.12	ผลของสัดส่วนช่องว่างในสภาวะหลวมต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุม <sup>(39)</sup> .....	39
รูปที่ 2.13	ผลของสัดส่วนความหนาแน่นต่อลักษณะรูปร่างของวัสดุผงที่มีขนาดเดียวกัน <sup>(40)</sup> .....	39
รูปที่ 2.14	สัดส่วนช่องว่างระหว่างอนุภาคเปรียบเทียบระหว่างรูปร่างกลมและมีเหลี่ยมมุม.....	40
รูปที่ 2.15	ลักษณะรูปร่างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จากกล้องขยายกำลังขยาย 1000 เท่า.....	40
รูปที่ 2.16	ลักษณะรูปร่างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จากกล้องขยายกำลังขยาย 3500 เท่า.....	41
รูปที่ 2.17	ลักษณะรูปร่างของเถ้าลอยขนาดดั้งเดิมจากกล้องขยายกำลังขยาย 900 เท่า.....	41
รูปที่ 2.18	ลักษณะรูปร่างของเถ้าลอยที่แยกละเอียดครั้งที่ 2 จากกล้องขยายกำลังขยาย 3500 เท่า.....	42
รูปที่ 2.19	ลักษณะรูปร่างของฝุ่นหินปูนจากกล้องขยายกำลังขยาย 3500 เท่า.....	42
รูปที่ 2.20	ลักษณะรูปร่างของผงซิลิกาจากกล้องขยายกำลังขยาย 7500 เท่า.....	43

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.21 การเรียงตัวของอนุภาคทรงกลมขนาดเดียวที่ค่าตัวเลข โคออร์ดิเนชันเท่ากับ 6 และ 12.....	43
รูปที่ 2.22 ค่าตัวเลข โคออร์ดิเนชันของอนุภาคทรงกลมขนาดเดียว <sup>(40)</sup> .....	44
รูปที่ 2.23 ผลของสัดส่วนช่องว่างต่อค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผง โดยปริมาตร.....	44
รูปที่ 2.24 ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำโดยปริมาตรต่อสัดส่วนช่องว่างของวัสดุผงชนิดต่าง ๆ .....	45
รูปที่ 2.25 ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำโดยปริมาตรเนื่องจากความพรุนภายในของเถ้าลอย.....	45
รูปที่ 2.26 ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำโดยปริมาตรที่ได้จากแบบจำลองและ ผลการทดลองจริง.....	46
รูปที่ 2.27 ค่าตัวประกอบการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของเถ้าลอยและซีเมนต์ประเภทที่ 1 ชนิดเมลามีนฟอรั่มลดีไฮด์คอนเดนเสท.....	46
รูปที่ 2.28 ค่าตัวประกอบการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของเถ้าลอยและซีเมนต์ประเภทที่ 1 เมื่อใส่สารลดน้ำอย่างมากชนิดเนฟทาไลน์ฟอรั่มลดีไฮด์คอนเดนเสท.....	47
รูปที่ 2.29 ค่าตัวประกอบการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของเถ้าลอยและซีเมนต์ประเภทที่ 1 เมื่อใส่สารลดน้ำอย่างมากชนิดโพลีคาร์บอกซิลิก.....	47
รูปที่ 2.30 ค่าตัวประกอบการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของเถ้าลอยและซีเมนต์ประเภทที่ 1 เมื่อใส่สารลดน้ำอย่างมากชนิดลิกโนซัลโฟเนต.....	48
รูปที่ 2.31 ผลเปรียบเทียบค่าตัวประกอบการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์ ประเภทที่ 1 เมื่อใส่สารลดน้ำอย่างมากชนิดต่าง ๆ .....	48
รูปที่ 3.1 สภาวะของส่วนผสมที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ .....	75
รูปที่ 3.2 แบบจำลองในการคำนวณหาค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเนื่องจากความชื้น.....	75
รูปที่ 3.3 ผลของระยะห่างระหว่างอนุภาคต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค.....	76
รูปที่ 3.4 ผลของปริมาณน้ำในส่วนผสมต่อค่าตัวเลข โคออร์ดิเนชัน.....	76
