การศึกษาผลของระดับความเข้มการผสมต่อคุณสมบัติคอนกรีตที่ได้จากโรงงานผสมคอนกรีต

นางสาว สุดารัตน์ ปีนะภา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0488-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STUDY OF EFFECTS OF MIXING INTENSITY ON PROPERTIES OF CONCRETE FROM CONCRETE MIXING PLANTS

Miss Sudarat Peenapa

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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
Academic Year 2001

ISBN 974-03-0488-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลของระดับความเข้มการผสมต่อคุณสมบัติคอนกรีตที่ได้จากโรงงานผสมคอนกรีต
โดย	นางสาว สุดารัตน์ ปีนะภา
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญไชย สถิตมั่นในธรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

……. ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ)

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

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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุดารัตน์ ปีนะภา : การศึกษาผลของระดับความเข้มการผสมต่อคุณสมบัติคอนกรีตที่ได้จากโรงงานผสมคอนกรีต. (STUDY OF EFFECTS OF MIXING INTENSITY ON PROPERTIES OF CONCRETE FROM CONCRETE MIXING PLANTS) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม, 150 หน้า. ISBN : 974-03-0488-5

คอนกรีต เป็นวัสดุสำคัญในการก่อสร้าง แต่กลับพบว่าเป็นวัสดุที่ได้รับการควบคุมคุณภาพด้านการผลิตต่ำกว่าวัสดุก่อสร้างประเภทอื่น โดยเฉพาะในแง่ของกระบวนการผสม จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าระดับความเข้มการผสมสามารถเป็นตัวบ่งชี้คุณสมบัติของคอนกรีตที่ได้จากโรงงานผสมคอนกรีตได้ โดยพบว่าคอนกรีตที่ได้รับการผสมโดยระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมจะมีค่าความสามารถการทำงานได้สูงที่สุดสำหรับคอนกรีตที่มีสัดส่วนผสมเดียวกัน

โรงงานผสมคอนกรีตโดยทั่วไปในปัจจุบันผสมคอนกรีตที่มีส่วนผสมต่างกัน ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 4 ประเภท คือ คอนกรีตธรรมดาที่ไม่ใช้เถ้าลอยและไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม คอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแต่ไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม และคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม จากการศึกษาพบว่า สามารถทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตได้ โดยปัจจัยที่มีผลต่อระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม ได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะเบลนของวัสดุผงซึ่งประกอบด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย สัดส่วนปริมาตรของแข็งของวัสดุผง ชนิดและปริมาณน้ำยาผสมเพิ่ม การเคลื่อนที่ของมวลรวมหยาบ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่วัดได้จริงจากโรงงาน พบว่า ชนิด ความจุมากที่สุดของเครื่องผสม ปริมาณการผสมแต่ละครั้ง และลำดับการใส่ส่วนผสม มีผลต่อระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม ซึ่งต้องทำการศึกษาโดยละเอียดต่อไป

คอนกรีตที่ได้จากโรงงานผสมในปัจจุบัน โดยส่วนใหญ่ได้รับการผสมโดยมีระดับความเข้มการผสมที่ใกล้เคียงกับค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม โดยมีคุณสมบัติด้านค่ายุบตัวเป็นที่ยอมรับได้ของผู้ผลิตและลูกค้า สำหรับบางโรงงานที่ผสมคอนกรีตโดยระดับความเข้มการผสมสูงกว่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมนั้น ควรจะต้องศึกษาเพิ่มเติมว่าคอนกรีตที่ได้มีคุณสมบัติด้านอื่น ๆ ดีขึ้นมากจนไม่ถือเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานในการผสมหรือไม่ ต่อไป

ภาควิชา .....วิศวกรรมโยธา..... ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา ..... วิศวกรรมโยธา..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา ..... 2544.....

4170592921: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORDS: MIXING INTENSITY / OPTIMUM MIXING INTENSITY / CONCRETE /CONCRETE PLANTS

SUDARAT PEENAPA: STUDY OF EFFECTS OF MIXING INTENSITY ON PROPERTIES OF CONCRETE FROM CONCRETE MIXING PLANTS THESIS ADVISOR: ASSIST. PROF. BOONCHAI STITMANNAITHUM, DR., 150 pp. ISBN: 974-03-0488-5

Concrete is one of the most important materials in construction. The quality control of the concrete production has not been interested by concrete industries especially in mixing process. This study can be concluded that mixing intensity can indicate properties of concrete from concrete plants. The concrete mixed by the optimum mixing intensity is the most workability compared to concrete with the same mix proportion mixed by less or higher mixing intensity.

The present concrete plants have many mix proportions which can be divided into 4 groups such as ordinary concrete without fly ash and admixture, concrete without fly ash but with admixture, concrete with fly ash but without admixture and concrete with fly ash and admixture. The study showed that the optimum mixing intensity can be predicted and factors effecting the optimum mixing intensity are specific surface of powder materials which contain cement and fly ash, solid volume fraction of powder materials, type and amount of admixture used and effects of aggregate particles. Comparing the predicted optimum mixing intensity to the one obtained from the concrete plants, it was found that type and capacity of mixer, mixing quantities and mixing sequences may effect the optimum mixing intensity. Further studies have to be included in this case.

It was found that in most concrete plants concrete is mixed by the mixing intensity that is quite equal to the optimum mixing intensity while the value of slump is acceptable. Some concrete plants have mixed the concrete by higher mixing intensity. The further studies must be conducted to ensure that the higher mixing intensity cause no exceed and not necessary mixing intensity or that the higher mixing intensity gives higher quality of concrete.

Department……Civil Engineering...…. Student's signature……..……....

Field of study…… Civil Engineering…... Advisor's signature……..……..…….

Academic year…….. 2001……

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญไชย สถิตมั่นในธรรม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ผู้ซึ่งได้อุทิศทั้งกำลังกาย กำลังใจ และสละเวลาอันมีค่าในการให้คำแนะนำชี้แนะอันเป็นประโยชน์ รวมทั้งตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ และอาจารย์ ดร.ชัชชาติ สิทธิพันธุ์ ที่ได้กรุณาให้ความสนใจเป็นคณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

งานวิจัยนี้จะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงลงได้หากปราศจากความอนุเคราะห์จากบุคลากรหลายฝ่ายของโรงงานผสมคอนกรีต ซึ่งได้ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลอันมีประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิจัย รวมทั้งอำนวยความสะดวกในระหว่างดำเนินการวิจัยเป็นอย่างดี

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รุ่นพี่ เพื่อน ๆ น้อง ๆ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการคอนกรีตที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินการวิจัยอย่างไม่เห็นแก่เหน็ดเหนื่อย

ท้ายที่สุด ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ครูบาอาจารย์ทุก ๆ ท่านที่ให้การอบรมดูแล ให้กำลังใจ และประสิทธิ์ประสาทวิชาการความรู้ในแขนงต่าง ๆ ซึ่งผู้เขียนขอจดจำไว้จนกว่าชีวิตจะหาไม่

สุดารัตน์ ปีนะภา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย…… ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ…… จ

กิตติกรรมประกาศ…… ฉ

สารบัญ…… ช

สารบัญตาราง…… ฌ

สารบัญภาพ…… ญ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย…… 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย…… 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย…… 2

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง…… 3

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง …… 11

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ศึกษากระบวนการผลิตในโรงงานผสมคอนกรีตเป็นข้อมูลเบื้องต้น…… 27

3.2 คัดเลือกโรงงานตัวแทน…… 27

3.3 ศึกษาข้อมูลกระบวนการผลิตคอนกรีตอย่างละเอียด…… 27

3.4 รวบรวมข้อมูล……28

3.5 วิเคราะห์ผลข้อมูล…… 28

บทที่ 4 การวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 กระบวนการผลิตในแต่ละโรงงานผสมคอนกรีต…… 31

4.2 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการหมุนเครื่องผสมเปล่า…… 33

4.3 การวัดระดับความเข้มการผสมในแต่ละโรงงาน…… 34

4.4 ผลทดสอบการผสมของโรงงานผสมคอนกรีต…… 35

4.5 ค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน (Normalized Slump)…… 36

4.6 ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม…… 36

หน้า

4.7 ผลของระดับความเข้มการผสมที่มีต่อค่ายุบตัวของคอนกรีตสด……. 36
4.8 การทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม……..…. 37
4.9 การเปรียบเทียบระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่วัดได้
จากโรงงานผสมกับค่าที่ได้จากการทำนาย……..…… 40
4.10 ผลของกระบวนการผสมที่มีต่อระดับความเข้มการผสม……. 50
4.11 ผลของเถ้าลอยและน้ำยาผสมเพิ่มต่อระดับความเข้มการผสม……. 51
4.12 ค่ากำลังอัดที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน (Normalized Strength)…….. 51
4.13 ระดับความเข้มการผสมกับค่ากำลังอัดที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน…… 52

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ
5.1 สรุปผลการวิจัย…….. 114
5.2 ข้อเสนอแนะ…….. 115

รายการอ้างอิง……...…….... 120

ภาคผนวก ……122

ภาคผนวก ก ภาพแสดงโรงงานผสมคอนกรีต……..123

ภาคผนวก ข สัดส่วนขนาดคละของมวลรวมที่ใช้ในโรงงานตัวแทน……..…. 137

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์…… 150

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 2.1	เวลาขั้นต่ำในการผสมที่แนะนำสำหรับความจุของเครื่องผสมต่าง ๆ…….	23
ตารางที่ 4.1	สรุปคุณสมบัติวัสดุผสมของโรงงานตัวอย่าง…….	53
ตารางที่ 4.2	สรุปคุณสมบัติเครื่องผสมของโรงงานตัวอย่าง……..	57
ตารางที่ 4.3	สรุปกระบวนการผสมของโรงงานตัวอย่าง……	59
ตารางที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการหมุนกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการหมุนเครื่องผสมเปล่า……..	62
ตารางที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดเครื่องผสมและปริมาณการผสมของแต่ละสัดส่วนผสม……...	63
ตารางที่ 4.6	ผลทดสอบการผสมคอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยและไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ค……...	65
ตารางที่ 4.7	ผลทดสอบการผสมคอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ก	67
ตารางที่ 4.8	ผลทดสอบการผสมคอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ง	68
ตารางที่ 4.9	ผลทดสอบการผสมคอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน จ	70
ตารางที่ 4.10	ผลทดสอบการผสมคอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ช	71
ตารางที่ 4.11	ผลทดสอบการผสมคอนกรีตใช้เถ้าลอยแต่ไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ฉ	73
ตารางที่ 4.12	ผลทดสอบการผสมคอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ก	74
ตารางที่ 4.13	ผลทดสอบการผสมคอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ข	77
ตารางที่ 4.14	ผลทดสอบการผสมคอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ง	78
ตารางที่ 4.15	ผลทดสอบการผสมคอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน จ	79
ตารางที่ 4.16	ผลทดสอบการผสมคอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ฉ	84
ตารางที่ 4.17	ผลทดสอบการผสมคอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ช	85
ตารางที่ 4.18	ค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมและระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่ได้จากโรงงานผสมคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม	94
ตารางที่ 4. 19	ค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมและระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่ได้จากโรงงานผสมคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม	95
ตารางที่ 5.1	สรุปผลระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีต	117

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ		หน้า
รูปที่ 2.1	Drum Mixer แบบเพลาเดี่ยวและแบบเพลาคู่……	24
รูปที่ 2.2	Pan Mixer แบบธรรมดาและแบบที่มีใบกวนเพิ่ม……	24
รูปที่ 2.3	วิธีการผสมแบบห่อหุ้มทรายด้วยซีเมนต์ (S.E.C.)……	25
รูปที่ 2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ใช้เถ้าลอยและไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่มกับพื้นที่ผิวจำเพาะเบลนของซีเมนต์…..	26
รูปที่ 2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยแต่ไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่มกับพื้นที่ผิวจำเพาะเบลนของวัสดุผง……..	26
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการเลือกโรงงานตัวแทนและการดำเนินการวิจัย…….	30
รูปที่ 4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับพลังงานที่ใช้ในการหมุนเครื่องผสมเปล่าของทุกโรงงานผสมคอนกรีต……...	96
รูปที่ 4.2	ลำดับการใส่ส่วนผสมของโรงงาน ค……	96
รูปที่ 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ค, mix 1 (คอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยและไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม)……..	97
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ง, mix 1 (คอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A&D)…….	98
รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน จ, mix 3 (คอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A)…….	98
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ช, mix 1 (คอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท D)…….	99
รูปที่ 4.7	เปรียบเทียบค่านายระดับความเข้มการผสมกับค่าระดับความเข้มการผสมที่ใช้ในโรงงาน ฉ ซึ่งผสมคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแต่ไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม……	100
รูปที่ 4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ก, mix 5 (คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท D)……...	101

ภาพประกอบ		หน้า
รูปที่ 4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ก, mix 6 (คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท D).....	101
รูปที่ 4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน จ, mix 5 (คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A).....	102
รูปที่ 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน จ, mix 13 (คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท D).....	102
รูปที่ 4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน จ, mix 6 (คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A).....	103
รูปที่ 4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน จ, mix 14 (คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท D).....	103
รูปที่ 4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน จ, mix 10 (คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A).....	104
รูปที่ 4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ช, mix 3 (คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A&D).....	104
รูปที่ 4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ช, mix 4 (คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A&D).....	105
รูปที่ 4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ช, mix 6 (คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A&D).....	105
รูปที่ 4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ช, mix 8 (คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A&D).....	106

ภาพประกอบ		หน้า
รูปที่ 4.19	รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ช, mix 9 (คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A&D)…….	106
รูปที่ 4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ช, mix 14 (คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A&D)…….	107
รูปที่ 4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ช, mix 23 (คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท D)……..	107
รูปที่ 4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ากำลังอัดที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ค (คอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยและไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม)…….	108
รูปที่ 4.23	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ากำลังอัดที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ง (คอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A&D)……..	109
รูปที่ 4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ากำลังอัดที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ฉ (คอนกรีตใช้เถ้าลอยแต่ไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม)……...	110
รูปที่ 4.25	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ากำลังอัดที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ข (คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A).	111
รูปที่ 4.26	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ากำลังอัดที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ง (คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A&D)……..	111
รูปที่ 4.27	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ากำลังอัดที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ฉ (คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท F)	112
รูปที่ 4.28	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ากำลังอัดที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ช (คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A&D)……..	112
รูปที่ 4.29	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ากำลังอัดที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ช (คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท D)	113
รูปที่ 5.1	เปรียบเทียบค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมกับค่าที่วัดได้จากโรงงานผสมคอนกรีต……..	119

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย

คอนกรีต เป็นวัสดุที่มีความสำคัญในวงการก่อสร้าง ในปัจจุบันมีการก่อสร้างเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นความต้องการคอนกรีตจึงมากขึ้นด้วย โรงงานผสมคอนกรีตมีความสำคัญเพื่อผลิตคอนกรีตให้ทันกับความต้องการ ไม่ว่าจะเป็นโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จหรือผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูป ความต้องการที่มากขึ้นทำให้เกิดการแข่งขันทางการค้า ดังนั้นการผลิตคอนกรีตในโรงงานผสมคอนกรีตต่าง ๆ จึงไม่ใช่เพียงผลิตให้มีคุณสมบัติตรงตามความต้องการของลูกค้าเท่านั้น แต่ยังต้องประหยัดเวลาในการผลิตและการขนส่งอีกด้วย การแข่งขันดังกล่าวส่งผลโดยตรงกับกระบวนการผลิตคอนกรีต ทำให้โรงงานผสมต้องควบคุมให้ได้คุณสมบัติของคอนกรีตที่ดีตามต้องการและต้องศึกษาผลกระทบทางด้านการค้าด้วย ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตคอนกรีตจึงมีมากขึ้นรวมทั้งกระบวนการผลิตก็มีความหลากหลายขึ้น

โดยทั่วไปการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตคอนกรีตที่ดีและมีคุณสมบัติตามที่ต้องการในโรงงานผสมคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตซึ่งประกอบไปด้วย การออกแบบส่วนผสม สัดส่วนผสม การคัดเลือกวัสดุผสม กระบวนการผสม การลำเลียงและเทลงแบบ การทดสอบและการควบคุมคุณภาพ ซึ่งกระบวนการต่าง ๆ เหล่านี้จะแตกต่างกันไปในแต่ละแหล่งผลิต

เพื่อให้คุณสมบัติของคอนกรีตมีการพัฒนาขึ้น การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการผลิตคอนกรีตจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งเพื่อให้ได้คอนกรีตตามที่ต้องการ แต่โดยทั่วไปพบว่าการวิจัยเกี่ยวกับคอนกรีตเพื่อพัฒนาคุณภาพมักเน้นที่การคัดเลือกและออกแบบส่วนผสม เช่น การคัดเลือกวัสดุที่สามารถใช้ทดแทนซีเมนต์หรือใส่สารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพ หรือการออกแบบส่วนผสมให้เหมาะสมกับวัสดุนั้น ๆ โดยให้ความสนใจกับกระบวนการผสมน้อยมากทั้งที่เป็นส่วนสำคัญที่จะกำหนดคุณภาพของคอนกรีต

งานวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการผสมคอนกรีตที่ผ่านมาได้ให้แนวทางในการพิจารณาระดับความเข้มการผสมซึ่งวัดได้จากพลังงานไฟฟ้ารวมที่ใช้ในการผสม แต่อย่างไรก็ตามโดยส่วนใหญ่ก็เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ เนื่องจากโรงงานผสมคอนกรีตเป็นแหล่งผลิตคอนกรีตที่สำคัญในปัจจุบัน การทำวิจัยในครั้งนี้จึงมุ่งความสนใจไปที่กระบวนการผสมในโรงงานผสมคอนกรีตในระดับอุตสาหกรรมว่ามีกระบวนการอย่างไร และเพื่อศึกษาว่ากระบวนการที่ปฏิบัติในปัจจุบันทำให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพน่าเชื่อถือเหมาะกับการนำไปใช้งานหรือไม่ อย่างไร รวมทั้งเพื่อศึกษาแนวทางการผลิตในส่วนของกระบวนการผสมว่าควรเป็นอย่างไรเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติที่ดีตามต้องการและมีคุณสมบัติสม่ำเสมอเพื่อสร้างความมั่นใจในการนำไปใช้งาน รวม

ทั้งเป็นการประหยัดในแง่ของการคัดเลือก ออกแบบส่วนผสม สัดส่วนผสม และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผสมอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาระดับความเข้มการผสมในโรงงานผสมคอนกรีต

1.2.2 ศึกษาผลของระดับความเข้มการผสมที่มีต่อคุณสมบัติด้านค่ายุบตัวของคอนกรีตสดที่ได้จากโรงงานผสมคอนกรีต โดยพิจารณาจำแนกตามส่วนผสมของคอนกรีตว่าเป็นคอนกรีตธรรมดาหรือคอนกรีตที่มีส่วนผสมของของเถ้าลอยหรือน้ำยาผสมเพิ่ม

1.2.3 ศึกษาผลของกระบวนการผสมที่มีต่อระดับความเข้มการผสม

1.2.4 เพื่อศึกษาว่ากระบวนการผสมในโรงงานผสมคอนกรีตที่ปฏิบัติในปัจจุบันทำให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติตรงตามความต้องการของผู้ผลิตหรือไม่

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษากระบวนการผสมในโรงงานผสมคอนกรีตโดยเครื่องผสมที่มีขนาดความจุมากที่สุด 0.5 – 3.0 ลูกบาศก์เมตร ชนิด Force Type Mixer และ Gravity Type Mixer

1.3.2 ศึกษาคุณสมบัติด้านค่ายุบตัวของคอนกรีตสดหลังจากเทออกจากเครื่องผสมโดยไม่พิจารณาการขนส่งและการเทลงแบบ

1.3.3 ศึกษาคอนกรีตที่มีส่วนผสมของน้ำยาผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำ สารลดน้ำและหน่วงการก่อตัว และสารลดน้ำอย่างมาก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 คุณสมบัติส่วนผสมและสัดส่วนผสม[1]

การผลิตคอนกรีตเพื่อให้มีคุณสมบัติตามต้องการจะต้องพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ดังนี้

2.1.1.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นกับน้ำ และทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะมีผลโดยตรงต่อการก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์ ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของคอนกรีต

อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ และคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วจะขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ดังนั้น ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น จะมีผลต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วซึ่งปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ได้แก่ อายุของเพสต์ องค์ประกอบของซีเมนต์ ความละเอียดของซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

พิจารณาว่าซีเมนต์เป็นอนุภาคของแข็งขนาดเล็กในคอนกรีต ถ้าส่วนผสมถูกผสมอย่างดีจนถึงระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมค่าหนึ่ง อนุภาคซีเมนต์จะกระจายทั่วส่วนผสมและห่อหุ้มอนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่กว่าเพื่อให้ส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกันและทำให้มีการลื่นไหลที่ดีมากกว่าการผสมอนุภาคที่มีขนาดเท่า ๆ กัน ส่งผลให้คอนกรีตมีคุณสมบัติการทำงานได้ที่ดี

2.1.1.2 มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด

คุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วจะขึ้นอยู่กับกระบวนการย่อยแปรสภาพของมวลรวม ได้แก่ ลักษณะของอนุภาค ความพรุนหรือความหนาแน่นของมวลรวม กำลังของมวลรวม ความทนทานต่อการสึกกร่อน การยืดหยุ่น ความอยู่ตัว เป็นต้น

นอกจากนี้มวลรวมที่ดี เมื่อผสมเป็นคอนกรีตแล้ว จะต้องทำให้คอนกรีตนั้นมีความสามารถเทได้ง่าย แข็งแรงทนทาน และราคาประหยัด นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาคุณสมบัติด้าน ความแข็งแกร่ง ความต้านทานต่อแรงกระแทกและการเสียดสี ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี รูปร่างและลักษณะผิว สัดส่วนขนาดคละร่วมด้วย

2.1.1.3 น้ำ

น้ำที่นำมาใช้ในการผสมคอนกรีตคือน้ำที่มีคุณภาพดี และปริมาณเหมาะสมในการผลิตคอนกรีต กฎเกณฑ์ทั่วไปของน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต คือน้ำที่ดื่มได้นับเป็นน้ำที่ใช้ในงานคอนกรีตได้เสมอ ส่วนปริมาณน้ำผสม นอกจากจะมีผลต่อความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตเหลวแล้วยังมีผลต่อกำลังอัดและความทนทานของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วย

ถ้าในน้ำที่ผสมคอนกรีตมีสิ่งเจือปนซึ่งได้แก่ ตะกอน สารละลายอินทรีย์ และสารละลาย อนินทรีย์อยู่มากเกินระดับหนึ่งอาจก่อปัญหาทางด้านคุณภาพ ได้แก่

- กำลังและความทนทานของคอนกรีตลดลง
- เวลาการก่อตัวที่เปลี่ยนแปลงไป
- คอนกรีตเกิดการหดตัวมากกว่าปกติ
- อาจมีการละลายของสารประกอบภายในคอนกรีตออกมาแข็งตัวบนผิวนอก

2.1.1.4 สารผสมเพิ่ม

สารเคมีผสมเพิ่มคอนกรีต คือ สารละลายเคมีชนิดต่าง ๆ ที่ใส่ส่วนผสมลงในคอนกรีตเพื่อเปลี่ยนเวลาการก่อตัวและลดปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C494 แบ่งสารเคมีผสมเพิ่มเหล่านี้ออกเป็น 7 ประเภท คือ

ก. ประเภท A สารลดปริมาณน้ำ (Water Reducing)

- ผลต่อคอนกรีตสด

สารลดปริมาณน้ำนี้จะเพิ่มความสามารถเทได้ ถ้าไม่มีการปรับส่วนผสมอื่น ๆ โดยปกติจะทำให้คอนกรีตมีค่ายุบตัวเพิ่มขึ้น 25 – 50 มิลลิเมตร และค่าอัตราการสูญเสียการยุบตัว (Slump Loss) ในช่วงแรกของคอนกรีตที่ใส่สารลดปริมาณน้ำจะมากกว่าคอนกรีตทั่วไป และยังพบว่า โดยทั่วไปสารลดปริมาณน้ำจะมีผลต่อเวลาการก่อตัวคือจะหน่วงเวลาการก่อตัวเล็กน้อยถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมคอนกรีต นอกจากนั้นสารลดปริมาณน้ำจะไม่มีผลต่อความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของคอนกรีต (Heat of Hydration)

- ผลต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

ถ้าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากัน คอนกรีตที่ใส่สารลดปริมาณน้ำจะให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตทั่วไปเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการกระจายตัวที่ดีของเม็ดปูนซีเมนต์ในส่วนผสม ในด้านการหดตัวพบว่าการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) และความล้า (Creep) จะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อความสามารถเทได้และกำลังอัดที่ 28 วันเท่ากัน นอกจากนี้ผลของการลดปริมาณน้ำในส่วนผสมยังทำให้ความทนทานและการกันซึมสูง เพราะคอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น

ข. ประเภท B สารหน่วงเวลาการก่อตัว (Retarding)

- ผลต่อคอนกรีตสด

มีผลในการหน่วงเวลาการก่อตัวและแข็งตัวของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความสามารถเทได้นาน รวมทั้งมีค่าการสูญเสียค่ายุบตัวน้อยลงโดยหน่วงการเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น แต่ปริมาณความร้อนทั้งหมดยังคงเดิม

สารหน่วงเวลาการก่อตัวมีแนวโน้มจะเพิ่มการหดตัวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage) เพราะว่าคอนกรีตจะเหลวอยู่นานกว่าปกติ ดังนั้นคอนกรีตที่ผสมสารหน่วงเวลาการก่อตัวจึงจำเป็นที่จะต้องบ่มอย่างถูกต้องและเพียงพอเพื่อป้องกันการแตกร้าว ซึ่งจะเกิดขึ้นถ้าปล่อยให้คอนกรีตแห้งก่อนที่คอนกรีตจะมีกำลังอัดเพียงพอ

- ผลต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นลดลง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการหน่วงเวลาการก่อตัว แต่เมื่อคอนกรีตมีอายุ 2 – 3 วัน กำลังอัดจะใกล้เคียงกับคอนกรีตทั่ว ๆ ไปและอัตราการเกิดการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) และการล้า (Creep) เพิ่มขึ้น แต่ค่ารวมจะไม่เปลี่ยนแปลง

ค. ประเภท C สารเร่งเวลาการก่อตัวและแข็งตัว (Accelerating)

- ผลต่อคอนกรีตสด

เวลาการก่อตัวและแข็งตัวจะลดลง แต่ทั้งนี้ได้มีข้อกำหนดควบคุมไว้ ไม่ให้การก่อตัวเกิดเร็วมากจนไม่สามารถนำคอนกรีตนั้น ๆ ไปใช้งานได้

- ผลต่อคอนกรีตแข็งตัวแล้ว

กำลังอัดในช่วงต้นจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่กำลังอัดในระยะยาว (Long Term Strength) ที่อายุมากกว่า 28 วัน จะต่ำกว่าคอนกรีตทั่ว ๆ ไป โดยแคลเซียมคลอไรด์ที่เพิ่มเข้าไปจะเพิ่มทั้ง การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) และความล้า (Creep) สารเร่งการก่อตัว จะมีผลทำให้ความสามารถทนทานต่อซัลเฟตของคอนกรีตลดลง รวมทั้งยังกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาอัลคาไลน์ของมวลรวม (Alkaline Aggregate Reaction) สำหรับในกรณีที่มวลรวมมีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ยังพบว่า คอนกรีตจะมีความสามารถทนทานต่อการกัดกร่อน (Erosion) และการสึกกร่อน (Abrasion) ทุกช่วงอายุมากกว่าคอนกรีตทั่ว ๆ ไป

ง. ประเภท D สารลดปริมาณน้ำและหน่วงเวลาการก่อตัว (Water Reducing and Retarding)

เป็นสารผสมเพิ่มที่ใช้มากที่สุดสำหรับงานคอนกรีตในประเทศไทยโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับงานคอนกรีตผสมเสร็จ มีหน้าที่ 2 อย่าง คือ ลดปริมาณน้ำและเพิ่มระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต โดยองค์ประกอบหลักจะเหมือนกับสารผสมเพิ่มประเภท A และ B โดยปริมาณการใช้สารผสมเพิ่มนี้จะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิของคอนกรีต ปริมาณซีเมนต์ ถ้า

อุณหภูมิยิ่งสูงหรือปริมาณซีเมนต์มาก ต้องใช้สารผสมเพิ่มนี้จำนวนมาก แต่ถ้าใส่มากเกินไปจะก่อให้เกิดผลเสียได้คือ กำลังอัดในระยะแรกจะลดลง และบางครั้งคอนกรีตอาจไม่แข็งตัว

จ. ประเภท E สารลดปริมาณน้ำและเร่งเวลาการก่อตัว (Water Reducing and Accelerating)

เป็นสารผสมเพิ่มที่มีคุณสมบัติในการลดปริมาณน้ำและเร่งการก่อตัวไปพร้อม ๆ กัน เพราะมีคุณสมบัติของสารผสมเพิ่ม ประเภท A และ C รวมกัน โดยจะเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นให้เร็วขึ้นและมากขึ้น

ฉ. ประเภท F สารลดปริมาณน้ำจำนวนมาก (Water Reducing-High Range)

สารลดปริมาณน้ำจำนวนมากมักเรียกกันอีกชื่อหนึ่งว่า “Superplasticizer” สารผสมนี้สามารถลดปริมาณน้ำในส่วนผสมได้ 15 – 30 % ทั้งนี้เนื่องจากประจุไฟฟ้าที่ก่อให้เกิดการผลักดัน มีแรงผลักดันมากกว่าสารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำทั่ว ๆ ไป ในปัจจุบันสารผสมเพิ่มประเภทนี้เข้ามามีบทบาทอย่างมากในโรงงานผลิตชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป เพราะการลดน้ำในปริมาณมาก ๆ ทำให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดในช่วงต้นที่สูงมาก ทำให้สามารถถอดแบบและตัดลวดอัดแรง (Pre-Stressed) ได้ในเวลารวดเร็ว รวมทั้งยังสามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมได้ ซึ่งเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย

ช. ประเภท G สารลดปริมาณน้ำจำนวนมากและหน่วงเวลาการก่อตัว (Water Reducing-High Range and Retarding)

เป็นสารผสมเพิ่มที่เหมาะสำหรับงานคอนกรีตผสมเสร็จที่ต้องการคอนกรีตที่เหลวมาก ๆ เช่น ในงานฐานรากแผ่ขนาดใหญ่ หรือเสา คาน และชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีเหล็กเสริมจำนวนมาก คอนกรีตที่ใส่สารผสมเพิ่มนี้จะมีค่ายุบตัวมากกว่า 15 ซม. ทำให้สามารถลื่นไหลเข้าไปในทุกซอกทุกมุมของเหล็กเสริมและไม้แบบ โดยไม่ต้องทำการจี้เขย่าคอนกรีตมากนัก คอนกรีตประเภทนี้มีชื่อเรียกทั่ว ๆ ไปว่า “คอนกรีตไหล (Flow Concrete)”

2.1.1.5 วัสดุผสมเพิ่ม

ในการผสมคอนกรีตในปัจจุบันวัสดุผสมเพิ่มที่ได้รับความนิยมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตและเพื่อลดต้นทุนทางการผลิต ได้แก่ เถ้าลอยที่ได้จากโรงงานผลิตไฟฟ้า และเป็นที่ยอมรับกันในโรงงานผสมคอนกรีตว่าสามารถใช้เถ้าลอยเพื่อเป็นวัสดุผสมแทนปูนซีเมนต์ได้สูงถึง 30 - 35% ในขณะที่คอนกรีตที่ได้นั้นมีความสามารถในการทำงานได้สูงขึ้น และกำลังอัดที่ได้เมื่ออายุ 28 วันก็ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้ใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุผสมแทนที่ซีเมนต์

2.1.2 ชนิดของเครื่องผสม

โรงงานผสมคอนกรีตส่วนใหญ่ในปัจจุบัน ใช้เครื่องผสมคอนกรีตซึ่งสามารถจำแนกประเภทได้ ดังนี้[1]

2.1.2.1 จำแนกตามลักษณะการผสม สามารถจำแนกได้ 2 ประเภท คือ

2.1.2.1.1 Batch Mixer เป็นเครื่องผสมที่ผสมครั้งละ 0.5, 1 ลูกบาศก์เมตร หรืออื่น ๆ ตามที่เครื่องสามารถจุได้

2.1.2.1.2 Continuous Mixer เครื่องผสมชนิดนี้ จะผสมคอนกรีตอย่างต่อเนื่องส่วนมากจะออกแบบไว้ใช้กับงานเฉพาะ เช่น ใช้กับงานเทคอนกรีตถนน หรือ สนามบิน เป็นต้น

2.1.2.2 จำแนกตามรูปลักษณะของเครื่องผสม สามารถจำแนกได้ 2 ประเภท คือ

2.1.2.2.1 Drum Mixer จำแนกออกได้เป็น 4 ประเภท คือ

- Tilting Drum Mixer เครื่องผสมแบบนี้ ตัว Drum สามารถเอียงได้ สำหรับการเทคอนกรีตออก ใบกวนอยู่ภายใน การคายคอนกรีตออกทำได้รวดเร็ว และไม่เกิดการแยกตัว ดังนั้นเครื่องผสมแบบนี้จะเหมาะสำหรับผสมคอนกรีตที่มีค่ายุบตัวต่ำ หรือมีส่วนผสมที่ใช้หินขนาดใหญ่

- Non-Tilting Drum Mixer แกนของเครื่องผสมจะอยู่ในแนวนอนตลอดเวลา การปล่อยคอนกรีตออกจากเครื่องผสมทำได้โดยการสอดรางเข้าไปใน Drum หรือโดยการหมุน Drum กลับทิศทาง เนื่องจากอัตราการคายคอนกรีตที่ช้า ดังนั้นอาจมีการแยกตัวขึ้นได้ เพราะหินอาจถูกปล่อยออกมาช้า ส่วนการใส่วัตถุดิบลงในเครื่องผสมทำโดยใช้ Loading skip

- Stationary Drum Mixer หรือ Horizontal Shaft Mixer เครื่องผสมแบบนี้ ตัว Drum จะไม่เคลื่อนที่ มีเพียงใบกวนด้านในที่เคลื่อนที่ ซึ่งแตกต่างจากเครื่องผสม 2 ชนิดแรกที่ตัว Drum และใบกวนหมุนไปพร้อม ๆ กัน เครื่องผสมชนิดนี้ประกอบด้วย Drum ทรงกระบอกวางอยู่ในแนวนอนและมีเพลาวางตัวอยู่ในแนวนอน โดยมีใบกวนติดอยู่ซึ่งอาจเป็นเพลาเดี่ยวหรือเพลาคู่ เครื่องผสมชนิดนี้ นิยมใช้ในโรงงานผสมคอนกรีตผสมเสร็จ เพราะสามารถผสมได้ทีละมาก ๆ ใช้เวลาผสมน้อย และคายคอนกรีตออกได้ง่าย แต่มีข้อกำจัดคือ ไม่เหมาะที่จะใช้คอนกรีตที่แห้งมาก ๆ

- Dual Drum Mixer บางครั้งใช้ในงานก่อสร้างถนนโดยมี Drum อยู่ 2 ชุด คอนกรีตจะถูกผสมใน Drum ชุดที่ 1 ช่วงเวลาหนึ่ง แล้วถ่ายลงมาผสมต่อใน

Drum ชุดที่ 2 ก่อนจะเทออก เพื่อนำไปใช้งาน ประโยชน์คือทำให้สามารถผลิตคอนกรีตได้ปริมาตรมากเป็น 2 เท่า

ลักษณะเครื่องผสมแสดงในรูปที่ 2.1

2.1.2.2.2 Pan-Type Mixer เป็น Forced Type Mixer แตกต่างจาก Drum Mixer ซึ่งคอนกรีตใน Drum จะตกลงอย่างอิสระ เครื่องผสมแบบนี้ประกอบด้วยส่วนสำคัญ คือ Circular Pan และมีใบกวนติดอยู่กับแกน และจะหมุนรอบแกนที่ตั้งได้ฉากกับแกนของ Pan Mixer บางชนิด Pan จะหมุน บางชนิดใบกวนจะหมุน และมีบางชนิดที่ทั้ง 2 สิ่งหมุนสวนทิศทางกันในเวลาเดียวกัน คอนกรีตจะถูกผสมอย่างดีมาก เครื่องผสมแบบนี้จะมีอุปกรณ์ที่ปัดมอร์ต้าไม่ให้ติดข้าง Pan ดังรูปที่ 2.2

Pan Mixer นี้ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพกับคอนกรีตที่แข็ง และมีส่วนผสมที่มีการยึดเกาะกันอย่างมาก เช่นในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์มาก ดังนั้นจะใช้สำหรับงานคอนกรีตอัดแรง และใช้ผสมคอนกรีตจำนวนน้อย ๆ หรือผสมมอร์ต้าในห้องปฏิบัติการ

นอกจากเครื่องผสมที่กล่าวมาแล้ว ยังมีการใช้รถผสมคอนกรีตผสมคอนกรีตอีกด้วย โดยภายในตัวโม่จะมีใบกวนและใบผสม ประสิทธิภาพการผสมจะขึ้นอยู่กับใบกวนและใบผสมรวมทั้งจำนวนวัตถุดิบที่ใส่เข้าไป โดยทั่ว ๆ ไปจะผสมคอนกรีตครั้งละ 1 ลบ.ม. จนครบจำนวน 5-6 ลูกบาศก์เมตร

2.1.3 ลำดับการใส่ส่วนผสมและเวลาที่ใช้ในการผสม

ไม่มีกฎทั่วไปเกี่ยวกับลำดับของการป้อนวัตถุดิบลงเครื่องผสม[1] แต่อาจพิจารณาจาก

- ชนิดและความจุมากที่สุด
- สภาพการใช้งานเครื่องผสม
- อัตราการหมุน
- ปริมาณคอนกรีตที่ผสมแต่ละครั้ง
- ลักษณะของวัตถุดิบที่ใช้
- การทำการทดลองผสม
- ประสบการณ์ของผู้ควบคุมการผลิต

ลำดับการใส่วัตถุดิบลงเครื่องผสม นอกจากจะพิจารณาจากปัจจัยข้างต้นแล้ว ยังคำนึงถึงความเป็นไปได้ในการทำงาน เช่น การป้องกันการฟุ้งกระจายของซีเมนต์โดยการเทซีเมนต์ในขณะที่ฝาเครื่องผสมปิดลงแล้ว เป็นต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อย่างไรก็ตามไม่ได้มีการกำหนดอย่างชัดเจนว่าเวลาที่ใช้ในการผสมควรจะเป็นเท่าไร แต่เวลาที่เหมาะสมที่สุด อาจหมายถึงเวลาที่ทำให้ได้ส่วนผสมที่สม่ำเสมอทุก ๆ ครั้งที่ผสม[1] และทำให้ได้คอนกรีตมีคุณสมบัติด้านอื่น ๆ ตามต้องการ เช่น กำลังอัด ค่ายุบตัว เป็นต้น

ตามมาตรฐานของอเมริกา แนะนำให้ใช้เวลาอย่างน้อย 1 นาที ในการผสมคอนกรีตภายใน 1 ลบ.ม. แรก และเพิ่มเวลา 20 วินาทีต่อปริมาณคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น 1 ลบ.ม. เวลาผสมสูงสุดไม่ควรเกิน 5 นาที ดังแสดงในตารางที่ 2.1 เวลาขั้นต่ำในการผสมที่แนะนำสำหรับความจุของเครื่องผสมต่าง ๆ

อย่างไรก็ตาม เวลาในการผสมอาจเพิ่มหรือลดลงได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ ดังกล่าวมาข้างต้น

การผสมนานเกินไป[1] อาจมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตโดยถ้าคอนกรีตถูกผสมเป็นเวลานาน น้ำจะระเหยออกจากคอนกรีตนั้น ซึ่งทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทได้ลดลง และกำลังจะเริ่มพัฒนาขึ้น ผลที่เกิดขึ้น 3 ประการคือ

1. มวลรวมที่อ่อนจะแตก ทำให้ส่วนละเอียดเพิ่มขึ้นและความสามารถเทได้ลดลง
2. ผลของแรงเสียดทาน ก่อให้เกิดอุณหภูมิของส่วนผสมที่เพิ่มขึ้น
3. ปริมาณฟองอากาศลดลง

การผสมซ้ำเป็นช่วง ๆ จนถึง 2-3 ชั่วโมง จะไม่เป็นอันตรายต่อกำลังและความทนทาน แต่ความสามารถเทได้จะลดลงถ้าไม่มีการป้องกันการสูญเสียน้ำหรือความชื้นจากเครื่องผสม การเพิ่มปริมาณน้ำ เพื่อให้ค่าความสามารถเทได้เหมือนเดิม ที่เรียกว่า Re-Tempering จะก่อให้กำลังอัดต่ำลง และมีการหดตัว (Shrinkage) เพิ่มขึ้น โดยผลนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ใส่เพิ่มเข้าไป

2.1.4 ระดับความเข้มการผสม

โดยการศึกษาของบุญไชย[16] ศึกษาระดับความเข้มการผสมที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต โดยเสนอว่าระดับความเข้มการผสมหมายถึงพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในการผสมคอนกรีต ซึ่งคำนวณได้จาก

$$E_{in} = \frac{E_m}{V_{st}} \qquad (2.1)$$

เมื่อ

E_{in} = ระดับความเข้มการผสม (วัตต์ – ชั่วโมง / ลิตร)

E_m = พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผสมคอนกรีต (วัตต์ – ชั่วโมง)

V_{st} = ปริมาตรของส่วนผสมที่เป็นของแข็ง (ลิตร)

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผสมคอนกรีต คำนวณได้จาก

$$E_m = E_t - E_{em} \quad (2.2)$$

เมื่อ

E_t = พลังงานไฟฟ้ารวมที่ได้จากการวัด (วัตต์ – ชั่วโมง)

E_{em} = พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการหมุนเครื่องผสมเปล่า (วัตต์ – ชั่วโมง)

ปริมาตรส่วนผสมที่เป็นของแข็ง คำนวณได้จาก

$$V_{st} = V_{co} + V_{fi} + V_c \quad (2.3)$$

เมื่อ

V_{co} = ปริมาตรของแข็งของมวลรวมหยาบ (ลิตร)

V_{fi} = ปริมาตรของแข็งของมวลรวมละเอียด (ลิตร)

V_c = ปริมาตรของแข็งของปูนซีเมนต์ (ลิตร)

ปริมาตรของวัสดุที่เป็นของแข็งดังกล่าวคำนวณได้จาก

$$V_i = \frac{W_i}{S_{g\,i}} \quad (2.4)$$

เมื่อ

V_i = ปริมาตรของแข็งของวัสดุใด ๆ (ลิตร)

W_i = น้ำหนักของวัสดุนั้น (กก.)

