

ผลของสารลดน้ำอย่างมากต่อระดับความเข้มของการผสมของซีเมนต์เฟลด์สปาร์และมะขรต์ตาวร์



นาย นิพนธ์ พงษ์ลิมานนท์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0475-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF HIGH RANGE WATER – REDUCING ADMIXTURE ON MIXING INTENSITY  
OF CEMENT PASTE AND MORTAR

Mr. Nipon Ponglimanon

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 2000

ISBN 974-13-0475-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของสารลดน้ำอย่างมาต่อระดับความเข้มข้นของการผสมของ  
ซีเมนต์โพสต์และมอร์ตาร์

โดย

นาย นิพนธ์ พงษ์ลิมานนท์


สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญไชย สถิตมั่นในธรรม

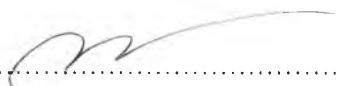
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

 ..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญไชย สถิตมั่นในธรรม)

 ..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.ชัชชาติ สิทธิพันธุ์)

นิพนธ์ พงษ์ลิมาพันธ์ : ผลของสารลดน้ำอย่างมากต่อระดับความเข้มของการผสมของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์  
(EFFECTS OF HIGH RANGE WATER – REDUCING ADMIXTURE ON MIXING INTENSITY OF CEMENT  
PASTE AND MORTAR) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.บุญไชย สถิตมั่นในธรรม 145 หน้า ISBN : 974-13-0475-7

กระบวนการผสมมีผลอย่างมากต่อการควบคุมคุณภาพของส่วนผสมคอนกรีต วิธีประเมินการผสมมักเป็น  
สิ่งที่นอกเหนือความสนใจ จากการศึกษาพบว่า ระดับความเข้มของการผสมมีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของคอนกรีต  
และสามารถใช้เป็นตัวชี้บ่งบอกคุณภาพการผสม ปัจจัยที่มีผลต่อระดับความเข้มของการผสมมีหลายประการได้แก่  
ปริมาณสารลดน้ำอย่างมาก การเคลื่อนที่ของมวลรวมหยาบ ตลอดจนจนถึงคุณสมบัติและชนิดของวัสดุผง งานวิจัยนี้  
ศึกษาเฉพาะผลของสารลดน้ำอย่างมากต่อพลังงานการผสมและค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของ  
ซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ที่มีสารลดน้ำอย่างมาก

จากการศึกษาพบว่า พลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์สัมพันธ์กับรูปร่างการจัดเรียงตัวและแรงยึดเหนี่ยว  
ระหว่างอนุภาค สำหรับซีเมนต์เพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมากพบว่า สารลดน้ำอย่างมากมีส่วนช่วยให้อนุภาคซีเมนต์มี  
การจัดเรียงตัวแน่นขึ้น ในขณะที่เดียวกันแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคมีค่าลดลงทั้งนี้เนื่องจากผลของแรงผลักทางไฟ  
ฟ้าจากสารลดน้ำอย่างมาก สำหรับมอร์ตาร์ ผลของสารลดน้ำอย่างมากต่อพลังงานการผสมสามารถพิจารณาได้เป็น  
2 กรณีคือ กรณีที่สัดส่วนปริมาตรของแข็งของซีเมนต์ต่อปริมาตรของแข็งทั้งหมดมากกว่า 0.25 และกรณีที่น้อยกว่า  
0.25 สำหรับกรณีแรก ผลของซีเมนต์เพสต์เป็นส่วนสำคัญและสามารถตัดผลของมวลรวมได้ สำหรับกรณีที่สอง ให้  
คิดผลของมวลรวมต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคด้วย

สำหรับผลของระดับความเข้มของการผสม จากการศึกษาพบว่า ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม  
ของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมากไม่ขึ้นกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ในขณะที่ ซีเมนต์เพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่าง  
มากพบว่า สารลดน้ำอย่างมากช่วยลดจำนวนรอยต่อระหว่างอนุภาค ซึ่งเป็นผลให้ต้องการพลังงานเพื่อกระจาย  
อนุภาคลดลง นอกจากนี้ สารลดน้ำอย่างมากยังมีส่วนช่วยหล่อลื่นซึ่งขึ้นกับระยะห่างระหว่างอนุภาค สำหรับค่าระดับ  
ความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของมอร์ตาร์ทั้งที่มีและไม่มีสารลดน้ำอย่างมากพบว่า เป็นสัดส่วนโดยตรงกับสัดส่วน  
ปริมาตรของแข็งของซีเมนต์ต่อปริมาตรของแข็งทั้งหมดและค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์  
เพสต์