รูปที่ 3.5 เครื่องผสมชนิด Paddle Type ความจุ 4 ลิตร.....	77
รูปที่ 3.6 ค่า $K'$ สำหรับเปลี่ยนหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเป็นพลังงานการผสมของเพสต์ที่ ใช้เครื่องผสมชนิดกระทะ (อ้างอิงผลการทดลองของ Stitmannaitum <sup>(35)</sup> ).....	77
รูปที่ 3.7 ค่า $K'$ ของเถ้าลอยทั้ง 2 ชนิดจากเครื่องผสมแบบ Paddle Type.....	78
รูปที่ 3.8 พลังงานการผสมของเถ้าลอยขนาดดั้งเดิมที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ .....	78
รูปที่ 3.9 พลังงานการผสมของเถ้าลอยที่แยกละเอียดครั้งที่ 1 ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ .....	79
รูปที่ 3.10 ค่าตัวประกอบที่ใช้แปลงหน่วยแรงยึดเหนี่ยวจากอนุภาคกลมเป็นอนุภาคเหลี่ยมเมื่อปริมาณน้ำ ต่ำกว่าปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บ ( $w \leq w_c$ ).....	79
รูปที่ 3.11 หน่วยแรงเฉือนของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วน w/c และระยะเวลาการผสมต่าง ๆ <sup>(44)</sup> .....	80
รูปที่ 3.12 ผลของปริมาณเถ้าถ่านหิน (pfa) ในซีเมนต์เพสต์ต่อค่าความหนืดพลาสติกของคอนกรีต เมื่อสัดส่วนปริมาตรของมวลรวมเท่ากับ 0.71 และปริมาณมวลรวมเท่ากับ 1880 kg/m <sup>3(45)</sup> .....	80

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.13 ค่าตัวประกอบที่ใช้แปลงหน่วยแรงยึดเหนี่ยวจากอนุภาคกลมเป็นอนุภาคเหลี่ยมของเพสต์ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมและปริมาณน้ำต่าง ๆ .....	81
รูปที่ 3.14 พลังงานการผสมของเพสต์ OPC-I ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ จากการทดลองและแบบจำลองทั้ง 2 แบบ.....	81
รูปที่ 3.15 พลังงานการผสมของเพสต์ OPC-III ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ จากการทดลองและแบบจำลองทั้ง 2 แบบ.....	82
รูปที่ 3.16 พลังงานการผสมของเพสต์ MC ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ จากการทดลองและแบบจำลองทั้ง 2 แบบ.....	82
รูปที่ 3.17 พลังงานการผสมของเพสต์ OLP ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ จากการทดลองและแบบจำลองทั้ง 2 แบบ.....	83
รูปที่ 3.18 พลังงานการผสมของเพสต์ OLPI0 ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ จากการทดลองและแบบจำลองทั้ง 2 แบบ.....	83
รูปที่ 3.19 พลังงานการผสมของเพสต์ OLP20 ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ จากการทดลองและแบบจำลองทั้ง 2 แบบ.....	84
รูปที่ 3.20 พลังงานการผสมของเพสต์ OFA40 ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ จากการทดลองและแบบจำลองทั้ง 2 แบบ.....	84
รูปที่ 3.21 พลังงานการผสมในสภาวะแห้งของวัสดุผงที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมต่าง ๆ เทียบกับเจ้าลอย.....	85
รูปที่ 3.22 พลังงานการผสมของเพสต์ที่สภาวะอิมตัวของวัสดุผงที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมต่าง ๆ เทียบกับเจ้าลอย.....	85
รูปที่ 3.23 แบบจำลองพลังงานการผสมของเจ้าลอย OFA เปรียบเทียบกับ FA1.....	86
รูปที่ 3.24 แบบจำลองพลังงานการผสมของ OPC-III และ OPC-I เปรียบเทียบกับเจ้าลอย OFA.....	86