S_{gi} = ความถ่วงจำเพาะของวัสดุนั้น

จากการศึกษาเกี่ยวกับระดับความเข้มการผสมที่ผ่านมา[16] พบว่าสำหรับคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ใช้ของเถ้าลอยและไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของสัดส่วนผสมใด ๆ จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนปริมาตรของแข็งของซีเมนต์ (n_c) ซึ่งคำนวณได้จาก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$n_c = \frac{V_c}{V_{co} + V_{fi} + V_c} \qquad (2.5)$$

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผสมที่ผ่านมา ส่วนใหญ่ให้ความสนใจลำดับการใส่ส่วนผสมและเวลาที่ใช้ในการผสมเป็นสำคัญ ดังนี้

2.2.1 ผลของลำดับการใส่ส่วนผสมที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต[2] (Effect of Mixing Sequence on the Properties of Concrete)

จากการศึกษาในครั้งนี้ได้ให้ความสนใจกับลำดับของการใส่ส่วนผสมของคอนกรีตซึ่งพบว่า ถ้าเปลี่ยนลำดับการใส่ส่วนผสมจากเดิมที่ผสมหิน ทรายและซีเมนต์เข้าด้วยกันแล้วตามด้วยน้ำมาเป็น ผสมซีเมนต์กับทรายเข้าด้วยกัน จากนั้นเติมน้ำให้เกิดเป็นมอร์ต้า และหลังจากนั้นจึงผสมหินหรือมวลรวมหยาบเข้าไปจะทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติต่าง ๆ ดีขึ้น คือ มีกำลังรับแรงอัดและแรงดึงที่ดีขึ้นในกรณีที่สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีค่าคงที่ และในขณะเดียวกันก็มีการไหล (Slump) ที่ดีขึ้นด้วย รวมทั้งมีความหนาแน่น (Density) มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่ามีผลให้ผิวของคอนกรีตเรียบขึ้น และมีการดูดซึมน้ำ (Absorption) ที่น้อยลงด้วย โดยในการศึกษาครั้งนี้ใช้มวลรวมแห้งในการทดสอบ

2.2.2 การพัฒนาคุณสมบัติด้านกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมโดยวิธีสองขั้นตอน[3] (Improving Compressive Strength of Concrete by Two-Step Mixing Method)

เป็นการศึกษาผลของกำลังอัดที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อผสมคอนกรีตแบบธรรมดา (Normal Concrete) และการผสมแบบสองขั้นตอน (Two-Step Mixing Method)

- การผสมแบบธรรมดา (Normal Concrete) นำคอนกรีตมาผสมใน Normal mixer (ความจุ 100 ลิตร หมุนเร็ว 27 รอบต่อนาที) โดยนำหิน ทราย และซีเมนต์ มาผสมกัน 30 วินาที หลังจากนั้นจึงเติมน้ำและสารลดน้ำอย่างมาก (Superplasticiser) ลงไปแล้วผสมเป็นเวลา 3 นาที

- การผสมแบบสองขั้นตอนโดยผสมซีเมนต์เพสต์ก่อน (Pre-Mixing of Cement Paste) เป็นการนำน้ำ สารลดน้ำอย่างมาก และซีเมนต์มาผสมกันก่อนโดย High-speed Mixer (Ultramixer-ความจุ 500 ลิตร หมุนเร็ว 3000-3500 รอบต่อนาที หรือ Ball Mixer-ความจุ 150 ลิตร หมุนเร็ว 27 รอบต่อนาที) เป็นเวลา 2 นาทีแล้วจึงเติมหินและทรายลงไปและผสมอีก 2 นาที โดย Normal Mixer

- การผสมแบบสองขั้นตอนโดยผสมน้ำปูนทรายก่อน (Pre-Mixing of Grout) เป็นการนำน้ำ สารลดน้ำอย่างมาก ซีเมนต์ และทรายมาผสมกันก่อนโดย High-Speed Mixer เป็นเวลา 2 นาที หลังจากนั้นจึงเติมหินลงไปผสมอีก 2 นาที โดย Normal Mixer

จากการศึกษาพบว่าหากเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตเมื่อผสมโดยวิธีธรรมดาและวิธีผสมแบบสองขั้นตอนจะพบว่าคอนกรีตที่ผสมแบบสองขั้นตอนมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นประมาณ 8.47-17.08% ขึ้นกับวิธีการผสม อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และลักษณะของเครื่องผสม และพบว่ากำลังที่เพิ่มขึ้นเกิดขึ้นเพราะความมีประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์ซึ่งเกิดขึ้นเพราะอนุภาคของซีเมนต์และน้ำมีความใกล้ชิดกันมากขึ้นเพราะมีแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงขึ้นของซีเมนต์เพสต์และน้ำปูนทราย ดังนั้นการผสมน้ำปูนทรายก่อนจะทำให้เกิด coating ของซีเมนต์เพสต์บนผิวของอนุภาคของทรายและทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคมากขึ้น

ในทุกกรณีพบว่า คอนกรีตที่ผสมแบบสองขั้นตอนโดย Ultramixer และ Normal Mixer จะมีกำลังมากกว่าคอนกรีตที่ผสมแบบสองขั้นตอนโดย Ball Mixer และ Normal Mixer และในขณะเดียวกันพบว่าคอนกรีตที่ผสมแบบสองขั้นตอนโดยผสมน้ำปูนทราย (grout) ก่อนจะมีกำลังรับแรงมากกว่าคอนกรีตที่ผสมแบบสองขั้นตอนโดยผสมซีเมนต์เพสต์ก่อน

และนอกจากนี้ยังได้มีการศึกษากำลังรับแรงของซีเมนต์เพสต์และน้ำปูนทราย พบว่าเมื่อผสมโดย Ultramixer จะมีกำลังมากขึ้น มีการตกตะกอนน้อยลงกว่าการผสมโดย Ball Mixer หรือ Normal Mixer นั่นคือ High-Speed Mixer เพิ่มแรงปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคน้ำและซีเมนต์ทำให้การทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำและซีเมนต์มีประสิทธิภาพดีขึ้น

นอกจากนี้ยังศึกษาพบว่าการผสมแบบสองขั้นตอนสามารถนำไปใช้ได้กับคอนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์ต่ำ มีมวลรวมปริมาณและกำลังต่ำ หรือซีเมนต์ที่มีคุณภาพต่ำ หรือการผสมคอนกรีตเบา (Lightweight Concrete)

2.2.3 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับคอนกรีตผสมเสร็จ[4] (Standard Specification for Ready-Mixed Concrete)

ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับคอนกรีตผสมเสร็จ กล่าวถึงเวลาที่ใช้ในการผสมว่าเป็นเวลาซึ่งวัดหลังจากใส่ส่วนผสมลงไปรวมกันในเครื่องผสมแล้วโดยน้ำทั้งหมดควรจะอยู่ในเครื่องผสมก่อนหน้าเวลาหนึ่งในสี่ส่วนสุดท้ายของเวลาผสม

ในกรณีที่มีการทดสอบเครื่องผสม เครื่องผสมที่มีขนาดต่ำกว่า 1 ลูกบาศก์หลา (0.76 ลูกบาศก์เมตร) หรือน้อยกว่า ควรจะใช้เวลาผสมมากกว่า 1 นาที และสำหรับเครื่องผสมที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ควรจะเพิ่มเวลาการผสมอีก 15 วินาทีทุก ๆ ลูกบาศก์หลาที่เพิ่มขึ้น ในกรณีที่มีการทดสอบเครื่องผสม เวลาในการผสมอาจเปลี่ยนแปลงได้ตามเหมาะสม

2.2.4 การผลิตคอนกรีต[5] (Concrete Production)

จากการศึกษาพบว่าการใส่ส่วนผสมลงในเครื่องผสมควรจะแยกวัสดุผสมลงไม่พร้อมกัน โดยให้มวลรวมหยาบอยู่ล่างสุด ปูนซีเมนต์หรือเถ้าลอยอยู่กลางและทรายอยู่บนสุด โดยการเทส่วนผสมเป็นลำดับเช่นนี้จะลดการฟุ้งกระจายของปูนซีเมนต์หรือเถ้าลอยได้ เวลาที่ใช้ในการผสมควรอยู่ระหว่าง 1-2 นาที โดยขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของเครื่องผสม

2.2.5 การชั่งตวง การผสม การเทลงแบบ และการบ่มคอนกรีต[6] (Batching, Mixing, Placing, and Curing)

เพิ่มเติมจากการศึกษาผลของลำดับการใส่ส่วนผสมที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต[2] พบว่าสำหรับการใส่ส่วนผสมมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต และแนะนำว่าควรมีขั้นตอนดังนี้

- ผสมปูนซีเมนต์และมวลรวมละเอียด เป็นเวลาประมาณ 1 นาที
- เติมน้ำ ผสมเป็นเวลาประมาณ 1 นาที
- เติมมวลรวมหยาบ ผสมเป็นเวลาประมาณ 1 นาที

โดยพบว่าขั้นตอนนี้มีแนวโน้มที่จะทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดและแรงดึงในขณะที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากัน และพบว่ามีความสามารถการทำงานได้ดีขึ้น เช่น ค่ายุบตัวสูงขึ้นสำหรับคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากัน โดยมีความหนาแน่นมากกว่าและการดูดซึมต่ำกว่า

และจากการศึกษายังพบว่ากำลังอัดจะต่ำที่สุดเมื่อซีเมนต์ผสมกับน้ำก่อนเติมมวลรวม Munger[7] แนะนำว่าซีเมนต์แห้งจะสัมผัสกับผิวของทรายซึ่งไม่ถูกทำลายโดยการเติมน้ำ ดังนั้นจึงเป็นการเพิ่มพันธะเมื่อน้ำเริ่มสัมผัสกับมวลรวม เพราะพื้นผิวแรงดึงของน้ำ (Surface Tension of Water Film) จะทำให้การพัฒนานั้นสมบูรณ์ลดลง แต่อย่างไรก็ตามขั้นตอนดังกล่าวก็เหมาะกับเครื่องผสมบางชนิดเท่านั้น

ในกรณีที่เครื่องผสมมีใบกวนนิ่งกับที่ (Rotating or Tilting Drum Type) จะพบว่ามวลรวมละเอียดอาจเกาะที่ใบกวน ซึ่งมักเกิดกับส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ จากเหตุผลนี้ ลำดับการใส่ส่วนผสมจะถูกกำหนดเพื่อให้เหมาะกับแต่ละเครื่องผสมโดยไม่ขึ้นกับคุณสมบัติของคอนกรีต สำหรับ pan mixer หรือ trough และ paddle type ก็จะต้องพิจารณาลำดับการผสมด้วย

เมื่อมีการใส่ส่วนผสมแบบแยกวัสดุลงควรจะใส่หินก่อนแล้วตามด้วยมวลรวมละเอียดและซีเมนต์และควรใส่น้ำเมื่อเครื่องผสมหมุน โดยการเติมน้ำช้า ๆ เพื่อป้องกันการเกิดการจับตัวเป็นก้อน (balling) ของซีเมนต์ซึ่งเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น ซีเมนต์ร้อน ใบกวนร้อน การใส่ส่วนผสมมากหรือเร็วเกินไป การใช้ทรายเปียก ลำดับการใส่ส่วนผสมที่ไม่ถูกต้อง และการใส่น้ำเร็วเกินไป

มีสองแนวทางในการพิจารณาเวลาที่ใช้ในการผสมโดยมีแนวความคิดว่าการผสมนานขึ้นจะเป็นผลดีต่อคุณสมบัติคอนกรีตที่ได้ ในขณะอีกแนวความคิดหนึ่งกล่าวว่าควรจะใช้เวลาผสมน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

แนวความคิดการผสมนานขึ้นทำให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติดีขึ้น โดยการทดลองพบว่าการผสม 60 นาทีจะทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้นถึง 20 % และทำให้ค่ายุบตัวลดลง 1-2.5 นิ้ว ซึ่งการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของคอนกรีตนี้เกิดจากการสูญเสียน้ำจากการระเหยหรือการบดอัดระหว่างผสม โดยประเด็นสำคัญก็คือ การผสมด้วยเวลานานเท่าใดก็ได้ตราบเท่าที่ไม่ทำให้เกิดการแยกตัวของคอนกรีต

ในทางตรงกันข้ามกล่าวว่าแนวความคิดในการผสมนานขึ้นโดยเฉพาะการทดลองกับ dry harsh mixer จะทำให้เกิด segregation ของคอนกรีตสด ซึ่งทำให้คอนกรีตไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกันและมีกำลังอัดลดลง โดยมาตรฐาน ACI สำหรับการผสมคอนกรีต[8] แนะนำว่า สำหรับการผสมคอนกรีต 1 ลูกบาศก์หลา ควรใช้เวลาในการผสมมากกว่า 1 นาที แต่ไม่ควรเกิน 3 เท่าของที่กำหนด

จากการศึกษายังพบว่าผลที่ได้มีความชัดเจนมากเมื่อเครื่องผสมต่างกัน ซึ่งพบว่าถ้าเป็น drum mixer นั้น ขนาดของเครื่องผสม จำนวน ชนิด และรูปร่างของใบกวน อัตราการหมุน จะเป็นปัจจัยสำคัญซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาอีกว่าประสิทธิภาพของเครื่องผสมจะลดลงเมื่อมีส่วนผสมมากเกินกำลังของเครื่องผสม การบำรุงรักษาเครื่องผสม และยังขึ้นกับชนิด ขนาดของเครื่องผสมอีกด้วย โดยพบว่าการเปลี่ยนแปลงชนิด ขนาดของเครื่องผสมยังส่งผลต่อความไม่แน่นอนของค่ากำลังอัดอีกด้วย

2.2.6 การผลิตและการตรวจสอบการผลิตคอนกรีต[9] (Concrete Manufacturing and Inspection)

จากการศึกษาพบว่าเพื่อให้เกิดการผสมทั่วทั้งเครื่องผสม ใบกวนจะได้รับการออกแบบเพื่อให้คอนกรีตเคลื่อนที่จากด้านหนึ่งสู่อีกด้านหนึ่งของเครื่องผสมตามแนวนอน แต่คอนกรีตไม่ควรจะออกแบบให้ตกจากจุดสูงสุดของ Drum และเครื่องผสมที่ผสม Mass concrete หรือคอนกรีตที่มีก้อนหินขนาดใหญ่เป็นส่วนผสมก็ไม่ต้องการใบกวนมากเท่ากับคอนกรีตที่มีมวลรวมขนาดเล็ก

การผสมที่ไม่มีประสิทธิภาพจะเกิดขึ้นเพราะเวลาที่ใช้ในการผสมน้อยเกินไป ใบกวนชำรุด มีคอนกรีตเกาะในเครื่องผสมมาก เวลาในการหมุนมากหรือน้อยเกินไป การใส่ส่วนผสมเกินกำลังของเครื่องผสมหรือลำดับการใส่ส่วนผสมที่ผิดไป

2.2.7 การผสมด้วยวิธี 2 ขั้นตอน[10] (2 Stage Mixing Method) หรือวิธีห่อหุ้มทรายด้วยซีเมนต์ (Sand Enveloped with Cement Mixing Method, S.E.C.)

วิธีการผสมแบบห่อหุ้มทรายด้วยซีเมนต์ (S.E.C.) เป็นวิธีการที่แนะนำโดย Higuchi[10] ซึ่งเป็นขั้นตอนการทำให้ทรายเปียกด้วยน้ำที่ใช้ในการผสมและจากนั้นจึงทำการผสมเข้ากับน้ำส่วนที่เหลือ ดังรูปที่ 2.3

และจากการศึกษาพบว่าสามารถเพิ่มกำลังอัดของมอร์ต้าทั้งในช่วงที่อายุน้อยและที่อายุมากขึ้น โดยสามารถลดการเยิ้มของมอร์ต้าได้ด้วย Tamimi[11] ได้ทำการทดลองและสนับสนุนความคิดนี้ว่าสามารถเพิ่มกำลังอัดของมอร์ต้าได้ โดยอธิบายว่าอนุภาคของซีเมนต์สามารถติด (stick) เข้ากับผิวของทรายที่มีผิวเปียกได้ และจะทำให้เกิดฟิล์มที่มีอัตราน้ำต่อซีเมนต์ต่ำรอบ ๆ อนุภาคของทราย ซึ่งทำให้เกิดการอัดแน่นของอนุภาครอบ ๆ อนุภาคของทราย ซึ่งทำให้ผิวสัมผัสระหว่างซีเมนต์เพสต์และมวลรวมแน่นขึ้น และจากการศึกษาของ Farran[12] พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตจะมีความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของพื้นผิวนั้น ๆ นั่นคือผิวบริเวณผิวสัมผัสของซีเมนต์เพสต์กับมวล

รวมแน่นขึ้นจะทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรงมากขึ้นด้วย Pope[13] ยังได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ S.E.C. อีกว่าช่วยให้ลดการเกิดขึ้นของแผ่นฟิล์มบาง ๆ ของน้ำรอบ ๆ อนุภาคของทราย

จากการศึกษาดังกล่าวข้างต้น ต่างสรุปรวมกันว่าวิธีการผสมแบบ S.E.C. ทำให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังอัดเพิ่มมากขึ้น โดยอธิบายปรากฏการณ์นี้ด้วยการกระจายอนุภาคของซีเมนต์รอบ ๆ อนุภาคของทราย

Rogeron[14] และคณะได้ทำการศึกษาสาเหตุของการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดโดยการผสมด้วยวิธี S.E.C. และพบว่าวิธีการผสมแบบ S.E.C. ทำให้เกิดแผ่นฟิล์มบาง ๆ ของอนุภาคซีเมนต์รอบ ๆ อนุภาคของทราย โดยบริเวณแผ่นฟิล์มบาง ๆ นั้นจะกระตุ้นให้เกิดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งเป็นสาเหตุให้ S.E.C. มีผลน้อยต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่มีอายุมากขึ้น

2.2.8 การศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องผสมโดยใช้วิธีของสวีเดน[15] (Swedish Method to Measure Effectiveness of Concrete Mixers)

เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องผสมที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนของคุณสมบัติของคอนกรีต โดยจะมีตัวแปรที่สนใจ คือ เวลาที่ใช้ในการผสมและสัดส่วนผสม โดยสามารถสรุปได้ว่า สำหรับเครื่องผสมแบบ Force Type Mixer จะเหมาะกับการผสมคอนกรีตที่มีปริมาตรซีเมนต์สูงและมีค่าความข้นเหลว (Consistency) ต่ำ ส่วนในกรณี Gravity Type Mixer จะเหมาะกับการผสมคอนกรีตที่มีปริมาตรซีเมนต์ต่ำและมีค่าความข้นเหลวสูง แต่จะมีข้อเสียคือ การผสมคอนกรีตด้วย Gravity Type Mixer จะทำให้คอนกรีตมีแนวโน้มที่จะเกิดการแยกชั้น (Layering) และแยกตัว (Segregation) มากขึ้น

สำหรับเวลาในการผสม จะต้องพิจารณาออกเป็นสองกรณีคือ พิจารณาระหว่างคอนกรีตที่ผสมในครั้งเดียวกัน (Micro Homogeneity) กับพิจารณาคอนกรีตที่ผสมในแต่ละครั้ง (Macro Heterogeneity) โดยได้ทำการศึกษาว่าสำหรับคอนกรีตที่ผสมในแต่ละครั้ง พบว่าคอนกรีตจะมีคุณสมบัติที่ยอมรับได้นั้นจะต้องใช้เวลาในการผสมเพียงพอที่จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนของส่วนประกอบของซีเมนต์มีค่าต่ำกว่า 6 % แต่ในกรณีพิจารณาคอนกรีตที่ผสมในครั้งเดียวกันนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ไม่สามารถสรุปได้จึงต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

การวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการผสมคอนกรีตที่ผ่านมาข้างต้นให้ความสำคัญกับการพิจารณาลำดับการใส่ส่วนผสม เวลาที่ใช้ในการผสม และชนิดเครื่องผสมเป็นหลัก แทบไม่ได้ศึกษาผลของระดับความเข้มการผสมที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตหรือผลของกระบวนการผสมที่มีต่อระดับความเข้มการผสม ในการพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตดังกล่าวมาทั้งหมดเป็นการพิจารณาจากประสบการณ์ในการผลิตเป็นส่วนใหญ่โดยไม่มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง แต่ทฤษฎีระดับความเข้มการผสมเป็นทฤษฎีหนึ่งซึ่งสามารถอธิบายการผสมคอนกรีตโดยใช้พลังงานไฟฟ้าในการผสมเป็นตัวแปรสำคัญในการศึกษาคุณสมบัติของการผสม การศึกษาเกี่ยวกับระดับความเข้มการผสมที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว มีดังนี้

2.2.9 การผสมและการควบคุมคุณภาพของคอนกรีต[16] (Mixing and Quality Control of Concrete)

จากการศึกษาพบว่า คุณสมบัติของคอนกรีตหรือมอร์ต้าจะเปลี่ยนแปลงอย่างมากกับระดับความเข้มการผสม (Mixing Intensity) ซึ่งวัดโดยใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ไปขณะผสม จากการทดลองพบว่าจะมีระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมค่าหนึ่ง (Optimum Mixing Intensity) ซึ่งจะให้ค่าการยุบตัวสูงที่สุดในขณะที่มีกำลังรับแรงอัดประลัยและปริมาณฟองอากาศในระดับที่ยอมรับได้สำหรับส่วนผสมนั้น ๆ จากข้อมูลการศึกษาที่มีอยู่สำหรับคอนกรีตธรรมดา (Conventional Concrete) พบว่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมนี้จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนปริมาตรของแข็งของซีเมนต์ (Solid Volume Fraction of Cement) ในส่วนผสมนั้น ๆ เป็นสำคัญ โดยมีผลของสัดส่วนการผสม ปริมาณการผสมและชนิดของเครื่องผสมน้อยมาก อย่างไรก็ตามหากมีการใช้สารเคมีผสมเพิ่ม เช่น สารลดน้ำปริมาณน้ำอย่างมาก (Superplasticizer) ระดับความเข้มการผสมจะลดลงขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้และประสิทธิภาพของสารผสมเพิ่มนั้น ๆ

ผลการทดสอบที่ผ่านมาพบว่าระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมไม่ขึ้นกับชนิดของเครื่องผสมแต่ขึ้นกับสัดส่วนปริมาตรของแข็งของซีเมนต์เป็นสำคัญ ในขณะที่สัดส่วนผสมจะมีผลกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผสมที่ทำให้ระยะเวลาในการผสมจนได้ระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมแตกต่างกัน และสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มของการผสมที่เหมาะสมกับสัดส่วนปริมาตรของแข็งของซีเมนต์สำหรับคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยและไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่มได้ดังสมการ

$$E_o = k_{nc} n_c \qquad (2.6)$$

เมื่อ

E_o = ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม

k_{nc} = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเบลนของซีเมนต์ที่ใช้ โดยสำหรับการศึกษาของบุญไชย[16] ใช้คอนกรีตที่มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเบลนของซีเมนต์เท่ากับ 3350 ตร.ซม./กรัม พบว่ามีค่าเท่ากับ 7.38

n_c = สัดส่วนปริมาตรของแข็งของซีเมนต์

ค่าคงที่ k_{nc} สำหรับการทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ขึ้นอยู่กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของเบลนของซีเมนต์ ซึ่งค่าพื้นที่ผิวจำเพาะนี้จะมีผลต่อระดับความเข้มการผสม ซึ่งจากการศึกษาพบว่าค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของเบลนของซีเมนต์มีผลต่อระดับความเข้มการผสม

ของซีเมนต์เพสต์ ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของเบลนได้ดังสมการที่ 2.7

$$E_{in,sp} = 0.0017\,SSF_c + 2.0257 \qquad (2.7)$$

เมื่อ

$E_{in,sp}$ = ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของส่วนผสมซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีเถ้าลอยและไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก (วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร)

SSF_c = ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเบลนของซีเมนต์ (ลบ.ซม./กรัม)

สมการที่ 2.6 ข้างต้นเหมาะกับการผสมมอร์ต้าเป็นอย่างดี แต่หากเป็นการผสมคอนกรีตซึ่งมีมวลรวมหยาบขนาดต่าง ๆ กันระหว่าง 10 มม. ถึง 40 มม. พบว่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมจะมีค่าเพียง 80% ของมอร์ต้าที่มีสัดส่วนปริมาตรของแข็งของซีเมนต์เท่ากัน นั่นคือ

$$E_o = k_1 n_c \qquad (2.8)$$

$$k_1 = 0.8 \cdot k_{nc} \qquad (2.9)$$

เมื่อ

k_1 = ค่าคงที่สำหรับคำนวณระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีต

บุญไชย[16] สรุปว่าขณะผสมคอนกรีต การเคลื่อนที่ของมวลรวมมีส่วนช่วยในการกระจายอนุภาคของซีเมนต์ในคอนกรีต อย่างไรก็ตามผลของมวลรวมหยาบต่อกลไกการผสมคอนกรีตยังไม่สามารถอธิบายได้อย่างชัดเจนในขณะนี้

ในการศึกษานี้[16] ได้เสนอผลของการนำเอาผลการศึกษาที่ได้ไปใช้กับเครื่องผสมแบบกะทะที่ใช้ในสนามในประเทศญี่ปุ่น โดยการทดลองได้ทำการผสมคอนกรีตกับเครื่องผสมขนาดความจุ 100 ลิตร โดยใช้คอนกรีตที่มีขนาดของมวลรวมใหญ่ที่สุดระหว่าง 10 – 40 มม. โดยมีสัดส่วนปริมาตรของแข็งของซีเมนต์ระหว่าง 0.1 – 0.2 นอกจากนี้ยังทำการทดลองผสมทั้งมอร์ต้าและคอนกรีตโดยใช้เครื่องผสมในโรงงาน ขนาดความจุระหว่าง 1500 – 3000 ลิตร โดยปริมาตรของการผสมอยู่ระหว่าง 1000 – 3000 ลิตร ทั้งในกรณีที่มีและไม่มีสารกระจายกักฟองอากาศที่ไม่มีผลในการลดปริมาณน้ำ สัดส่วนปริมาตรของแข็งของซีเมนต์อยู่ระหว่าง 0.1 – 0.4

จากการทดสอบที่ได้พบว่า หากทำการเปรียบเทียบค่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่ได้จากการทดสอบกับที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่ให้ไว้ข้างต้น จะได้ค่าที่ใกล้เคียงกันในกรณีของการผสมคอนกรีตทั้งเครื่องผสมขนาดใหญ่และขนาดเล็ก นอกจากนี้ค่ากำลังรับแรงอัดและ

ปริมาณฟองอากาศก็อยู่ในระดับที่ดีสำหรับส่วนผสมนั้น ๆ อย่างไรก็ตามในกรณีของมอร์ต้าที่ผสมโดยใช้เครื่องผสมขนาดใหญ่ในโรงงานแม้จะให้ค่าผิดพลาดค่อนข้างสูงแต่ก็อยู่ในระดับเดียวกันกับที่ได้จากเครื่องผสมขนาดเล็ก ซึ่งจากผลการทดสอบที่ได้แสดงว่า ขนาดของเครื่องผสมและปริมาตรการผสมจะมีผลไม่มากนักกับระดับความเข้มที่เหมาะสมที่ใช้ในการผสม นอกจากนี้สารกักกระจายฟองอากาศก็มีผลน้อยมากเช่นกัน ซึ่งแตกต่างจากส่วนผสมที่มีสารลดน้ำอย่างมาก ซึ่งเป็นเพราะสารกักกระจายฟองอากาศกับสารลดน้ำอย่างมากมีกลไกการทำงานที่ต่างกัน จากการทดสอบกับการผสมในโรงงานพบว่า มีความเป็นไปได้ในการใช้ระดับความเข้มการผสมเป็นดัชนีในการควบคุมการผสมคอนกรีต อย่างไรก็ตามยังต้องศึกษาผลของมวลรวมหยาบ ปริมาณน้ำ ตลอดจนระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของวัสดุผงอื่น ๆ เช่น เถ้าลอย ซิลิกาฟูม หรือเถ้าแกลบ ทั้งนี้เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องมากขึ้นอันจะเป็นผลให้การคำนวณหาระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมสำหรับส่วนผสมต่าง ๆ มีค่าถูกต้องขึ้นด้วย และหากว่าแนวความคิดนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการผสมคอนกรีตก็อาจส่งผลให้กระบวนการผสมคอนกรีตมีความแตกต่างไปจากปัจจุบัน

2.2.10 การทดลองการผสมคอนกรีตและมอร์ต้า[16] (Experimental Investigation on Mixing of Concrete and Mortar)

ในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการทดลองการผสมคอนกรีตแบบแยกน้ำ ซึ่งพบว่า ปริมาณน้ำส่วนแรกนั้นมีความสำคัญมาก กล่าวคือจะเป็นตัวควบคุมคุณสมบัติหลาย ๆ ประการของคอนกรีต นอกจากนี้ในแง่ของการผสม ปริมาณน้ำส่วนนี้ก็มีความสำคัญมากเช่นกัน เพราะพบว่าการผสมระหว่างของแข็งที่มีขนาดของอนุภาคเล็ก เช่น ซีเมนต์หรือทรายละเอียดกับน้ำนั้น พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผสมจะมีค่าสูงมากเมื่อวัสดุที่ผสมนั้นอยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งมีผลให้ระดับความเข้มการผสมมีค่าสูงในระยะอันสั้น ยิ่งไปกว่านั้นในทางคอนกรีตเทคโนโลยี ปริมาณน้ำที่ทำให้วัสดุที่นำมาผสมอยู่ในภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำนั้นก็เพียงพอที่จะเคลือบอนุภาคของแข็งได้อย่างสมบูรณ์

ระยะเวลาที่ใช้ในการผสมด้วยปริมาณน้ำส่วนแรกก็มีความสำคัญมากเช่นกัน เพราะจะเป็นตัวกำหนดระดับความเข้มการผสมเพราะหลังจากที่เติมน้ำส่วนที่สองลงไปแล้ว พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผสมจะลดลงอย่างมาก ซึ่งมีผลให้ระดับความเข้มการผสมเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง ดังนั้นจึงควรทำการผสมด้วยปริมาณน้ำส่วนแรกให้ได้ระดับความเข้มการผสมเพียงพอที่จะกระจายอนุภาคของซีเมนต์ ซึ่งหมายความว่าเมื่อเติมน้ำส่วนที่สองลงไปแล้ว จะส่งผลในการขยายระยะห่างระหว่างอนุภาคของซีเมนต์ หรือเป็นการเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ (Workability) นั่นเอง

และถึงแม้ว่าการผสมแบบแบ่งแยกน้ำในการศึกษาครั้งนี้จะส่งผลในการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตหรือมอร์ต้าไม่มากนัก อย่างไรก็ตามจากการที่การผสมคอนกรีตหรือมอร์ต้าสามารถกระทำให้สำเร็จในระยะเวลาอันสั้น ตลอดจนวิธีการปฏิบัติก็ไม่มีความยุ่งยากซับซ้อน จึงถือว่าการผสมแบบแบ่งแยกน้ำนั้นน่าจะเป็นประโยชน์อย่างมากในงานอุตสาหกรรมคอนกรีต

การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของคอนกรีตจะขึ้นอยู่ปัจจัยในการผสมหลายปัจจัย ซึ่งได้แก่ ลำดับการใส่ส่วนผสม เวลาที่ใช้ในการผสม คุณสมบัติของเครื่องผสม เป็นต้น แต่ในขณะเดียวกันเป็นที่สังเกตได้ว่า ปัจจัยต่าง ๆ เหล่านั้นมีความสัมพันธ์กับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผสมซึ่งมีผลต่อระดับความเข้มการผสมทั้งสิ้น

แต่ในการวิจัยครั้งนี้พบว่า ในโรงงานผสมคอนกรีต แม้ว่าจะมีการออกแบบสัดส่วนผสมให้คงที่และมีการตรวจสอบคุณภาพวัสดุผสมแล้วก็ตาม คุณภาพของส่วนผสมอาจต่างกันออกไปได้ ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติคอนกรีตสดและแข็งตัวแล้วที่ได้จากโรงงานผสมคอนกรีตจึงไม่ใช่เพียงระดับความเข้มการผสมเท่านั้น แต่ยังรวมถึงคุณภาพของส่วนผสมที่ต่างกันออกไปด้วย ดังนั้นการศึกษาผลของวัสดุผสมว่ามีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดและแข็งตัวแล้วอย่างไร จึงเป็นสิ่งจำเป็นเป็นอย่างยิ่ง

2.2.11การศึกษาผลของสารลดน้ำอย่างมากต่อระดับความเข้มการผสมของซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้า[17]

นิพนธ์ทำการศึกษาผลของสารลดน้ำอย่างมากต่อระดับความเข้มการผสมของซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้าและพบว่าพลังงานการผสมของซีเมนต์เพสต์สัมพันธ์กับรูปร่างการจัดเรียงตัวและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค สำหรับซีเมนต์เพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมากพบว่า สารลดน้ำอย่างมากมีส่วนช่วยให้อนุภาคซีเมนต์มีการจัดเรียงตัวแน่นขึ้น ในขณะเดียวกันแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคมีค่าลดลงทั้งนี้เนื่องจากผลของแรงผลักทางไฟฟ้าจากสารลดน้ำอย่างมาก สำหรับมอร์ต้า ผลของสารลดน้ำอย่างมากต่อพลังงานผสมจะพิจารณาร่วมกับสัดส่วนปริมาตรของแข็งของซีเมนต์ต่อปริมาตรทั้งหมด