สารลดน้ำอย่างมากส่งผลให้ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมลดลง ทั้งนี้เนื่องจาก สารลดน้ำอย่าง  
มากช่วยกระจายอนุภาคซีเมนต์ ดังนั้นจึงต้องการพลังงานกลภายนอกเพื่อมาช่วยกระจายอนุภาคลดลง อย่างไรก็ตาม  
ในงานวิจัยนี้ได้ครอบคลุมถึงผลการเคลื่อนที่ของมวลรวมหยาบ ดังนั้นเพื่อให้สามารถนำไปใช้เป็นมาตรฐานกำหนด  
ความเหมาะสมของการผสมคอนกรีตได้ จึงควรมีการศึกษาผลของการเคลื่อนที่ของมวลรวมหยาบ ตลอดจนจนถึงผล  
ของวัสดุผงต่อระดับความเข้มของการผสมต่อไป

ภาควิชา..... วิศวกรรมโยธา..... ลายมือชื่อนิสิต..... พงษ์ลิมาพันธ์  
สาขาวิชา..... วิศวกรรมโยธา..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา..... 2543.....

# # 4070315321: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORDS: MIXING ENERGY/MIXING INTENSITY/OPTIMUM MIXING INTENSITY HIGH RANGE WATER -  
REDUCING ADMIXTURE (HRWRA) /CEMENT PASTE/MORTAR NIPON PONGLIMANON, MR:  
EFFECTS OF HIGH RANGE WATER – REDUCING ADMIXTURE ON MIXING INTENSITY OF  
CEMENT PASTE AND MORTAR, THESIS ADVISOR: ASST. PROF BOONCHAI  
STITMANNATHUM, DR., 145 pp., ISBN: 974-13-0475-7

It has been widely accepted that mixing process will be a major factor that greatly influences to the quality control of concrete mixture. The method to specify the adequacy of mixing process has been an outmost topic interested by concrete industry for a long time. The previous research can be concluded that mixing intensity greatly affects to the properties of concrete after mixing and can be adopted as an indicator to specify the mixing adequacy. Since the study has also been shown that mixing intensity depends on a variety of factors such as HRWRA content, movement of coarse aggregate and properties of powder materials. This research will focus on the effect of mixing energy and mixing intensity of cement paste and mortar with HRWRA.

The study have shown that mixing energy of cement paste is greatly affected by particle arrangements and their interactive bonding. For cement paste with HRWRA, it have been found that HRWRA brings cement particles becoming denser; at the same time, it weakens their bonding by the effect of electrical repulsive force. For mortar mixture, the effect of HRWRA affecting to mixing energy must be described in 2 different cases: As the ratio of cement's solid volume to total solid volume is greater than 0.25 and lower than 0.25. For the first case, effect of cement paste is dominant so the effect of aggregate can be omitted; however, the effect of aggregate to particle bonding have to be included in the later case.

For the effect of mixing intensity, the study have shown that the optimum mixing intensity of cement paste without HRWRA is independent to the water-cement ratio. Mean while, for cement paste with HRWRA, it can be shown that HRWRA will reduce some particle contacts, so the dissipating energy can be decreased. Furthermore, HRWRA prevents cement to agglomerate by its lubricating effect depending on the distance between cement particle. The study have also indicated that the optimum mixing intensity of mortar both with and without HRWRA varies linearly to the ratio of solid volume fraction of cement to total solid volume in mixture and the optimum mixing intensity of cement paste.

For the reason that HRWRA significantly reduces the optimum mixing intensity can be explained by dispersing effect of HRWRA to the cement particle. This surface reaction brings to the less external mechanical energy to be input. However this research does not account for the effect of coarse aggregate movement through the effect of other powders to the mixing intensity. The further studies must be conducted.