รูปที่ 3.25 พลังงานการผสมของเพสต์ที่มีความละเอียดและค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมต่าง ๆ .....	87
รูปที่ 3.26 รูปร่างและขนาดของใบพายและภาชนะของเครื่องผสมแบบ Paddle Type ความจุ 20 ลิตร.....	87
รูปที่ 3.27 พลังงานการผสมของมอร์ตาร์ M1 ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ จากการทดลองและแบบจำลอง.....	88
รูปที่ 3.28 พลังงานการผสมของมอร์ตาร์ M2 ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ จากการทดลองและแบบจำลอง.....	88
รูปที่ 3.29 พลังงานการผสมของมอร์ตาร์ M3 ที่ปริมาณน้ำต่าง ๆ จากการทดลองและแบบจำลอง.....	89
รูปที่ 3.30 พลังงานการผสมของมอร์ตาร์ M4 จากการทดลองและแบบจำลอง.....	89
รูปที่ 3.31 ขนาดต่าง ๆ ของใบพายและเครื่องผสมแบบกระเทาะขนาดความจุ 150 ลิตรที่ใช้ในการทดลอง....	90
รูปที่ 3.32 แรงต้านเนื่องจากหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของส่วนผสมที่กระทำกับใบพายขณะผสม.....	91
รูปที่ 3.33 พลังงานการผสมคอนกรีต OPC-I ที่ $(w/c)_{\text{ณ}}=0.31$ จากการทดลองและแบบจำลอง.....	92
รูปที่ 3.34 พลังงานการผสมคอนกรีต OPC-III ที่ $(w/c)_{\text{ณ}}=0.31$ จากการทดลองและแบบจำลอง.....	92

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.35 พลังงานการผสมคอนกรีต OFA40 ที่ $(w/c)_{eff}=0.31$ จากการทดลองและแบบจำลอง.....	93
รูปที่ 3.36 ค่าแรงดึงผิวของน้ำที่ได้จากการทดลองด้วยเครื่อง Du Nouy Ring Tensiometer ที่เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของสารลดน้ำอย่างมากชนิดเมลามีนฟอรั่มลิตไฮด์คอนเดนเสทต่าง ๆ .....	93
รูปที่ 3.37 ค่าตัวประกอบแรงผลึกของเพสต์ OPC-I ที่ปริมาณสารลดน้ำอย่างมาก 0.3% , 0.4% และ 1.0% ที่อัตราส่วนน้ำอิสระต่าง ๆ .....	94
รูปที่ 3.38 ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าทำนายและผลการทดลองพลังงานการผสมของเพสต์ มอร์ตาร์และคอนกรีตที่ใส่สารลดน้ำอย่างมาก.....	94
รูปที่ 4.1 กระบวนการแตกตัวของอนุภาคซีเมนต์ที่เกิดย้อนกลับไม่ได้ <sup>(13)</sup> .....	117
รูปที่ 4.2 การเรียงตัวของอนุภาคที่ระดับความเข้มข้นของการผสมต่าง ๆ <sup>(35)</sup> .....	117
รูปที่ 4.3 ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผง OPC-I.....	118
รูปที่ 4.4 ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผง OFA.....	119
รูปที่ 4.5 ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผง FA1.....	120
รูปที่ 4.6 ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผง MC.....	121
รูปที่ 4.7 ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผง OLP.....	122
รูปที่ 4.8 ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผง OPC-III.....	123
รูปที่ 4.9 ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผง OFA10.....	124
รูปที่ 4.10 ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผง OFA20.....	124
รูปที่ 4.11 ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผง OFA30.....	125
รูปที่ 4.12 ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผง OFA40.....	125
รูปที่ 4.13 ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผง OLP5.....	126