ในกรณีของระดับความเข้มการผสมพบว่าค่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมากไม่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ในขณะที่ ซีเมนต์เพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมากพบว่าค่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมากขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ โดยสารลดน้ำอย่างมากช่วยลดจำนวนรอยต่อระหว่างอนุภาค ซึ่งเป็นผลให้ต้องการพลังงานเพื่อกระจายอนุภาคลดลง นอกจากนี้ สารลดน้ำอย่างมากยังมีส่วนช่วยหล่อลื่นซึ่งขึ้นกับระยะห่างระหว่างอนุภาค สำหรับค่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของมอร์ต้าทั้งที่มีและไม่มีสารลดน้ำอย่างมากพบว่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสัดส่วนปริมาตรของแข็งของซีเมนต์ต่อปริมาตรของแข็งทั้งหมดและค่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์

นิพนธ์[17] ได้ให้แนวทางในการทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมาก โดยกำหนดว่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่สัมพันธ์กับพลังงานที่ต้องการเพื่อใช้สลายรอยต่อระหว่างอนุภาค ดังนั้น ค่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ปกติจะไม่ขึ้นกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจาก อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ไม่มีผล

ต่อรูปร่างการจัดเรียงตัวของอนุภาค กล่าวคือ ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชั่นคงที่ โดยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นจะมีผลเพียงแต่ทำให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้นเท่านั้น

โดยนิพนธ์[17] ได้เสนอแบบจำลองทำนายค่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ ดังนี้

$$E_{in,\%sp} = \alpha_{red}\left(E_{in,sp}\right) \quad (2.10)$$

$$\alpha_{red} = \beta_1 \cdot \beta_2 \quad (2.11)$$

เมื่อ

$E_{in,\%sp}$ = ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมาก

$E_{in,sp}$ = ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก

α_{red} = ค่าตัวประกอบการลดลง (Reduction factor) ของค่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม

β_1 = ค่าตัวประกอบที่เป็นผลจากจำนวนรอยต่อระหว่างอนุภาคที่ลดลงและจำนวนรอยต่อทั้งหมดที่เพิ่มขึ้น

β_2 = ค่าตัวประกอบที่เป็นผลจากสารลดน้ำอย่างมากทำหน้าที่เสมือนม่านป้องกันการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน และช่วยหล่อลื่นผิวสัมผัสระหว่างอนุภาค

เนื่องจากค่า β_1 คือค่าตัวประกอบที่เป็นผลจากจำนวนรอยต่อระหว่างอนุภาคที่ลดลงจากผลของแรงผลักสถิตย์ทางไฟฟ้าและจำนวนรอยต่อทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นจากตัวเลขโคออร์ดิเนชั่นที่สูงขึ้น ดังนั้น β_1 จึงประกอบด้วย 2 พจน์ ดังนี้

$$\beta_1 = \gamma_k \cdot \gamma_c \quad (2.12)$$

เมื่อ

γ_k = ค่าตัวประกอบเนื่องจากจำนวนรอยต่อทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นจากผลของค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชั่นที่สูงขึ้น ซึ่งค่าตัวประกอบนี้จะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1 เสมอ โดยจะขึ้นกับปริมาณสารลดน้ำอย่างมาก

γ_c = ค่าตัวประกอบเนื่องจากจำนวนรอยต่อที่ลดลง จากผลของแรงผลักสถิตย์ทางไฟฟ้าของสารลดน้ำอย่างมาก ซึ่งจะขึ้นกับปริมาณสารลดน้ำอย่างมาก

$$\gamma_k = \frac{\pi}{k \cdot (\varphi_{red} \cdot w_{s,no})}\left(\varphi_{red} \cdot w_{s,no} + \frac{1}{\rho}\right) \qquad (2.13)$$

$$\varphi_{red} = 1 - 0.13 X_{SP}^{0.66} \qquad (2.14)$$

เมื่อ

k = ค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชั่นของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก

φ_{red} = ค่าตัวประกอบการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์

$w_{s,no}$ = ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก

ρ = ความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์

จากการวิเคราะห์ย้อนกลับ พบว่าค่า γ_c มีความสัมพันธ์กับปริมาณสารลดน้ำอย่างมาก ดังนี้

$$\gamma_c = 1 - 0.38 X_{sp}^{0.22} \qquad (2.15)$$

เมื่อ

X_{sp} = ปริมาณสารลดน้ำอย่างมาก (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของซีเมนต์)

$$\beta_2 = 1 - a \cdot X_{sp} \quad ; X_{sp} \le 1.1\% \qquad (2.16)$$

$$\beta_2 = 1 - 1.1a \quad ; X_{sp} \ge 1.1\% \qquad (2.17)$$

ค่าปริมาณสารลดน้ำอย่างมากเท่ากับ 1.1 % เป็นค่าที่แนะนำจากผู้ผลิตสำหรับน้ำยาผสมเพิ่มประเภท F (ชื่อทางการค้า sikament FF)

เมื่อ $a = 0.89 - 4.08\left(\frac{w}{c}\right) \quad ; \left(\frac{w}{c}\right) \le 0.32 \qquad (2.18)$

$$a = -0.41 \quad ; \left(\frac{w}{c}\right) \ge 0.32 \qquad (2.19)$$

ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.32 ในสมการที่ (2.18) และ (2.19) นั้นหมายถึงค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่มากพอจะทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเป็นศูนย์[17]

2.2.12 การศึกษาผลของเถ้าลอยต่อระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ที่มีเถ้าลอย

จากการศึกษาพบว่า ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยจะขึ้นอยู่กับร้อยละของสัดส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อซีเมนต์ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนของเถ้าลอยมีผลต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของเบลนของวัสดุผง โดยจากการศึกษาพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์กับพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุผงซึ่งประกอบด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย เป็นดังรูปที่ 2.5 และมีสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$E_{in,sp} = 0.008 SSF_{c+fa} - 20.844 \quad (2.20)$$

$$SSF_{c+fa} = r_c SSF_c + r_{fa} SSF_{fa} \quad (2.21)$$

เมื่อ

$E_{in,sp}$ = ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของส่วนผสมซีเมนต์เพสต์ที่มีเถ้าลอยแต่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก

SSF_{fa} = ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเบลนของเถ้าลอย

SSF_{c+fa} = ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเบลนของวัสดุผงซึ่งประกอบด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย

r_c = ค่าสัดส่วนโดยน้ำหนักของซีเมนต์ต่อน้ำหนักวัสดุผงทั้งหมด

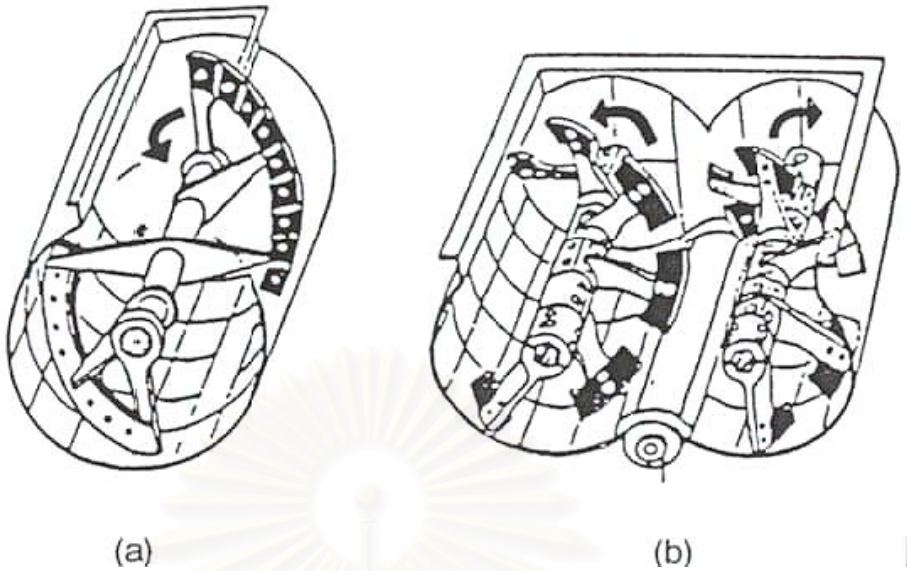
r_{fa} = ค่าสัดส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อน้ำหนักวัสดุผงทั้งหมด

งานวิจัยที่ผ่านมา ศึกษาผลของน้ำยาผสมเพิ่มและเถ้าลอยที่มีต่อระดับความเข้มการผสม โดยให้แนวทางในการทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยและน้ำยาผสมเพิ่ม โดยยังไม่มีการศึกษาผลของกระบวนการผสมที่มีต่อระดับความเข้มการผสม ซึ่งได้แก่ ชนิดเครื่องผสม ปริมาณการผสม และลำดับการใส่ส่วนผสม

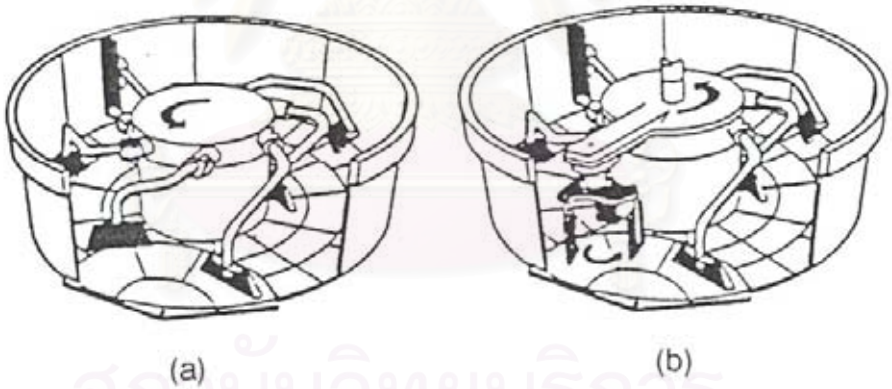
ตารางที่ 2.1 เวลาขั้นต่ำในการผสมที่แนะนำสำหรับความจุของเครื่องผสมต่าง[1] ๆ

ความจุของเครื่องผสม (ลบ.ม.)	เวลาขั้นต่ำในการผสม (นาที : วินาที)
1	1 : 00
1.5	1 : 10
2.5	1 : 30
3.0	1 : 40
4.0	2 : 00
4.5	2 : 10

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

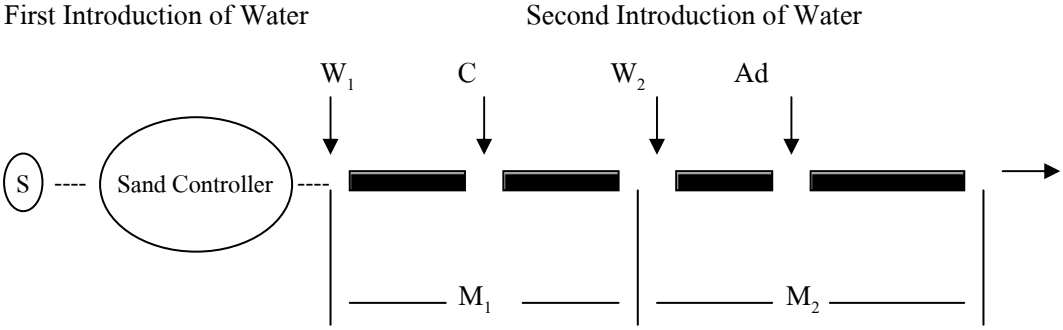


รูปที่ 2.1 Drum Mixer แบบเพลาเดี่ยว (a) และแบบเพลาคู่ (b)



รูปที่ 2.2 Pan Mixer แบบธรรมดา (a) และแบบที่มีใบกวนเพิ่ม (b)

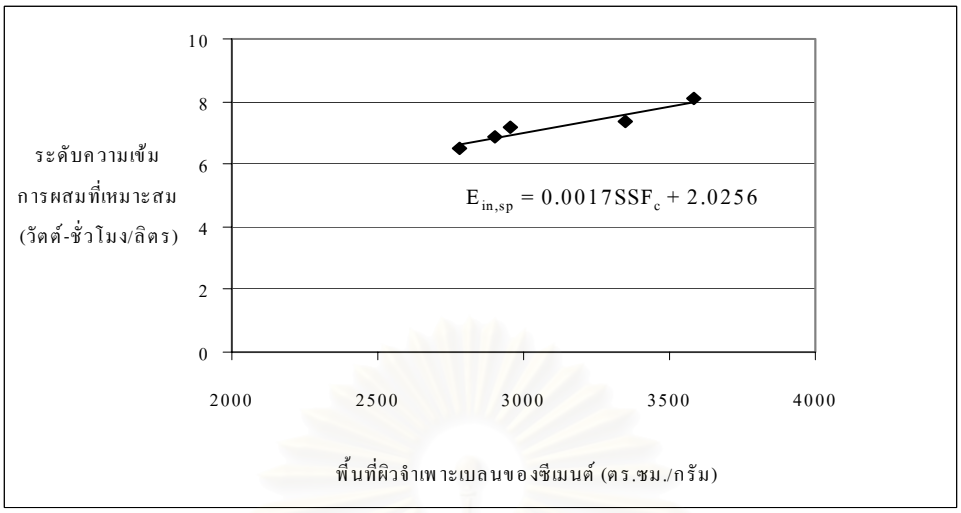
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



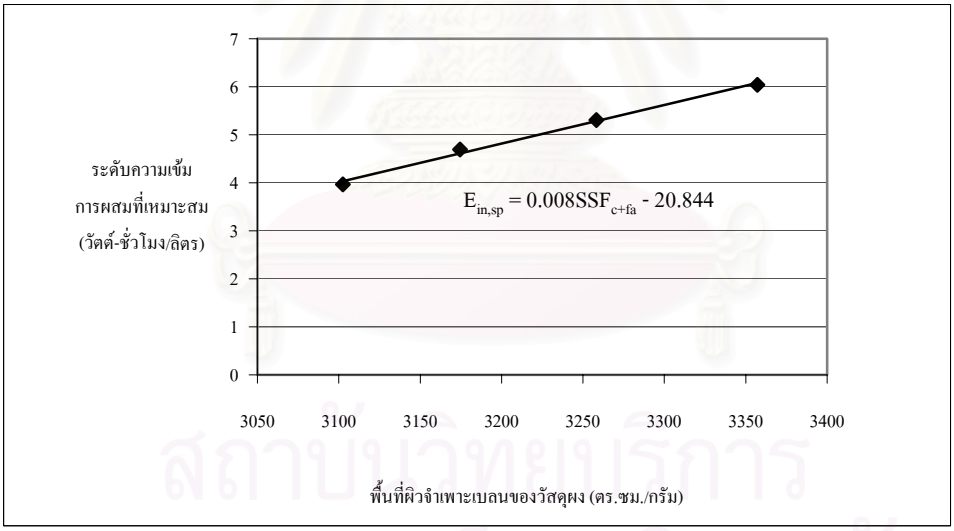
S	หมายถึง	ทราย
C	หมายถึง	ซีเมนต์
W	หมายถึง	น้ำ
Ad	หมายถึง	น้ำยาผสมเพิ่ม
M	หมายถึง	การผสม

รูปที่ 2.3 วิธีการผสมแบบห่อหุ้มทรายด้วยซีเมนต์ (S.E.C.)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ใช้เถ้าลอยและไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่มกับพื้นที่ผิวจำเพาะเบลนของซีเมนต์



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยแต่ไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่มกับพื้นที่ผิวจำเพาะเบลนของวัสดุผง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

เนื่องจากวัตถุประสงค์ในการทำวิจัยครั้งนี้ มุ่งเน้นที่การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมและคุณสมบัติของคอนกรีตที่ได้จากการผสมนั้น ๆ จึงต้องทำการเก็บรวบรวมข้อมูลด้านพลังงานไฟฟ้าและคุณสมบัติของคอนกรีตที่ได้เป็นส่วนสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของคอนกรีตที่ได้ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ ในกระบวนการผลิตอีกด้วย ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติของวัสดุผสม การตรวจสอบคุณภาพ หรือรวมถึงคุณสมบัติของเครื่องผสมคอนกรีต เป็นต้น ดังนั้น เพื่อให้สามารถพิจารณาผลของระดับความเข้มการผสมว่ามีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตอย่างไร จึงจำเป็นต้องศึกษากระบวนการผลิตอย่างละเอียดด้วย โดยในการวิจัยได้ดำเนินการดังนี้

3.1 ศึกษากระบวนการผลิตในโรงงานผสมคอนกรีตเป็นข้อมูลเบื้องต้น

กระบวนการผลิตในโรงงานผสมคอนกรีตซึ่งศึกษาเป็นข้อมูลเบื้องต้น ได้แก่

3.1.1 ปริมาณการผลิตเฉลี่ยต่อวันของโรงงานผสมคอนกรีต

3.1.2 การออกแบบส่วนผสมและสัดส่วนผสม

3.1.3 วิธีการคัดเลือกผสม แหล่งที่มา การตรวจสอบคุณภาพและการกองเก็บวัสดุผสม

3.1.4 ศึกษาคุณสมบัติของเครื่องผสม ได้แก่ ความจุมากที่สุดของเครื่องผสม ลักษณะการหมุน ลักษณะใบกวน

3.1.5 กระบวนการผสม ได้แก่ การชั่งตวง การลำเลียงวัสดุผสม ปริมาณการผสม ลำดับการใส่ส่วนผสม และเวลาที่ใช้ในการผสม

3.1.6 ลักษณะการเทออกจากเครื่องผสม

3.2 คัดเลือกโรงงานตัวแทน

หลังจากศึกษากระบวนการผลิตเบื้องต้นแล้ว จัดกลุ่มโรงงานผสมคอนกรีตที่มีกระบวนการผลิตใกล้เคียงกันโดยพิจารณาการควบคุมคุณภาพการผลิตและชนิดเครื่องผสมเป็นหลัก จากนั้นจึงคัดเลือกโรงงานตัวแทนของแต่ละกลุ่มโดยพิจารณาความสะดวกในการทดสอบและเก็บรวบรวมข้อมูล

3.3 ศึกษาข้อมูลกระบวนการผลิตคอนกรีตอย่างละเอียด

ศึกษาข้อมูลกระบวนการผลิตอย่างละเอียด ซึ่งประกอบไปด้วย

3.3.1 คุณสมบัติของวัสดุส่วนผสม ได้แก่

3.3.1.1 การคัดเลือกและแหล่งที่มาของวัสดุผสม

3.3.1.2 การตรวจสอบคุณภาพวัสดุผสม ได้แก่

3.3.1.2.1 สัดส่วนขนาดคละของมวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบ ตรวจสอบคุณภาพตามมาตรฐาน ASTM C136, C33

3.3.1.2.2 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของมวลรวมละเอียด ตรวจสอบคุณภาพตามมาตรฐาน ASTM C128

3.3.1.2.3 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของมวลรวมหยาบ ตรวจสอบคุณภาพตามมาตรฐาน ASTM C127

3.3.1.2.4 ความถ่วงจำเพาะของขี้เถ้าลอยและหินฝุ่น ตรวจสอบคุณภาพตามมาตรฐาน ASTM C188

3.3.1.3 ลักษณะการกองเก็บวัสดุผสม

3.3.2 การออกแบบส่วนผสมและสัดส่วนผสม

3.3.3 คุณสมบัติของเครื่องผสม ได้แก่ ชนิดเครื่องผสม ความจุของเครื่องผสม ลักษณะการหมุน ลักษณะใบกวน

3.3.4 กระบวนการผสม ได้แก่ วิธีการชั่งตวง การลำเลียงส่วนผสม ปริมาณการผสม ลำดับการใส่ส่วนผสม เวลาที่ใช้ในการผสมโดยนับเริ่มจากเมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำจนเมื่อเทคอนกรีตออกจากเครื่องผสม และลักษณะการเทคอนกรีตออกจากเครื่องผสม

3.3.5 ระดับความเข้มการผสมซึ่งวัดได้จากพลังงานไฟฟ้ารวมที่ใช้ในการผสมเทียบกับปริมาตรของแข็งในส่วนผสมนั้น โดยเริ่มวัดจากเมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำจนเมื่อเทคอนกรีตออกจากเครื่องผสม

3.3.6 คุณสมบัติของคอนกรีต ได้แก่ ค่ายุบตัวของคอนกรีตสด และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

3.4 รวบรวมข้อมูล

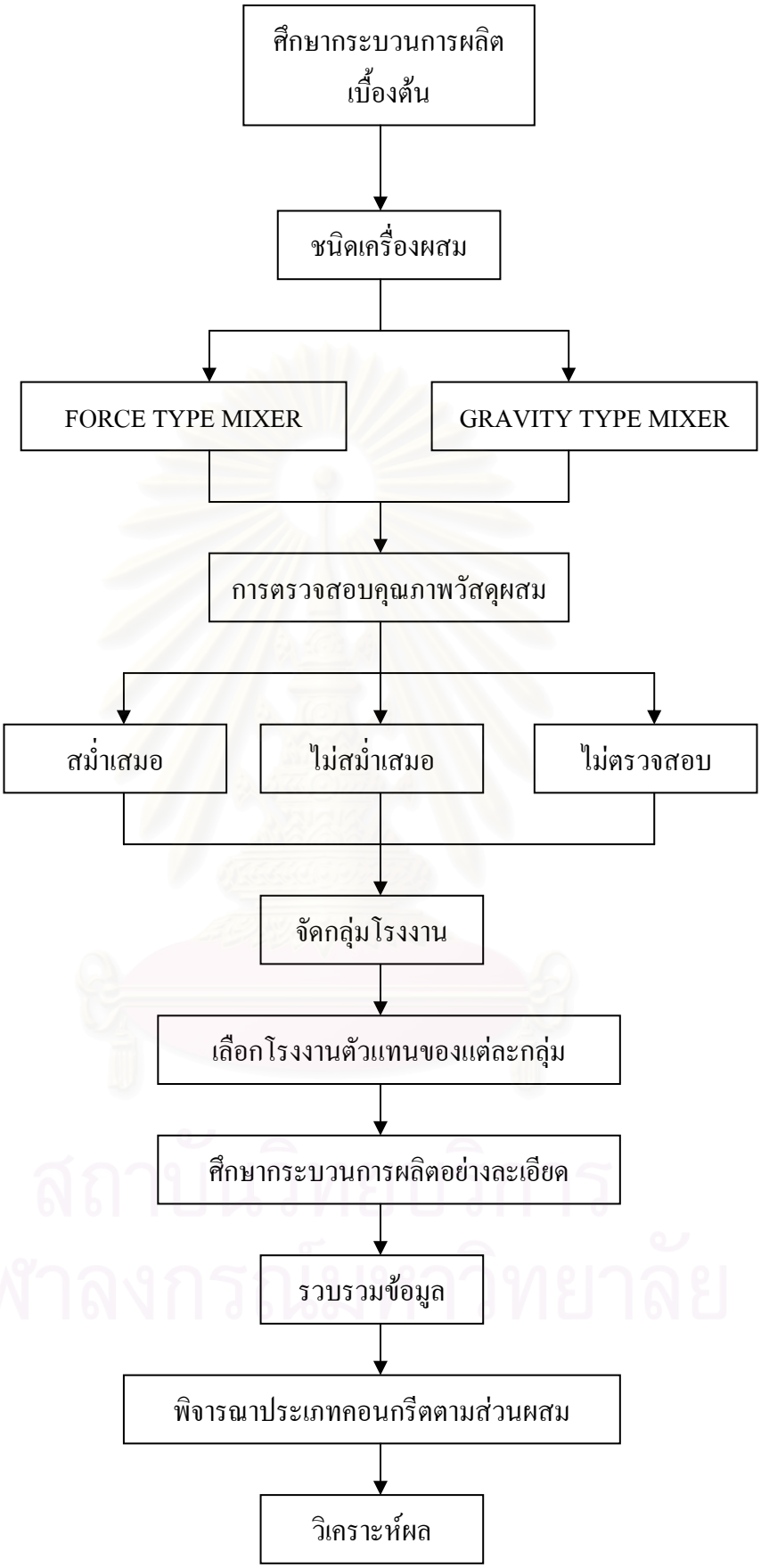
รวบรวมข้อมูลโดยนำเสนอในรูปของตารางข้อมูลเพื่อแสดงให้เห็นกระบวนการผลิตและผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตในแต่ละโรงงาน แบ่งกลุ่มข้อมูลโดยพิจารณาโรงงานผสมคอนกรีตและสัดส่วนผสมว่ามีเถ้าลอยหรือน้ำยาผสมเพิ่มหรือไม่

3.5 วิเคราะห์ผลข้อมูล

ทำการวิเคราะห์ผลข้อมูลโดยพิจารณาผลของระดับความเข้มการผสมต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ผลของกระบวนการผสมที่มีต่อระดับความเข้มการผสม โดยใช้แนวทางการศึกษาเกี่ยวกับ

ระดับความเข้มการผสมและกระบวนการผสมจากงานวิจัยที่ผ่านมา รวมทั้งงานวิจัยเกี่ยวกับผลของสัดส่วนผสม ได้แก่ ผลของสารลดน้ำอย่างมากและเถ้าลอยต่อระดับความเข้มการผสม เพื่อเป็นแนวทางในการทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตสัดส่วนผสมหนึ่ง ๆ และเปรียบเทียบระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่วัดได้จากโรงงานผสมกับค่าที่ได้จากการทำนาย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการคัดเลือกโรงงานตัวแทนและการดำเนินการวิจัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
การวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 กระบวนการผลิตในแต่ละโรงงานผสมคอนกรีต

เมื่อทำการศึกษากระบวนการผลิตในโรงงานผสมคอนกรีตเป็นข้อมูลเบื้องต้นแล้วได้ทำการจัดกลุ่มโรงงานผสมคอนกรีตโดยพิจารณาปริมาณการผลิตเฉลี่ยต่อวันรวมทั้งการควบคุมคุณภาพ และคัดเลือกโรงงานซึ่งเป็นตัวแทนของโรงงานผสมคอนกรีตต่าง ๆ จำนวน 7 โรงงาน หลังจากนั้นจึงศึกษาข้อมูลกระบวนการผสมคอนกรีตอย่างละเอียดในโรงงานต่าง ๆ เหล่านั้น โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 กระบวนการผลิตในโรงงานผสมคอนกรีตส่วนใหญ่

4.1.1.1 ปริมาณผลิตเฉลี่ยต่อวันของโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จส่วนใหญ่จะมีค่าประมาณ 50 – 200 ลบ.ม. ต่อวัน สำหรับโรงงานผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูปส่วนใหญ่ปริมาณการผลิตจะขึ้นอยู่กับจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ผลิตในแต่ละวัน

4.1.1.2 การออกแบบส่วนผสมและสัดส่วนผสมนั้น ในแต่ละโรงงานจะมีค่าแตกต่างกันออกไปเนื่องจากมีที่มาและมาตรฐานในการออกแบบต่าง ๆ กัน ทำให้สัดส่วนผสมของคอนกรีตในแต่ละโรงงานต่างกันออกไป แต่อย่างไรก็ตามสามารถจำแนกคอนกรีตที่ผสมได้เป็นกลุ่มย่อย ๆ ดังนี้

4.1.1.2.1 คอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยและไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม มีโรงงานตัวแทน คือโรงงาน ค

4.1.1.2.2 คอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม มีโรงงานตัวแทน คือ โรงงาน ง , จ และ ช

4.1.1.2.3 คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแต่ไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม มีโรงงานตัวแทน คือ โรงงาน ฉ

4.1.1.2.4 คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม มีโรงงานตัวแทน คือ โรงงาน ก , ข , ง , จ และ ช

4.1.1.3 การคัดเลือกส่วนผสม แหล่งที่มา การตรวจสอบคุณภาพและการกองเก็บวัสดุผสม

โรงงานผสมคอนกรีตในปัจจุบันนั้น มีการควบคุมคุณภาพการผลิตต่าง ๆ กัน ได้แก่ การตรวจสอบคุณภาพวัตถุดิบ ซึ่งจากการศึกษาพบว่า โรงงานตัวแทนแต่ละโรงงานจะมีการตรวจสอบคุณภาพวัตถุดิบต่างกัน ดังนี้

โรงงาน ก, ข, จ, ช จะตรวจสอบคุณภาพซีเมนต์ทุกครั้งที่นำเข้าโรงงาน ตรวจสอบสีและความถ่วงจำเพาะของน้ำยาผสมเพิ่ม มีการตรวจสอบสัดส่วนขนาดคละ ความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดทุกสัปดาห์

โรงงาน ค และ ง ไม่ได้ทำการตรวจสอบคุณภาพวัสดุผสมเลย ส่วนในกรณีของโรงงาน ฉ จะตรวจสอบสัดส่วนขนาดคละของมวลรวมนาน ๆ ครั้ง เช่น ในกรณีที่เปลี่ยนแหล่งที่มาของมวลรวม เป็นต้น

4.1.1.4 กระบวนการผสม ได้แก่

4.1.1.4.1 การชั่งตวง : จากการศึกษาพบว่าโดยส่วนใหญ่วัสดุผสมจะได้รับการชั่งตวงโดยอัตโนมัติ ยกเว้นบางโรงงานที่จะควบคุมน้ำหนักของส่วนผสมโดยเจ้าหน้าที่ควบคุมการผลิต

4.1.1.4.2 การลำเลียงวัสดุผสม : จากการศึกษาพบว่าโดยส่วนใหญ่มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดจะได้รับการลำเลียงโดยใช้กระบะตวง มีเพียงบางโรงงานที่ลำเลียงมวลรวมโดยสายพาน น้ำและน้ำยาจะได้รับการสเปรย์เข้าสู่เครื่องผสม ส่วนซีเมนต์และเถ้าลอยจะได้รับการเป่าลงสู่เครื่องผสม

4.1.1.4.3 ปริมาณการผสมแต่ละครั้ง : ปริมาณการผสมที่ใช้ในโรงงานผสมคอนกรีตส่วนใหญ่ จะขึ้นอยู่กับปริมาณคอนกรีตที่ลูกค้าต้องการ ความจุมากที่สุดของเครื่องผสม และความจุมากที่สุดที่รถกวนคอนกรีตสามารถบรรทุกได้ ซึ่งจะแตกต่างกันในแต่ละโรงงาน

4.1.1.4.4 เวลาที่ใช้ในการผสม : ขึ้นอยู่กับการออกแบบของแต่ละโรงงาน ซึ่งมีความแตกต่างกัน

4.1.1.4.5 การเทออกจากเครื่องผสม : ทุกโรงงานจะเทคอนกรีตออกทางด้านล่างของเครื่องผสม

4.1.2 โรงงานตัวแทน

หลังจากพิจารณาข้อมูลเบื้องต้นของโรงงานผสมส่วนใหญ่แล้ว ทำการคัดเลือกโรงงานตัวแทนซึ่งอยู่ในเขตกรุงเทพ ฯ และปริมณฑล โดยพิจารณาจากลักษณะการควบคุมคุณภาพของการผลิต และลักษณะเครื่องผสมที่แตกต่างกันเป็นหลัก โดยได้โรงงานตัวแทน ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

4.1.2.1 โรงงาน ก : เป็นโรงงานที่มีการควบคุมคุณภาพการผลิตดี เพราะจะทำการตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุผสมอย่างสม่ำเสมอ โดยเฉลี่ยสัปดาห์ละครั้ง รวมทั้งมีการตรวจสอบและบำรุงรักษาสภาพของเครื่องจักรอย่างสม่ำเสมอเช่นเดียวกัน โดยเครื่องผสมที่ใช้ เป็นประเภท Drum Type Mixer มีความจุมากที่สุด 2 ลบ.ม.

4.1.2.2 โรงงาน ข : เป็นโรงงานที่มีการควบคุมคุณภาพการผลิตที่ดีใกล้เคียงกับโรงงาน ก แต่จะมีการบำรุงรักษาสภาพเครื่องจักรน้อยกว่าโรงงาน ก สำหรับเครื่องผสมใช้ประเภทเดียวกันกับโรงงาน ก

4.1.2.3 โรงงาน ค : เป็นโรงงานที่ไม่ได้ตรวจสอบคุณภาพของวัตถุดิบโดยเฉพาะมวลรวมเลย รวมทั้งสภาพของเครื่องจักรก็ค่อนข้างเก่าเพราะมีอายุการใช้งานนาน โดยเครื่องผสมเป็นประเภท Pan Type Mixer ซึ่งมีความจุมากที่สุด 0.7 ลบ.ม.

4.1.2.4 โรงงาน ง : เป็นโรงงานที่ไม่ได้ตรวจสอบคุณภาพของวัตถุดิบเช่นเดียวกับโรงงาน ค และไม่ได้บำรุงรักษาเครื่องจักรอย่างสม่ำเสมอ เครื่องผสมเป็นประเภท Pan Type Mixer ซึ่งมีความจุมากที่สุด 1.5 ลบ.ม.

4.1.2.5 โรงงาน จ : เป็นโรงงานที่มีการตรวจสอบคุณภาพของวัตถุดิบดีเช่นเดียวกับโรงงาน ก โดยเครื่องผสมเป็นแบบ Pan Type Mixer ซึ่งมีความจุมากที่สุด 1.5 ลบ.ม.

4.1.2.6 โรงงาน ฉ : เป็นโรงงานที่ไม่ได้ตรวจสอบคุณภาพวัตถุดิบอย่างสม่ำเสมอเหมือนโรงงาน ก, ข และ จ แต่เป็นโรงงานที่บำรุงรักษาเครื่องจักรโดยเฉพาะเครื่องผสมอย่างดี รวมทั้งเครื่องผสมก็มีอายุการใช้งานไม่นาน โดยเครื่องผสมเป็นแบบ Pan Type Mixer ความจุมากที่สุด 2 ลบ.ม.

4.1.2.7 โรงงาน ช : เป็นโรงงานที่ตรวจสอบคุณภาพของวัตถุดิบอย่างสม่ำเสมอเช่นเดียวกับโรงงาน ก และ จ แต่เป็นโรงงานที่แทบไม่ได้บำรุงรักษาสภาพเครื่องจักรโดยเฉพาะเครื่องผสม โดยจะทำความสะอาดด้วยการล้างด้วยน้ำเท่านั้น เครื่องผสมเป็นแบบ Drum Type Mixer ซึ่งมีความจุมากที่สุด 3 ลบ.ม.