Department..... Civil Engineering ..... Student's signature.....  
Field of study..... Civil Engineering ..... Advisor's signature.....  
Academic year..... 2000 .....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญไทย สติตมันน์ในธรรม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งได้อุทิศทั้งกำลังกาย กำลังใจ และสละเวลาอันมีค่าในการให้คำแนะนำชี้แนะอันเป็นประโยชน์ รวมทั้งตรวจสอบ และแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาในการทำกรวิจัย ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ และ อาจารย์ ดร.ชัชชาติ สิทธิพันธุ์ ที่ได้กรุณาให้ความสนใจในการเป็นคณะกรรมการตรวจสอบ วิทยานิพนธ์

งานวิจัยนี้จะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงลงได้หากปราศจากความอนุเคราะห์ และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ จากบุคคล หลายฝ่าย ซึ่งผู้เขียนขอประกาศกิตติกรรมไว้ ณ ที่นี้ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล      ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คุณพงษ์เทพ สิริกุลประทุม

บริษัท W.R.GRACE ประเทศไทย

ผู้เขียนยังขอขอบพระคุณอย่างสุดซึ้งกับ รุ่นพี่ เพื่อน ๆ น้อง ๆ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการคอนกรีตที่คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินการทดสอบอย่างไม่เห็นแก่เหน็ด เหนื่อย โดยเฉพาะพี่หนุ่มและพี่ก้อง ที่ได้ช่วยเหลือเกี่ยวกับการทดสอบและแก้ไขบางส่วน

ท้ายที่สุด และเหนือสิ่งอื่นใด คุณประโยชน์อันใดทั้งหมดที่พึงจะได้รับจากวิทยานิพนธ์นี้ ผู้เขียนขอมอบให้แก่ บิดา มารดา และ ครูบาอาจารย์ทุก ๆ ท่าน ที่คอยให้การอบรม ดูแล ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในแขนงต่าง ๆ ซึ่งผู้เขียนขอจดจำไว้จนกว่าชีวิตจะหาไม่

นิพนธ์ พงษ์ลิมานนท์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
รายการตารางประกอบ .....	ฅ
รายการรูปประกอบ .....	ญ
รายการสัญลักษณ์ .....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ทั่วไป .....	1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา .....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย .....	4
1.5 การดำเนินการวิจัย .....	5
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ .....	6
บทที่ 2 สารเคมีผสมเพิ่ม	
2.1 ทั่วไป .....	12
2.2 สารเคมีผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำ .....	12
2.3 สารเคมีผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำอย่างมาก .....	15
2.4 สารเคมีผสมเพิ่มประเภทสารเร่งการก่อตัว .....	16
2.5 สารเคมีผสมเพิ่มประเภทสารหน่วงการก่อตัว .....	17
2.6 สรุป .....	17
บทที่ 3 พลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ที่มีสารลดน้ำอย่างมาก	
3.1 บทนำ .....	28
3.2 ปริมาณน้ำอิสระ .....	28
3.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค .....	32
3.4 แบบจำลองทำนายพลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก.....	37
3.5 ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าทำนายและผลการทดลองของพลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์ และมอร์ตาร์ที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก .....	42

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.6 แบบจำลองทำนายพลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ที่มีสารลดน้ำอย่างมาก.....	43
3.7 ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าทำนายและผลการทดลองพลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์ และมอร์ตาร์ที่มีสารลดน้ำอย่างมาก .....	48
3.8 สรุป .....	49
บทที่ 4 ผลของระดับความเข้มข้นของการผสมต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์	
4.1 ทัวไป .....	67
4.2 ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสม .....	67
4.3 ค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก .....	68
4.4 การทดลองหาค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมาก..	69
4.5 แบบจำลองทำนายค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ .....	73
4.6 ผลการทดลองและแบบจำลองทำนายค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของมอร์ตาร์.....	77
4.7 ผลการทดลองของค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีต .....	79
4.8 สรุป .....	79
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	
5.1 ทัวไป .....	103
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	104
รายการอ้างอิง .....	105
ภาคผนวก .....	107
ภาคผนวก ก. รายละเอียดสมการที่อ้างอิง .....	108
ภาคผนวก ข. รายการคำนวณ .....	113
ภาคผนวก ค. รายละเอียดการทดสอบ .....	117
ภาคผนวก ง. ผลการทดลอง .....	120
ภาคผนวก จ. มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง .....	144
ประวัติผู้เขียน .....	145