รูปที่ 4.14 ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผง OLP10.....	126
รูปที่ 4.15 ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผง OLP15.....	127
รูปที่ 4.16 ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผง OLP20.....	127
รูปที่ 4.17 ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของมอร์ตาร์ M1-OPC-I และ M2-OPC-I.....	128
รูปที่ 4.18 ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของมอร์ตาร์ M3-OFA.....	128
รูปที่ 4.19 ผลของระดับความเข้มข้นของการผสมต่อคุณสมบัติของคอนกรีต C1 และ C2.....	129
รูปที่ 4.20 ผลของระดับความเข้มข้นของการผสมต่อคุณสมบัติของคอนกรีต C3 C4 และ C5.....	130
รูปที่ 4.21 ระยะเวลาการไหลกับค่าระดับความเข้มข้นของการผสมของเพสต์ OFA40 ที่ $w/p = 0.25$ ที่ปริมาณสารลดน้ำอย่างมากต่าง ๆ .....	131
รูปที่ 4.22 ระยะเวลาการไหลกับค่าระดับความเข้มข้นของการผสมของเพสต์ OFA40 ที่ $w/p = 0.30$ ที่ปริมาณสารลดน้ำอย่างมากต่าง ๆ .....	131
รูปที่ 4.23 ผลของระดับความเข้มข้นของการผสมต่อคุณสมบัติของคอนกรีต CS1, CS2 และ CS3.....	132

## สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.24 ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองกับ แบบจำลองที่ใช้ทำนายของส่วนผสมต่าง ๆ ทั้งใส่และไม่ใส่สารลดน้ำอย่างมาก.....	133
รูปที่ 4.25 ค่าระดับความเข้มของการผสมกับค่าการยุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ก. mix 1 (คอนกรีตไม่ใส่ทั้งเถ้าลอยและน้ำยาผสมเพิ่ม).....	133
รูปที่ 4.26 ค่าระดับความเข้มของการผสมกับค่าการยุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ข. mix 2 (คอนกรีตไม่ใส่เถ้าลอยแต่ใส่น้ำยาผสมเพิ่ม).....	134
รูปที่ 4.27 ค่าระดับความเข้มของการผสมกับค่าการยุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ค. mix 3 (คอนกรีตไม่ใส่เถ้าลอยแต่ใส่น้ำยาผสมเพิ่ม).....	134
รูปที่ 4.28 ค่าระดับความเข้มของการผสมกับค่าการยุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ง. mix 4 (คอนกรีตไม่ใส่เถ้าลอยแต่ใส่น้ำยาผสมเพิ่ม).....	135

## คำอธิบายสัญลักษณ์

$\alpha$	คือ มุมวงของของเหลว
$\alpha_c, \alpha_p, \alpha_p$	คือ ค่าการดูดซึมของหิน ทรายและวัสดุผง ตามลำดับ
$\alpha_{\psi}$	คือ ค่าตัวประกอบที่ใช้แปลงหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างของอนุภาคกลม ไปเป็นหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมมุม
$\alpha_{red}$	คือ ค่าตัวประกอบการลดลงของค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม
$\alpha_{sh}$	คือ ค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นของค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจากผลของรูปร่างของวัสดุผง
$\alpha_{sp}$	คือ ค่าตัวประกอบการลดลงของค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมจากผลของสารลดน้ำอย่างมาก
$\beta_1$	คือ ค่าตัวประกอบที่เป็นผลจากจำนวนรอยต่อระหว่างอนุภาคที่ลดลงและจำนวนรอยต่อทั้งหมดที่เพิ่มขึ้น
$\beta_2$	คือ ค่าตัวประกอบที่เป็นผลจากสารลดน้ำอย่างมากทำหน้าที่เสมือนม่านป้องกันการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนและช่วยหล่อลื่นผิวสัมผัสระหว่างอนุภาค