โดยรายละเอียดของแต่ละโรงงาน แสดงในตารางที่ 4.1 ถึง 4.3

4.2 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการหมุนเครื่องผสมเปล่า

การวิจัยครั้งนี้ศึกษาระดับความเข้มการผสมที่ใช้ในการผสมคอนกรีต ซึ่งจะต้องพิจารณาจากเวลาที่ใช้ในการผสม พลังงานไฟฟ้ารวมที่ใช้ในการผสม และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการหมุนเครื่องผสมเปล่า จากการศึกษาพบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการหมุนเครื่องผสมเปล่าแปรผันตรงกับเวลาที่ใช้ในการหมุน โดยเครื่องผสมต่างกันก็จะมีความสัมพันธ์ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการหมุนกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการหมุนเครื่องผสมเปล่า และรูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการหมุนกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการหมุนเครื่องผสมเปล่า

ตารางที่ 4.4 และ รูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้เวลาในการหมุนเครื่องผสมเปล่าเท่ากัน พลังงานที่ใช้ในการหมุนเครื่องผสมเปล่าจะต่างกันโดย เครื่องผสมของโรงงาน ฉ ใช้พลังงานไฟฟ้าในการหมุนมากกว่าที่ใช้ในโรงงาน ช, ข, ง, ค, ก และ จ ตามลำดับ นั่นคือ แม้ว่าโรงงาน ฉ จะใช้

เวลาในการผสมคอนกรีตเท่ากับโรงงานอื่น ๆ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผสมคอนกรีตจริง อาจจะมีค่าน้อยกว่าโรงงานอื่น ๆ เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าดังกล่าวสูญเสียไปกับการหมุนเครื่องผสมเปล่าเป็นส่วนใหญ่เช่นเดียวกับเครื่องผสมของโรงงานอื่น ๆ ดังนั้น เพื่อให้คอนกรีตได้รับพลังงานในการผสมเท่ากัน จึงไม่ควรใช้เวลาในการผสมเป็นตัววัด

4.3 การวัดระดับความเข้มการผสมในแต่ละโรงงาน

ระดับความเข้มการผสมซึ่งนิยามในการทำวิจัยครั้งนี้คือพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผสมคอนกรีตเทียบกับหนึ่งหน่วยปริมาตรของแข็งของส่วนผสม โดยพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผสมนั้นวัดจากเมื่อน้ำเริ่มผสมกับปูนซีเมนต์จนกระทั่งคอนกรีตถูกปล่อยออกจากเครื่องผสม โดยขึ้นอยู่กับลำดับการใส่ส่วนผสมของแต่ละโรงงาน ดังนี้

4.3.1 โรงงาน ก : จะเริ่มวัดเวลาและพลังงานไฟฟ้าเมื่อปูนซีเมนต์เริ่มผสมกับน้ำ นั่นคือหลังจากที่เทน้ำลงในเครื่องผสม เพราะหิน ทราย และปูนซีเมนต์จะถูกเทลงก่อนหน้านั้นอยู่แล้วจนกระทั่งเทคอนกรีตออกจากเครื่องผสม และปริมาตรของแข็งที่ใช้ในการคำนวณก็คือปริมาตรของแข็งทั้งหมดของส่วนผสม

4.3.2 โรงงาน ข : จะเริ่มวัดเวลาและพลังงานไฟฟ้าเมื่อปูนซีเมนต์เริ่มผสมกับน้ำ จนกระทั่งเทคอนกรีตออกจากเครื่องผสม ซึ่งโรงงาน ข มีลำดับการใส่ส่วนผสมเหมือนกับโรงงาน ก ดังนั้นการวัดเวลาและพลังงานไฟฟ้าจึงเริ่มวัดที่จุดเดียวกันและสิ้นสุดที่จุดเดียวกัน และปริมาตรของแข็งที่ใช้ในการคำนวณก็คือปริมาตรของแข็งทั้งหมดของส่วนผสมเช่นกัน

4.3.3 โรงงาน ค : เนื่องจากลำดับการใส่ส่วนผสมต่างไปจากโรงงาน ก และโรงงาน ข เพราะจะใส่ส่วนผสมแยกเป็น 2 ช่วง ดังนี้คือ ในช่วงแรกจะเติม หิน หินย่อย และปูนซีเมนต์ลงประมาณครึ่งส่วนก่อนที่จะเติมอีกครึ่งส่วนที่เหลือลงโดยมีลำดับการใส่ส่วนผสมเดียวกันคือ หิน หินย่อย และปูนซีเมนต์ โดยจะเปิดน้ำตั้งแต่เริ่มเทหินส่วนแรกจนกระทั่งเทปูนซีเมนต์ส่วนสุดท้ายลงในเครื่องผสม หลังจากนั้นจึงทำการผสมต่อจนกระทั่งนำคอนกรีตไปเทลงในแบบ โดยรูปที่ 4.2 แสดงลำดับการใส่ส่วนผสมของโรงงาน ค

เนื่องจากระดับความเข้มการผสมมีความสัมพันธ์กับปริมาตรของแข็งของวัสดุผสม ดังนั้นหลังจากวัดพลังงานไฟฟ้าที่ได้จะต้องแบ่งการคำนวณระดับความเข้มการผสมออกเป็น 2 ช่วงเพราะในแต่ละช่วงจะมีปริมาตรของแข็งไม่เท่ากัน ดังนี้

ก. ช่วงที่ 1 : วัดพลังงานไฟฟ้าโดยเริ่มตั้งแต่ปูนซีเมนต์ส่วนแรกเริ่มผสมกับน้ำจนกระทั่งเทหินและหินย่อยส่วนที่เหลือลงผสมทั้งหมด โดยคิดปริมาตรของแข็งเท่ากับปริมาตรของแข็งของซีเมนต์รวมกับปริมาตรหินและหินย่อยทั้งหมด

ข. ช่วงที่ 2 : วัดพลังงานไฟฟ้าตั้งแต่เทหินและหินย่อยส่วนที่เหลือลงผสมจนหมดจนกระทั่งเทคอนกรีตออกจากเครื่องผสม โดยคิดปริมาตรของแข็งของส่วนผสมทั้งหมด

4.3.4 โรงงานผสม ง : เนื่องจากโรงงานผสม ง จะเทส่วนผสมลงพร้อมกันทั้งหมดในเวลาเดียวกัน ดังนั้นจึงเริ่มวัดเวลาและพลังงานไฟฟ้าเมื่อเริ่มทำการผสมในทันที จนกระทั่งเทคอนกรีตออกจากเครื่องผสม โดยปริมาตรของแข็งที่ใช้ในการคำนวณคือปริมาตรของแข็งทั้งหมดของส่วนผสม

4.3.5 โรงงานผสม จ : ทำการผสมคอนกรีตโดยเทหิน ทรายทั้งหมด และเทน้ำลงบางส่วนก่อนที่จะเทปูนซีเมนต์ลงไป ดังนั้นจะเริ่มวัดเวลาและพลังงานไฟฟ้าจากเมื่อปูนซีเมนต์เริ่มผสมกับน้ำ จนกระทั่งเทคอนกรีตออกจากเครื่องผสม โดยปริมาตรของแข็งที่ใช้ในการคำนวณคือปริมาตรของแข็งทั้งหมดของส่วนผสม

4.3.6 โรงงานผสม ฉ : จะเริ่มวัดเวลาและพลังงานไฟฟ้าเมื่อปูนซีเมนต์เริ่มผสมกับน้ำ จนกระทั่งเทคอนกรีตออกจากเครื่องผสม ซึ่งแม้ว่าโรงงาน ฉ จะใช้เวลาในการผสมแต่ละส่วนผสมนานกว่าโรงงาน ก แต่มีลำดับการใส่ส่วนผสมเดียวกัน ดังนั้นการวัดเวลาและพลังงานไฟฟ้าจึงเริ่มวัดที่จุดเดียวกันและสิ้นสุดที่จุดเดียวกัน และปริมาตรของแข็งที่ใช้ในการคำนวณก็คือปริมาตรของแข็งทั้งหมดของส่วนผสมเช่นกัน

4.3.7 โรงงาน ช : เนื่องจากโรงงานผสม ช จะเทส่วนผสมลงพร้อมกันทั้งหมดในเวลาเดียวกันยกเว้นน้ำยาผสมเพิ่ม ดังนั้นจึงเริ่มวัดเวลาและพลังงานไฟฟ้าเมื่อเริ่มทำการผสมในทันที จนกระทั่งเทคอนกรีตออกจากเครื่องผสม โดยปริมาตรของแข็งที่ใช้ในการคำนวณคือปริมาตรของแข็งทั้งหมดของส่วนผสม

4.4 ผลทดสอบการผสมของโรงงานผสมคอนกรีต

ในการผสมคอนกรีตแต่ละครั้ง สัดส่วนผสมจะแตกต่างกันออกไปตามคุณสมบัติของคอนกรีตที่ออกแบบไว้และยังมีความแตกต่างกันในแต่ละโรงงานด้วย โดยการผสมโดยทั่วไปจะใช้เวลาในการผสมเป็นตัววัดว่าผสมคอนกรีตนานเพียงพอและได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการใช้งานหรือไม่ อย่างไรก็ตามแม้ว่าแต่ละโรงงานจะกำหนดเวลาที่ใช้ในการผสม ในการปฏิบัติงานจริงก็มีความคลาดเคลื่อนบ้าง ซึ่งเกิดจากปัจจัยหลายด้าน เช่น การรอรถกวนคอนกรีตเข้ารับคอนกรีตหรือเจ้าหน้าที่ที่ควบคุมการผลิตพิจารณาโดยประสบการณ์แล้วพบว่าควรเพิ่มเวลาในการผสมต่อไปอีก แต่แม้ว่าในการผสมแต่ละครั้งจะใช้เวลาในการผสมเท่ากันหรือไม่ก็ตาม พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผสมก็จะมีความแตกต่างกัน ซึ่งส่งผลให้ระดับความเข้มการผสมต่างกันไปด้วย

โดยตารางที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของเครื่องผสมและปริมาณการผสมของแต่ละสัดส่วนผสม และตารางที่ 4.6 ถึง 4.17 แสดงผลทดสอบการผสมคอนกรีตของแต่ละโรงงาน เพื่อนำค่าที่ได้จากการทดสอบดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์ผลของระดับความเข้มการผสมที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีต และผลของกระบวนการผสมที่มีต่อระดับความเข้มการผสม

4.5 ค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน (Normalized Slump)

ค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน (Normalized Slump) หมายถึง ค่าสัดส่วนของค่ายุบตัวต่อค่ายุบตัวสูงที่สุดที่คาดว่าเป็นไปได้ซึ่งได้จากการทดสอบของคอนกรีตที่ผสมโดยสัดส่วนผสมหนึ่ง ๆ เพื่อศึกษาว่าค่ายุบตัวของคอนกรีตที่ระดับความเข้มการผสมแตกต่างกันมีค่ามากน้อยอย่างไรเมื่อเทียบกับค่ายุบตัวสูงสุดที่คาดว่าเป็นไปได้ของสัดส่วนผสมนั้น ๆ และเพื่อให้เป็นการสะดวกในการระบุค่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของสัดส่วนผสมนั้น ๆ เช่นเดียวกัน โดยค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4.1

$$NSlm = \frac{Slm_r}{Slm_{\max}} \qquad (4.1)$$

เมื่อ

$NSlm$ = ค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน

Slm_r = ค่ายุบตัวจริงที่ทดสอบได้ของคอนกรีตที่สัดส่วนผสมหนึ่ง

$Slm_{\max}$ = ค่ายุบตัวสูงที่สุดที่คาดว่าเป็นไปได้ของคอนกรีตที่สัดส่วนผสมนั้น ซึ่งได้จากการเขียนสมการแสดงแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวจริง

โดยค่า $Slm_{\max}$ คำนวณจาก

$$\frac{d(Slm_r)}{d(MI)} = 0 \qquad (4.2)$$

เมื่อ

MI = ระดับความเข้มการผสมที่วัดได้จากโรงงาน

4.6 ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม

ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม หมายถึงระดับความเข้มการผสมที่ทำให้ได้คอนกรีตที่มีค่ายุบตัวสูงที่สุดสำหรับคอนกรีตที่ผสมโดยสัดส่วนผสมหนึ่ง ๆ

4.7 ผลของระดับความเข้มการผสมที่มีต่อค่ายุบตัวของคอนกรีตสด

จากความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่เป็นบรรทัดฐานของคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ใช้เถ้าลอยและไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่มในรูปที่ 4.3 คอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้

น้ำยาผสมเพิ่มในรูปที่ 4.4 ถึง 4.6 คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มในรูปที่ 4.8 ถึง 4.21 พบว่าสามารถสรุปได้ว่าระดับความเข้มการผสมมีผลต่อค่ายุบตัวของคอนกรีตโดยสามารถระบุระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตเพื่อให้มีค่ายุบตัวสูงที่สุดได้ โดยค่าระดับความเข้มการผสมที่วัดได้จากโรงงานผสมคอนกรีตแสดงในตารางที่ 4.18 – 4.19

ในกรณีของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแต่ไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่มนั้น เนื่องจากเป็นสัดส่วนผสมที่ออกแบบให้มีค่ายุบตัวเป็นศูนย์ ทำให้ไม่สามารถระบุระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมได้

4.8 การทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม

4.8.1 การทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์

จากการศึกษาที่ผ่านมา[16), (17)] พบว่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ขึ้นอยู่กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของเบลน โดยมีความสัมพันธ์กันดังรูปที่ 2.4 และมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.7 ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวจะใช้ในการทำนายค่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ได้ โดยจะใช้ในการทำนายระดับความเข้มการผสมของคอนกรีตต่อไป

4.8.2 การทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยและไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม

จากการศึกษา[16] สำหรับคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยและไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม พบว่าสามารถทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมได้ดังนี้

$$E_o = k_1 \cdot E_{in,mix} \qquad (4.3)$$

เมื่อ

E_o = ค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีต

k_1 = ค่าสัมประสิทธิ์เพื่อลดระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคของมวลรวมหยาบมีส่วนช่วยในการกระจายอนุภาคของซีเมนต์ ซึ่งจากการศึกษาของบุญไชย[16] เสนอว่ามีค่าเท่ากับ 0.8

$E_{in,mix}$ = ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของส่วนผสมที่ไม่มีมวลรวม

$$E_{in,mix} = \left(\frac{V_{sc}}{V_{st}}\right) E_{in,sp} = (n_c) E_{in,sp} \qquad (4.4)$$

เมื่อ

V_{sc} = ปริมาตรของแข็งของซีเมนต์ในส่วนผสม

V_{st} = ปริมาตรของแข็งทั้งหมดของส่วนผสม

n_c = สัดส่วนโดยปริมาตรของซีเมนต์

4.8.3 การทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม

จากการศึกษาเรื่องผลของสารลดน้ำอย่างมากต่อระดับความเข้มการผสมของซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้า[17] พบว่าสามารถคำนวณระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมได้ดังนี้

คำนวณระดับความเข้มการผสมตามสมการ (4.3) โดย

$$E_{in,mix} = \left(\frac{V_{sc}}{V_{st}}\right) E_{in,\%sp} = (n_c) E_{in,\%sp} \qquad (4.5)$$

เมื่อ

$E_{in,\%sp}$ = ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ที่มีสารลดน้ำอย่างมากซึ่งสามารถคำนวณได้ตามวิธีที่เสนอโดยนิพนธ์[17]

4.8.4 การทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแต่ไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม

การศึกษาพบว่า ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยแต่ไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่มนั้นขึ้นอยู่กับร้อยละของสัดส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อซีเมนต์ซึ่งส่งผลต่อค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเบลนของวัสดุผง

คำนวณระดับความเข้มการผสมตามสมการที่ 4.3 โดยความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมของซีเมนต์เพสต์ที่มีเถ้าลอยแต่ไม่มีสารลดน้ำอย่างมาก ($E_{in,spfa}$) กับพื้นที่ผิวจำเพาะเบลนของวัสดุผงที่ประกอบด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย (SSF_{c+fa}) เป็นไปดังรูปที่ 2.5 และมีสมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.20 และ 2.21

4.8.5 การทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม

นิพนธ์[17] ได้ศึกษาผลของสารลดน้ำอย่างมากต่อระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตและมอร์ต้าที่ไม่ใช้เถ้าลอย แต่เนื่องจากในปัจจุบัน คอนกรีตที่ผสมในโรงงานผสมทั่วไปจะมีส่วนผสมของทั้งเถ้าลอยและน้ำยาผสมเพิ่ม ดังนั้นเพื่อทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยและน้ำยาผสมเพิ่ม ผู้วิจัยได้รวมผลการศึกษาของนิพนธ์

และการศึกษาเกี่ยวกับผลของเถ้าลอยเข้าด้วยกัน โดยศึกษาระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์โดยพิจารณาว่ามีส่วนประกอบของทั้งเถ้าลอยและน้ำยาผสมเพิ่ม โดยศึกษาจากความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมกับพื้นที่ผิวจำเพาะเบลนของวัสดุผงดังรูปที่ 2.5 และสมการที่ 2.20 และ 2.21 และรวมผลของน้ำยาผสมเพิ่มโดยใช้ค่าตัวประกอบการลดลง (Reduction factor) ของค่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม (α_{red}) ดังสมการที่ 4.7 และคำนวณระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีต ดังความสัมพันธ์ในสมการที่ 4.6 ดังนี้

$$E_{in,mix} = \left(\frac{V_{sc}}{V_{st}}\right) E_{in,\%spfa} = (n_c) E_{in,\%spfa} \quad (4.6)$$

$$E_{in,\%spfa} = \alpha_{red} \left(E_{in,spfa}\right) \quad (4.7)$$

จากการศึกษาของนิพนธ์[17] พบว่า สารลดน้ำอย่างมากจะมีคุณสมบัติลดระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้า โดยจะมีค่าตัวประกอบการลดลง (Reduction Factor) ของค่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมซึ่งเกิดจากผลของจำนวนรอยต่อระหว่างอนุภาคที่ลดลงเนื่องจากผลของแรงผลักสถิตย์ทางไฟฟ้าของสารลดน้ำอย่างมาก ซึ่งจะขึ้นกับปริมาณสารลดน้ำอย่างมากและจำนวนรอยต่อทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของค่าตัวเลขโคออร์ดิเนชั่นที่สูงขึ้น และผลจากสารลดน้ำอย่างมากที่ทำหน้าที่เหมือนม่าน ป้องกันการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน และช่วยหล่อลื่นผิวสัมผัสระหว่างอนุภาค แต่เนื่องจากในโรงงานผสมคอนกรีตโดยทั่วไปไม่ได้จำกัดเฉพาะการใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท F (สารลดน้ำอย่างมาก) แต่ยังใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภทอื่น ๆ อีก ซึ่งในโรงงานตัวแทนทั้ง 7 โรงงานพบว่านอกจากน้ำยาผสมเพิ่มประเภท F แล้ว บางโรงงานใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A สารลดน้ำ ประเภท D สารลดน้ำและหน่วงการก่อตัว ประเภท G สารลดน้ำอย่างมากและหน่วงการก่อตัวร่วมด้วย ซึ่งยังไม่มีการศึกษาว่าน้ำยาผสมเพิ่มแต่ละประเภทจะมีผลต่อระดับความเข้มการผสมแตกต่างกันหรือไม่ อย่างไร

จากการศึกษาของนิพนธ์[17] พบว่าผลของน้ำยาผสมเพิ่มที่มีต่อระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบทางเคมีและปริมาณการใช้ แต่เนื่องจากคุณสมบัติของเถ้าลอยและน้ำยาผสมเพิ่มที่ใช้ในแต่ละโรงงานแตกต่างกันและยังไม่มีการศึกษาผลของเถ้าลอยและน้ำยาผสมเพิ่มประเภทอื่น ๆ นอกเหนือจากสารลดน้ำอย่างมาก (ประเภท F) อย่างชัดเจน ในการวิจัยครั้งนี้จึงใช้ผลจากการทดลองของบุญไชย[16] และนิพนธ์[17] มาทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมเพื่อพิจารณาแนวโน้มของระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่เป็นไปได้ โดยมีสมมติฐานว่าน้ำยาผสมเพิ่มประเภท A , D และ F เป็นน้ำยาที่มีคุณสมบัติเป็นสารลดน้ำเหมือนกัน เพราะจากการศึกษาของนิพนธ์[17] สรุปได้ว่า สำหรับสารลดน้ำธรรมดา (ประเภท A) มีคุณสมบัติช่วยให้อนุภาคซีเมนต์กระจายตัว โดยสารลดน้ำจะดูดติดบนผิวอนุภาคซีเมนต์และทำให้อนุภาค

ซีเมนต์เกิดประจุที่เหมือนกัน และผลักซึ่งกันและกัน เป็นผลให้อนุภาคซีเมนต์กระจายตัว อย่างไรก็ตาม สารลดน้ำไม่สามารถใช้ในปริมาณที่สูงกว่า 0.5% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ได้เพราะจะก่อให้เกิดปัญหาทางด้านการก่อตัว และปัญหาเนื่องจากฟองอากาศขนาดใหญ่ ส่วนในกรณีของสารลดน้ำอย่างมาก (ประเภท F) จะมีคุณสมบัติในการช่วยให้อนุภาคซีเมนต์กระจายตัว โดยสารลดน้ำอย่างมากจะทำหน้าที่เช่นเดียวกับกับสารลดน้ำธรรมดา แต่ต่างกันที่สารลดน้ำอย่างมากสามารถใช้ในปริมาณที่สูงได้โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาด้านการก่อตัว

แต่สำหรับกรณีน้ำยาผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำและหน่วงการก่อตัว (ประเภท D) จะมีกลไกการทำงานต่าง ๆ เหมือนสารลดน้ำธรรมดา เพียงแต่ผลของสารหน่วงการก่อตัวจะทำให้ลดระยะเวลาในการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งจะส่งผลต่อการแข็งตัวของมอร์ต้าและคอนกรีต

นั่นคือน้ำยาผสมเพิ่มประเภท A , D และ F ถือเป็นสารลดน้ำที่มีกลไกการทำงานในด้านการกระจายอนุภาคเช่นเดียวกัน จึงถือว่าแนวทางการทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของนิพนธ์สามารถนำมาใช้ได้ในทุกกรณี

4.9 การเปรียบเทียบระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่วัดได้จากโรงงานผสมกับค่าที่ได้จากการทำนาย

ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่วัดได้จากโรงงานผสม คือ ระดับความเข้มการผสมที่ทำให้คอนกรีตมีค่ายุบตัวสูงที่สุดสำหรับส่วนผสมหนึ่ง ๆ ซึ่งวัดได้จากโรงงานผสมตัวแทนแต่ละโรงงานโดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสม (MI) กับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน ($NSlm$) และคำนวณค่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมโดย

$$\frac{d\,(NSlm)}{d\,(MI)} = 0 \qquad (4.8)$$

เนื่องด้วยข้อมูลที่ได้จากโรงงานตัวแทนมีจำนวนมาก และในแต่ละโรงงานก็ผสมคอนกรีตที่มีสัดส่วนผสมที่แตกต่างกันออกไปเนื่องจากความต้องการของลูกค้า ซึ่งทำให้ไม่สามารถกำหนดจำนวนข้อมูลที่ต้องการได้ ดังนั้น ในการเปรียบเทียบระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมจริงที่วัดได้จากโรงงานกับค่าทำนายระดับความเข้มการผสมจะเลือกเฉพาะข้อมูลการทดสอบคอนกรีตสัดส่วนผสมเดียวกันที่มีจำนวนไม่ต่ำกว่า 9 ค่า เนื่องจากสามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานได้

4.9.1 ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยและไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม

โรงงาน ค เป็นโรงงานเดียวที่ผสมคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยและไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม สัดส่วนผสมและผลทดสอบการผสมคอนกรีตแสดงในตารางที่ 4.7 โดยใช้เครื่องผสมชนิด Force Type

Mixer มีลักษณะเครื่องผสมเป็น Pan Mixer ซึ่งมีความจุมากที่สุด 0.7 ลบ.ม. ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 3 ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเบลนเท่ากับ 5256 ตร.ซม./กรัม มวลรวมหยาบเป็นหินขนาด ¾" คละกับหินขนาด ½" มวลรวมละเอียดเป็นหินย่อยซึ่งมาจากแหล่งผลิตเดียวกันคือจังหวัดสระบุรี

ในการทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมสำหรับซีเมนต์เพสต์ พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์กับพื้นที่ผิวจำเพาะเบลนของซีเมนต์ดังสมการที่ 2.7 และรูปที่ 2.4 พบว่า เมื่อพื้นที่ผิวจำเพาะเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ใช้ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5256 ตร.ซม./กรัม ค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมจะมีค่าประมาณ 10.96 วัตต์ –ชั่วโมง / ลิตร และนำมาทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตโดยสมการที่ 2.8 และ 2.9 โดยคูณค่าคงที่ 0.8 ซึ่งแนะนำโดยบุญไชย[16] ดังนั้น จึงสามารถทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตได้เท่ากับ 0.903 วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานดังรูปที่ 4.3 และโดยสมการที่ 4.8 พบว่า ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตที่ได้จากโรงงาน ค มีค่าเท่ากับ 0.200 วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร

พิจารณาระดับความเข้มการผสมที่วัดได้จากโรงงาน ค พบว่ามีค่าต่ำกว่าค่าทำนายค่อนข้างมาก

4.9.1.1 ผลของชนิดเครื่องผสม

เครื่องผสมที่ใช้ในโรงงานผสม ค เป็นเครื่องผสมแบบ Force Type Mixer ซึ่งมีอายุการใช้งานค่อนข้างนาน แต่อย่างไรก็ตามพบว่ามีการบำรุงรักษาเครื่องผสมค่อนข้างดีเพราะจะทำความสะอาดใบกวนและภายในเครื่องผสมทุกครั้งที่ทำการผสมเสร็จในแต่ละวัน ดังนั้นจึงถือว่าเครื่องผสมยังมีประสิทธิภาพในการผสมค่อนข้างดี

4.9.1.2 ผลของสัดส่วนปริมาตรการผสมต่อความจุมากที่สุดของเครื่องผสม

ในแต่ละครั้งจะใส่ส่วนผสมด้วยสัดส่วนปริมาตรการผสมต่อความจุมากที่สุดของเครื่องผสมเท่ากับ 0.47 (330 ลิตร: 700 ลิตร) ซึ่งจากการศึกษาของบุญไชย[16] พบว่าการผสมโดยสัดส่วนปริมาตรการผสมเท่ากับ 0.5 ถึง 1.0 ไม่มีผลต่อระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม ในกรณีนี้ผสมโดยสัดส่วนปริมาตรการผสมต่ำกว่า 0.5 ซึ่งส่งผลให้พลังงานที่ใช้ในการผสมทั้งหมดกระจายอนุภาคได้ดี ดังนั้นพลังงานในการผสมหรือระดับความเข้มที่เหมาะสมเพื่อทำให้ได้คอนกรีตที่มีค่ายุบตัวสูงที่สุดจึงมีค่าต่ำลงค่อนข้างมาก แต่อย่างไรก็ตาม ยังต้องศึกษาถึงปัจจัยอื่น ๆ ประกอบด้วย

4.9.1.3 ผลของลำดับการใส่ส่วนผสม

การทำนายค่าระดับความเข้มการผสมได้ใช้ผลการศึกษาของบุญไชย[16] และนิพนธ์[17] พบว่าลำดับการใส่ส่วนผสมจากการศึกษาของบุญไชย[16] มีสองกรณี คือ เทวัสดุ

ผสมทั้งหมดรวมทั้งน้ำเข้าด้วยกันก่อนทำการผสม และเทวัสดุผสมแห้งเข้าด้วยกันและทำการผสมเป็นเวลา 180 วินาทีก่อนที่จะเทน้ำลงผสม โดยพบว่าสำหรับคอนกรีตที่มีส่วนผสมเดียวกัน แม้จะได้รับการผสมด้วยลำดับการใส่ส่วนผสมต่างกันก็ยังมีแนวโน้มที่จะมีระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมเท่ากัน และบุญไชย[16] ได้ให้แนวคิดที่ว่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมไม่ขึ้นอยู่กับลำดับการใส่ส่วนผสม ส่วนการศึกษาของนิพนธ์[17] ได้ผสมซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้าโดยเทวัสดุผสมทั้งหมดรวมทั้งน้ำเข้าด้วยกันและปล่อยทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 30 วินาทีก่อนที่จะทำการผสม

ลำดับการใส่ส่วนผสมของโรงงาน ค เป็นการใส่ส่วนผสม 2 ครั้ง ดังรูปที่ 4.2 โดยจะเปิดน้ำตลอดการผสมและแบ่งเทวัสดุผสมแห้งออกเป็น 2 ครั้ง ซึ่งลำดับการใส่ส่วนผสมในลักษณะนี้ยังไม่ได้มีการศึกษาว่ามีผลต่อระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมหรือไม่ แม้ว่าการศึกษาของบุญไชยจะให้แนวคิดว่าลำดับการใส่ส่วนผสมไม่มีผลต่อระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาถึงผลของลำดับการใส่ส่วนผสมลักษณะที่ใช้ในโรงงาน ค ว่ามีผลต่อระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่ใช้ในคอนกรีตอย่างไรต่อไป

นอกจากปัจจัยดังกล่าวที่มีผลต่อค่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมแล้ว หากพิจารณาสมการที่ 2.7 และรูปที่ 2.4 พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ใช้ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5256 ตร.ซม./กรัม ซึ่งเป็นค่าที่ไม่อยู่ในช่วงที่ทำการทดสอบในรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นไปได้ว่าเมื่อพื้นที่ผิวจำเพาะเบลนของซีเมนต์มีค่าสูงกว่าช่วงที่ทำการทดสอบในรูปที่ 2.4 อาจไม่สามารถใช้สมการที่ 2.7 ในการทำนายได้ ซึ่งผลของพื้นที่ผิวจำเพาะเบลนของซีเมนต์ที่มีต่อระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์ควรจะได้รับการศึกษาต่อไป

อย่างไรก็ตาม พบว่า ค่ายุบตัวของคอนกรีตที่ได้เมื่อใช้ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมเท่ากับ 0.2 วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร เป็นค่าที่ยอมรับได้และมีแนวโน้มที่จะสูงกว่าที่ออกแบบไว้ คือมีค่าประมาณ 12 ซม. ในขณะที่ค่ายุบตัวที่ออกแบบไว้คือ 5-8 ซม. จึงถือว่าพลังงานผสมที่ใช้ในโรงงาน ค ในปัจจุบันก็มีความเหมาะสมโดยทำให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติตรงกับความต้องการและใช้เวลาในการผสมอย่างเหมาะสมต่อการทำงานจริง

4.9.2 ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม

โรงงานที่ผสมคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม ได้แก่ โรงงาน ง, จ และ ช คุณสมบัติของเครื่องผสม วัสดุผสม และกระบวนการผสมแสดงในตารางที่ 4.1 ถึง 4.3 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตแสดงในตารางที่ 4.7 ถึง 4.10

ค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมและค่าที่วัดได้จากโรงงานผสมสรุปได้ดังตารางที่ 4.18 และรูปที่ 4.4 ถึง 4.6

ค่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่วัดได้จากโรงงาน ง และ จ มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำนาย ซึ่งได้แนวคิดจากการศึกษาระดับความเข้มการผสมของบุญไชย[16] และการศึกษาผลของสารลดน้ำอย่างมากของนิพนธ์[17] สามารถใช้ทำนายค่าระดับความเข้มการผสมสำหรับกรณีนี้ได้ แต่สำหรับค่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่วัดได้จากโรงงาน ช กลับมีค่าต่ำกว่าค่าทำนายค่อนข้างมาก

4.9.2.1 ผลของชนิดเครื่องผสม

แม้โรงงาน ง, จ และ ช จะใช้เครื่องผสมแบบ Force Type Mixer เหมือนกัน แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าโรงงาน ง และ จ ใช้เครื่องผสมลักษณะ Pan Mixer ในขณะที่ โรงงาน ช ใช้เครื่องผสมลักษณะ Drum Mixer ซึ่งมีลักษณะการกวนเนื้อคอนกรีตที่ต่างกัน และพบว่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่วัดได้จริงในโรงงานกับค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมมีค่าใกล้เคียงกันเฉพาะในกรณีของ โรงงาน ง และ จ ซึ่งใช้เครื่องผสมลักษณะ Pan Mixer เท่านั้น แต่ในกรณีของโรงงาน ช ซึ่งแม้จะใช้เครื่องผสมแบบ Force Type Mixer เหมือนกัน แต่เนื่องจากลักษณะเครื่องผสมเป็นแบบ Drum Mixer จึงอาจส่งผลให้ค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมไม่สามารถนำมาใช้ได้ในกรณีนี้

ในการทำนายค่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมนั้นใช้แนวคิดจากผลการศึกษาของบุญไชย[16] ซึ่งใช้เครื่องผสมแบบ Pan Mixer ดังนั้นค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่ใช้แนวคิดของบุญไชย[16] จึงมีความเหมาะสมสำหรับการผสมคอนกรีตด้วยเครื่องผสมลักษณะ Pan Mixer เท่านั้น และการศึกษาเกี่ยวกับผลของชนิดเครื่องผสมนั้นควรจะได้มีการศึกษาต่อไป

4.9.2.2 ผลของสัดส่วนปริมาตรการผสมต่อความจุมากที่สุดของเครื่องผสม

พิจารณาสัดส่วนปริมาตรการผสมต่อความจุมากที่สุดของเครื่องผสมของทั้งสามสัดส่วนผสมแล้ว พบว่า

โรงงาน ง mix 1 ผสมด้วยสัดส่วนปริมาตร 0.667 (1000 ลิตร : 1500 ลิตร)

โรงงาน จ mix 3 ผสมด้วยสัดส่วนปริมาตร 0.750 (1125 ลิตร : 1500 ลิตร)

โรงงาน ช mix 1 ผสมด้วยสัดส่วนปริมาตร 0.833 (2500 ลิตร : 3000 ลิตร)

พิจารณาจากสัดส่วนปริมาตรการผสมต่อความจุมากที่สุดของเครื่องผสมแล้วพบว่า เมื่อสัดส่วนปริมาตรการผสมเพิ่มขึ้น ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่วัดได้จากโรงงานมีแนวโน้มที่จะค่าต่ำกว่าค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม แต่จากการศึกษาของบุญไชย[16] พบว่า สัดส่วนปริมาตรการผสมต่อความจุมากที่สุดของเครื่องผสมเท่ากับ 0.5 ถึง 1.0 ไม่มีผลต่อระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม แนวโน้มดังกล่าวจึงอาจเป็นผลของกระบวนการผสมอื่น ๆ

4.9.2.3 ผลของลำดับการใส่ส่วนผสม

พิจารณาจากลำดับการใส่ส่วนผสม พบว่า

โรงงาน ง เป็นโรงงานที่ทำการเทวัสดุผสมทั้งหมดลงพร้อม ๆ กันแล้วจึงเริ่มทำการผสมตามเวลาที่กำหนด

โรงงาน จ เป็นโรงงานที่ทำการผสมโดยเทหิน ทรายทั้งหมด และเทน้ำลงโดยในระหว่างที่เทน้ำลงได้ประมาณครึ่งส่วน จะเทปูนซีเมนต์ลงไป แล้วทำการผสมตามเวลาที่กำหนด

โรงงาน ช เป็นโรงงานที่ทำการผสมโดยเทส่วนผสมยกเว้นน้ำยาผสมเพิ่มลงไปพร้อมกันจนหมด จากนั้นจึงเติมน้ำยาผสมเพิ่ม และทำการผสมตามเวลาที่กำหนด

ลำดับการใส่ส่วนผสมของทั้งสามโรงงานข้างต้น มีลักษณะใกล้เคียงกับลำดับการผสมที่ใช้ในการศึกษาของบุญไชย[16] อย่างไรก็ตามพบว่าในกรณีนี้ คอนกรีตมีส่วนผสมเพิ่มมาจากคอนกรีตธรรมดาคือ ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม ดังนั้นจึงต้องศึกษาผลของน้ำยาผสมเพิ่มที่มีต่อระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมด้วย

4.9.2.4 ผลของน้ำยาผสมเพิ่ม

น้ำยาผสมเพิ่มโดยเฉพาะสารลดน้ำ มีคุณสมบัติในการกระจายอนุภาคซีเมนต์ในเฟสของเหลวของคอนกรีตและไม่ทำให้เกิดการรวมตัวกันของซีเมนต์กับน้ำ ซึ่งส่งผลให้ปริมาณน้ำอิสระซึ่งโดยปกติถูกกักอยู่รอบ ๆ อนุภาคซีเมนต์ถูกปล่อยออกมา ดังนั้นจึงเพิ่มประสิทธิภาพในการไหลของคอนกรีต

ในกรณีของทั้งสามสัดส่วนผสมซึ่งเป็นคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่มนั้น พบว่า ใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A และ D ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารลดน้ำ ดังนั้นในการทำนายระดับความเข้มการผสมจึงใช้แนวทางในการศึกษาของนิพนธ์[17] แต่อย่างไรก็ตามพบว่า ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่วัดได้จริงจากโรงงานยังมีค่าต่ำกว่าค่าทำนายค่อนข้างมากโดยเฉพาะในกรณีของโรงงาน ช โดยค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมเท่ากับ 0.799 วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร และระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่วัดได้จากโรงงานมีค่าเพียง 0.219 วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร

ค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่ใช้แนวทางในการศึกษาของบุญไชย[16] และนิพนธ์[17] ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก ได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะเบลนของซีเมนต์ สัดส่วนปริมาตรของแข็งของวัสดุผงต่อปริมาตรของแข็งทั้งหมด ชนิดและปริมาณของน้ำยาผสมเพิ่มที่ใช้ โดยค่าทำนายนี้ไม่ได้คำนึงถึงผลของชนิดเครื่องผสม ปริมาณการผสม และลำดับการใส่ส่วนผสม ซึ่งได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 4.8.2.1 ถึง 4.8.2.3

แม้ว่าค่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่ได้จากการทำนายและที่ได้จากโรงงานจะมีค่าแตกต่างกัน ยังเป็นที่สังเกตได้ว่า เมื่อคอนกรีตใช้น้ำยาผสมเพิ่มแล้วทำให้ระบุระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่วัดได้จริงยากมากขึ้น หรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่งคือ

ระดับความเข้มการผสมเริ่มมีผลต่อคุณสมบัติด้านค่ายุบตัวของคอนกรีตสดน้อยลงจนเป็นการยากในการระบุระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมโดยใช้ค่ายุบตัวของคอนกรีตสดเป็นตัววัด

4.9.2.5 ผลของการควบคุมคุณภาพการผลิต

แม้ระดับความเข้มการผสมจะส่งผลต่อคุณสมบัติด้านค่ายุบตัวของคอนกรีตน้อยลงจนทำให้ระบุระดับความเข้มการผสมได้ยากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าสำหรับคอนกรีตที่ผสมในโรงงาน ง mix1 จะมีค่ายุบตัวที่ต่างกันค่อนข้างชัดเจนเมื่อระดับความเข้มการผสมเปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นผลจากการควบคุมคุณภาพการผลิตของโรงงานผสม เนื่องจากพบว่า สำหรับโรงงานผสม จ และ ช จะควบคุมคุณภาพทางด้านการผลิตค่อนข้างสม่ำเสมอ โดยโรงงาน จ จะทำความสะอาดภายในเครื่องผสมทุกวันก่อนทำการผสม รวมทั้งมีการบำรุงรักษาเครื่องมือ และตรวจสอบคุณภาพของวัตถุดิบอยู่เสมอทุกสัปดาห์

สำหรับโรงงาน ช แม้จะไม่ได้ทำความสะอาดภายในเครื่องผสมแต่ก็ใช้วิธีล้างน้ำทุกครั้งที่พักการผสม แต่จะมีการตรวจสอบคุณภาพของวัตถุดิบอย่างสม่ำเสมอทุกสัปดาห์

ในขณะที่โรงงาน ง ไม่ได้ให้ความสำคัญกับการดูแลเครื่องผสมและการตรวจสอบคุณภาพวัตถุดิบมากนัก โดยพบว่า ไม่ได้ตรวจสอบภายในเครื่องผสมหรือบำรุงรักษาเครื่องจักรอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องอย่างสม่ำเสมอเลย รวมทั้งไม่ได้ตรวจสอบคุณภาพของวัตถุดิบอย่างสม่ำเสมอด้วยเช่นเดียวกัน จึงเป็นสาเหตุให้ค่ายุบตัวที่วัดได้ของคอนกรีตยังคงมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อระดับความเข้มการผสมต่างกันสำหรับกรณีคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม ในขณะที่คอนกรีตที่ได้จากโรงงาน จ และ ช มีค่ายุบตัวที่เปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยเมื่อระดับความเข้มการผสมเปลี่ยนแปลงไป

แต่อย่างไรก็ตามพบว่าระดับความเข้มการผสมที่ใช้ในปัจจุบันสำหรับกรณีคอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม ยังมีความเหมาะสมต่อการผลิตคอนกรีตเมื่อพิจารณาเฉพาะคุณสมบัติด้านค่ายุบตัว โดยพบว่าค่ายุบตัวของคอนกรีตที่ได้จากการผสมในโรงงานมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบ เป็นที่ยอมรับของผู้ผลิตและลูกค้า โดยพบว่าสำหรับคอนกรีตที่ได้จากโรงงาน ง mix1 จะผสมคอนกรีตได้

4.9.3 ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแต่ไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม

โรงงาน ฉ เป็นโรงงานเดียวที่ผสมคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแต่ไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม แต่เนื่องจากเป็นคอนกรีตที่มีค่ายุบตัวที่ออกแบบเท่ากับศูนย์ จึงไม่สามารถทำการทดสอบค่ายุบตัวและไม่สามารถวัดระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมจากโรงงานได้