## รายการตารางประกอบ

	หน้า
ตารางที่ 1.1	สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ ..... 7
ตารางที่ 1.2	สัดส่วนการผสมของมอร์ตาร์ที่มีสารลดน้ำอย่างมาก ..... 7
ตารางที่ 2.1	คุณลักษณะใช้งานของสารเคมีผสมเพิ่มตามมาตรฐาน มอก.733-2530 ..... 19
ตารางที่ 2.2	คุณลักษณะทางฟิสิกส์เมื่อทดสอบแล้วของสารเคมีผสมเพิ่ม ..... 19
ตารางที่ 2.3	ชนิดของสารลดน้ำและอัตราการเติมของสารลดน้ำ ..... 20
ตารางที่ 2.4	การเปรียบเทียบอัตราการเติมที่ใช้งานของสารหน่วงการก่อตัวชนิด A และ D ..... 20
ตารางที่ 3.1	คุณสมบัติของวัสดุ ..... 51
ตารางที่ 3.2	ขนาดคละของทรายที่ใช้ในการทดสอบเทียบกับขนาดคละของทรายตามมาตรฐาน ASTM C778 - 92a ..... 51
ตารางที่ 3.3	ค่าเฉลี่ยของกลุ่มขนาด (Size group) จำนวนโดยสมการที่ (3.12) ..... 52
ตารางที่ 3.4	สัดส่วนการผสมของของผสม ..... 52
ตารางที่ 4.1	สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่มีสารลดน้ำอย่างมาก ..... 81
ตารางที่ 4.2	ช่วงปริมาณการใช้งานของสารลดน้ำอย่างมากเบสเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์คอนเดนเสท ที่แนะนำโดยผู้ผลิต (ชื่อทางการค้า Sikament FF) ..... 81
ตารางที่ 4.3	ค่าสัมประสิทธิ์ของผลการทดลองที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และปริมาณสารลดน้ำอย่าง มากต่าง ๆ ..... 82
ตารางที่ 4.4	ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์ที่ปริมาณสารลดน้ำอย่างมาต่าง ๆ ..... 83
ตารางที่ 4.5	ผลเปรียบเทียบค่าระดับความเข้มของการผสมระหว่างการผสมตามมาตรฐาน ASTM C305-94 และ ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม ..... 83
ตารางที่ 4.6	ผลเปรียบเทียบระยะเวลาการแข็งตัวเริ่มต้นและสุดท้ายระหว่างการผสมตามมาตรฐาน ASTM C305-94 และการผสมที่ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม ..... 84
ตารางที่ 4.7	ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของมอร์ตาร์ที่มีสารลดน้ำอย่างมาก ..... 84