$\beta_{p,vol}$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงโดยปริมาตร
$\beta_{p,wt}$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงโดยน้ำหนัก
$\beta_{p,wt}(T^{\circ}C)$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงโดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ ( $T^{\circ}C$ )
$\beta_{p,vol}(shape)$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงโดยปริมาตรจากผลของรูปร่างของวัสดุผง
$\beta_{p,vol}(porosity)$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผงโดยปริมาตรจากผลของความพรุนภายใน
$\beta_a$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของมวลรวมโดยน้ำหนัก(ไม่รวมน้ำที่ถูกดูดซึม)
$\delta$	คือ มุมสัมผัส
$\varepsilon_r$	คือ สัดส่วนช่องว่างของอนุภาคในช่วงขนาดคละที่แน่นอนและมีสถานะเกาะตัวอย่างหลวม
$\varepsilon$	คือ สัดส่วนช่องว่างโดยปริมาตรของวัสดุผงที่ไม่ได้ทำการแยกขนาด
$\varphi_{ij}$	คือ ค่าการกระจายแรงของแรงเฉือนซึ่งขึ้นกับลักษณะของใบมีด
$\mathcal{G}_{ij}$	คือ ค่าการกระจายแรงของแรงตึงฉากซึ่งขึ้นกับลักษณะของใบมีด
$\gamma_k$	คือ ค่าตัวประกอบเนื่องจากจำนวนรอยต่อทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นจากผลของค่าตัวเลข โคออร์ดิเนชันที่สูงขึ้น ซึ่งค่าตัวประกอบจะขึ้นกับปริมาณสารลดน้ำอย่างมาก
$\gamma_c$	คือ ค่าตัวประกอบเนื่องจากจำนวนรอยต่อที่ลดลง เนื่องมาจากผลของแรงผลักรังสีทางไฟฟ้าของสารลดน้ำอย่างมากซึ่งจะขึ้นกับปริมาณสารลดน้ำอย่างมาก
$\phi_{rep}$	คือ ค่าตัวประกอบแรงผลักรังสีจากผลของสารลดน้ำอย่างมาก
$\phi_{sp}$	คือ ค่าตัวประกอบการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำเมื่อใส่สารลดน้ำอย่างมาก
$\xi_c$	คือ ค่าประกอบที่ขึ้นกับขนาดคละของวัสดุผง
$\xi_r$	คือ ค่าประกอบที่ขึ้นกับความละเอียดและรูปร่างของวัสดุผง
$\xi_T$	คือ ค่าประกอบที่ขึ้นกับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

## คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

$\psi$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุมของอนุภาค
$\rho$	คือ ความถ่วงจำเพาะ
$\Omega$	คือ ความเร็วรอบของเครื่องผสม
$\sigma_c$	คือ หน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของส่วนผสม
$\sigma_{c,partial}$	คือ หน่วยแรงยึดเหนี่ยวกรณีที่มีความชื้นบางส่วน
$\omega_G, \omega_s, \omega_p$	คือ ปริมาณความชื้นของหิน ทรายและวัสดุผง ตามลำดับ
$\omega_i$	คือ มุมเอียงของใบพาย $i$ จากแนวตั้ง
$\omega_{sp}$	คือ ปริมาณสารลดน้ำอย่างมากที่สุดที่ใช้โดยน้ำหนัก
$A_i$	คือ พื้นที่สัมผัสระหว่างใบพาย $i$ และส่วนผสม
$a$	คือ ระยะห่างระหว่างอนุภาค
$d_{av}$	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย
$D_i$	คือ ขนาดเฉลี่ยระหว่างตะแกรงขนาด $i$ ที่มีมวลรวมค้างอยู่และตะแกรงอันดับถัดไป
$E_s$	คือ พลังงานการผสมในสภาวะแห้ง
$E_w$	คือ พลังงานการผสมที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากพันธะของเหลว
$E_{mix}$	คือ พลังงานการผสม
$E_{in}$	คือ ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของส่วนผสม
$E_{in,sp}$	คือ ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมในกรณีของเพสต์