คุณสมบัติของเครื่องผสม วัสดุผสม และกระบวนการผสมแสดงในตารางที่ 4.1 ถึง 4.3

ผลทดสอบการผสมคอนกรีตแสดงในตารางที่ 4.11

รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์เพื่อเปรียบเทียบระหว่างระดับความเข้มการผสมที่ใช้ในโรงงาน ฉ กับค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมเพื่อศึกษาว่าระดับความเข้มการผสมที่ใช้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมหรือไม่ โดยจากรูปที่ 4.7 พบว่าระดับความเข้มการผสมที่ใช้ในโรงงาน ฉ นั้นมีค่าสูงกว่าค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม นั่นคือ โรงงาน ฉ ผสมคอนกรีตโดยใช้ระดับความเข้มการผสมสูงกว่าค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม ซึ่งหากค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมเป็นค่าที่ยอมรับได้จริง จะถือได้ว่าผสมคอนกรีตโดยใช้พลังงานผสมที่มากเกินความจำเป็น แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมไม่ใช่ค่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมจริงที่วัดได้จากโรงงาน ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพื่อวัดระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมจริงที่ได้จากโรงงานโดยอาจวัดคุณสมบัติอื่น ๆ ของคอนกรีตนอกจากค่ายุบตัว ได้แก่ กำลังอัด หรือประมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตเพื่อให้สามารถระบุระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่แท้จริงได้

เนื่องจากไม่สามารถระบุระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม จึงไม่สามารถพิจารณาผลของเถ้าลอยที่มีต่อระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมได้

4.9.4 ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม

โรงงานที่ผสมคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม ได้แก่ โรงงาน ก, จ และ ช คุณสมบัติของเครื่องผสม วัสดุผสม และกระบวนการผสมแสดงในตารางที่ 4.1 ถึง 4.3 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตแสดงในตารางที่ 4.12 ถึง 4.17

ค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมและค่าที่วัดได้จากโรงงานผสมคอนกรีตสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.19 และรูปที่ 4.8 ถึง 4.21

โรงงาน ก เป็นโรงงานที่ใช้เครื่องผสมคอนกรีตแบบ Gravity Type Mixer ซึ่งมีลักษณะเป็น Drum Mixer โดยสำหรับ mix 5 พบว่า ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่วัดได้จากโรงงานมีค่าใกล้เคียงกับค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม ในขณะที่ mix6 นั้นค่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่วัดได้จากโรงงานมีค่าต่ำกว่าค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมค่อนข้างมากโดยค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมเท่ากับ 0.264 วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร และระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่วัดได้จริงจากโรงงานผสมเท่ากับ 0.048 วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร

สำหรับโรงงาน จ ซึ่งใช้เครื่องผสมคอนกรีตแบบ Force Type Mixer ซึ่งมีลักษณะเป็น Pan Mixer นั้น พบว่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่วัดได้จริงจากโรงงานมีค่าใกล้เคียงกับค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม

สำหรับโรงงาน ช ใช้เครื่องผสมคอนกรีตแบบ Force Type Mixer ซึ่งมีลักษณะเป็น Drum Mixer นั้น พบว่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่วัดได้จากโรงงานมีค่าต่ำกว่าค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมค่อนข้างมากในทุกส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 4.18 และพบว่ามีบางสัดส่วนผสมที่ไม่สามารถระบุระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมได้เนื่องจากระดับความเข้มการ

ผสมที่เปลี่ยนแปลงไม่ได้ส่งผลต่อค่ายุบตัวของคอนกรีตอย่างเห็นได้ชัดจนสามารถระบุระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมได้

4.9.4.1 ผลของชนิดเครื่องผสม

เครื่องผสมคอนกรีตที่ใช้ในโรงงาน จ เป็นแบบ Force Type Mixer ซึ่งมีลักษณะเป็น Pan Mixer เช่นเดียวกับที่ทำการศึกษาโดยบุญไชย[16] และพบว่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่วัดได้จริงจากโรงงานมีค่าใกล้เคียงกับค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมดังตารางที่ 4.4.19

สำหรับเครื่องผสมคอนกรีตที่ใช้ในโรงงาน ก เป็นแบบ Gravity Type Mixer แต่เครื่องผสมคอนกรีตที่ใช้ในโรงงาน ช เป็นแบบ Force Type Mixer แต่เมื่อพิจารณาลักษณะของเครื่องผสมพบว่าเครื่องผสมคอนกรีตของโรงงาน ก และโรงงาน ช มีลักษณะเป็น Drum Mixer เช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นผลให้ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่วัดได้จริงจากโรงงานมีค่าต่ำกว่าค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม เช่นเดียวกับในกรณีของคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่มซึ่งได้จากโรงงานผสม ช ก็มีระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่วัดได้จริงต่ำกว่าค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม

4.9.4.2 ผลของสัดส่วนปริมาตรการผสมต่อความจุมากที่สุดของเครื่องผสม

พิจารณาสัดส่วนปริมาตรการผสมต่อความจุมากที่สุดของเครื่องผสมของสัดส่วนผสมต่าง ๆ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม พบว่า

โรงงาน ก mix 5 ผสมด้วยสัดส่วนปริมาตร 0.585 (1170 ลิตร : 2000 ลิตร)

โรงงาน ก mix 6 ผสมด้วยสัดส่วนปริมาตร 0.625 (1250 ลิตร : 2000 ลิตร)

โรงงาน จ mix 5 ผสมด้วยสัดส่วนปริมาตร 0.833 (1250 ลิตร : 1500 ลิตร)

โรงงาน จ mix 13 ผสมด้วยสัดส่วนปริมาตร 0.833 (1250 ลิตร : 1500 ลิตร)

โรงงาน จ mix 6 ผสมด้วยสัดส่วนปริมาตร 0.833 (1250 ลิตร : 1500 ลิตร)

โรงงาน จ mix 14 ผสมด้วยสัดส่วนปริมาตร 0.833 (1250 ลิตร : 1500 ลิตร)

โรงงาน จ mix 10 ผสมด้วยสัดส่วนปริมาตร 0.833 (1250 ลิตร : 1500 ลิตร)

โรงงาน ช mix 3 ผสมด้วยสัดส่วนปริมาตร 0.833 (2500 ลิตร : 3000 ลิตร)

โรงงาน ช mix 4 ผสมด้วยสัดส่วนปริมาตร 0.717 (2500 ลิตร : 3000 ลิตร)

โรงงาน ช mix 6 ผสมด้วยสัดส่วนปริมาตร 0.833 และ 0.583
(2500 ลิตร : 3000 ลิตร และ 1750 ลิตร : 3000 ลิตร)

โรงงาน ช mix 8 ผสมด้วยสัดส่วนปริมาตร 0.833 (2500 ลิตร : 3000 ลิตร)

โรงงาน ช mix 9 ผสมด้วยสัดส่วนปริมาตร 0.667 (2500 ลิตร : 3000 ลิตร)

โรงงาน ช mix 14 ผสมด้วยสัดส่วนปริมาตร 0.833 และ 0.613
(2500 ลิตร : 3000 ลิตร และ 1840 ลิตร : 3000 ลิตร)

โรงงาน ช mix 23 ผสมด้วยสัดส่วนปริมาตร 0.833 (2500 ลิตร : 3000 ลิตร)

พิจารณาจากสัดส่วนปริมาตรการผสมต่อความจุมากที่สุดของเครื่องผสมแล้ว พบว่าสัดส่วนปริมาตรการผสมไม่มีผลต่อระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม ซึ่งจากการศึกษาของบุญไชย[16] พบว่า สัดส่วนปริมาตรการผสมต่อความจุมากที่สุดของเครื่องผสมเท่ากับ 0.5 ถึง1.0 ไม่มีผลต่อระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม

จากการศึกษาพบว่า โรงงานผสมคอนกรีตบางโรงงานกำหนดปริมาตรการผสมโดยพิจารณาจากปริมาณการผลิตที่ได้รับจากลูกค้า ความจุมากที่สุดที่บรรทุกได้ของรถกวนคอนกรีต ในขณะที่บางโรงงานพิจารณาพลังงานไฟฟ้ารวมที่ใช้ในโรงงานว่ามีปริมาณเท่าไรและเลือกปริมาณการผสมที่ทำให้ใช้พลังงานไฟฟ้ารวมภายในโรงงานน้อยที่สุด

4.9.4.3 ผลของลำดับการใส่ส่วนผสม

พิจารณาจากลำดับการใส่ส่วนผสม พบว่า

โรงงาน ก เป็นโรงงานที่ทำการเทมวลรวมทั้งหมดลงก่อนแล้วจึงเทซีเมนต์และน้ำเข้าสู่เครื่องผสมแล้วจึงเริ่มทำการผสมตามเวลาที่กำหนด

โรงงาน จ เป็นโรงงานที่ทำการผสมโดยเทหิน ทรายทั้งหมด และเทน้ำลงโดยในระหว่างที่เทน้ำลงได้ประมาณครึ่งส่วน จะเทปูนซีเมนต์ลงไป แล้วทำการผสมตามเวลาที่กำหนด

โรงงาน ช เป็นโรงงานที่ทำการผสมโดยเทส่วนผสมยกเว้นน้ำยาผสมเพิ่มลงไปพร้อมกันจนหมด จากนั้นจึงเติมน้ำยาผสมเพิ่ม และทำการผสมตามเวลาที่กำหนด

โดยในทุกโรงงานจะเป่าเถ้าลอยจากไซโลเก็บเข้าสู่เครื่องผสมเช่นเดียวกันกับปูนซีเมนต์

ลำดับการใส่ส่วนผสมของทั้งสามโรงงานข้างต้น มีลักษณะใกล้เคียงกับลำดับการผสมที่ใช้ในการศึกษาของบุญไชย[16] อย่างไรก็ตามพบว่าในกรณีนี้ คอนกรีตมีส่วนผสมเพิ่มมาจากคอนกรีตธรรมดาคือ ใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม ดังนั้นจึงต้องศึกษาผลของเถ้าลอยและน้ำยาผสมเพิ่มที่มีต่อระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมด้วย

4.9.4.4 ผลของเถ้าลอย

ยังไม่มีการศึกษาผลของเถ้าลอยที่มีต่อระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม เถ้าลอยเป็นวัสดุผงชนิดหนึ่งในคอนกรีตซึ่งจะมีผลต่อพื้นที่ผิวจำเพาะเบลนของซีเมนต์ซึ่งใช้ในการทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการที่ 2.20 และ 2.21 และรูปที่ 2.5 โดยขึ้นอยู่กับปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ผสม สำหรับพื้นที่ผิวจำเพาะเบลนของเถ้าลอยที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นค่าเฉลี่ยซึ่งมีค่าเท่ากับ 2240 ตร.ซม./กรัม

4.9.4.5 ผลของน้ำยาผสมเพิ่ม

สำหรับโรงงาน ก พบว่า คอนกรีต mix5 มีค่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่วัดได้จากโรงงานใกล้เคียงกับค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม ในขณะที่ mix6 มีค่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่วัดได้จากโรงงานต่ำกว่าค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมมาก โดยค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมเท่ากับ 0.264 วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร ในขณะที่ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่วัดได้จากโรงงานเท่ากับ 0.048 วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร เมื่อพิจารณาความแตกต่างของทั้งสองส่วนผสมพบว่าใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท D เช่นเดียวกัน แต่ mix6 ใช้ปริมาณของน้ำยาผสมเพิ่มมากกว่า mix5 ถึงสองเท่า ซึ่งส่งผลให้ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมลดลง

ค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมตามแนวทางการศึกษาของนิพนธ์[17] สรุปไว้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตที่ใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำอย่างมากนั้น ได้แก่ ประเภทและปริมาณน้ำยาผสมเพิ่มที่ใช้ แต่อย่างไรก็ตาม ค่าทำนายระดับความเข้มการผสมของคอนกรีตที่ได้แนวคิดมาจากนิพนธ์[17] นั้นจะเหมาะสมกับกรณีคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยผสม แต่เนื่องจากคอนกรีตที่ผสมในโรงงาน ก mix5 และ mix6 นั้น เป็นคอนกรีตที่ใช้ทั้งเถ้าลอยและน้ำยาผสมเพิ่ม นั่นคือ นอกจากผลของน้ำยาผสมเพิ่มแล้ว เถ้าลอยก็มีผลต่อระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมด้วย

การที่คอนกรีตใช้ทั้งเถ้าลอยและน้ำยาผสมเพิ่มนั้นอาจส่งผลให้ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมมีค่าต่ำลงกว่าค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมอย่างมาก แต่เนื่องด้วยปัจจัยอะไรบ้างต้องทำการศึกษาเพิ่มเติม

จากการศึกษาพบว่า ในบางกรณี ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมที่วัดได้จากโรงงานผสมคอนกรีตและค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานนั้น ไม่สามารถระบุระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมได้ ได้แต่ โรงงาน ช บางส่วน ซึ่งอาจเป็นเพราะมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อค่ายุบตัวของคอนกรีตมากกว่าผลของระดับความเข้มการผสม เถ้าลอยและน้ำยาผสมเพิ่มก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ลดผลของระดับความเข้มการผสมที่มีต่อค่ายุบตัวของคอนกรีต เนื่องจากทั้งเถ้าลอยและน้ำยาผสมเพิ่มมีคุณสมบัติในการกระจายอนุภาคของมวลรวม โดยทำให้คอนกรีตมีความสามารถทำงานได้ดีขึ้นมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยและไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม หรืออาจเป็นไปได้ว่าระดับความเข้มการผสมที่ใช้ในการผสมยังมีค่าต่ำกว่าค่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมสำหรับสัดส่วนผสมนั้นจึงทำให้ยังไม่สามารถระบุระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมได้

แม้ว่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่วัดได้จากโรงงานจะมีค่าเท่ากับค่าทำนายระดับความเข้มการผสมหรือไม่ก็ตาม จากการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่ได้จากโรงงานต่าง ๆ ก็มีคุณสมบัติด้านค่ายุบตัวเป็นที่ยอมรับของผู้ผลิตและลูกค้า แต่เนื่องจากค่ายุบตัวของคอนกรีตไม่ใช่คุณสมบัติเดียวที่ใช้พิจารณาว่าคอนกรีตนั้นมีคุณภาพดีหรือตรงตามความต้องการของผู้ผลิตและลูกค้าหรือไม่

ค่ากำลังอัดหรือปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตก็ถือว่าเป็นคุณสมบัติสำคัญที่ต้องทำการศึกษาเพิ่มเติม

อย่างไรก็ตามหากสามารถระบุระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมได้หรือสามารถทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมได้อย่างแม่นยำก็ย่อมเป็นการสะดวกต่อการกำหนดระยะเวลาผสมและประหยัดต้นทุนการผลิตเพื่อไม่ให้สิ้นเปลืองพลังงานในการผสมมากจนเกินไปสำหรับการผลิตคอนกรีตในโรงงานผสม

4.10 ผลของกระบวนการผสมที่มีต่อระดับความเข้มการผสม

4.10.2 ชนิดเครื่องผสม

จากการวิจัยพบว่า เครื่องผสมที่มีลักษณะ Drum Mixer ผสมคอนกรีตโดยพลังงานผสมที่ต่ำกว่าเครื่องผสมที่มีลักษณะ Pan Mixer ทำให้การผสมคอนกรีตโดย Drum Mixer ต้องใช้เวลาในการผสมให้ได้ระดับความเข้มการผสมที่ต้องการนานกว่าการผสมคอนกรีตโดย Pan Mixer อย่างไรก็ตาม ยังต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตที่ผสมโดยเครื่องผสมลักษณะ Drum Mixer และลำดับการใส่ส่วนผสมที่ทำให้สามารถผสมคอนกรีตให้ได้ระดับความเข้มการผสมที่ต้องการในเวลาอันสั้น

4.10.3 สัดส่วนปริมาณการผสมต่อความจุของเครื่องผสม

จากการศึกษาพบว่าปริมาณการผสมมีผลต่อพลังงานผสมซึ่งเป็นตัวแปรเพื่อกำหนดเวลาที่ใช้ในการผสมเพื่อให้ได้ระดับความเข้มการผสมที่ต้องการ จากการศึกษาพบว่า ไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจนว่าสัดส่วนปริมาณการผสมต่อความจุของเครื่องผสมมีผลอย่างไรต่อระดับความเข้มการผสม การศึกษาของบุญไชย[16] พบว่า สัดส่วนปริมาตรการผสมต่อความจุของเครื่องผสมเท่ากับ 0.5 – 1.0 ไม่มีผลต่อระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม แต่สำหรับสัดส่วนปริมาตรการผสมต่อความจุของเครื่องผสมต่ำกว่า 0.5 ยังไม่มีการศึกษา ดังนั้นการเทวัสดุลงครั้งละครึ่งส่วนและทำให้มีสัดส่วนปริมาณการผสมเท่ากับ 0.47 ในช่วงแรกอาจมีผลต่อระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมและเป็นสาเหตุให้ไม่สามารถทำนายระดับความเข้มการผสมโดยแนวคิดของบุญไชย[16] ได้

4.10.1 ลำดับการใส่ส่วนผสม

จากการศึกษาพบว่า ลำดับการใส่ส่วนผสมมีผลต่อระดับความเข้มการผสมโดยการพิจารณาพลังงานการผสมที่ใช้ในแต่ละช่วงเวลาว่ามีผลให้คอนกรีตได้รับระดับความเข้มการผสมที่ต้องการในระยะเวลาที่กำหนดได้ โดยการศึกษาของบุญไชย[16] ได้เสนอให้มีการผสมแบบแบ่งแยกน้ำโดยการผสมด้วยปริมาณน้ำส่วนแรกให้ได้ระดับความเข้มการผสมเพียงพอที่จะกระจายอนุภาคของซีเมนต์ ซึ่งหมายความว่าเมื่อเติมน้ำส่วนที่สองลงไปแล้ว จะส่งผลในการขยายระยะห่างระหว่างอนุภาคของซีเมนต์ หรือเป็นการเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ (Workability) จากการวิจัยครั้งนี้พบว่า โรงงานผสมคอนกรีตส่วนใหญ่จะมีลำดับการใส่ส่วนผสมคล้ายกัน คือ ผสมส่วนผสมแห้ง

ก่อนแล้วจึงเติมน้ำ และบางโรงงานจะผสมส่วนผสมทั้งหมดลงพร้อม ๆ กัน ยกเว้นโรงงาน ค ซึ่งจะผสมคอนกรีตโดยเทส่วนผสมครั้งละครึ่งส่วนของทั้งหมด โดยพบว่าลำดับการใส่ส่วนผสมที่ใช้พลังงานผสมสูงจะทำให้ผสมคอนกรีตเพื่อให้ได้ระดับความเข้มการผสมที่ต้องการโดยใช้เวลาในการผสมสั้นกว่า

4.11 ผลของเถ้าลอยและน้ำยาผสมเพิ่มต่อระดับความเข้มการผสม

จากการศึกษาพบว่าคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ใช้เถ้าลอยและไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่มจะมีระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมสูง ในกรณีคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยหรือน้ำยาผสมเพิ่มจะมีระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมต่ำลงเนื่องจากคุณสมบัติในการกระจายอนุภาคของเถ้าลอยและน้ำยาผสมเพิ่ม นั่นคือเมื่อผสมด้วยกระบวนการผสมเดียวกัน โดยเครื่องผสมชนิดเดียวกัน คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและน้ำยาผสมเพิ่มจะต้องการเวลาในการผสมเพื่อให้ได้ระดับความเข้มการผสมต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ไม่มีส่วนผสมของเถ้าลอยและน้ำยาผสมเพิ่มซึ่งถือเป็นการประหยัดในแง่ของเวลาที่ใช้ในการผลิต

ในการวิจัยครั้งนี้ใช้แนวทางการทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำอย่างมากที่เสนอโดยนิพนธ์[17] แต่เนื่องจากโรงงานโดยส่วนใหญ่ใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำ สารลดน้ำและหน่วงการก่อตัว และจากการเปรียบเทียบค่าทำนายระดับความเข้มการผสมกับค่าที่ได้จากโรงงานพบว่าต่างกันค่อนข้างมาก ซึ่งอาจเนื่องมาจากคุณสมบัติของสารผสมเพิ่มซึ่งแม้จะเป็นสารลดน้ำเหมือนกัน แต่ก็ไม่ใช่น้ำยาประเภทเดียวกัน และผู้ผลิตก็ต่างกัน ดังนั้นอาจมีผลขององค์ประกอบทางเคมีต่างกัน ทำให้ค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่เสนอโดยนิพนธ์[17] ยังไม่สามารถนำมาใช้ได้ จะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับคุณสมบัติของน้ำยาผสมเพิ่มดังกล่าวว่ามีผลต่อระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมอย่างไร

4.12 ค่ากำลังอัดที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน

ค่ากำลังอัดที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน (Normalized Strength) หมายถึง ค่าสัดส่วนของค่ากำลังอัดต่อค่ากำลังอัดที่ออกแบบของคอนกรีตที่ผสมโดยสัดส่วนผสมหนึ่ง ๆ เพื่อศึกษาว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ระดับความเข้มการผสมแตกต่างกันมีค่ามากน้อยอย่างไรเมื่อเทียบกับค่ากำลังอัดที่ออกแบบของสัดส่วนผสมนั้น ๆ โดยค่ากำลังอัดที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4.9

$$RStg = \frac{Stg_r}{Stg_d} \qquad (4.9)$$

เมื่อ

$RStg$ = ค่ากำลังอัดที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน

Stg_r = ค่ากำลังอัดจริงที่ทดสอบได้ของคอนกรีตที่สัดส่วนผสมหนึ่ง

Stg_d = ค่ากำลังอัดที่ออกแบบของคอนกรีตที่สัดส่วนผสมนั้น ๆ

4.13 ระดับความเข้มการผสมกับค่ากำลังอัดที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน

จากการศึกษาของบุญไชย[16] พบว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความเข้มการผสมสูงขึ้น แต่จากการวิจัยในครั้งนี้พบว่าไม่สามารถสรุปได้เนื่องจากข้อมูลมีปริมาณที่น้อยเกินไปและไม่สามารถพิจารณาแนวโน้มได้ โดยรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.7 ถึง 4.18 และรูปที่ 4.22 ถึง 4.29 อย่างไรก็ตามพบว่าในทุก ๆ กรณี ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากโรงงานผสมคอนกรีตส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่าค่าที่ออกแบบ ซึ่งสาเหตุหนึ่งเนื่องมาจากการออกแบบสัดส่วนผสมที่มีส่วนเผื่อกำลังอัดมากเกินไป โดยเป็นการออกแบบสัดส่วนผสมเพื่อให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงกว่าค่ากำลังอัดที่กำหนดในแบบ เนื่องจากผู้ผลิตพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมีหลากหลายและไม่สามารถควบคุมได้ คุณสมบัติของคอนกรีตมีความแปรปรวนมากจึงต้องออกแบบให้มีส่วนเผื่อไว้ การออกแบบสัดส่วนผสมที่มีส่วนเผื่อกำลังอัดมากทำให้ต้องปรับปรุงสัดส่วนผสมโดยเฉพาะเพิ่มปริมาณซีเมนต์ที่ใช้มากขึ้น ซึ่งถือเป็นการสิ้นเปลืองวัสดุ

การผสมคอนกรีตโดยใช้ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม สามารถระบุได้ชัดเจนขึ้นว่าคอนกรีตที่ได้รับการผสมนั้นจะมีคุณสมบัติเป็นอย่างไร ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการลดส่วนเผื่อกำลังอัดได้ และเป็นการลดความสิ้นเปลืองของการใช้วัสดุผสมโดยเฉพาะปูนซีเมนต์ซึ่งมีราคาสูง เพื่อเป็นแนวทางหนึ่งในการลดต้นทุนการผลิต

ดังนั้น การศึกษาระดับความเข้มการผสมที่มีผลต่อคุณสมบัติด้านกำลังอัดของคอนกรีตโดยเฉพาะในกรณีคอนกรีตที่ได้จากโรงงานผสมควรจะได้รับการศึกษาต่อไป เพราะแม้ว่าจะสามารถระบุระดับความเข้มการผสมโดยใช้ค่ายุบตัวเป็นตัววัดแล้ว กำลังอัดก็เป็นคุณสมบัติสำคัญของคอนกรีตเช่นเดียวกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 สรุปคุณสมบัติวัสดุผสมของโรงงานตัวอย่าง

กระบวนการ	รายละเอียด	โรงงานผสม ก	โรงงานผสม ข	โรงงานผสม ค	โรงงานผสม ง	โรงงานผสม จ	โรงงานผสม ฉ	โรงงานผสม ช
1.1 การคัดเลือกวัสดุผสม แหล่งผลิต	1.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	Type 1	Type 1	Type 3	Type 1	Type 1	Type 1 และ 3	Type 1
	1.1.2 มวลรวมหยาบ - แหล่งผลิต - ขนาดใหญ่สุด	จ. สระบุรี หิน ¾” และ ½” คละกับหินที่ค้างบนตะแกรง no.4	จ. สระบุรี หิน ¾”	จ. สระบุรี หิน ¾” , ½” คละกัน	จ. ราชบุรี หิน 1”, ¾” คละกัน	จ. สระบุรี หิน ¾” และ ½” คละกับหินที่ค้างบนตะแกรง no.4	จ. สระบุรี หิน ¾”, ½”, 3/8”	จ. สระบุรี หิน 3/8”
	1.1.3 มวลรวมละเอียด	ทราย จ. สุพรรณบุรี	ทราย จ. สุพรรณบุรี	หินย่อย จ. สระบุรี	ทราย จ. กาญจนบุรี และสุพรรณบุรี	ทราย จ. สุพรรณบุรี	ทรายหยาบและทรายละเอียด จ. สุพรรณบุรี	ทราย จ. สิงห์บุรี
	1.1.4 น้ำ	น้ำบาดาล	น้ำประปา	น้ำประปา	น้ำบาดาล	น้ำบาดาล	น้ำบาดาล	น้ำบาดาล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 สรุปคุณสมบัติวัสดุผสมของโรงงานตัวอย่าง (ต่อ)

กระบวนการ	รายละเอียด	โรงงานผสม ก	โรงงานผสม ข	โรงงานผสม ค	โรงงานผสม ง	โรงงานผสม จ	โรงงานผสม ฉ	โรงงานผสม ช
	1.1.5 น้ำยาผสมเพิ่ม	Type A, D, F, G	Type B, C, D, E	ไม่ใช้	Type A, B, D	Type A, D, F,G	Type F	Type A, D, F, G
	1.1.6 เถ้าลอย	แม่เมาะ จ. ลำปาง	แม่เมาะ จ. ลำปาง	ไม่ใช้	แม่เมาะ จ. ลำปาง และราชบุรี	แม่เมาะ จ. ลำปาง	แม่เมาะ จ. ลำปาง	แม่เมาะ จ. ลำปาง
1.2 การกองเก็บวัสดุ	1.2.1 ปูนซีเมนต์	เก็บในไซโล						
	1.2.2 มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด	เก็บกลางแจ้งแบบ star pattern	เก็บกลางแจ้งแบบ star pattern	กองบนพื้นกลางแจ้ง	เก็บกลางแจ้งแบบ star pattern	เก็บกลางแจ้งแบบ star pattern	เก็บในที่ร่ม	เก็บกลางแจ้งโดยกองแบ่งเป็นส่วน
	1.2.3 น้ำ	เก็บในบ่อพักน้ำ ยกเว้นโรงงานผสม ช เก็บในถังเก็บน้ำ						

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 สรุปคุณสมบัติวัสดุผสมของโรงงานตัวอย่าง (ต่อ)

กระบวนการ	รายละเอียด	โรงงานผสม ก	โรงงานผสม ข	โรงงานผสม ค	โรงงานผสม ง	โรงงานผสม จ	โรงงานผสม ฉ	โรงงานผสม ช
	1.2.4 น้ำยาผสมเพิ่ม	เก็บในถังเก็บน้ำยา ยกเว้นโรงงาน ค ไม่ได้ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม						
	1.2.5 เถ้าลอย	เก็บในไซโล						
1.3 การตรวจสอบคุณภาพ	1.3.1 ปูนซีเมนต์	ตรวจสอบคุณภาพโดยบริษัทผู้ผลิต						
	- ถ.พ.	3.15	3.15	3.15	3.15	3.15	3.15	3.15
	- พื้นที่ผิวจำเพาะเบลนของซีเมนต์	3150 ตร.ซม./กรัม	3000 ตร.ซม./กรัม	5256 ตร.ซม./กรัม	3148 ตร.ซม./กรัม	3150 ตร.ซม./กรัม	3150 ตร.ซม./กรัม	3310 ตร.ซม./กรัม
	1.3.2 มวลรวม							
	หยาบ	ตรวจสอบคุณภาพสัปดาห์ละครั้ง	ตรวจสอบคุณภาพสัปดาห์ละครั้ง	ไม่ได้ตรวจสอบคุณภาพอย่างสม่ำเสมอ	ไม่ได้ตรวจสอบคุณภาพอย่างสม่ำเสมอ	ตรวจสอบคุณภาพสัปดาห์ละครั้ง	ไม่ได้ตรวจสอบคุณภาพอย่างสม่ำเสมอ	ตรวจสอบคุณภาพสัปดาห์ละครั้ง
	- สัดส่วนขนาดคละ	ดูภาคผนวก ข						
	- ถ.พ.	2.71	2.69	2.76	2.71	2.71	2.71	2.42

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 สรุปคุณสมบัติวัสดุผสมของโรงงานตัวอย่าง (ต่อ)

กระบวนการ	รายละเอียด	โรงงานผสม ก	โรงงานผสม ข	โรงงานผสม ค	โรงงานผสม ง	โรงงานผสม จ	โรงงานผสม ฉ	โรงงานผสม ช
	1.3.3 มวลรวม ละเอียด	ตรวจสอบคุณภาพ สัปดาห์ละครั้ง	ตรวจสอบคุณภาพ สัปดาห์ละครั้ง	ไม่ได้ตรวจสอบ คุณภาพอย่าง สม่ำเสมอ	ไม่ได้ตรวจสอบ คุณภาพอย่าง สม่ำเสมอ	ตรวจสอบคุณภาพ สัปดาห์ละครั้ง	ไม่ได้ตรวจสอบ คุณภาพอย่าง สม่ำเสมอ	ตรวจสอบคุณภาพ สัปดาห์ละครั้ง
	- สัดส่วนขนาด คละ	ดูภาคผนวก ข						
	- ถ.พ.	2.60	2.56	2.77	2.60	2.60	2.53	2.48
	1.3.4 น้ำ	ตรวจสอบคุณภาพ ประมาณเดือนละ ครั้ง	ตรวจสอบคุณภาพ ประมาณเดือนละ ครั้ง	ไม่ได้ตรวจสอบ คุณภาพอย่าง สม่ำเสมอ	ไม่ได้ตรวจสอบ คุณภาพอย่าง สม่ำเสมอ	ตรวจสอบคุณภาพ ประมาณเดือนละ ครั้ง	ไม่ได้ตรวจสอบ คุณภาพอย่าง สม่ำเสมอ	ตรวจสอบคุณภาพ ประมาณเดือนละ ครั้ง
	1.3.5 น้ำยาผสม เพิ่ม	ตรวจสอบ ถ.พ. และสี	ตรวจสอบ ถ.พ. และสี	ไม่ใช้	ตรวจสอบสี	ตรวจสอบ ถ.พ. และสี	ไม่ได้ตรวจสอบ คุณภาพ	ตรวจสอบ ถ.พ. และสี
	1.3.6 เถ้าลอย	ตรวจสอบคุณภาพ โดยบริษัทผู้ จำหน่าย	ตรวจสอบคุณภาพ โดยบริษัทผู้ จำหน่าย	ไม่ใช้	ตรวจสอบคุณภาพ โดยบริษัทผู้ จำหน่าย	ตรวจสอบคุณภาพ โดยบริษัทผู้ จำหน่าย	ตรวจสอบคุณภาพ โดยบริษัทผู้ จำหน่าย	ตรวจสอบคุณภาพ โดยบริษัทผู้ จำหน่าย
	- ถ.พ.	2.17	2.74	-	2.54	2.17	2.20	2.17

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 สรุปคุณสมบัติเครื่องผสมของโรงงานตัวอย่าง

กระบวนการ	รายละเอียด	โรงงานผสม ก	โรงงานผสม ข	โรงงานผสม ค	โรงงานผสม ง	โรงงานผสม จ	โรงงานผสม ฉ	โรงงานผสม ช
	2.1 ประเภท	Gravity Type (Drum Mixer)	Gravity Type (Drum Mixer)	Force Type (Pan Mixer)	Force Type (Pan Mixer)	Force Type (Pan Mixer)	Force Type (Pan Mixer)	Force Type (Drum Mixer)
	2.2 ความจุมากที่สุด	2 ลบ.ม.	2 ลบ.ม.	0.7 ลบ.ม.	1.5 ลบ.ม.	1.5 ลบ.ม.	2 ลบ.ม.	3 ลบ.ม.
	2.3 แกนหมุน	แนวนอน 1 แกน	แนวนอน 1 แกน	แกนกลาง 1 แกน อยู่นิ่งแนวตั้ง และมีแขน 2 ข้าง แต่ละแขนของแกนมีแกนหมุนเล็กอีกแขนละแกน	แกนกลาง 1 แกน หมุนแนวตั้ง และมีแขน 2 ข้างแต่ละแขนของแกนมีแกนหมุนเล็กอีกแขนละแกน	แนวตั้ง 1 แกน	แกนกลาง 1 แกน หมุนแนวตั้ง และมีแขน 2 ข้าง แต่ละแขนของแกนมีแกนหมุนเล็กอีกแขนละแกน	แนวนอน 1 แกน
	2.4 ใบกวน	มีใบกวน 2 ใบ ไขว้กัน	มีใบกวน 2 ใบ ไขว้กัน	มีใบกวน 3 ใบในแต่ละแกนหมุนเล็กและมีใบกวนนิ่งอีก 2 ใบ มีใบปาดข้างอีก 2 ใบอยู่นิ่ง	มีใบกวน 2 ใบ ในแต่ละแกนหมุนเล็ก มีใบปาดข้างอยู่นิ่งอีก 2 ใบ	มีใบกวน 6 ใบ โดยมีใบกวนข้างอีก 2 ใบ	มีใบกวน 3 ใบในแต่ละแกนหมุนเล็ก มีใบปาดข้างอยู่นิ่งอีก 2 ใบ	มีใบกวน 8 ใบในแต่ละแกน มีใบปาดข้างอีก 4 ใบที่ปลายแกน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 สรุปคุณสมบัติเครื่องผสมของโรงงานตัวอย่าง (ต่อ)

กระบวนการ	รายละเอียด	โรงงานผสม ก	โรงงานผสม ข	โรงงานผสม ค	โรงงานผสม ง	โรงงานผสม จ	โรงงานผสม ฉ	โรงงานผสม ช
	2.6 ลักษณะการกวน	เครื่องผสมนิ่งหมุนแกนหมุน	เครื่องผสมนิ่งหมุนแกนหมุน	เครื่องผสมหมุนและหมุนแกนหมุนเล็ก	เครื่องผสมนิ่งหมุนแกนกลางและแกนเล็ก	เครื่องผสมนิ่งหมุนแกนหมุน	เครื่องผสมนิ่งหมุนแกนกลางและแกนเล็ก	เครื่องผสมนิ่งหมุนแกนหมุนในทิศทางเข้าหากัน
	2.7 การบำรุงรักษา	ล้างน้ำเมื่อพักการผสม โดยตรวจสอบภายในทุกวัน ทำความสะอาดด้วยน้ำและสกัดคอนกรีตที่แข็งตัวออกด้วย	ล้างน้ำเมื่อพักการผสม โดยตรวจสอบภายในทุกสัปดาห์ ทำความสะอาดด้วยน้ำและสกัดคอนกรีตที่แข็งตัวออกด้วย	ล้างน้ำเมื่อพักการผสมโดยทาน้ำมันด้วย	ล้างน้ำเมื่อพักการผสมเท่านั้น ไม่มีการตรวจสอบภายใน	ล้างน้ำเมื่อพักการผสม โดยตรวจสอบภายในทุกวัน ทำความสะอาดด้วยน้ำและสกัดคอนกรีตที่แข็งตัวออกด้วย	ล้างน้ำเมื่อพักการผสม โดยทาน้ำมันด้วย	ล้างน้ำเมื่อพักการผสมเท่านั้น ไม่มีการตรวจสอบภายใน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 สรุปกระบวนการผสมของโรงงานตัวอย่าง

กระบวนการ	รายละเอียด	โรงงานผสม ก	โรงงานผสม ข	โรงงานผสม ค	โรงงานผสม ง	โรงงานผสม จ	โรงงานผสม ฉ	โรงงานผสม ช
3.1 การชั่งตวงวัสดุผสม	3.1.1 ปูนซีเมนต์	ชั่งตวงอัตโนมัติ						
	3.1.2 มวลรวมหยาบ	ใช้กระบะตวงโดยเทลงทางช่องเทหิน	ใช้กระบะตวงโดยเทลงทางช่องเทหิน	ใช้สายพานตักหินแล้วจึงเทลงกระบะตวง	ใช้กระบะตวงโดยเทลงทางช่องเทหิน	ใช้กระบะตวงโดยเทลงทางช่องเทหิน	ปล่อยจากช่องเทหินลงสายพานแล้วจึงเทลงกระบะตวง	ปล่อยจากช่องเทหินลงสายพานแล้วจึงเทลงกระบะตวง
	3.1.3 มวลรวมละเอียด	ใช้กระบะตวงโดยเทลงจากช่องเททราย	ใช้กระบะตวงโดยเทลงจากช่องเททราย	ใช้สายพานตักหินย่อยแล้วจึงเทลงกระบะตวง	ใช้กระบะตวงโดยเทลงทางช่องเททราย	ใช้กระบะตวงโดยเทลงทางช่องเททราย	ปล่อยจากช่องเททรายลงสายพานแล้วจึงเทลงกระบะตวง	ปล่อยจากช่องเททรายลงสายพานแล้วจึงเทลงกระบะตวง
	3.1.4 น้ำ	ใช้มาตรวัด						
	3.1.5 น้ำยาผสมเพิ่ม	ใช้มาตรวัด ยกเว้นโรงงาน ค ไม่ได้ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม						
	3.1.6 เถ้าลอย	ชั่งตวงอัตโนมัติ ยกเว้นโรงงาน ค ไม่ได้ใช้เถ้าลอย						

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 สรุปกระบวนการผสมของโรงงานตัวอย่าง (ต่อ)