## รายการรูปประกอบ

		หน้า
รูปที่ 1.1	ผลของค่าพื้นที่ผิวจำเพาะต่อค่าหน่วยแรงคลากและค่าความหนืดของซีเมนต์เฟสค์ ..	8
รูปที่ 1.2	การเปลี่ยนแปลงของค่าหน่วยแรงคลากและค่าความหนืดตามระยะเวลาการผสม ...	9
รูปที่ 1.3	การเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดที่ปริมาณสารลดน้ำอย่างมาต่าง ๆ .....	10
รูปที่ 1.4	ผลของความเร็วยอบของเครื่องผสมต่อค่าความหนืดของซีเมนต์เฟสค์ .....	10
รูปที่ 1.5	ผลของสารลดน้ำอย่างมากต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์ .....	11
รูปที่ 2.1	การกระจายตัวของซีเมนต์เฟสค์ด้วยสารลดน้ำ .....	21
รูปที่ 2.2	โครงสร้างทางเคมีของสารลดน้ำ .....	22
รูปที่ 2.3	ผลของยิปซัมและแอนไฮไดรท์ต่อประสิทธิภาพของสารลดน้ำ .....	23
รูปที่ 2.4	ผลของปริมาณอัลคาไลน์ , อะลูมิเนต และซีเมนต์ต่อสารลดน้ำ .....	24
รูปที่ 2.5	โครงสร้างทางเคมีของสารลดน้ำอย่างมาก .....	25
รูปที่ 2.6	ผลของแคลเซียมคลอไรด์ต่อปฏิริยาระหว่างไตรแคลเซียมซิลิเกตและน้ำ .....	26
รูปที่ 2.7	ผลของระยะเวลาการก่อตัวต่อกำลังรับแรงอัดระยะปลายที่ 28 วัน .....	27
รูปที่ 3.1	ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของทราย แคล็ก (Slag) และซีเมนต์ด้วยวิธีเซนตริฟิวส์ <sup>[1]</sup> .....	53
รูปที่ 3.2	ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์โดยวิธีทดสอบค่ายุบตัวขนาดเล็ก .....	54
รูปที่ 3.3	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค (F) และสัดส่วนระยะห่างระหว่างอนุภาค (k) .....	54
รูปที่ 3.4	แรงต้านของส่วนผสมที่กระทำต่อโม่มีดผสม <sup>[1]</sup> .....	55
รูปที่ 3.5	ค่าตัวประกอบสำหรับปรับเปลี่ยนหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเป็นพลังงานการผสมของเฟสค์ที่ผสมด้วยเครื่องผสมชนิดกระทะ (อ้างอิงผลการทดลองของ Stitmannaitum <sup>[1]</sup> ) .....	56
รูปที่ 3.6	ค่าตัวประกอบสำหรับปรับเปลี่ยนหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเป็นพลังงานการผสมของเฟสค์ที่ผสมด้วยเครื่องผสมชนิดใบพาย .....	56
รูปที่ 3.7	พลังงานการผสมของเฟสค์และมอร์ตาร์ที่ผสมด้วยเครื่องผสมชนิดกระทะ (อ้างอิงผลการทดลองของ Stitmannaitum <sup>[1]</sup> ) .....	57
รูปที่ 3.8	ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าทำนายและผลการทดลองพลังงานการผสมของส่วนผสมแคล็กและทราย (อ้างอิงผลการทดลองของ Stitmannaitum <sup>[1]</sup> ) .....	58
รูปที่ 3.9	ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าทำนายและผลการทดลองพลังงานการผสมของส่วนผสมแคล็กและทราย (อ้างอิงผลการทดลองของ Stitmannaitum <sup>[1]</sup> ) .....	59
รูปที่ 3.10	พลังงานการผสมของซีเมนต์เฟสค์ที่ผสมด้วยเครื่องผสมชนิดใบพาย .....	60

## รายการรูปประกอบ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3.11	ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าทำนายและผลการทดลองพลังงานการผสมที่ผสมด้วยเครื่องผสมชนิดต่าง ๆ .....	60
รูปที่ 3.12	ค่าแรงดึงผิวของน้ำที่ได้จากการทดลองด้วยเครื่อง Du Nouy Ring Tensiometer ที่เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของสารลดน้ำอย่างมากชนิดเบสเมลามีนฟอรั่มัลดีไฮด์คอนเดนเสท (ชื่อทางการค้า Sikament FF) ต่าง ๆ .....	61
รูปที่ 3.13	การเกิดชั้นคู่ทางไฟฟ้าบนอนุภาคซีเมนต์ที่มีส่วนผสมของสารลดน้ำอย่างมาก <sup>[30]</sup> .....	61
รูปที่ 3.14	โครงสร้างทางเคมีของสารลดน้ำอย่างมาก .....	62
รูปที่ 3.15	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารลดน้ำอย่างมากกับค่าศักย์เซต้า .....	63
	พื้นที่ได้กราฟ และค่าประมาณที่ได้จากค่าเฉลี่ยพลังงานการผสม .....	63
รูปที่ 3.16	ค่าตัวประกอบการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์ .....	64
รูปที่ 3.17	ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันสูงสุดที่ปริมาณสารลดน้ำอย่างมากต่าง ๆ .....	64
รูปที่ 3.18	ค่าตัวประกอบแรงผลึกที่ปริมาณสารลดน้ำอย่างมากและอัตราส่วนน้ำอิสระต่อซีเมนต์ต่าง ๆ .....	65
รูปที่ 3.19	ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าทำนายและผลการทดลองพลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ที่มีสารลดน้ำอย่างมาก .....	65
รูปที่ 3.20	พลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์ที่ $w/c = 0.2180$ , $\%_{sp} = 0.4\%$ .....	66
รูปที่ 3.21	ผลเปรียบเทียบค่าระดับความเข้มของการผสมระหว่างค่าจากผลการทดลอง และค่าประมาณที่ได้จากค่าเฉลี่ยพลังงานการผสม .....	66
รูปที่ 4.1	กระบวนการแตกตัวของโครงสร้างที่เกิดย้อนกลับไม่ได้และเงื่อนไขการกระจายตัวที่ระดับความเข้มของการผสมต่าง ๆ .....	85
รูปที่ 4.2	ผลการทดลองผลของระดับความเข้มของการผสมต่อคุณสมบัติสภาวะเหลวของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก .....	86
รูปที่ 4.3	ผลการทดลองหาระยะเวลาการไหลที่ระดับความเข้มของการผสมต่าง ๆ ของซีเมนต์เพสต์ .....	87
รูปที่ 4.4	การเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการไหลที่ระดับความเข้มของการผสมต่าง ๆ ( $w/c = 0.26$ ) .....	88
รูปที่ 4.5	การเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการไหลที่ระดับความเข้มของการผสมต่าง ๆ ( $w/c = 0.28$ ) .....	89
รูปที่ 4.6	ผลการทดลองผลของระดับความเข้มของการผสมต่อค่าการไหลของซีเมนต์เพสต์ .....	90
รูปที่ 4.7	ผลของระดับความเข้มของการผสมต่อค่าการไหลของซีเมนต์เพสต์ .....	91

### รายการรูปประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.8	ผลของระดับความเข้มข้นของการผสมต่อค่าการไหลที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานของซีเมนต์ เพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมาก ..... 92
รูปที่ 4.9	ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าทำนายและผลการทดลองของค่าระดับความเข้มข้นของ การผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมากปริมาณต่าง ๆ ..... 94
รูปที่ 4.10	ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทำนายค่าระดับความเข้มข้นของการผสมที่ เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ ..... 94
รูปที่ 4.11	ผลการทดลองผลของระดับความเข้มข้นของการผสมต่อมอร์ตาร์ M1 ..... 95
รูปที่ 4.12	ผลการทดลองผลของระดับความเข้มข้นของการผสมต่อมอร์ตาร์ M2 ..... 96
รูปที่ 4.13	ผลการทดลองผลของระดับความเข้มข้นของการผสมต่อมอร์ตาร์ M3 ..... 97
รูปที่ 4.14	ผลการทดลองผลของระดับความเข้มข้นของการผสมต่อมอร์ตาร์ M4 ..... 98
รูปที่ 4.15	ผลของระดับความเข้มข้นของการผสมต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์ M1 ..... 99
รูปที่ 4.16	ผลของระดับความเข้มข้นของการผสมต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์ M2 ..... 100
รูปที่ 4.17	ผลของระดับความเข้มข้นของการผสมต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์ M4 ..... 101
รูปที่ 4.18	ผลของระดับความเข้มข้นของการผสมต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ..... 102