$E_{in,sphere}$	คือ ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของเพสต์ที่ใช้วัสดุผงที่มีรูปร่างกลม
$E_{in, \%SP}$	คือ ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของส่วนผสมที่มีสารลดน้ำอย่างมากที่สุด
$Fl_r$	คือ ค่าการไหลที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน
$H$	คือ แรงยึดเหนี่ยวรวมทั้งหมดเนื่องจากพันธะสะพานของเหลว
$H_K$	คือ แรงยึดเหนี่ยวเนื่องจากการบดพร่องของแรงดัน
$H_R$	คือ แรงยึดเหนี่ยวเนื่องจากแรงตึงผิวของน้ำ
$k$	คือ ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชัน
$k_{min}$	คือ ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันต่ำสุด
$k_{max}$	คือ ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันสูงสุด
$l_{ij}$	คือ ความยาวแขนของใบพายผสม $i$
$M_G, M_s, M_p$	คือ น้ำหนักของหิน ทรายและวัสดุผง ตามลำดับ
$M_p$	คือ น้ำหนักของวัสดุผงในส่วนผสม
$M_i$	คือ เปอร์เซ็นต์คั่งค้างของมวลรวมบนตะแกรงขนาด $i$
$M_s$	คือ น้ำหนักของทรายในส่วนผสม
$M$	คือ น้ำหนักอนุภาคของแข็งในสภาวะแห้ง
$MI$	คือ ระดับความเข้มของการผสม
$N_i$	คือ แรงตึงฉากที่กระทำบนใบพาย $i$



## คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

$n_p$	คือ สัดส่วนปริมาตรของวัสดุผงต่อปริมาตรของแข็งทั้งหมด
$P$	คือ งานจากแรงบิด
$R_1$	คือ รัศมีความโค้งเนื่องจากการบดพ่นของแรงดัน
$R_2$	คือ รัศมีความโค้งเนื่องจากแรงดึงผิวของของเหลว
$r$	คือ รัศมีของอนุภาคทรงกลม
$S_u$	คือ ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของมวลรวม
$S$	คือ ระดับขั้นการอิมตัวของช่องว่าง
$SSB_i$	คือ พื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาค
$S_i$	คือ แรงเฉือนที่กระทำบนใบพาย $i$
$T$	คือ แรงดึงผิวของน้ำ
$t_{mix}$	คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการผสม
$V_{ws}$	คือ ปริมาณน้ำที่ทำให้อนุภาคของแข็งอิมตัว
$V_{ms}$	คือ ปริมาตรทั้งหมดที่สภาวะอิมตัว
$V_{ss}$	คือ ปริมาตรของแข็งที่สภาวะอิมตัว
$V_{vs}$	คือ ปริมาตรช่องว่างที่สภาวะอิมตัว
$V_{sc}$	คือ ปริมาตรของหินในส่วนผสม
$V_{sf}$	คือ ปริมาตรของทรายในส่วนผสม
$V_{sp}$	คือ ปริมาตรของวัสดุผงในส่วนผสม
$V_{st}$	คือ ปริมาตรของแข็งทั้งหมดของส่วนผสม
$\Delta V_w$	คือ ปริมาตรน้ำส่วนเกินจากปริมาณที่จะกักเก็บได้โดยอนุภาคของแข็ง
$\Delta V_m$	คือ ปริมาตรที่เพิ่มขึ้นของส่วนผสมเนื่องจาก $\Delta V_w$
$\Delta V_v$	คือ ปริมาตรที่เพิ่มขึ้นของช่องว่างเนื่องจาก $\Delta V_w$
$w/c$	คือ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์
$(w/p)_{eff}$	คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงประสิทธิภาพ
$(w/c)_{free}$	คือ อัตราส่วนน้ำอิสระต่อซีเมนต์
$w_s$	คือ ปริมาณน้ำในส่วนผสมที่เท่ากับปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บโดยวัสดุผง
$W_u$	คือ หน่วยน้ำหนักของอนุภาคของแข็ง
$W_{free}$	คือ ปริมาณน้ำอิสระ
$W_{hyd}$	คือ ปริมาณน้ำที่สูญเสียในปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์
$W_{total}$	คือ ปริมาณน้ำทั้งหมดในส่วนผสม
$W_{retained}$	คือ ปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บโดยวัสดุผงและมวลรวม