กระบวนการ	รายละเอียด	โรงงานผสม ก	โรงงานผสม ข	โรงงานผสม ค	โรงงานผสม ง	โรงงานผสม จ	โรงงานผสม ฉ	โรงงานผสม ช
3.2 การลำเลียงส่วนผสม	3.2.1 ปูนซีเมนต์	เป่าปูนซีเมนต์ลงทางด้านบนเครื่องผสม						
	3.2.2 มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด	เทลงทางด้านบนเครื่องผสมโดยกระบะตวง						
	3.2.3 น้ำ	สเปรย์น้ำลงทางด้านบนเครื่องผสม						
	3.2.4 น้ำยาผสมเพิ่ม	เทลงทางด้านบนเครื่องผสม ยกเว้นโรงงาน ค ไม่ได้ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม						
	3.2.5 เถ้าลอย	เป่าลงจากไซโลทางด้านบนเครื่องผสม ยกเว้น โรงงาน ค ไม่ได้ใช้เถ้าลอย						
3.3 ลำดับการใส่ส่วนผสม		1. เทหินและทราย 2. เป่าปูนซีเมนต์และเถ้าลอย 3. เทน้ำและน้ำยาผสมเพิ่ม	1. เทหินและทราย 2. เป่าปูนซีเมนต์และเถ้าลอย 3. เทน้ำและน้ำยาผสมเพิ่ม	1. สเปรย์น้ำให้ทั่ว 2. เทหินและทรายลงครึ่งส่วน 3. เป่าซีเมนต์ลงครึ่งส่วน 4. เทหินและทรายส่วนที่เหลือลง 5. เป่าซีเมนต์ส่วนที่เหลือลง ปิดน้ำ	1. เทหินและทราย 2. เทน้ำและน้ำยาและเป่าปูนซีเมนต์ลงพร้อม ๆ กัน	1. เทหินและทราย 2. ปล่อยน้ำยาผสมเพิ่ม 3. ปล่อยน้ำลงประมาณครึ่งส่วน 4. ปล่อยปูนซีเมนต์ลงพร้อม ๆ กับน้ำส่วนที่เหลือ	1. เทหินและทรายผสม 5-10 วินาที 2. ปล่อยปูนและเถ้าลอย ผสม 20 วินาที 3. เติมน้ำและน้ำยา	1. เทหิน ทราย ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และน้ำลงพร้อมกัน 2. เติมน้ำยาผสมเพิ่ม

ตารางที่ 4.3 สรุปกระบวนการผสมของโรงงานตัวอย่าง (ต่อ)

กระบวนการ	รายละเอียด	โรงงานผสม ก	โรงงานผสม ข	โรงงานผสม ค	โรงงานผสม ง	โรงงานผสม จ	โรงงานผสม ฉ	โรงงานผสม ช
3.4 เวลาในการผสม (หลังจากเทส่วนผสมทั้งหมดลงไปแล้ว)		ประมาณ 30 วินาที	ประมาณ 15-20 วินาที	ประมาณ 1-1.5 นาที	ประมาณ 30 วินาที	ประมาณ 30 วินาที	ประมาณ 2-3 นาที	ประมาณ 40 วินาที
3.5 ปริมาณการผสมแต่ละครั้ง		1.75, 1.67, 1.5, 1.25, 1 ลบ.ม.	1.75, 1.67, 1.5, 1.25, 1 ลบ.ม.	0.6-0.7 ลบ.ม.	1 ลบ. ม.	1.75, 1.67, 1.5, 1.25 ,1 ลบ.ม.	0.6-1.2 ลบ.ม.	2.75, 2.5, 2.38, 2.13, 2, 1.75, 1.5, 1 ลบ.ม.
3.6 การเทออกจากเครื่องผสม		เทออกด้านล่างเครื่องผสมลงสู่รถกวนคอนกรีต						

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการหมุนกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการหมุนเครื่องผสมเปล่า

โรงงาน	เครื่องผสม	ความจุมากที่สุด	ความสัมพันธ์
ก	Drum Mixer (Gravity Type)	2 ลบ.ม.	P = 1.0564t - 0.3487
ข	Drum Mixer (Gravity Type)	2 ลบ.ม.	P = 1.4526t + 0.4471
ค	Pan Mixer (Force Type)	0.7 ลบ.ม.	P = 1.0986t + 2.4505
ง	Pan Mixer (Force Type)	1.5 ลบ.ม.	P = 1.1577t + 0.1912
จ	Pan Mixer (Force Type)	1.5 ลบ.ม.	P = 0.8842t + 0.6624
ฉ	Pan Mixer (Force Type)	2 ลบ.ม.	P = 2.9766t – 2.3785
ช	Drum Mixer (Force Type)	3 ลบ.ม.	P = 2.0394t –0.0538

เมื่อ P = พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการหมุนเครื่องผสมเปล่า (วัตต์-ชั่วโมง)

t = เวลา (วินาที)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดเครื่องผสมและปริมาณการผสมของแต่ละสัดส่วนผสม

ชนิดเครื่องผสม	โรงงาน	Mix No.	ปริมาณซีเมนต์ (กก/ลบ.ม.^{3})				ปริมาณผสม (ลิตร)	ความจุ (ลิตร)	ปริมาณผสม / ความจุ
			≤ 200	201 - 250	251 - 300	301 - 450			
Gravity Type (DRUM)	ก	1		A			1250	2000	0.625
	ก	7	D				1250 , 1330	2000	0.625 , 0.665
	ก	8		D			1250	2000	0.625
	ก	2		D			1250	2000	0.625
	ก	9		D			1250	2000	0.625
	ก	3			D		1130	2000	0.565
	ก	5			D		1170 , 1500	2000	0.585 , 0.750
	ก	4				D	1250	2000	0.625
	ก	6				D	1250 , 1500	2000	0.625 , 0.750
	ข	1	D				2000	2000	1.000
	ข	2		D			1670	2000	0.835
	ข	3		D			1130 , 1670 ,1750	2000	0.565 , 0.835 , 0.875
	ข	4		D			1250 , 1670 , 2000	2000	0.625 , 0.835 , 1.000
	ข	5		D			1670	2000	0.835
	ข	6			D		1250 , 1670	2000	0.625 , 0.835
Force Type (PAN)	ค	1			A		660	700	0.943
	ง	1		B			1000	1500	0.667
	ง	5		B			1000	1500	0.667
	ง	4			B		1000	1500	0.667
	ง	2				B	1000	1500	0.667
	ง	3				B	1000	1500	0.667
	ง	8	D				1000	1500	0.667
	ง	7	D				1000	1500	0.667
	ง	6		D			1000	1500	0.667
	ง	9		D			1000	1500	0.667
	ง	10			D		1000	1500	0.667
	จ	3			B		1000 , 1250	1500	0.67 , 0.83
	จ	1			B		1330	1500	0.887
	จ	2				B	1250	1500	0.833
	จ	4				B	1250	1500	0.833
	จ	8	D				1250 , 1330 ,1500	1500	0.833 , 0.887 ,1.000
	จ	11	D				1250 , 1330	1500	0.833 , 0.887
	จ	12	D				1160 , 1500	1500	0.773 , 1.000
	จ	14		D			1250	1500	0.833
	จ	6			D		1250 , 1500	1500	0.833 ,1.000
	จ	7			D		1000 , 1160 , 1500	1500	0.667 , 0.773 ,1.000

หมายเหตุ A = คอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยและไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม(คอนกรีตธรรมดา)

B = คอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม

C = คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแต่ไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม

D = คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดเครื่องผสมและปริมาณการผสมของแต่ละสัดส่วนผสม (ต่อ)

ชนิดเครื่อง	โรง	Mix	ปริมาณซีเมนต์ (กก/ลบ.ม.)				ปริมาณ (ลิตร	ความ (ลิตร	ปริมาณผสม /
			<	201 -	251 -	301 -			
Force Type (DRUM)	ช	1				A	2000 , 2500 , 2750	3000	0.667 , 0.833 , 0.917
	ช	16	D				2500	3000	0.833
	ช	17	D				1500 , 2000 , 2250	3000	0.500 , 0.667 , 0.750
	ช	5	D				1500 , 2500	3000	0.500 , 0.833
	ช	10		D			2500	3000	0.833
	ช	20		D			1750 , 2500	3000	0.584 , 0.833
	ช	21		D			1500 , 2000	3000	0.500 , 0.667
	ช	9		D			1500 , 2000 , 2500	3000	0.500 , 0.667 , 0.833
	ช	15		D			2000	3000	0.667
	ช	11		D			1500 , 2130 , 2500	3000	0.500 , 0.710 , 0.833
	ช	8			D		1500 ,2000 , 2500	3000	0.500 , 0.667 , 0.834
	ช	13			D		500 , 1000 , 1250 , 1500 , 2250	3000	0.167 , 0.334 , 0.417, 0.500 , 0.750
	ช	4			D		1000 , 2000 , 2130 , 2250 , 2380 , 2500	3000	0.333 , 0.667 , 0.710 , 0.750 , 0.793 , 0.833
	ช	6			D		1000 , 1250 ,1750 ,1500 ,1880 , 2500	3000	0.333 , 0.417 , 0.584 , 0.500 , 0.627 , 0.834
	ช	18			D		2000	3000	0.667
	ช	3			D		1500 , 2000 , 2500	3000	0.500 , 0.667 , 0.833
	ช	7			D		1880 , 2500	3000	0.627 , 0.834
	ช	12			D		2500	3000	0.833
	ช	14			D		1750 , 1830 , 1840 , 2000 , 2250 , 2500	3000	0.584 , 0.610 , 0.614 , 0.667 , 0.750 , 0.833
	ช	19			D		1500 , 2000 , 2500	3000	0.500 , 0.667 , 0.833
	ช	25			D		2500	3000	0.833
	ช	22				D	2500	3000	0.833
	ช	2				D	1500	3000	0.500
	ช	23				D	2500	3000	0.833
	ช	24				D	2500	3000	0.833

หมายเหตุ A = คอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยและไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม(คอนกรีตธรรมดา)

B = คอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม

C = คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแต่ไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม

D = คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.6 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยและไม่ใช่น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ค

ลำดับที่	สัดส่วนผสม				เวลาผสมขั้นที่ 1, t_1 (วินาที)	พลังงานรวมขั้นที่ 1, E_{t1} (กิโลวัตต์-ชม.)	เวลาผสมขั้นที่ 2, t_2 (วินาที)	พลังงานรวมขั้นที่ 2, E_{t2} (กิโลวัตต์-ชม.)	ระดับความเข้มการผสม, I_{in} (วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร)	ปริมาตรส่วนผสม V_{st} (ลิตร)	สัดส่วนปริมาตรซีเมนต์, n_c	กำลังอัดจริง, S_r (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดออกแบบ, S_d (กก./ซม.^{2})	ค่ายุบตัวจริง, Sl_r (ซม.)	ค่ายุบตัวออกแบบ, Sl_d (ซม.)	ปริมาณผสม, V_{mix} (ลิตร)	ความจุมากที่สุด, V_{max} (ลิตร)	หมายเหตุ
	ซีเมนต์ type III (กก.)	น้ำ (กก.)	ทราย (กก.)	หิน 3/4" (กก.)														
1	200	80	500	800	16	0.049	141	0.280	0.351	533.7	0.103	378.3	350	no	5-8	660	700	mix1
2	200	80	500	800	26	0.044	78	0.171	0.215	533.7	0.103	NA	350	16.0	5-8	660	700	mix1
3	200	80	500	800	16	0.032	131	0.288	0.324	533.7	0.103	NA	350	7.5	5-8	660	700	mix1
4	200	80	500	800	10	0.056	116	0.375	0.629	533.7	0.103	348.5	350	11.5	5-8	660	700	mix1
5	200	80	500	800	21	0.065	234	0.587	0.772	533.7	0.103	332.3	350	11.0	5-8	660	700	mix1
6	200	80	500	800	36	0.057	107	0.255	0.322	533.7	0.103	NA	350	15.5	5-8	660	700	mix1
7	200	80	500	800	11	0.065	110	0.186	0.317	533.7	0.103	NA	350	13.5	5-8	660	700	mix1
8	200	80	500	800	14	0.065	119	0.194	0.305	533.7	0.103	NA	350	19.0	5-8	660	700	mix1
9	200	80	500	800	25	0.063	62	0.078	0.152	533.7	0.103	NA	350	13.0	5-8	660	700	mix1
10	200	80	500	800	29	0.049	200	0.492	0.571	533.7	0.103	NA	350	15.0	5-8	660	700	mix1
11	200	80	500	800	25	0.055	68	0.114	0.176	533.7	0.103	NA	350	15.5	5-8	660	700	mix1
12	200	80	500	800	15	0.056	90	0.189	0.314	533.7	0.103	NA	350	12.5	5-8	660	700	mix1
13	200	80	500	800	27	0.054	53	0.081	0.134	533.7	0.103	NA	350	17.0	5-8	660	700	mix1
14	200	80	500	800	15	0.052	76	0.155	0.267	533.7	0.103	327.4	350	10.0	5-8	660	700	mix1
15	200	80	500	800	25	0.045	74	0.203	0.293	533.7	0.103	363.2	350	15.0	5-8	660	700	mix1
16	200	80	500	800	33	0.056	89	0.138	0.148	533.7	0.103	NA	350	23.0	5-8	660	700	mix1
17	200	80	500	800	24	0.061	58	0.067	0.136	533.7	0.103	NA	350	7.5	5-8	660	700	mix1
18	200	80	500	800	11	0.045	80	0.279	0.481	533.7	0.103	NA	350	17.0	5-8	660	700	mix1
19	200	80	500	800	10	0.033	90	0.370	0.590	533.7	0.103	NA	350	4.0	5-8	660	700	mix1
20	200	80	500	800	15	0.03	88	0.340	0.506	533.7	0.103	NA	350	9.0	5-8	660	700	mix1
21	200	80	500	800	10	0.045	39	0.134	0.298	533.7	0.103	NA	350	8.0	5-8	660	700	mix1
22	200	80	500	800	9	0.037	72	0.307	0.528	533.7	0.103	NA	350	10.5	5-8	660	700	mix1
23	200	80	500	800	12	0.038	68	0.232	0.388	533.7	0.103	NA	350	11.0	5-8	660	700	mix1

ตารางที่ 4.6 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยและไม่ใช่น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ค (ต่อ)

ลำดับที่	สัดส่วนผสม				เวลาผสมขั้นที่ 1, t_1 (วินาที)	พลังงานรวมขั้นที่ 1, E_{t1} (กิโลวัตต์-ชม.)	เวลาผสมขั้นที่ 2, t_2 (วินาที)	พลังงานรวมขั้นที่ 2, E_{t2} (กิโลวัตต์-ชม.)	ระดับความเข้มการผสม, I_{in} (วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร)	ปริมาตรส่วนผสม V_{st} (ลิตร)	สัดส่วนปริมาตรซีเมนต์, n_c	กำลังอัดจริง, S_r (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดออกแบบ, S_d (กก./ซม.^{2})	ค่ายุบตัวจริง, Sl_r (ซม.)	ค่ายุบตัวออกแบบ, Sl_d (ซม.)	ปริมาณผสม, V_{mix} (ลิตร)	ความจุมากที่สุด, V_{max} (ลิตร)	หมายเหตุ
	ซีเมนต์ type III (กก.)	น้ำ (กก.)	ทราย (กก.)	หิน 3/4" (กก.)														
24	200	80	500	800	13	0.054	48	0.158	0.346	533.7	0.103	NA	350	11.0	5-8	660	700	mix1
25	200	80	500	800	11	0.035	70	0.203	0.322	533.7	0.103	NA	350	11.5	5-8	660	700	mix1
26	200	80	500	800	20	0.055	101	0.283	0.446	533.7	0.103	NA	350	14.5	5-8	660	700	mix1
27	200	80	500	800	56	0.244	31	0.140	0.882	533.7	0.103	NA	350	13.0	5-8	660	700	mix1
28	200	80	500	800	9	0.041	50	0.435	0.829	533.7	0.103	NA	350	8.5	5-8	660	700	mix1
29	200	80	500	800	10	0.03	45	0.175	0.306	533.7	0.103	NA	350	12.0	5-8	660	700	mix1
30	200	80	500	800	10	0.046	53	0.196	0.389	533.7	0.103	NA	350	7.0	5-8	660	700	mix1
31	200	80	500	800	15	0.051	65	0.222	0.411	533.7	0.103	NA	350	8.0	5-8	660	700	mix1
32	200	80	500	800	8	0.059	99	0.362	0.662	533.7	0.103	NA	350	12.5	5-8	660	700	mix1
33	200	80	500	800	59	0.081	93	0.266	0.367	533.7	0.103	NA	350	10.0	5-8	660	700	mix1
34	200	80	500	800	15	0.049	101	0.358	0.584	533.7	0.103	NA	350	6.0	5-8	660	700	mix1

ตารางที่ 4.7 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ก

ลำดับที่	สัดส่วนผสม							เวลาผสม, t (วินาที)	พลังงานรวม, E_t (กิโลวัตต์-ชม.)	ระดับความเข้มการผสม, I_{in} (วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร)	ปริมาตรของแข็ง V_{st} (ลิตร)	สัดส่วนปริมาตรซีเมนต์, n_c	กำลังอัดจริง, S_r (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดออกแบบ, S_d (กก./ซม.^{2})	ค่ายุบตัวจริง, Sl_r (ซม.)	ค่ายุบตัวออกแบบ, Sl_d (ซม.)	ปริมาณผสม, V_{mix} (ลิตร)	ความจุมากที่สุด, V_{max} (ลิตร)	หมายเหตุ
	ซีเมนต์ type I (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	น้ำ (กก.)	ทราย (กก.)	หิน 3/4" (กก.)	หิน 1/2" (กก.)	น้ำยาประเภท D (ลบ.ซม.)												
1	285	0	191	1200	800	520	800	26	0.122	0.110	847.4	0.073	NA	140	13.0	5-10	1250	2000	mix1
2	270	0	189	1240	790	540	750	36	0.144	0.123	854.4	0.069	NA	140	13.5	5-10	1250	2000	mix1
3	280	0	147	1250	790	510	850	22	0.117	0.108	861.4	0.074	NA	140	15.0	5-10	1250	2000	mix1
4	280	0	150	1240	790	540	850	18	0.121	0.118	857.5	0.074	NA	140	7.0	5-10	1250	2000	mix1
5	280	0	159	1270	800	530	750	18	0.140	0.138	872.8	0.072	NA	140	8.0	5-10	1250	2000	mix1
6	280	0	164	1230	790	530	900	25	0.137	0.129	853.7	0.073	NA	140	12.0	5-10	1250	2000	mix1

ตารางที่ 4.8 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ง

ลำดับที่	สัดส่วนผสม						เวลาผสม, t (วินาที)	พลังงานรวม, E_t (กิโลวัตต์-ชม.)	ปริมาตรของแข็ง, V_{st} (ลิตร)	ระดับความเข้มการผสม,I_{in} (วัตต์-ชม./ลิตร)	สัดส่วนปริมาตรซีเมนต์, n_c	กำลังอัดจริง, S_r (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดออกแบบ, S_d (กก./ซม.^{2})	ค่ายุบตัวจริง, Sl_r (ซม.)	ค่ายุบตัวออกแบบ, Sl_d (ซม.)	ปริมาณผสม, V_{mix} (ลิตร)	ความจุมากที่สุด, V_{max} (ลิตร)	หมายเหตุ
	ซีเมนต์ type I (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	น้ำ (กก.)	ทราย (กก.)	หิน 3/4" (กก.)	น้ำยา ประเภท A&D (ลบ.ซม.)												
1	225	0	190	960	1110	1000	28	0.290	848.2	0.302	0.069	201.60	180	3.5	7.5-12.5	1000	1500	mix1
2	225	0	195	960	1110	1000	55	0.357	848.2	0.343	0.068	180.87	180	14.0	7.5-12.5	1000	1500	mix1
3	225	0	225	1260	1110	1000	44	0.327	963.1	0.285	0.060	NA	180	7.0	7.5-12.5	1000	1500	mix1
4	225	0	191	960	1110	1000	48	0.338	848.2	0.331	0.069	NA	180	8.0	7.5-12.5	1000	1500	mix1
5	225	0	196	960	1110	1000	65	0.374	848.2	0.349	0.068	NA	180	4.0	7.5-12.5	1000	1500	mix1
6	225	0	256	960	1380	1000	101	0.664	947.7	0.573	0.059	NA	180	3.0	7.5-12.5	1000	1500	mix1
7	225	0	185	960	1110	1000	44	0.326	848.2	0.322	0.069	NA	180	6.0	7.5-12.5	1000	1500	mix1
8	225	0	178	960	1110	1000	93	0.278	848.2	0.196	0.070	NA	180	3.0	7.5-12.5	1000	1500	mix1
9	225	0	191	960	1110	1000	37	0.326	848.2	0.332	0.069	NA	180	8.0	7.5-12.5	1000	1500	mix1
10	225	0	188	960	1110	1000	36	0.288	848.2	0.290	0.069	NA	180	8.0	7.5-12.5	1000	1500	mix1
11	225	0	186	960	1110	1000	73	0.387	848.2	0.353	0.069	NA	180	6.0	7.5-12.5	1000	1500	mix1
12	225	0	193	960	1110	1000	33	0.278	848.2	0.281	0.069	NA	180	8.0	7.5-12.5	1000	1500	mix1
13	320	0	192	900	1085	1350	33	0.277	846.2	0.276	0.098	363.91	280	10.0	7.5-12.5	1000	1500	mix2
14	320	0	170	900	1085	1350	30	0.301	846.2	0.313	0.100	384.32	280	5.0	7.5-12.5	1000	1500	mix2
15	320	0	190	900	1085	1350	49	0.341	846.2	0.333	0.098	328.53	280	5.0	7.5-12.5	1000	1500	mix2
16	320	0	196	900	1085	1350	54	0.354	846.2	0.342	0.097	285.16	280	15.5	7.5-12.5	1000	1500	mix2
17	320	0	188	900	1085	1350	50	0.344	846.2	0.335	0.098	338.50	280	16.0	7.5-12.5	1000	1500	mix2
18	325	0	190	870	1110	1625	33	0.280	845.5	0.284	0.100	NA	320	13.0	7.5-12.5	1000	1500	mix3
19	325	0	192	870	1110	1625	49	0.326	845.5	0.316	0.099	NA	320	12.0	7.5-12.5	1000	1500	mix3

ตารางที่ 4.8 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ง (ต่อ)

ลำดับที่	สัดส่วนผสม						เวลาผสม, t (วินาที)	พลังงานรวม, E_t (กิโลวัตต์-ชม.)	ปริมาตรของแข็ง, V_{st} (ลิตร)	ระดับความเข้มการผสม,I_{in} (วัตต์-ชม./ลิตร)	สัดส่วนปริมาตรซีเมนต์, n_c	Actual Strength (ksc)	กำลังอัดออกแบบ, S_d (กก./ซม.^{2})	ค่ายุบตัวจริง, Sl_r (ซม.)	ค่ายุบตัวออกแบบ, Sl_d (ซม.)	ปริมาณผสม, V_{mix} (ลิตร)	ความจุมากที่สุด, V_{max} (ลิตร)	หมายเหตุ
	ซีเมนต์ type I (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	น้ำ (กก.)	ทราย (กก.)	หิน 3/4" (กก.)	น้ำยา ประเภท A&D (ลบ.ซม.)												
20	300	0	172	930	1080	1230	21	0.265	849.5	0.282	0.093	356.58	240	6.5	7.5-12.5	1000	1500	mix4
21	300	0	172	930	1080	1230	53	0.352	849.5	0.339	0.093	273.22	240	9.0	7.5-12.5	1000	1500	mix4
22	250	0	225	950	1120	1250	32	0.295	856.0	0.300	0.073	229.25	210	18.0	7.5-12.5	1000	1500	mix5
23	250	0	171	950	1120	1250	44	0.280	856.0	0.265	0.077	NA	210	15.0	7.5-12.5	1000	1500	mix5

ตารางที่ 4.9 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน จ

ลำดับที่	สัดส่วนผสม									เวลาผสม, t (วินาที)	พลังงานรวม, E_t (กิโลวัตต์-ชม.)	ระดับความเข้มการผสม, I_{in} (วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร)	ปริมาตรของแข็ง V_{st} (ลิตร)	สัดส่วนปริมาตรซีเมนต์, n_c	กำลังอัดจริง, S_r (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดออกแบบ, S_d (กก./ซม.^{2})	ค่ายุบตัวจริง, Sl_r (ซม.)	ค่ายุบตัวออกแบบ, Sl_d (ซม.)	ปริมาณผสม, V_{mix} (ลิตร)	ความจุมากที่สุด, V_{max} (ลิตร)	หมายเหตุ
	ซีเมนต์ type I (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	น้ำ (กก.)	ทราย (กก.)	หิน 3/4" (กก.)	หิน 1/2" (กก.)	น้ำยา 1 (ลบ.ซม.)	น้ำยา 2 (ลบ.ซม.)	น้ำยา 3 (ลบ.ซม.)												
1	412	0	142	1230	870	560	900	0	0	12	0.340	0.354	925.1	0.103	NA	250	12.0	5-10	1330	1500	mix1
2	562	0	135	1050	780	520	1000	0	0	27	0.241	0.247	870.3	0.149	NA	500	18.0	15-20	1250	1500	mix2
3	562	0	136	1040	790	530	1000	0	0	20	0.245	0.259	870.1	0.148	NA	500	18.0	15-20	1250	1500	mix2
4	566	0	135	1050	790	520	1000	0	0	24	0.237	0.244	875.3	0.149	NA	500	18.0	15-20	1250	1500	mix2
5	242	0	109	890	670	440	700	0	0	24	0.151	0.184	691.5	0.080	NA	210	13.0	5-10	1000	1500	mix3
6	276	0	107	940	650	430	600	0	0	32	0.221	0.276	689.2	0.092	NA	210	14.0	5-10	1000	1500	mix3
7	344	0	152	1130	820	550	800	0	0	17	0.177	0.189	846.6	0.091	NA	210	14.0	5-10	1250	1500	mix3
8	344	0	150	1130	820	570	800	0	0	21	0.212	0.226	846.6	0.090	NA	210	13.0	5-10	1250	1500	mix3
9	346	0	152	1140	820	530	800	0	0	26	0.248	0.261	851.1	0.092	NA	210	14.0	5-10	1250	1500	mix3
10	344	0	153	1130	820	560	800	0	0	19	0.154	0.159	846.6	0.090	NA	210	13.0	5-10	1250	1500	mix3
11	344	0	153	1140	820	540	800	0	0	22	0.240	0.257	850.5	0.091	NA	210	14.0	5-10	1250	1500	mix3
12	346	0	153	1130	830	550	800	0	0	23	0.210	0.220	851.0	0.091	NA	210	14.0	5-10	1250	1500	mix3
13	276	0	125	900	670	420	600	0	0	23	0.143	0.177	681.2	0.091	NA	210	13.0	5-10	1000	1500	mix3
14	346	0	159	1140	820	540	800	0	0	20	0.185	0.194	851.1	0.091	NA	210	14.0	5-10	1250	1500	mix3
15	564	0	136	1040	790	530	0	0	7000	27	0.267	0.277	870.8	0.149	NA	500	18.0	15-20	1250	1500	mix4
16	566	0	136	1050	780	530	0	0	7000	28	0.284	0.295	871.6	0.149	NA	500	18.0	15-20	1250	1500	mix4
17	564	0	136	1060	790	540	0	0	7000	27	0.299	0.311	878.5	0.148	NA	500	18.0	15-20	1250	1500	mix4
18	564	0	139	1040	790	530	0	0	7000	22	0.226	0.234	870.8	0.149	NA	500	18.0	15-20	1250	1500	mix4
19	562	0	135	1050	790	530	0	0	7000	22	0.255	0.267	874.0	0.148	NA	500	19.0	15-20	1250	1500	mix4
20	554	0	136	1040	790	530	0	0	7000	35	0.262	0.264	867.6	0.147	NA	500	23.5	15-20	1250	1500	mix4

ตารางที่ 4.10 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ช

ลำดับที่	สัดส่วนผสม							เวลาผสม, t (วินาที)	พลังงานรวม, E_t (กิโลวัตต์-ชม.)	ปริมาตรส่วนผสม V_{st} (ลิตร)	ระดับความเข้มการผสม, I_{in} (วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร)	สัดส่วนปริมาตรซีเมนต์, n_c	กำลังอัดจริง, S_r (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดออกแบบ, S_d (กก./ซม.^{2})	ค่ายุบตัวจริง, Sl_r (ซม.)	ค่ายุบตัวออกแบบ, Sl_d (ซม.)	ปริมาณผสม, V_{mix} (ลิตร)	ความจุมากที่สุด, V_{max} (ลิตร)	หมายเหตุ
	ซีเมนต์ type I (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	น้ำ (กก.)	ทราย (กก.)	หิน 3/4" (กก.)	น้ำยาประเภท A&D (ลบ.ซม.)	น้ำยาประเภท D (ลบ.ซม.)												
1	1156	0	295	2100	3155	0	3375	153	1.060	2343.2	0.322	0.157	NA	450	11.0	5-10	2500	3000	mix1
2	1168	0	312	1860	2720	0	3375	14	0.355	2094.1	0.156	0.177	NA	450	10.0	5-10	2500	3000	mix1
3	1202	0	267	2140	2850	0	3375	85	0.469	2260.2	0.132	0.169	NA	450	10.0	5-10	2500	3000	mix1
4	1136	0	379	2105	3225	0	3375	93	0.443	2364.7	0.109	0.153	NA	450	10.0	5-10	2500	3000	mix1
5	1280	0	347	2505	3310	0	3713	90	0.514	2595.7	0.129	0.157	NA	450	10.0	5-10	2750	3000	mix1
6	1123	0	314	1990	2520	0	3375	57	0.272	2055.2	0.077	0.173	NA	450	10.0	5-10	2500	3000	mix1
7	1181	0	320	2100	2910	0	3375	75	0.338	2260.4	0.083	0.166	NA	450	10.0	5-10	2500	3000	mix1
8	1128	0	264	2065	2675	0	3375	57	0.246	2143.1	0.062	0.167	NA	450	9.0	5-10	2500	3000	mix1
9	1167	0	270	2315	2595	0	3375	66	0.306	2222.0	0.078	0.167	NA	450	10.0	5-10	2500	3000	mix1
10	1116	0	279	1725	2780	0	3375	68	0.322	2047.9	0.091	0.173	NA	450	10.0	5-10	2500	3000	mix1
11	1172	0	281	2390	2700	0	3375	66	0.325	2291.3	0.084	0.162	NA	450	10.0	5-10	2500	3000	mix1
12	918	0	214	1900	2510	0	2700	76	0.352	1951.8	0.102	0.149	NA	450	10.0	5-10	2000	3000	mix1
13	1144	0	366	2305	2930	0	3375	83	0.390	2334.9	0.096	0.156	NA	450	10.0	5-10	2500	3000	mix1
14	1148	0	373	2145	2760	0	3375	50	0.287	2211.7	0.085	0.165	NA	450	11.0	5-10	2500	3000	mix1
15	1143	0	376	2085	2680	0	3375	30	0.132	2157.4	0.033	0.168	NA	450	10.0	5-10	2500	3000	mix1
16	1155	0	363	1870	2475	0	3375	48	0.239	2002.6	0.071	0.183	NA	450	10.0	5-10	2500	3000	mix1
17	1157	0	366	2120	2800	0	3375	64	0.315	2219.7	0.084	0.165	NA	450	10.0	5-10	2500	3000	mix1
18	1176	0	364	2555	2740	0	3375	66	0.340	2370.8	0.088	0.157	NA	450	10.0	5-10	2500	3000	mix1
19	1153	0	368	2200	2795	0	3375	59	0.288	2247.4	0.076	0.163	NA	450	10.5	5-10	2500	3000	mix1

ตารางที่ 4.10 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ช (ต่อ)

ลำดับที่	สัดส่วนผสม							เวลาผสม, t (วินาที)	พลังงานรวม, E_t (กิโลวัตต์-ชม.)	ปริมาตรส่วนผสม V_{st} (ลิตร)	ระดับความเข้มการผสม, I_{in} (วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร)	สัดส่วนปริมาตรซีเมนต์, n_c	กำลังอัดจริง, S_r (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดออกแบบ, S_d (กก./ซม.^{2})	ค่ายุบตัวจริง, Sl_r (ซม.)	ค่ายุบตัวออกแบบ, Sl_d (ซม.)	ปริมาณผสม, V_{mix} (ลิตร)	ความจุมากที่สุด, V_{max} (ลิตร)	หมายเหตุ
	ซีเมนต์ type I (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	น้ำ (กก.)	ทราย (กก.)	หิน 3/4" (กก.)	น้ำยา ประเภท A&D (ลบ.ซม.)	น้ำยา ประเภท D (ลบ.ซม.)												
20	1144	0	368	1950	2815	0	3375	59	0.280	2155.8	0.075	0.168	NA	450	11.0	5-10	2500	3000	mix1
21	1150	0	367	2180	2790	0	3375	66	0.317	2237.4	0.083	0.163	NA	450	10.5	5-10	2500	3000	mix1
22	1170	0	359	1900	2720	0	3375	75	0.328	2109.6	0.084	0.176	NA	450	10.0	5-10	2500	3000	mix1
23	1149	0	362	2115	2740	0	3375	74	0.322	2193.0	0.079	0.166	NA	450	10.0	5-10	2500	3000	mix1
24	1140	0	364	2025	2735	0	3375	82	0.359	2153.7	0.090	0.168	NA	450	10.0	5-10	2500	3000	mix1
25	1148	0	360	1930	2760	0	3375	59	0.272	2129.5	0.072	0.171	NA	450	11.0	5-10	2500	3000	mix1
26	1132	0	361	2025	2590	0	3375	86	0.369	2097.5	0.094	0.171	NA	450	10.0	5-10	2500	3000	mix1
27	1134	0	353	2040	2655	0	3375	73	0.323	2128.4	0.083	0.169	NA	450	12.0	5-10	2500	3000	mix1
28	1151	0	369	2170	2830	0	3375	65	0.317	2248.2	0.083	0.163	NA	450	10.0	5-10	2500	3000	mix1
29	1155	0	361	1985	2815	0	3375	65	0.305	2172.7	0.080	0.169	NA	450	11.0	5-10	2500	3000	mix1
30	1263	0	399	2325	3050	0	3713	66	0.348	2424.8	0.089	0.165	NA	450	10.0	5-10	2750	3000	mix1
31	1162	0	367	1950	2915	0	3375	58	0.294	2198.5	0.081	0.168	NA	450	10.0	5-10	2500	3000	mix1
32	1149	0	365	2025	2980	0	3375	53	0.264	2247.3	0.070	0.162	NA	450	9.5	5-10	2500	3000	mix1
33	1158	0	365	2365	2720	0	3375	93	0.627	2284.6	0.193	0.161	NA	450	9.5	5-10	2500	3000	mix1
34	1164	0	367	2375	2790	0	3375	70	0.359	2316.3	0.095	0.160	NA	450	11.5	5-10	2500	3000	mix1

ตารางที่ 4.11 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตใช้เถ้าลอยแต่ไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ฉ

ลำดับที่	สัดส่วนผสม									เวลาผสม, t (วินาที)	พลังงานรวม, E_t (กิโลวัตต์-ชม.)	ปริมาตรของแข็ง V_{st} (ลิตร)	ระดับความเข้มการผสม, I_{in} (วัตต์-ชม./ลิตร)	สัดส่วนปริมาตรซีเมนต์, n_c	กำลังอัดจริง, S_r (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดออกแบบ, S_d (กก./ซม.^{2})	ปริมาณผสม, V_{mix} (ลิตร)	ความจุมากที่สุด, V_{max} (ลิตร)	หมายเหตุ
	ซีเมนต์ type I (กก.)	ซีเมนต์ type III (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	น้ำ (กก.)	ทรายหยาบ (กก.)	ทรายละเอียด (กก.)	หิน 1/2" (กก.)	หิน 3/8" (กก.)	น้ำยาประเภท F (ลบ.ซม.)										
1	257	0	69	100	807	0	806	0	0	121	1.281	833.9	1.116	0.209	300.8	420	872	1500	mix1
2	273	0	69	168	781	0	832	147	0	102	0.793	950.4	0.524	0.183	340.3	350	986	1500	mix1
3	273	0	68	167	784	0	832	148	0	90	2.332	950.7	2.179	0.183	313.7	350	988	1500	mix1
4	162	0	41	92	328	0	629	113	0	96	0.695	563.4	0.741	0.156	448.9	350	579	1500	mix2
5	82	0	21	49	172	0	328	54	0	101	0.496	292.1	0.698	0.153	474.6	350	299	1500	mix2
6	154	0	39	89	309	0	605	107	0	98	0.694	538.6	0.762	0.155	496.1	350	553	1500	mix2
7	198	0	49	97	398	0	763	135	0	103	0.889	668.5	0.884	0.159	546.0	350	699	1500	mix2
8	247	0	83	90	675	0	797	141	0	83	0.985	814.2	0.915	0.182	535.3	500	875	1500	mix3
9	248	0	83	93	658	0	797	139	0	90	1.028	810.0	0.948	0.182	557.0	500	868	1500	mix3