## รายการสัญลักษณ์

$\alpha$	คือ มุมวงของของเหลว (Liquid Ring angle)
$\alpha_G, \alpha_s, \alpha_p$	คือ ค่าการดูดซึมของอนุภาคหยาบ ทราย และวัสดุผง ตามลำดับ
$\alpha_{red}$	คือ ค่าตัวประกอบการลดลงของค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสม
$\beta_1$	คือ ค่าตัวประกอบที่เป็นผลจากจำนวนรอยต่อระหว่างอนุภาคที่ลดลงและจำนวนรอยต่อทั้งหมดที่เพิ่มขึ้น
$\beta_2$	คือ ค่าตัวประกอบที่เป็นผลจากสารลดน้ำอย่างมากทำหน้าที่เสมือนม่าน ป้องกันการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน และช่วยหล่อลื่นผิวสัมผัสระหว่างอนุภาค
$\delta$	คือ มุมสัมผัส (Contact Angle)
$\epsilon$	คือ สัดส่วนปริมาตรช่องว่าง (Void Volume fraction)
$\epsilon_0$	คือ สภาพยอมของสุญญากาศ (Permittivity of the vacuum)
$\epsilon_r$	คือ สภาพยอมสัมพัทธ์ของชั้นคูทางไฟฟ้าของตัวกลาง (Relative dielectric permittivity of the medium)
$v$	คือ จำนวนของประจุที่ผิวซึ่งมีค่าศักย์เป็น $\phi_d$
$\varphi_{ij}$	คือ ค่าการกระจายแรง (Force Distribution Factor) ของแรงเฉือนซึ่งขึ้นกับลักษณะของใบมีด
$\mathcal{G}_{ij}$	คือ ค่าการกระจายแรง (Force Distribution Factor) ของแรงตั้งฉากซึ่งขึ้นกับลักษณะของใบมีด
$\gamma_G$	คือ สัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของอนุภาคหยาบ
$\gamma_s$	คือ สัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของทราย
$\gamma_p$	คือ สัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผง
$\gamma_a$	คือ พลังงานอิสระที่ผิวต่อหน่วยพื้นที่ของของเหลว a (แรงตึงผิวของของเหลว a)
$\gamma_b$	คือ พลังงานอิสระที่ผิวต่อหน่วยพื้นที่ของของเหลว b (แรงตึงผิวของของเหลว b)
$\gamma_{ab}$	คือ พลังงานปฏิกริยา a-b ต่อหน่วยพื้นที่ตรงรอยต่อระหว่างของเหลว a และ b
$\gamma_k$	คือ ค่าตัวประกอบเนื่องจากจำนวนรอยต่อทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นจากผลของค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันที่สูงขึ้น ซึ่งค่าตัวประกอบนี้จะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1 เสมอ โดยจะขึ้นกับปริมาณสารลดน้ำอย่างมาก
$\gamma_c$	คือ ค่าตัวประกอบเนื่องจากจำนวนรอยต่อที่ลดลง เนื่องมาจากผลของแรงผลักรังสีทางไฟฟ้าของสารลดน้ำอย่างมาก ซึ่งจะขึ้นกับปริมาณสารลดน้ำอย่างมาก
$\beta'_{agg}$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของมวลรวมโดยน้ำหนัก ซึ่งไม่รวมน้ำที่ถูกดูดซึมในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง
$\phi_d$	คือ ค่าศักย์ของชั้นแพร่ (Potential of the diffuse layer)
$\phi_{rep}$	คือ ตัวประกอบแรงผลักรังสี (Repulsion factor)
$\varphi_{red}$	คือ ค่าตัวประกอบการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์
$\rho$	คือ ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)
$\rho_s$	คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของทราย

### รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

$\Omega$	คือ ความเร็วรอบของเครื่องผสม
$\sigma_z$	คือ หน่วยแรงยึดเหนี่ยวของส่วนผสม
$\sigma_{z,partial}$	คือ หน่วยแรงยึดเหนี่ยวกรณีที่มีความชื้นบางส่วน
$\frac{1}{\psi_s}$	คือ ตัวประกอบความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวม
$\omega_G, \omega_s, \omega_p$	คือ ปริมาณความชื้นของอนุภาคหยาบ ทราย และวัสดุผง ตามลำดับ
$\omega_i$	คือ มุมเอียงของใบมีด $i$ จากแนวตั้ง
$A_i$	คือ พื้นที่สัมผัสระหว่างใบมีด $i$ และส่วนผสม
$a$	คือ ระยะห่างระหว่าง 2 อนุภาค
$D_{av}$	คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยสมมติ
$D_i$	คือ ขนาดเฉลี่ยของกลุ่มขนาด $i$ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้
$d$	คือ เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค
$d_i$	คือ $(2/3)$ ของขนาดช่องเปิดของตะแกรงที่อยู่เหนือตะแกรง $i$ หรือค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของวัสดุผง
$E_{wm}$	คือ พลังงานการผสมระหว่างอนุภาคของแข็งกับน้ำ
$E_s$	คือ พลังงานการผสมของอนุภาคของแข็งในสภาวะแห้ง
$E_w$	คือ พลังงานการผสมที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของพันธะของเหลว
$E_{mix}$	คือ พลังงานการผสม
$E_{in}$	คือ ระดับความเข้มของการผสม
$E_{in,mix}$	คือ ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของส่วนผสม
$E_{in,sp}$	คือ ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์โพสต์
$E_{in,\%SP}$	คือ ค่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์โพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมาก
$F$	คือ ประจุไฟฟ้าเบื้องต้น (Elementary electric charge)
$F_{RE}$	คือ แรงผลักระหว่างไฟฟ้า (Electrostatic repulsive force)
$H$	คือ แรงยึดเหนี่ยวทั้งหมดเนื่องจากพันธะสะพานของเหลว
$H_K$	คือ แรงยึดเหนี่ยวเนื่องจากความบกพร่องของแรงดัน (pressure deficiency)
$H_R$	คือ แรงยึดเหนี่ยวเนื่องจากแรงตึงผิวของน้ำ
$K'$	คือ ค่าตัวประกอบที่ใช้สำหรับปรับเปลี่ยนแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเป็นพลังงานการผสม
$k$	คือ ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชัน (co-ordination number)
$k_{min}$	คือ ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันต่ำสุด
$k_{max}$	คือ ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชันสูงสุด
$l_i^l, l_i^u$	คือ ขนาดของช่องเปิดที่เป็นขอบเขตล่างและขอบเขตบนของกลุ่มขนาดลำดับที่ $i$ ตามลำดับ
$l_{ij}$	คือ ความยาวแขนของใบมีดผสม $i$
$M_G, M_s, M_p$	คือ น้ำหนักของอนุภาคหยาบ ทราย และวัสดุผง ตามลำดับ

## รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

$M_p$	คือ น้ำหนักของวัสดุผงในส่วนผสม
$M_i$	คือ เปอร์เซ็นต์ค้ำของมวลรวมบนตะแกรงขนาด $i$
$M$	คือ น้ำหนักอนุภาคของแข็งในสภาวะแห้ง
$M_s$	คือ น้ำหนักของทรายในส่วนผสม
$N_i$	คือ แรงตึงจากที่กระทำบนใบมีด $i$
$n$	คือ ความเข้มข้นโดยรวม (Bulk concentration)
$n_p$	คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของวัสดุผงต่อปริมาตรของแข็งทั้งหมด
$P$	คือ งานจากแรงบิด มีหน่วยเป็น $N - m / sec$
$p_i$	คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งของกลุ่มขนาดที่ $i$
$R_1$	คือ รัศมีความโค้งเนื่องจากความบกพร่องของแรงดัน
$R_2$	คือ รัศมีความโค้งเนื่องจากแรงตึงผิวของของเหลว
$R$	คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann
$r$	คือ รัศมีของอนุภาคทรงกลม
$S_{agg}$	คือ ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของมวลรวม (ตร.ซม./กก.)
$S_{s0}$	คือ พื้นที่ผิวจำเพาะของทรงกลมสมมติของทราย
$S$	คือ ระดับขั้นการอิ่มตัวของช่องว่าง (degree of saturation of void)
$SSB_i$	คือ พื้นที่ผิวทั้งหมดของอนุภาคของแข็ง
$S_i$	คือ แรงเฉือนที่กระทำบนใบมีด $i$
$T$	คือ แรงตึงผิวของน้ำ
$t_{mix}$	คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการผสม
$V_{ws}$	คือ ปริมาณน้ำที่จะทำให้อนุภาคของแข็งอิ่มตัว
$V_{ms}$	คือ ปริมาตรทั้งหมดที่สภาวะอิ่มตัว
$V_{ss}$	คือ ปริมาตรของแข็งที่สภาวะอิ่มตัว
$V_{vs}$	คือ ปริมาตรช่องว่างที่สภาวะอิ่มตัว
$V_{sp}$	คือ ปริมาตรของแข็งของวัสดุผงในส่วนผสม
$V_{st}$	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
$\left(\frac{w}{p}\right)_{eff}$	คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงประสิทธิภาพ
$\left(\frac{w}{c}\right)_{free}$	คือ อัตราส่วนน้ำอิสระต่อซีเมนต์

### รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

$w_a$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์
$w_{s,no}$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์ที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก
$W_u$	คือ หน่วยน้ำหนักของอนุภาคของแข็ง
$W_{us}$	คือ ค่าหน่วยน้ำหนักของทราย
$W_{free}$	คือ ปริมาณน้ำอิสระ
$W_{hyd}$	คือ ปริมาณน้ำที่สูญเสียในปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์
$W_{total}$	คือ ปริมาณน้ำทั้งหมดในส่วนผสม
$W_{retained}$	คือ ปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บ
$\Delta W$	คือ ปริมาณน้ำที่ถูกกักเก็บโดยอนุภาคของแข็งอื่น ๆ ที่ไม่ใช่วัสดุผง
$X_{SP}$	คือ ปริมาณสารลดน้ำอย่างมาก (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของซีเมนต์)