ตารางที่ 4.12 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ก

ลำดับที่	สัดส่วนผสม							เวลาผสม, t (วินาที)	พลังงานรวม, E_t (กิโลวัตต์-ชม.)	ระดับความเข้มการผสม, I_{in} (วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร)	ปริมาตรของแข็ง V_{st} (ลิตร)	สัดส่วนปริมาตรซีเมนต์, n_c	กำลังอัดจริง, S_r (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดออกแบบ, S_d (กก./ซม.^{2})	ค่ายุบตัวจริง, Sl_r (ซม.)	ค่ายุบตัวออกแบบ, Sl_d (ซม.)	ปริมาณผสม, V_{mix} (ลิตร)	ความจุมากที่สุด, V_{max} (ลิตร)	หมายเหตุ
	ซีเมนต์ type I (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	น้ำ (กก.)	ทราย (กก.)	หิน 3/4" (กก.)	หิน 1/2" (กก.)	น้ำยาประเภท D (ลบ.ซม.)												
1	300	75	174	1130	840	560	900	36	0.135	0.109	873.5	0.076	NA	240	12.0	5-10	1250	2000	mix2
2	305	75	158	1080	840	560	850	32	0.151	0.136	855.9	0.079	NA	240	12.0	5-10	1250	2000	mix2
3	295	70	138	980	720	480	1150	43	0.176	0.168	767.7	0.086	NA	240	15.0	7.5-12.5	1130	2000	mix3
4	295	80	143	980	740	500	1125	50	0.219	0.211	779.6	0.085	NA	240	15.0	7.5-12.5	1130	2000	mix3
5	300	70	143	1060	720	480	1250	60	0.260	0.243	800.1	0.085	NA	240	14.0	7.5-12.5	1130	2000	mix3
6	290	75	149	930	750	490	1300	43	0.164	0.154	760.2	0.084	NA	240	15.0	7.5-12.5	1130	2000	mix3
7	400	70	167	1040	850	560	1100	43	0.168	0.139	872.1	0.102	NA	350	13.0	7.5-12.5	1250	2000	mix4
8	445	75	243	1280	980	650	1750	38	0.153	0.108	1029.0	0.093	NA	280	13.0	7.5-12.5	1500	2000	mix5
9	320	50	137	1300	770	510	1000	38	0.174	0.146	908.3	0.082	NA	280	13.0	7.5-12.5	1170	2000	mix5
10	325	60	140	1020	790	530	1050	47	0.233	0.223	814.0	0.090	NA	280	14.0	7.5-12.5	1170	2000	mix5
11	320	65	143	770	770	520	1050	42	0.161	0.162	711.1	0.097	NA	280	14.0	7.5-12.5	1170	2000	mix5
12	330	85	152	1140	750	510	1100	48	0.202	0.174	858.1	0.087	NA	280	15.0	7.5-12.5	1170	2000	mix5
13	325	80	156	920	790	510	1150	55	0.265	0.261	784.5	0.091	NA	280	14.0	7.5-12.5	1170	2000	mix5
14	330	85	156	910	770	520	1100	28	0.156	0.161	777.1	0.093	NA	280	15.0	7.5-12.5	1170	2000	mix5
15	325	60	138	1050	770	520	1000	37	0.189	0.182	818.1	0.090	NA	280	15.0	7.5-12.5	1170	2000	mix5
16	330	65	143	1050	810	530	1050	55	0.297	0.283	836.7	0.089	NA	280	15.0	7.5-12.5	1170	2000	mix5
17	325	55	143	1040	800	530	1050	77	0.365	0.341	823.1	0.089	NA	280	14.0	7.5-12.5	1170	2000	mix5
18	325	60	143	1030	800	530	1050	40	0.184	0.171	821.5	0.089	NA	280	14.0	7.5-12.5	1170	2000	mix5
19	395	65	219	1200	770	500	2350	55	0.135	0.083	900.3	0.096	NA	280	18.0	17.5-22.5	1250	2000	mix6

ตารางที่ 4.12 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ก (ต่อ)

ลำดับที่	สัดส่วนผสม							เวลาผสม, t (วินาที)	พลังงานรวม, E_t (กิโลวัตต์-ชม.)	ระดับความเข้มการผสม, I_{in} (วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร)	ปริมาตรของแข็ง V_{st} (ลิตร)	สัดส่วนปริมาตรซีเมนต์, n_c	กำลังอัดจริง, S_r (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดออกแบบ, S_d (กก./ซม.^{2})	ค่ายุบตัวจริง, Sl_r (ซม.)	ค่ายุบตัวออกแบบ, Sl_d (ซม.)	ปริมาณผสม, V_{mix} (ลิตร)	ความจุมากที่สุด, V_{max} (ลิตร)	หมายเหตุ
	ซีเมนต์ type I (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	น้ำ (กก.)	ทราย (กก.)	หิน 3/4" (กก.)	หิน 1/2" (กก.)	น้ำยาประเภท D (ลบ.ซม.)												
20	400	75	201	940	780	530	2400	18	0.073	0.066	810.0	0.105	NA	280	19.0	17.5-22.5	1250	2000	mix6
21	400	65	183	910	770	520	2400	24	0.085	0.074	790.3	0.109	NA	280	19.0	17.5-22.5	1250	2000	mix6
22	405	70	109	1170	780	510	2400	56	0.179	0.131	897.9	0.107	NA	280	11.0	17.5-22.5	1250	2000	mix6
23	395	65	180	1120	770	510	2350	26	0.116	0.100	869.5	0.101	NA	280	17.0	17.5-22.5	1250	2000	mix6
24	400	75	187	980	780	510	2400	22	0.089	0.079	825.4	0.106	NA	280	19.0	17.5-22.5	1250	2000	mix6
25	400	70	191	1180	770	530	2400	21	0.106	0.093	896.4	0.099	NA	280	19.0	17.5-22.5	1250	2000	mix6
26	405	70	196	960	780	520	2400	19	0.082	0.075	817.1	0.107	NA	280	19.0	17.5-22.5	1250	2000	mix6
27	445	80	209	1340	980	640	1750	23	0.160	0.128	1054.3	0.094	NA	280	13.0	17.5-22.5	1500	2000	mix6
28	455	75	213	1150	990	670	1750	25	0.160	0.135	985.8	0.100	NA	280	15.0	17.5-22.5	1500	2000	mix6
29	450	75	222	1250	980	670	1750	18	0.116	0.095	1019.0	0.096	NA	280	17.0	17.5-22.5	1500	2000	mix6
30	400	70	197	970	780	520	2400	23	0.092	0.082	819.3	0.105	NA	280	20.0	17.5-22.5	1250	2000	mix6
31	400	70	199	1060	770	530	2400	31	0.116	0.096	850.3	0.102	NA	280	19.0	17.5-22.5	1250	2000	mix6
32	405	70	200	1030	780	510	2400	23	0.088	0.074	844.0	0.104	NA	280	19.0	17.5-22.5	1250	2000	mix6
33	400	70	199	1010	770	510	2250	57	0.088	0.030	831.0	0.104	NA	280	19.0	17.5-22.5	1250	2000	mix6
34	400	70	197	1040	780	520	2400	31	0.090	0.066	846.3	0.103	NA	280	21.0	17.5-22.5	1250	2000	mix6
35	395	70	187	1120	770	520	2400	41	0.097	0.060	871.8	0.100	NA	280	22.0	17.5-22.5	1250	2000	mix6
36	400	70	156	1080	780	520	2400	33	0.094	0.067	861.7	0.105	NA	280	20.0	17.5-22.5	1250	2000	mix6
37	395	70	192	1060	770	510	2350	31	0.136	0.120	848.7	0.102	NA	280	17.0	17.5-22.5	1250	2000	mix6
38	405	70	195	1040	780	520	2400	21	0.095	0.085	847.9	0.104	NA	280	19.0	17.5-22.5	1250	2000	mix6

ตารางที่ 4.12 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ก (ต่อ)

ลำดับที่	สัดส่วนผสม							เวลาผสม, t (วินาที)	พลังงานรวม, E_t (กิโลวัตต์-ชม.)	ระดับความเข้มการผสม, I_{in} (วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร)	ปริมาตรของแข็ง V_{st} (ลิตร)	สัดส่วนปริมาตรซีเมนต์, n_c	กำลังอัดจริง, S_r (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดออกแบบ, S_d (กก./ซม.^{2})	ค่ายุบตัวจริง, Sl_r (ซม.)	ค่ายุบตัวออกแบบ, Sl_d (ซม.)	ปริมาณผสม, V_{mix} (ลิตร)	ความจุมากที่สุด, V_{max} (ลิตร)	หมายเหตุ
	ซีเมนต์ type I (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	น้ำ (กก.)	ทราย (กก.)	หิน 3/4" (กก.)	หิน 1/2" (กก.)	น้ำยาประเภท D (ลบ.ซม.)												
39	400	65	201	1060	770	520	2400	16	0.077	0.070	848.0	0.102	NA	280	19.0	17.5-22.5	1250	2000	mix6
40	395	75	198	1060	780	520	2400	16	0.080	0.074	854.6	0.101	NA	280	17.0	17.5-22.5	1250	2000	mix6
41	450	80	211	1240	980	640	1750	28	0.168	0.135	1017.4	0.097	NA	280	19.0	17.5-22.5	1500	2000	mix6
42	450	75	207	1280	990	680	1800	23	0.153	0.123	1034.2	0.096	NA	280	19.0	17.5-22.5	1500	2000	mix6
43	450	70	213	1260	980	660	1750	24	0.145	0.117	1020.6	0.097	NA	280	19.0	17.5-22.5	1500	2000	mix6
44	180	45	189	1280	880	590	700	23	0.130	0.117	894.5	0.044	NA	140	16.0	7.5-12.5	1330	2000	mix7
45	185	45	202	1300	890	600	600	21	0.126	0.114	907.5	0.044	NA	140	12.0	7.5-12.5	1330	2000	mix7
46	185	50	201	1300	880	580	700	28	0.140	0.121	906.0	0.044	NA	140	12.0	7.5-12.5	1330	2000	mix7
47	175	45	162	1230	830	550	600	74	0.244	0.190	855.2	0.046	NA	140	14.0	7.5-12.5	1250	2000	mix7
48	275	60	142	1160	810	550	950	31	0.104	0.082	859.4	0.072	NA	210	17.0	7.5-12.5	1250	2000	mix8
49	275	75	146	1160	850	560	950	33	0.183	0.167	880.8	0.071	NA	210	16.0	7.5-12.5	1250	2000	mix8
50	275	70	146	1130	830	550	950	25	0.120	0.108	859.7	0.072	NA	210	17.0	7.5-12.5	1250	2000	mix8
51	275	70	146	1120	840	570	1000	55	0.210	0.174	859.5	0.072	NA	210	17.0	7.5-12.5	1250	2000	mix8
52	295	50	141	1190	820	550	950	32	0.167	0.151	876.5	0.077	NA	210	14.0	5-10	1250	2000	mix9
53	300	50	144	1130	830	540	900	41	0.194	0.174	858.7	0.079	NA	210	13.0	5-10	1250	2000	mix9

ตารางที่ 4.13 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ข

ลำดับที่	สัดส่วนผสม						เวลาผสม, t (วินาที)	พลังงานรวม, E_i (กิโลวัตต์-ชม.)	ระดับความเข้มการผสม, I_{in} (วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร)	ปริมาตรของแข็ง V_{st} (ลิตร)	สัดส่วนปริมาตรซีเมนต์, n_c	กำลังอัดจริง, S_r (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดออกแบบ, S_d (กก./ซม.^{2})	ค่ายุบตัวจริง, Sl_r (ซม.)	ค่ายุบตัวออกแบบ, Sl_d (ซม.)	ปริมาณผสม, V_{mix} (ลิตร)	ความจุมากที่สุด, V_{max} (ลิตร)	หมายเหตุ
	ซีเมนต์ type I (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	น้ำ (กก.)	ทราย (กก.)	หิน 3/4" (กก.)	น้ำยาประเภท D (ลบ.ซม.)												
1	400	100	340	1830	2200	1120	31	0.481	0.256	1693.3	0.075	NA	180	3.0	5-10	2000	2000	mix1
2	400	100	340	1830	2200	1120	33	0.457	0.240	1693.3	0.075	244.46	180	4.5	5-10	2000	2000	mix1
3	367	92	284	1495	1837	1029	34	0.451	0.282	1415.6	0.082	291.21	210	13.5	5-10	1670	2000	mix2
4	376	125	284	1461	1837	1091	29	0.346	0.213	1421.3	0.084	293.16	240	10.0	5-10	1670	2000	mix3
5	254	85	192	989	1243	738	35	0.136	0.086	961.7	0.084	NA	240	13.0	5-10	1130	2000	mix3
6	254	85	192	989	1243	738	35	0.163	0.115	961.7	0.084	350.49	240	13.0	5-10	1130	2000	mix3
7	394	131	298	1531	1925	1143	33	0.334	0.191	1489.4	0.084	NA	240	11.0	5-10	1750	2000	mix3
8	394	131	298	1531	1925	1143	29	0.340	0.199	1489.4	0.084	272.79	240	11.0	5-10	1750	2000	mix3
9	376	125	284	1461	1837	1091	31	0.322	0.193	1421.3	0.084	NA	240	9.0	5-10	1670	2000	mix3
10	376	125	284	1461	1837	1091	27	0.288	0.174	1421.3	0.084	NA	240	9.0	5-10	1670	2000	mix3
11	409	134	284	1428	1837	1187	75	0.332	0.154	1423.1	0.091	NA	280	10.0	5-10	1670	2000	mix4
12	409	134	284	1428	1837	1187	41	0.349	0.202	1423.1	0.091	393.26	280	10.0	5-10	1670	2000	mix4
13	530	170	392	1710	2180	1802	31	0.389	0.200	1714.3	0.098	408.56	280	10.0	5-10	2000	2000	mix4
14	306	100	213	1069	1375	889	31	0.156	0.102	1065.2	0.091	NA	280	9.0	5-10	1250	2000	mix4
15	306	100	213	1069	1375	889	35	0.198	0.137	1065.2	0.091	274.98	280	9.0	5-10	1250	2000	mix4
16	409	175	284	1353	1837	2660	60	0.404	0.222	1414.0	0.092	313.41	320	11.0	10-15	1670	2000	mix5
17	409	175	284	1353	1837	2660	60	0.290	0.141	1414.0	0.092	401.27	320	3.5	10-15	1670	2000	mix5
18	443	142	284	1394	1837	1284	21	0.243	0.148	1424.8	0.099	268.24	350	11.5	10-15	1670	2000	mix6
19	331	106	225	1069	1313	1126	47	0.228	0.149	1052.9	0.100	NA	350	19.0	10-15	1250	2000	mix6
20	331	106	225	1069	1313	1126	78	0.398	0.266	1052.9	0.100	NA	350	19.0	10-15	1250	2000	mix6

ตารางที่ 4.14 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตใช้เถ้าลอยแและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงานผสม ง

ลำดับที่	สัดส่วนผสม						เวลาผสม, t (วินาที)	พลังงานรวม, E_t (กิโลวัตต์-ชม.)	ปริมาตรของแข็ง, V_{st} (ลิตร)	ระดับความเข้มการผสม,I_{in} (วัตต์-ชม./ลิตร)	สัดส่วนปริมาตรซีเมนต์, n_c	กำลังอัดจริง, S_r (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดออกแบบ, S_d (กก./ซม.^{2})	ค่ายุบตัวจริง, Sl_r (ซม.)	ค่ายุบตัวออกแบบ, Sl_d (ซม.)	ปริมาณผสม, V_{mix} (ลิตร)	ความจุมากที่สุด, V_{max} (ลิตร)	หมายเหตุ
	ซีเมนต์ type I (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	น้ำ (กก.)	ทราย (กก.)	หิน 3/4" (กก.)	น้ำยา A&D (ลบ.ซม.)												
1	210	40	160	950	1120	1250	30	0.311	860.2	0.319	0.065	305.60	210	12.0	7.5-12.5	1000	1500	mix6
2	210	40	170	950	1120	1250	26	0.285	859.2	0.295	0.065	227.99	210	14.5	7.5-12.5	1000	1500	mix6
3	210	50	198	950	1120	1250	67	0.390	862.8	0.358	0.063	247.86	210	18.0	7.5-12.5	1000	1500	mix6
4	195	80	170	930	1080	1230	29	0.281	847.4	0.290	0.061	359.55	240	15.5	7.5-12.5	1000	1500	mix7
5	195	80	175	930	1080	1230	27	0.295	847.4	0.310	0.060	257.23	240	15.5	7.5-12.5	1000	1500	mix7
6	195	80	170	930	1080	1230	26	0.260	847.4	0.270	0.061	308.16	240	10.0	7.5-12.5	1000	1500	mix7
7	155	70	181	960	1110	1000	69	0.386	853.3	0.355	0.048	NA	180	17.0	7.5-12.5	1000	1500	mix8
8	155	70	183	960	1110	1000	19	0.271	853.3	0.291	0.047	262.87	180	19.5	7.5-12.5	1000	1500	mix8
9	250	50	175	900	1125	1500	33	0.281	858.5	0.285	0.077	322.28	280	10.0	7.5-12.5	1000	1500	mix9
10	250	50	180	900	1125	1500	30	0.281	858.5	0.285	0.076	320.55	280	17.0	7.5-12.5	1000	1500	mix9
11	270	55	150	870	1110	1625	37	0.301	851.2	0.301	0.085	386.33	320	5.0	7.5-12.5	1000	1500	mix10
12	270	55	150	870	1110	1625	32	0.295	851.2	0.301	0.085	390.60	320	5.0	7.5-12.5	1000	1500	mix10

ตารางที่ 4.15 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน จ

ลำดับที่	สัดส่วนผสม									เวลาผสม, t (วินาที)	พลังงานรวม, E_t (กิโลวัตต์-ชม.)	ระดับความเข้มการผสม, I_{in} (วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร)	ปริมาตรของแข็ง V_{st} (ลิตร)	สัดส่วนปริมาตรซีเมนต์, n_c	กำลังอัดจริง, S_r (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดออกแบบ, S_d (กก./ซม.^{2})	ค่ายุบตัวจริง, Sl_r (ซม.)	ค่ายุบตัวออกแบบ, Sl_d (ซม.)	ปริมาณผสม, V_{mix} (ลิตร)	ความจุมากที่สุด, V_{max} (ลิตร)	หมายเหตุ
	ซีเมนต์ type I (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	น้ำ (กก.)	ทราย (กก.)	หิน 3/4" (กก.)	หิน 1/2" (กก.)	น้ำยาประเภท A (ลบ.ซม.)	น้ำยา 2 ประเภท D (ลบ.ซม.)	น้ำยา 3 ประเภท G (ลบ.ซม.)												
1	342	64	159	1090	820	540	900	0	0	32	0.226	0.227	859.2	0.089	NA	240	15.0	7.5-12.5	1250	1500	mix5
2	344	62	166	1080	830	550	1000	0	0	67	0.299	0.276	858.8	0.089	NA	240	15.0	7.5-12.5	1250	1500	mix5
3	366	68	175	1160	870	550	1200	0	0	35	0.289	0.280	914.0	0.090	NA	240	15.0	7.5-12.5	1330	1500	mix5
4	344	62	147	1100	820	550	1000	0	0	20	0.184	0.191	862.8	0.090	NA	240	15.0	7.5-12.5	1250	1500	mix5
5	344	64	147	1110	820	540	1000	0	0	26	0.211	0.215	867.5	0.090	NA	240	14.0	7.5-12.5	1250	1500	mix5
6	346	62	147	1100	820	550	900	0	0	33	0.255	0.259	863.4	0.090	NA	240	15.0	7.5-12.5	1250	1500	mix5
7	344	64	147	1090	830	560	1000	0	0	27	0.253	0.262	863.5	0.090	NA	240	16.0	7.5-12.5	1250	1500	mix5
8	344	62	146	1100	820	540	1000	0	0	21	0.244	0.259	862.8	0.090	NA	240	15.0	7.5-12.5	1250	1500	mix5
9	344	64	146	1090	820	550	1000	0	0	28	0.232	0.238	859.8	0.090	NA	240	16.0	7.5-12.5	1250	1500	mix5
10	344	64	146	1090	820	550	1000	0	0	62	0.314	0.298	859.8	0.090	NA	240	16.0	7.5-12.5	1250	1500	mix5
11	366	68	159	1180	870	570	1200	0	0	70	0.457	0.426	921.7	0.090	NA	240	16.0	7.5-12.5	1330	1500	mix5
12	346	60	158	1080	820	530	1200	0	0	25	0.257	0.273	854.8	0.091	NA	240	15.0	7.5-12.5	1250	1500	mix5
13	344	64	161	1090	810	540	1100	0	0	30	0.199	0.199	856.1	0.103	NA	240	15.0	7.5-12.5	1250	1500	mix5
14	344	62	175	1070	800	590	1000	0	0	21	0.170	0.177	843.8	0.088	NA	240	18.0	7.5-12.5	1250	1500	mix5
15	346	60	176	1060	830	550	1000	0	0	19	0.166	0.173	850.8	0.089	NA	240	18.0	7.5-12.5	1250	1500	mix5
16	342	70	175	1020	820	600	900	0	0	22	0.147	0.150	834.9	0.088	NA	240	18.0	7.5-12.5	1250	1500	mix5
17	346	62	175	1070	820	540	900	0	0	18	0.147	0.151	851.9	0.090	NA	240	18.0	7.5-12.5	1250	1500	mix5
18	344	66	170	1060	820	590	900	0	0	19	0.172	0.180	849.2	0.088	NA	240	18.0	7.5-12.5	1250	1500	mix5
19	332	72	170	1080	820	550	900	0	0	18	0.186	0.196	855.7	0.086	NA	240	15.0	7.5-12.5	1250	1500	mix5

ตารางที่ 4.15 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน จ (ต่อ)

ลำดับที่	สัดส่วนผสม									เวลาผสม, t (วินาที)	พลังงานรวม, E_t (กิโลวัตต์-ชม.)	ระดับความเข้มการผสม, I_{in} (วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร)	ปริมาตรของแข็ง V_{st} (ลิตร)	สัดส่วนปริมาตรซีเมนต์, n_c	กำลังอัดจริง, S_r (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดออกแบบ, S_d (กก./ซม.^{2})	ค่ายุบตัวจริง, Sl_r (ซม.)	ค่ายุบตัวออกแบบ, Sl_d (ซม.)	ปริมาณผสม, V_{mix} (ลิตร)	ความจุมากที่สุด, V_{max} (ลิตร)	หมายเหตุ
	ซีเมนต์ type I (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	น้ำ (กก.)	ทราย (กก.)	หิน 3/4" (กก.)	หิน 1/2" (กก.)	น้ำยาประเภท A (ลบ.ซม.)	น้ำยา 2 ประเภท D (ลบ.ซม.)	น้ำยา 3 ประเภท G (ลบ.ซม.)												
20	334	76	170	1080	820	550	900	0	0	21	0.187	0.194	858.2	0.086	NA	240	14.0	7.5-12.5	1250	1500	mix5
21	344	62	175	1060	820	550	1000	0	0	21	0.209	0.223	847.4	0.089	NA	240	18.0	7.5-12.5	1250	1500	mix5
22	346	62	175	1070	820	540	1000	0	0	17	0.188	0.201	851.9	0.090	NA	240	18.0	7.5-12.5	1250	1500	mix5
23	384	68	177	1360	1010	650	1000	0	0	43	0.369	0.313	1048.3	0.083	NA	240	14.0	5-10	1500	1500	mix6
24	320	58	139	1120	840	560	900	0	0	38	0.346	0.281	1101.5	0.070	NA	240	14.0	5-10	1250	1500	mix6
25	320	56	145	1120	830	560	900	0	0	24	0.262	0.276	863.9	0.084	NA	240	14.0	5-10	1250	1500	mix6
26	302	74	146	1100	850	560	900	0	0	30	0.309	0.324	865.9	0.079	NA	240	13.0	5-10	1250	1500	mix6
27	320	56	138	1130	840	550	900	0	0	15	0.376	0.414	871.4	0.084	NA	240	14.0	5-10	1250	1500	mix6
28	320	56	140	1120	840	550	900	0	0	60	0.383	0.377	867.5	0.084	NA	240	14.0	5-10	1250	1500	mix6
29	320	56	153	1090	850	550	900	0	0	24	0.235	0.246	859.7	0.084	NA	240	13.0	5-10	1250	1500	mix6
30	344	70	170	1070	820	560	900	0	0	56	0.335	0.331	854.8	0.089	NA	240	16.0	5-10	1250	1500	mix6
31	320	56	155	1110	830	550	700	0	0	19	0.184	0.192	860.0	0.083	NA	240	14.0	5-10	1250	1500	mix6
32	320	58	158	1100	840	560	900	0	0	17	0.203	0.216	860.7	0.083	NA	240	14.0	5-10	1250	1500	mix6
33	316	70	158	1110	840	540	900	0	0	26	0.219	0.223	868.7	0.082	NA	240	14.0	5-10	1250	1500	mix6
34	320	54	125	1030	770	540	900	0	0	31	0.266	0.293	806.2	0.090	NA	280	14.0	5-10	1160	1500	mix7
35	412	76	165	1320	1000	660	1100	0	0	29	0.287	0.249	1041.7	0.090	NA	280	14.0	5-10	1500	1500	mix7
36	258	68	120	860	680	440	800	0	0	30	0.169	0.202	694.1	0.084	NA	280	14.0	5-10	1000	1500	mix7
37	390	94	179	1280	1010	670	1200	0	0	35	0.375	0.331	1031.1	0.085	NA	280	14.0	5-10	1500	1500	mix7
38	174	45	134	1270	840	570	500	0	0	27	0.261	0.269	874.0	0.045	NA	210	12.0	5-10	1250	1500	mix8

ตารางที่ 4.15 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน จ (ต่อ)

ลำดับที่	สัดส่วน									เวลผส t (วินา	พลังรวม, (กิโล -	ระดับเข้มการ in (วัตต์-ชั่ว /	ปริมาของ V_{st} (ลิตร	สัดปริมาซีเมน n	กำลังจริง S (กก./ ^{2})	กำลังออก S (กก./ ^{2})	ค่ายุบจริง r (ซม	ค่ายุบออก St (ซม	ปริมาผสม V_{mix} (ลิตร	ความมากที่ V_{max} (ลิตร	หมาย
	ซีเมน type (กก.	เถ้า (กก.	น้ำ (กก	ทราย (กก.	หิน 3/4 (กก.	หิน 1/2 (กก	น้ำประเภท (ลบ.	น้ำยาประเภท (ลบ.	น้ำยาประเภท (ลบ.												
39	17	48	13	123	83	56	50	0	0	30	0.23	0.24	856.	0.04	N	21	14.	5-	125	150	mix
40	21	52	17	150	100	66	60	0	0	55	0.50	0.43	1036.	0.04	N	21	14.	5-	125	150	mix
41	17	44	13	128	83	55	60	0	0	46	0.35	0.35	873.	0.04	N	21	13.	5-	125	150	mix
42	21	46	16	153	100	65	60	0	0	30	0.29	0.25	1044.	0.05	N	21	13.	5-	150	150	mix
43	18	48	15	134	88	56	60	0	0	19	0.17	0.17	920.	0.04	N	21	14.	5-	133	150	mix
44	37	70	14	105	84	57	100	0	0	30	0.30	0.32	864.	0.09	N	32	11.	7.5-	125	150	mix
45	40	72	17	100	83	56	110	0	0	20	0.18	0.19	850.	0.10	N	32	15.	7.5-	125	150	mix
46	50	26	16	100	82	55	110	0	0	33	0.26	0.27	859.	0.13	N	38	18.	7.5-	125	150	mix1
47	50	24	16	101	81	55	120	0	0	35	0.27	0.28	859.	0.13	N	38	18.	7.5-	125	150	mix1
48	50	26	16	100	81	56	120	0	0	38	0.29	0.29	856.	0.13	N	38	18.	7.5-	125	150	mix1
49	50	24	16	103	82	51	110	0	0	49	0.35	0.35	870.	0.13	N	38	18.	7.5-	125	150	mix1
50	50	26	17	100	81	55	120	0	0	21	0.20	0.21	856.	0.13	N	38	17.	7.5-	125	150	mix1
51	50	26	18	99	80	55	120	0	0	38	0.25	0.25	848.	0.13	N	38	18.	7.5-	125	150	mix1
52	50	26	18	94	81	59	110	0	0	20	0.18	0.20	832.	0.12	N	38	18.	7.5-	125	150	mix1
53	50	26	18	99	81	52	110	0	0	24	0.21	0.22	852.	0.13	N	38	18.	7.5-	125	150	mix1
54	50	28	19	98	81	57	110	0	0	20	0.18	0.19	849.	0.12	N	38	18.	7.5-	125	150	mix1
55	50	24	18	96	81	56	120	0	0	23	0.20	0.21	840.	0.13	N	38	18.	7.5-	125	150	mix1
56	50	28	18	98	81	54	120	0	0	27	0.23	0.24	849.	0.13	N	38	19.	7.5-	125	150	mix1
57	50	26	19	98	81	54	120	0	0	23	0.19	0.20	848.	0.13	N	38	19.	7.5-	125	150	mix1

ตารางที่ 4.15 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน จ (ต่อ)

ลำดับที่	สัดส่วนผสม									เวลาผสม, t (วินาที)	พลังงานรวม, E_t (กิโลวัตต์-ชม.)	ระดับความเข้มการผสม, I_{in} (วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร)	ปริมาตรของแข็ง V_{st} (ลิตร)	สัดส่วนปริมาตรซีเมนต์, n_c	กำลังอัดจริง, S_r (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดออกแบบ, S_d (กก./ซม.^{2})	ค่ายุบตัวจริง, Sl_r (ซม.)	ค่ายุบตัวออกแบบ, Sl_d (ซม.)	ปริมาณผสม, V_{mix} (ลิตร)	ความจุมากที่สุด, V_{max} (ลิตร)	หมายเหตุ
	ซีเมนต์ type I (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	น้ำ (กก.)	ทราย (กก.)	หิน 3/4" (กก.)	หิน 1/2" (กก.)	น้ำยาประเภท A (ลบ.ซม.)	น้ำยา 2 ประเภท D (ลบ.ซม.)	น้ำยา 3 ประเภท G (ลบ.ซม.)												
58	504	26	196	970	810	540	1100	0	0	19	0.185	0.197	843.8	0.129	NA	380	18.0	7.5-12.5	1250	1500	mix10
59	504	28	198	970	820	550	1200	0	0	25	0.226	0.238	848.4	0.128	NA	380	19.0	7.5-12.5	1250	1500	mix10
60	506	26	187	990	810	530	1200	0	0	27	0.243	0.254	852.1	0.130	NA	380	18.0	7.5-12.5	1250	1500	mix10
61	506	26	188	970	810	560	1200	0	0	30	0.265	0.280	844.4	0.130	NA	380	19.0	7.5-12.5	1250	1500	mix10
62	504	28	189	990	800	550	1200	0	0	25	0.240	0.255	848.7	0.129	NA	380	19.0	7.5-12.5	1250	1500	mix10
63	506	26	182	990	810	540	1200	0	0	23	0.210	0.220	852.1	0.130	NA	380	19.0	7.5-12.5	1250	1500	mix10
64	506	26	174	990	810	530	1100	0	0	56	0.273	0.259	852.1	0.131	NA	380	19.0	7.5-12.5	1250	1500	mix10
65	294	74	154	1210	860	600	900	0	0	27	0.272	0.270	909.3	0.073	NA	210	14.0	5-10	1330	1500	mix11
66	248	94	151	1220	890	590	800	0	0	24	0.268	0.266	918.6	0.061	NA	210	14.0	5-10	1250	1500	mix11
67	296	72	166	1190	890	600	900	0	0	22	0.214	0.211	912.5	0.072	NA	210	13.0	5-10	1330	1500	mix11
68	286	128	187	1400	940	660	1000	0	0	24	0.233	0.203	1033.5	0.062	NA	210	14.0	5-10	1500	1500	mix12
69	226	100	138	1020	780	530	800	0	0	63	0.380	0.404	796.7	0.063	NA	210	12.0	5-10	1160	1500	mix12
70	346	64	173	1070	820	550	0	1800	0	19	0.181	0.190	852.8	0.089	NA	240	16.0	7.5-12.5	1250	1500	mix13
71	346	64	173	1070	820	550	0	1800	0	20	0.189	0.198	852.8	0.089	NA	240	16.0	7.5-12.5	1250	1500	mix13
72	344	60	171	1080	810	540	0	1800	0	25	0.160	0.160	850.5	0.089	NA	240	15.0	7.5-12.5	1250	1500	mix13
73	344	62	173	1080	810	540	0	1800	0	20	0.176	0.184	851.4	0.089	NA	240	16.0	7.5-12.5	1250	1500	mix13
74	346	60	172	1080	820	530	0	1800	0	22	0.186	0.192	854.8	0.090	NA	240	16.0	7.5-12.5	1250	1500	mix13
75	344	64	173	1060	820	580	0	1800	0	17	0.156	0.163	848.3	0.088	NA	240	16.0	7.5-12.5	1250	1500	mix13
76	344	64	174	1100	810	530	0	1800	0	20	0.171	0.176	860.0	0.089	NA	240	16.0	7.5-12.5	1250	1500	mix13

ตารางที่ 4.15 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน จ (ต่อ)

ลำดับที่	สัดส่วนผสม									เวลาผสม, t (วินาที)	พลังงานรวม, E_t (กิโลวัตต์-ชม.)	ระดับความเข้มการผสม, I_{in} (วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร)	ปริมาตรของแข็ง V_{st} (ลิตร)	สัดส่วนปริมาตรซีเมนต์, n_c	กำลังอัดจริง, S_r (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดออกแบบ, S_d (กก./ซม.^{2})	ค่ายุบตัวจริง, Sl_r (ซม.)	ค่ายุบตัวออกแบบ, Sl_d (ซม.)	ปริมาณผสม, V_{mix} (ลิตร)	ความจุมากที่สุด, V_{max} (ลิตร)	หมายเหตุ
	ซีเมนต์ type I (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	น้ำ (กก.)	ทราย (กก.)	หิน 3/4" (กก.)	หิน 1/2" (กก.)	น้ำยาประเภท A (ลบ.ซม.)	น้ำยา 2 ประเภท D (ลบ.ซม.)	น้ำยา 3 ประเภท G (ลบ.ซม.)												
77	346	60	171	1080	810	550	0	1800	0	23	0.180	0.185	851.1	0.090	NA	240	16.0	7.5-12.5	1250	1500	mix13
78	354	54	170	1090	820	550	0	1800	0	16	0.152	0.158	858.5	0.091	NA	240	15.0	7.5-12.5	1250	1500	mix13
79	360	52	169	1080	820	530	0	1800	0	24	0.198	0.204	855.7	0.094	NA	240	15.0	7.5-12.5	1250	1500	mix13
80	344	64	174	1090	820	540	0	1800	0	21	0.209	0.219	859.8	0.088	NA	240	16.0	7.5-12.5	1250	1500	mix13
81	318	58	132	1140	830	560	0	1800	0	33	0.295	0.302	871.8	0.083	NA	240	13.0	5-10	1250	1500	mix14
82	334	42	148	1130	820	550	0	1800	0	32	0.290	0.301	862.2	0.087	NA	240	14.0	5-10	1250	1500	mix14
83	326	48	145	1120	840	560	0	1800	0	26	0.248	0.257	865.9	0.085	NA	240	13.0	5-10	1250	1500	mix14
84	320	54	136	1130	830	560	0	1800	0	40	0.308	0.311	866.8	0.084	NA	240	13.0	5-10	1250	1500	mix14
85	320	58	140	1110	840	570	0	1800	0	39	0.315	0.322	864.6	0.084	NA	240	14.0	5-10	1250	1500	mix14
86	320	56	153	1000	840	570	0	1800	0	27	0.300	0.333	821.4	0.086	NA	240	14.0	5-10	1250	1500	mix14
87	318	58	166	1090	840	560	0	1800	0	24	0.169	0.170	856.3	0.082	NA	240	14.0	5-10	1250	1500	mix14
88	322	56	155	1100	820	570	0	1800	0	21	0.201	0.211	853.1	0.084	NA	240	14.0	5-10	1250	1500	mix14
89	318	56	150	1140	840	540	0	1800	0	18	0.180	0.185	874.6	0.082	NA	240	13.0	5-10	1250	1500	mix14
90	320	56	146	1100	840	580	0	1800	0	34	0.282	0.290	859.9	0.095	NA	240	12.0	5-10	1250	1500	mix14
91	320	58	161	1100	840	550	0	1800	0	19	0.183	0.191	860.7	0.083	NA	240	14.0	5-10	1250	1500	mix14
92	320	52	155	1090	840	560	0	1800	0	18	0.168	0.175	854.2	0.083	NA	240	14.0	5-10	1250	1500	mix14

ตารางที่ 4.16 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ฉ

ลำดับที่	สัดส่วนผสม									เวลาผสม, t (วินาที)	พลังงานรวม, E_t (กิโลวัตต์-ชม.)	ปริมาตรของแข็ง V_{st} (ลิตร)	ระดับความเข้มการผสม, I_{in} (วัตต์-ชม./ลิตร)	สัดส่วนปริมาตรซีเมนต์, n_c	กำลังอัดจริง, S_r (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดออกแบบ, S_d (กก./ซม.^{2})	ปริมาณผสม, V_{mix} (ลิตร)	ความจุมากที่สุด, V_{max} (ลิตร)	หมายเหตุ
	ซีเมนต์ type I (กก.)	ซีเมนต์ type III (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	น้ำ (กก.)	ทรายหยาบ (กก.)	ทรายละเอียด (กก.)	หิน 1/2" (กก.)	หิน 3/8" (กก.)	น้ำยาประเภท F (ลบ.ซม.)										
1	196	0	49	101	410	0	769	138	1500	94	0.529	681.1	0.380	0.156	449.8	350	600	1500	mix4
2	196	0	49	100	407	0	770	136	1500	116	0.845	678.5	0.751	0.156	419.3	350	600	1500	mix4
3	159	0	40	74	328	0	627	110	1200	161	0.843	543.2	0.694	0.158	457.9	350	600	1500	mix4
4	202	0	51	103	421	0	794	141	1500	98	0.838	700.3	0.792	0.156	349.6	350	600	1500	mix4
5	165	0	42	84	344	0	652	115	1200	125	0.902	573.3	0.942	0.156	470.2	350	592	1500	mix4
6	81	0	20	42	178	0	319	56	601	100	0.479	284.9	0.666	0.156	447.9	350	294	1500	mix4
7	203	0	51	111	409	0	800	142	1500	41	0.796	706.9	0.959	0.155	462.5	350	727	1500	mix4
8	238	0	60	129	500	0	939	166	1800	103	0.907	835.5	0.729	0.155	457.5	350	860	1500	mix4
9	89	0	22	51	191	0	357	60	666	97	0.518	318.1	0.747	0.154	521.2	350	326	1500	mix4
10	159	0	40	80	336	0	626	110	1200	100	0.775	552.2	0.880	0.157	505.1	350	570	1500	mix4
11	202	0	51	113	423	0	794	139	1500	99	0.809	710.4	0.736	0.156	456.0	350	729	1500	mix4
12	260	0	69	67	791	0	0	815	0	76	0.96	799.8	0.926	0.215	510.5	420	866	1500	mix5
13	311	45	89	165	448	50	1038	345	2500	113	1.303	1027.6	0.950	0.174	538.6	500	1057	1500	mix6
14	312	44	89	166	450	48	1037	345	2500	103	1.244	1028.3	0.920	0.174	524.7	500	1057	1500	mix6
15	300	43	85	164	445	50	996	332	2400	110	1.186	998.8	0.869	0.174	599.0	500	1025	1500	mix6
16	313	44	89	173	457	50	1029	342	2500	113	1.123	1035.0	0.769	0.175	629.2	500	1062	1500	mix6
17	312	45	89	169	456	49	1029	344	2500	101	1.109	1031.0	0.792	0.175	501.8	500	1062	1500	mix6
18	300	42	86	165	451	49	987	331	2400	113	1.139	1016.3	0.799	0.175	616.5	500	1027	1500	mix6

ตารางที่ 4.17 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ช

ลำดับที่	สัดส่วนผสม							เวลาผสม, t (วินาที)	พลังงานรวม, E_t (กิโลวัตต์-ชม.)	ปริมาตรส่วนผสม V_{st} (ลิตร)	ระดับความเข้มการผสม, I_{in} (วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร)	สัดส่วนปริมาตรซีเมนต์, n_c	กำลังอัดจริง, S_r (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดออกแบบ, S_d (กก./ซม.^{2})	ค่ายุบตัวจริง, Sl_r (ซม.)	ค่ายุบตัวออกแบบ, Sl_d (ซม.)	ปริมาณผสม, V_{mix} (ลิตร)	ความจุมากที่สุด, V_{max} (ลิตร)	หมายเหตุ
	ซีเมนต์ type I (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	น้ำ (กก.)	ทราย (กก.)	หิน 3/4" (กก.)	น้ำยาประเภท A&D (ลบ.ซม.)	น้ำยาประเภท D (ลบ.ซม.)												
1	380	105	188	1210	1795	2570	0	43	0.166	1300.8	0.061	0.093	NA	240	13.0	7.5-12.5	1500	3000	mix2
2	731	193	323	2095	3120	4813	0	50	0.269	2285.3	0.074	0.102	NA	350	13.0	7.5-12.5	2500	3000	mix3
3	723	193	320	2060	2685	4813	0	50	0.238	2108.2	0.065	0.109	NA	350	14.0	7.5-12.5	2500	3000	mix3
4	732	192	333	2110	2390	4813	0	74	0.298	2020.5	0.074	0.115	NA	350	14.0	7.5-12.5	2500	3000	mix3
5	723	211	331	2045	2350	4813	0	36	0.174	1986.9	0.051	0.116	NA	350	14.0	7.5-12.5	2500	3000	mix3
6	717	210	336	2090	2710	4813	0	24	0.218	2135.2	0.080	0.107	NA	350	14.0	7.5-12.5	2500	3000	mix3
7	729	190	333	2090	2400	4813	0	44	0.201	2014.6	0.056	0.115	NA	350	14.0	7.5-12.5	2500	3000	mix3
8	722	182	334	2065	2435	4813	0	101	0.372	2012.0	0.084	0.114	NA	350	13.5	7.5-12.5	2500	3000	mix3
9	725	181	336	2115	2545	4813	0	61	0.278	2072.4	0.075	0.111	NA	350	14.0	7.5-12.5	2500	3000	mix3
10	723	209	334	2075	2390	4813	0	39	0.194	2012.3	0.058	0.114	NA	350	14.0	7.5-12.5	2500	3000	mix3
11	722	186	334	2055	2465	4813	0	90	0.487	2021.1	0.152	0.113	NA	350	14.0	7.5-12.5	2500	3000	mix3
12	855	203	305	2370	3030	4913	0	58	0.357	2401.9	0.100	0.113	NA	350	13.5	7.5-12.5	2500	3000	mix3
13	854	254	307	2327	3130	4913	0	82	0.329	2446.3	0.067	0.111	NA	350	14.0	7.5-12.5	2500	3000	mix3
14	625	147	295	2155	1870	3850	0	35	0.142	1789.9	0.040	0.111	NA	350	12.0	7.5-12.5	2000	3000	mix3
15	469	74	190	1500	1745	2888	0	46	0.147	1407.3	0.039	0.106	NA	350	11.0	7.5-12.5	1500	3000	mix3
16	522	178	277	1655	2045	5840	0	64	0.220	1644.4	0.056	0.101	NA	300	20.0	15-20	2000	3000	mix4
17	627	189	327	2045	2300	6935	0	42	0.177	1927.4	0.048	0.103	NA	300	20.0	15-20	2000	3000	mix4
18	282	157	138	895	1575	2920	0	360	1.489	1091.8	0.704	0.082	NA	300	18.5	15-20	1000	3000	mix4
19	714	221	374	2330	2590	7300	0	121	0.279	2187.3	0.017	0.104	NA	300	20.0	15-20	2500	3000	mix4

ตารางที่ 4.17 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ช (ต่อ)

ลำดับที่	สัดส่วนผสม							เวลาผสม, t (วินาที)	พลังงานรวม, E_t (กิโลวัตต์-ชม.)	ปริมาตรส่วนผสม V_{st} (ลิตร)	ระดับความเข้มการผสม, I_{in} (วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร)	สัดส่วนปริมาตรซีเมนต์, n_c	กำลังอัดจริง, S_r (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดออกแบบ, S_d (กก./ซม.^{2})	ค่ายุบตัวจริง, Sl_r (ซม.)	ค่ายุบตัวออกแบบ, Sl_d (ซม.)	ปริมาณผสม, V_{mix} (ลิตร)	ความจุมากที่สุด, V_{max} (ลิตร)	หมายเหตุ
	ซีเมนต์ type I (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	น้ำ (กก.)	ทราย (กก.)	หิน 3/4" (กก.)	น้ำยาประเภท A&D (ลบ.ซม.)	น้ำยาประเภท D (ลบ.ซม.)												
20	672	216	272	2130	2505	6970	0	52	0.191	2063.2	0.042	0.103	NA	300	20.0	15-20	2380	3000	mix4
21	559	170	227	1940	2015	5840	0	47	0.170	1750.9	0.043	0.101	NA	300	20.0	15-20	2000	3000	mix4
22	724	220	267	2375	2475	7300	0	130	0.279	2164.7	0.009	0.106	NA	300	20.0	15-20	2500	3000	mix4
23	633	184	308	2120	2290	6570	0	48	0.225	1952.1	0.066	0.103	NA	300	21.0	15-20	2250	3000	mix4
24	562	155	273	1770	1935	5840	0	49	0.199	1649.7	0.061	0.108	NA	300	20.0	15-20	2000	3000	mix4
25	676	198	332	2265	2330	6950	0	57	0.279	2043.0	0.081	0.105	NA	300	20.0	15-20	2380	3000	mix4
26	564	163	282	1885	2100	5840	0	96	0.340	1759.4	0.084	0.102	NA	300	20.0	15-20	2000	3000	mix4
27	622	219	298	2020	2535	6220	0	89	0.363	2017.6	0.092	0.098	NA	300	21.0	15-20	2130	3000	mix4
28	634	278	279	1745	2320	5840	0	61	0.230	1864.1	0.058	0.108	NA	300	19.0	15-20	2000	3000	mix4
29	578	248	250	2215	2010	5840	0	62	0.257	1898.0	0.070	0.097	NA	300	19.0	15-20	2000	3000	mix4
30	480	122	279	2260	2715	3125	0	31	0.158	2085.3	0.046	0.073	NA	180	10.5	5-10	2500	3000	mix5
31	307	84	177	1505	1940	1875	0	40	0.177	1434.8	0.067	0.068	NA	180	12.5	5-10	1500	3000	mix5
32	575	135	293	2470	2940	3125	0	260	1.254	2285.7	0.321	0.080	NA	180	11.0	5-10	2500	3000	mix5
33	510	121	297	2190	2775	3125	0	39	0.147	2089.6	0.033	0.077	NA	180	11.0	5-10	2500	3000	mix5
34	505	115	277	2300	2650	3125	0	69	0.350	2081.2	0.102	0.077	NA	180	11.0	5-10	2500	3000	mix5
35	513	130	260	2485	2810	3125	0	65	0.444	2221.3	0.141	0.073	NA	180	11.0	5-10	2500	3000	mix5
36	538	163	221	1805	2035	3384	0	33	0.172	1696.3	0.062	0.101	NA	300	11.0	5-10	1880	3000	mix6
37	296	100	127	890	1435	1800	0	51	0.209	1015.4	0.105	0.093	NA	300	12.0	5-10	1000	3000	mix6
38	723	196	305	2350	2655	4500	0	87	0.404	2210.0	0.104	0.104	NA	300	10.5	5-10	2500	3000	mix6

ตารางที่ 4.17 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ช (ต่อ)

ลำดับที่	สัดส่วนผสม							เวลาผสม, t (วินาที)	พลังงานรวม, E_t (กิโลวัตต์-ชม.)	ปริมาตรส่วนผสม V_{st} (ลิตร)	ระดับความเข้มการผสม, I_{in} (วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร)	สัดส่วนปริมาตรซีเมนต์, n_c	กำลังอัดจริง, S_r (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดออกแบบ, S_d (กก./ซม.^{2})	ค่ายุบตัวจริง, Sl_r (ซม.)	ค่ายุบตัวออกแบบ, Sl_d (ซม.)	ปริมาณผสม, V_{mix} (ลิตร)	ความจุมากที่สุด, V_{max} (ลิตร)	หมายเหตุ
	ซีเมนต์ type I (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	น้ำ (กก.)	ทราย (กก.)	หิน 3/4" (กก.)	น้ำยาประเภท A&D (ลบ.ซม.)	น้ำยาประเภท D (ลบ.ซม.)												
39	503	151	271	1670	2105	3150	0	50	0.201	1653.5	0.061	0.097	NA	300	10.5	5-10	1750	3000	mix6
40	720	180	394	2150	2760	4508	0	131	0.304	2163.4	0.019	0.106	NA	300	11.0	5-10	2500	3000	mix6
41	432	211	175	1520	1590	2700	0	370	1.265	1411.1	0.372	0.097	NA	300	10.5	5-10	1500	3000	mix6
42	431	105	176	1360	1615	2700	0	63	0.406	1308.1	0.214	0.105	NA	300	10.5	5-10	1500	3000	mix6
43	313	164	135	930	1415	1800	0	35	0.126	1059.2	0.053	0.094	NA	300	10.0	5-10	1000	3000	mix6
44	725	166	325	2410	2700	4500	0	48	0.236	2236.1	0.063	0.103	NA	300	10.0	5-10	2500	3000	mix6
45	727	192	325	2195	2430	4500	0	62	0.257	2066.5	0.064	0.112	NA	300	10.0	5-10	2500	3000	mix6
46	734	218	326	2835	2815	4500	0	69	0.283	2469.8	0.059	0.094	NA	300	11.0	5-10	2500	3000	mix6
47	739	167	321	2300	2690	4500	0	45	0.204	2195.0	0.052	0.107	NA	300	11.0	5-10	2500	3000	mix6
48	723	235	321	2320	2900	4500	0	60	0.286	2307.8	0.072	0.099	NA	300	10.0	5-10	2500	3000	mix6
49	743	143	326	2270	2570	4500	0	46	0.237	2128.9	0.068	0.111	NA	300	11.0	5-10	2500	3000	mix6
50	744	225	323	2470	2635	4500	0	59	0.267	2269.3	0.066	0.104	NA	300	11.0	5-10	2500	3000	mix6
51	498	131	233	1590	2055	3150	0	48	0.215	1593.1	0.075	0.099	NA	300	11.0	5-10	1750	3000	mix6
52	359	96	149	1125	1460	2250	0	78	0.237	1133.1	0.071	0.101	NA	300	11.0	5-10	1250	3000	mix6
53	710	154	301	2400	2700	4500	0	88	0.362	2221.8	0.084	0.101	NA	300	9.0	5-10	2500	3000	mix6
54	728	279	324	2310	2770	4500	0	65	0.294	2278.4	0.072	0.101	NA	300	10.0	5-10	2500	3000	mix6
55	773	245	305	2175	2880	4500	0	60	0.317	2265.3	0.087	0.108	NA	300	9.0	5-10	2500	3000	mix6
56	722	186	302	2365	2795	4500	0	64	0.346	2262.6	0.096	0.101	NA	300	10.0	5-10	2500	3000	mix6
57	717	172	295	2425	2795	4500	0	80	0.412	2277.4	0.111	0.100	NA	300	10.0	5-10	2500	3000	mix6

ตารางที่ 4.17 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ช (ต่อ)

ลำดับที่	สัดส่วนผสม							เวลาผสม, t (วินาที)	พลังงานรวม, E_t (กิโลวัตต์-ชม.)	ปริมาตรส่วนผสม V_{st} (ลิตร)	ระดับความเข้มการผสม, I_{in} (วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร)	สัดส่วนปริมาตรซีเมนต์, n_c	กำลังอัดจริง, S_r (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดออกแบบ, S_d (กก./ซม.^{2})	ค่ายุบตัวจริง, Sl_r (ซม.)	ค่ายุบตัวออกแบบ, Sl_d (ซม.)	ปริมาณผสม, V_{mix} (ลิตร)	ความจุมากที่สุด, V_{max} (ลิตร)	หมายเหตุ
	ซีเมนต์ type I (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	น้ำ (กก.)	ทราย (กก.)	หิน 3/4" (กก.)	น้ำยาประเภท A&D (ลบ.ซม.)	น้ำยาประเภท D (ลบ.ซม.)												
58	561	176	246	1780	1910	3459	0	34	0.153	1653.9	0.051	0.108	344.05	280	14.0	7.5-12.5	1880	3000	mix7
59	761	232	306	1710	2700	4600	0	59	0.261	2009.8	0.071	0.120	331.00	280	13.0	7.5-12.5	2500	3000	mix7
60	725	193	301	2365	2795	4601	0	139	0.362	2266.9	0.037	0.102	345.50	280	13.0	7.5-12.5	2500	3000	mix7
61	815	188	303	2380	2715	4600	0	104	0.459	2269.2	0.111	0.114	336.80	280	14.0	7.5-12.5	2500	3000	mix7
62	731	180	347	2230	2865	4600	0	60	0.257	2236.6	0.061	0.104	NA	280	12.0	7.5-12.5	2500	3000	mix7
63	636	161	317	2385	2500	3975	0	41	0.212	2121.8	0.061	0.095	327.57	280	11.0	5-10	2500	3000	mix8
64	623	189	298	2275	2595	3975	0	56	0.304	2123.9	0.090	0.093	329.50	280	11.5	5-10	2500	3000	mix8
65	514	168	240	1905	2005	3180	0	42	0.177	1718.5	0.054	0.095	325.15	280	12.0	5-10	2000	3000	mix8
66	505	186	259	1995	2625	3180	0	48	0.245	1988.4	0.075	0.081	339.75	280	11.5	5-10	2000	3000	mix8
67	636	209	341	2290	2755	3975	0	45	0.206	2202.6	0.053	0.092	NA	280	11.0	5-10	2500	3000	mix8
68	396	196	173	1475	1615	2385	0	34	0.119	1384.5	0.036	0.091	345.40	280	11.5	5-10	1500	3000	mix8
69	381	141	187	1440	1655	2355	0	40	0.170	1354.9	0.066	0.089	NA	280	12.0	5-10	1500	3000	mix8
70	641	173	295	2390	2730	3975	0	58	0.291	2216.2	0.079	0.092	330.60	280	11.0	5-10	2500	3000	mix8
71	646	165	298	2440	2685	3975	0	125	0.325	2216.6	0.034	0.093	338.60	280	11.5	5-10	2500	3000	mix8
72	639	159	297	2385	2690	3975	0	121	0.324	2192.2	0.037	0.093	NA	280	11.0	5-10	2500	3000	mix8
73	628	174	301	2480	2720	3975	0	125	0.363	2243.5	0.050	0.089	335.23	280	11.0	5-10	2500	3000	mix8
74	654	184	135	2310	2560	3975	0	199	0.813	2131.8	0.195	0.097	NA	280	11.0	5-10	2500	3000	mix8
75	510	139	259	1655	2550	3180	0	397	1.208	1809.1	0.229	0.089	NA	280	11.0	5-10	2000	3000	mix8
76	352	77	186	1230	1790	2198	0	28	0.115	1284.5	0.046	0.087	NA	240	11.5	5-10	1500	3000	mix9

ตารางที่ 4.17 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ช (ต่อ)

ลำดับที่	สัดส่วนผสม							เวลาผสม, t (วินาที)	พลังงานรวม, E_t (กิโลวัตต์-ชม.)	ปริมาตรส่วนผสม V_{st} (ลิตร)	ระดับความเข้มการผสม, I_{in} (วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร)	สัดส่วนปริมาตรซีเมนต์, n_c	กำลังอัดจริง, S_r (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดออกแบบ, S_d (กก./ซม.^{2})	ค่ายุบตัวจริง, Sl_r (ซม.)	ค่ายุบตัวออกแบบ, Sl_d (ซม.)	ปริมาณผสม, V_{mix} (ลิตร)	ความจุมากที่สุด, V_{max} (ลิตร)	หมายเหตุ
	ซีเมนต์ type I (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	น้ำ (กก.)	ทราย (กก.)	หิน 3/4" (กก.)	น้ำยา ประเภท A&D (ลบ.ซม.)	น้ำยา ประเภท D (ลบ.ซม.)												
77	471	192	235	1970	2215	2930	0	43	0.273	1819.0	0.103	0.082	NA	240	11.0	5-10	2000	3000	mix9
78	353	102	159	1495	1680	2198	0	144	0.314	1357.9	0.019	0.083	NA	240	11.0	5-10	1500	3000	mix9
79	601	138	200	1975	2570	3663	0	66	0.220	1968.0	0.045	0.097	NA	240	9.0	5-10	2500	3000	mix9
80	475	103	258	1720	2075	2930	0	42	0.171	1629.9	0.053	0.093	NA	240	9.0	5-10	2000	3000	mix9
81	493	114	257	1925	2340	2930	0	44	0.188	1817.8	0.055	0.086	283.47	240	10.0	5-10	2000	3000	mix9
82	468	124	254	1825	2280	2930	0	47	0.196	1754.0	0.058	0.085	NA	240	11.0	5-10	2000	3000	mix9
83	659	219	257	2575	2910	3663	0	55	0.218	2381.7	0.045	0.088	NA	240	10.0	5-10	2500	3000	mix9
84	531	144	239	1840	2230	2930	0	112	0.401	1770.8	0.100	0.095	NA	240	8.0	5-10	2000	3000	mix9
85	515	197	204	2450	2515	3175	0	50	0.242	2131.1	0.067	0.077	NA	210	11.5	5-10	2500	3000	mix10
86	532	210	236	2485	2665	3375	0	42	0.194	2211.7	0.050	0.076	NA	210	10.0	5-10	2500	3000	mix10
87	523	142	306	2225	2690	3375	0	92	0.315	2085.7	0.063	0.080	NA	210	10.0	5-10	2500	3000	mix10
88	524	121	317	1975	2690	3375	0	47	0.196	1979.9	0.051	0.084	NA	210	9.5	5-10	2500	3000	mix10
89	527	170	321	2285	2820	3375	0	57	0.238	2171.5	0.057	0.077	NA	210	10.0	5-10	2500	3000	mix10
90	584	183	306	2650	3045	3663	0	75	0.364	2419.5	0.088	0.077	NA	240	9.0	5-10	2500	3000	mix10
91	582	191	309	2500	3110	3663	0	75	0.287	2389.1	0.057	0.077	NA	240	10.0	5-10	2500	3000	mix10
92	520	158	278	2015	2205	3248	0	35	0.144	1832.0	0.040	0.090	249.70	210	12.0	7.5-12.5	2130	3000	mix11
93	369	164	204	1350	1785	2218	0	21	0.169	1375.6	0.092	0.085	268.07	210	12.0	7.5-12.5	1500	3000	mix11
94	553	133	275	2190	2225	3248	0	55	0.257	1905.3	0.077	0.092	254.05	210	12.0	7.5-12.5	2130	3000	mix11
95	520	150	256	2100	2480	3248	0	125	0.382	1962.7	0.067	0.084	248.25	210	14.0	7.5-12.5	2130	3000	mix11

ตารางที่ 4.17 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ช (ต่อ)

ลำดับที่	สัดส่วนผสม							เวลาผสม, t (วินาที)	พลังงานรวม, E_t (กิโลวัตต์-ชม.)	ปริมาตรส่วนผสม V_{st} (ลิตร)	ระดับความเข้มการผสม, I_{in} (วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร)	สัดส่วนปริมาตรซีเมนต์, n_c	กำลังอัดจริง, S_r (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดออกแบบ, S_d (กก./ซม.^{2})	ค่ายุบตัวจริง, Sl_r (ซม.)	ค่ายุบตัวออกแบบ, Sl_d (ซม.)	ปริมาณผสม, V_{mix} (ลิตร)	ความจุมากที่สุด, V_{max} (ลิตร)	หมายเหตุ
	ซีเมนต์ type I (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	น้ำ (กก.)	ทราย (กก.)	หิน 3/4" (กก.)	น้ำยาประเภท A&D (ลบ.ซม.)	น้ำยาประเภท D (ลบ.ซม.)												
96	623	182	347	2460	2825	3813	0	44	0.222	2276.9	0.059	0.087	245.35	210	12.0	7.5-12.5	2500	3000	mix11
97	734	167	350	2055	2880	4625	0	53	0.248	2169.6	0.065	0.107	NA	250	12.0	10-15	2500	3000	mix12
98	403	163	165	1055	1610	2438	0	78	0.272	1207.6	0.096	0.106	NA	300	10.5	5-10	1500	3000	mix13
99	593	135	252	2190	2535	3656	0	168	0.669	2033.7	0.164	0.093	NA	300	11.0	5-10	2250	3000	mix13
100	151	109	61	485	675	813	0	46	0.117	536.4	0.046	0.089	NA	300	11.0	5-10	500	3000	mix13
101	266	176	136	950	1570	1625	0	226	0.714	1115.1	0.235	0.076	NA	300	10.0	5-10	1000	3000	mix13
102	329	79	163	1160	1430	2031	0	42	0.140	1117.8	0.050	0.093	NA	300	9.0	5-10	1250	3000	mix13
103	784	183	306	2395	3090	4475	0	122	0.359	2401.6	0.048	0.104	NA	300	11.5	7.5-12.5	2500	3000	mix14
104	745	204	312	2395	2425	4475	0	56	0.297	2153.0	0.086	0.110	NA	300	12.5	7.5-12.5	2500	3000	mix14
105	734	207	291	2425	2660	4475	0	123	0.370	2249.5	0.055	0.104	NA	300	12.5	7.5-12.5	2500	3000	mix14
106	729	194	313	2485	2535	4475	0	50	0.281	2218.5	0.082	0.104	NA	300	12.0	7.5-12.5	2500	3000	mix14
107	525	172	225	1795	2230	3294	0	46	0.238	1764.9	0.083	0.094	NA	300	12.0	7.5-12.5	1840	3000	mix14
108	538	153	224	1870	1730	3294	0	49	0.240	1603.6	0.088	0.107	NA	300	12.5	7.5-12.5	1840	3000	mix14
109	509	184	203	1750	2215	3133	0	77	0.377	1742.7	0.128	0.093	NA	300	13.0	7.5-12.5	1750	3000	mix14
110	741	189	285	2530	2690	4475	0	78	0.425	2294.6	0.117	0.103	NA	300	13.0	7.5-12.5	2500	3000	mix14
111	778	193	283	2445	2740	4475	0	130	0.636	2294.1	0.164	0.108	NA	300	12.5	7.5-12.5	2500	3000	mix14
112	711	194	285	2445	2780	4475	0	141	0.445	2288.1	0.071	0.099	NA	300	13.0	7.5-12.5	2500	3000	mix14
113	709	195	314	2415	2705	4475	0	148	0.412	2248.6	0.052	0.100	NA	300	12.5	7.5-12.5	2500	3000	mix14
114	778	219	330	2425	2730	4475	0	134	0.370	2295.1	0.044	0.108	NA	300	13.0	7.5-12.5	2500	3000	mix14

ตารางที่ 4.17 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ช (ต่อ)

ลำดับที่	สัดส่วนผสม							เวลาผสม, t (วินาที)	พลังงานรวม, E_t (กิโลวัตต์-ชม.)	ปริมาตรส่วนผสม V_{st} (ลิตร)	ระดับความเข้มการผสม, I_{in} (วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร)	สัดส่วนปริมาตรซีเมนต์, n_c	กำลังอัดจริง, S_r (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดออกแบบ, S_d (กก./ซม.^{2})	ค่ายุบตัวจริง, Sl_r (ซม.)	ค่ายุบตัวออกแบบ, Sl_d (ซม.)	ปริมาณผสม, V_{mix} (ลิตร)	ความจุมากที่สุด, V_{max} (ลิตร)	หมายเหตุ
	ซีเมนต์ type I (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	น้ำ (กก.)	ทราย (กก.)	หิน 3/4" (กก.)	น้ำยาประเภท A&D (ลบ.ซม.)	น้ำยาประเภท D (ลบ.ซม.)												
115	534	159	205	1840	2145	3294	0	118	0.261	1747.4	0.014	0.097	NA	300	13.0	7.5-12.5	1830	3000	mix14
116	519	164	187	1755	2075	3294	0	123	0.314	1686.4	0.040	0.098	NA	300	12.5	7.5-12.5	1840	3000	mix14
117	500	134	226	1405	2185	3133	0	48	0.219	1572.2	0.078	0.101	NA	300	10.0	7.5-12.5	1750	3000	mix14
118	570	110	271	2265	2870	3580	0	63	0.339	2167.5	0.098	0.083	NA	300	11.0	7.5-12.5	2000	3000	mix14
119	641	176	300	2080	2365	4028	0	79	0.282	1963.2	0.063	0.104	NA	300	11.0	7.5-12.5	2250	3000	mix14
120	469	193	223	1880	2180	2930	0	55	0.197	1771.3	0.049	0.084	NA	210	11.0	5-10	2000	3000	mix15
121	457	123	270	2515	3005	2875	0	100	0.405	2283.9	0.090	0.064	NA	150	10.5	5-10	2500	3000	mix16
122	389	200	225	1935	2280	2350	0	50	0.209	1807.4	0.060	0.068	NA	190	11.0	5-10	2000	3000	mix17
123	422	128	250	2170	2570	2644	0	60	0.291	1981.4	0.086	0.068	NA	190	11.0	5-10	2250	3000	mix17
124	341	92	256	1950	2365	2350	0	79	0.350	1778.0	0.108	0.061	NA	190	10.0	5-10	2000	3000	mix17
125	383	127	255	1915	2340	2350	0	71	0.262	1785.3	0.067	0.068	NA	190	10.0	5-10	2000	3000	mix17
126	291	88	182	1445	725	1763	0	85	0.367	958.6	0.205	0.096	NA	190	9.0	5-10	1500	3000	mix17
127	576	170	251	1730	2255	3450	0	54	0.232	1764.4	0.070	0.104	NA	300	12.0	5-10	2000	3000	mix18
128	756	190	334	2225	2585	4375	0	44	0.211	2143.7	0.057	0.112	NA	250	12.0	7.5-12.5	2500	3000	mix19
129	554	147	327	1810	2020	3500	0	72	0.233	1690.2	0.053	0.104	NA	250	12.0	7.5-12.5	2000	3000	mix19
130	434	134	200	1420	1585	2625	0	34	0.131	1334.8	0.047	0.103	NA	250	11.0	7.5-12.5	1500	3000	mix19
131	762	229	353	2535	2940	4625	0	60	0.292	2414.8	0.071	0.100	NA	250	12.0	7.5-12.5	2500	3000	mix19
132	558	172	315	2360	2840	3688	0	49	0.220	2218.6	0.055	0.080	NA	240	10.0	5-10	2500	3000	mix20
133	630	186	318	2335	2650	3688	0	59	0.259	2168.1	0.065	0.092	NA	240	9.0	5-10	2500	3000	mix20

ตารางที่ 4.17 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ช (ต่อ)

ลำดับที่	สัดส่วนผสม							เวลาผสม, t (วินาที)	พลังงานรวม, E_t (กิโลวัตต์-ชม.)	ปริมาตรส่วนผสม V_{st} (ลิตร)	ระดับความเข้มการผสม, I_{in} (วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร)	สัดส่วนปริมาตรซีเมนต์, n_c	กำลังอัดจริง, S_r (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดออกแบบ, S_d (กก./ซม.^{2})	ค่ายุบตัวจริง, Sl_r (ซม.)	ค่ายุบตัวออกแบบ, Sl_d (ซม.)	ปริมาณผสม, V_{mix} (ลิตร)	ความจุมากที่สุด, V_{max} (ลิตร)	หมายเหตุ
	ซีเมนต์ type I (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	น้ำ (กก.)	ทราย (กก.)	หิน 3/4" (กก.)	น้ำยา ประเภท A&D (ลบ.ซม.)	น้ำยา ประเภท D (ลบ.ซม.)												
134	575	173	324	2125	2830	3688	0	50	0.223	2130.4	0.058	0.086	NA	240	9.0	5-10	2500	3000	mix20
135	569	207	318	2265	3175	3688	0	43	0.229	2326.3	0.061	0.078	NA	240	10.0	5-10	2500	3000	mix20
136	397	141	232	1600	1990	2581	0	68	0.238	1545.6	0.066	0.082	NA	240	10.0	5-10	1750	3000	mix20
137	486	117	252	1965	2445	2680	0	49	0.210	1871.3	0.060	0.082	NA	180	10.0	5-10	2000	3000	mix21
138	314	101	188	1515	2165	2010	0	72	0.384	1532.3	0.157	0.065	NA	180	10.0	5-10	1500	3000	mix21
139	422	181	259	1965	2225	2680	0	64	0.251	1800.0	0.068	0.074	NA	180	10.5	5-10	2000	3000	mix21
140	894	263	326	2320	2760	4813	0	74	0.366	2323.6	0.094	0.122	NA	350	13.5	7.5-12.5	2500	3000	mix22
141	862	216	324	2345	2455	4913	0	58	0.363	2187.7	0.113	0.125	NA	350	14.0	7.5-12.5	2500	3000	mix22
142	967	197	351	2070	2430	0	3000	50	0.211	2096.9	0.053	0.146	NA	350	15.0	10-20	2500	3000	mix23
143	969	194	216	2060	2540	0	3000	68	0.328	2133.0	0.090	0.144	NA	350	14.0	10-20	2500	3000	mix23
144	954	224	255	1990	2630	0	3000	56	0.257	2149.0	0.067	0.141	NA	350	14.0	10-20	2500	3000	mix23
145	963	184	253	1995	2640	0	3000	40	0.218	2138.4	0.064	0.143	NA	350	15.0	10-20	2500	3000	mix23
146	953	190	252	1975	2740	0	3000	59	0.270	2167.4	0.070	0.140	NA	350	14.5	10-20	2500	3000	mix23
147	968	185	266	2145	2725	0	3000	63	0.272	2229.7	0.065	0.138	NA	350	14.0	10-20	2500	3000	mix23
148	957	175	250	2045	2810	0	3000	48	0.202	2214.4	0.048	0.137	NA	350	15.0	10-20	2500	3000	mix23
149	967	183	252	2290	2795	0	3000	58	0.234	2310.1	0.051	0.133	NA	350	14.0	10-20	2500	3000	mix23
150	947	174	251	2115	2870	0	3000	56	0.248	2259.9	0.060	0.133	NA	350	14.0	10-20	2500	3000	mix23
151	1009	264	258	2125	2935	0	3000	47	0.214	2350.4	0.051	0.136	NA	350	15.0	10-20	2500	3000	mix23
152	1028	245	251	2210	2880	0	3000	73	0.304	2359.7	0.067	0.138	NA	350	15.0	10-20	2500	3000	mix23

ตารางที่ 4.17 ผลทดสอบการผสมคอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม โรงงาน ช (ต่อ)

ลำดับที่	สัดส่วนผสม							เวลาผสม, t (วินาที)	พลังงานรวม, E_t (กิโลวัตต์-ชม.)	ปริมาตรส่วนผสม V_{st} (ลิตร)	ระดับความเข้มการผสม, I_{in} (วัตต์-ชั่วโมง/ลิตร)	สัดส่วนปริมาตรซีเมนต์, n_c	กำลังอัดจริง, S_r (กก./ซม.^{2})	กำลังอัดออกแบบ, S_d (กก./ซม.^{2})	ค่ายุบตัวจริง, Sl_r (ซม.)	ค่ายุบตัวออกแบบ, Sl_d (ซม.)	ปริมาณผสม, V_{mix} (ลิตร)	ความจุมากที่สุด, V_{max} (ลิตร)	หมายเหตุ
	ซีเมนต์ type I (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	น้ำ (กก.)	ทราย (กก.)	หิน 3/4" (กก.)	น้ำยา ประเภท A&D (ลบ.ซม.)	น้ำยา ประเภท D (ลบ.ซม.)												
153	944	296	255	2315	2725	0	3000	54	0.229	2340.3	0.052	0.128	NA	350	14.0	10-20	2500	3000	mix23
154	945	178	254	2385	2940	0	3000	67	0.277	2391.0	0.060	0.125	NA	350	15.0	10-20	2500	3000	mix23
155	966	104	330	2385	2315	0	3188	55	0.251	2130.9	0.066	0.144	389.00	320	12.0	7.5-12.5	2500	3000	mix24
156	959	103	326	2225	2280	0	3188	43	0.224	2053.7	0.067	0.148	412.20	320	12.0	7.5-12.5	2500	3000	mix24
157	936	224	329	2400	2350	0	3188	43	0.192	2197.3	0.048	0.135	389.00	320	12.0	7.5-12.5	2500	3000	mix24
158	954	118	342	2335	2400	0	3188	46	0.212	2146.0	0.056	0.141	394.80	320	12.0	7.5-12.5	2500	3000	mix24
159	977	123	355	2125	2230	0	3188	55	0.234	2012.0	0.062	0.154	371.60	320	12.0	7.5-12.5	2500	3000	mix24
160	759	378	298	2180	2345	0	2450	143	0.558	2127.9	0.128	0.113	NA	350	20.0	15-20	2500	3000	mix25

ตารางที่ 4.18 ค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมและระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่ได้จากโรงงานผสมคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม

โรงงาน	Mix No.	ชนิดเครื่องผสม	ความจุมากที่สุด	ปริมาณผสมเฉลี่ย	ประเภทของน้ำยาผสมเพิ่ม	ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม	
						ทำนาย	ได้จากโรงงาน
ง	1	Force Type (P)	1500 ลิตร	1000 ลิตร	A&D	0.330	0.336
จ	3	Force Type (P)	1500 ลิตร	1125 ลิตร	A	0.459	0.295
ช	1	Force Type (D)	3000 ลิตร	2500 ลิตร	D	0.799	0.219

เมื่อ P หมายถึง Pan Type Mixer

D หมายถึง Drum Type Mixer

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

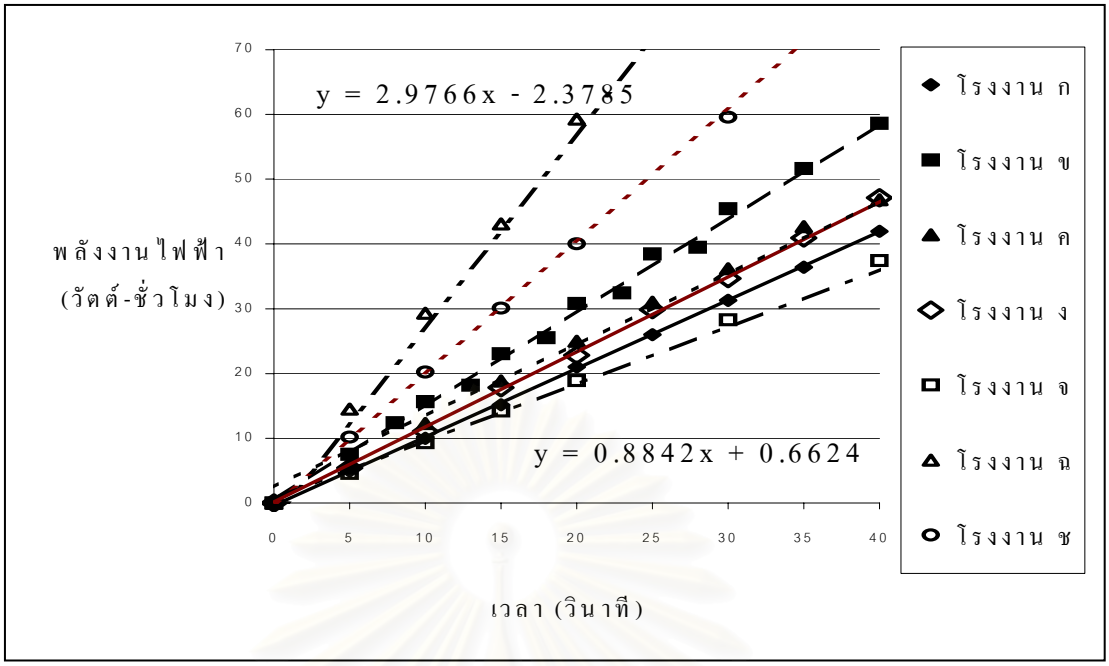
ตารางที่ 4.19 ค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมและระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่ได้จากโรงงานผสมคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม

โรงงาน	Mix No.	ชนิดเครื่องผสม	ความจุมากที่สุด	ปริมาณผสมเฉลี่ย	ประเภทของน้ำยาผสมเพิ่ม	ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม	
						ทำนาย	ได้จากโรงงาน
ก	5	Gravity Type (D)	2000 ลิตร	1170 ลิตร	D	0.221	0.226
ก	6			1250 ลิตร	D	0.264	0.048
จ	5	Force Type (P)	1500 ลิตร	1250 ลิตร	A	0.221	0.200
จ	13			1250 ลิตร	D	0.232	0.191
จ	6			1250 ลิตร	A	0.202	0.316
จ	14			1250 ลิตร	D	0.234	0.254
จ	10			1250 ลิตร	A	0.351	0.250
ช	3	Force Type (D)	3000 ลิตร	2500 ลิตร	A&D	0.375	0.095
ช	4			2150 ลิตร	A&D	0.354	หาค่าไม่ได้
ช	6			2500 และ 1750 ลิตร	A&D	0.334	0.110
ช	8			2500 ลิตร	A&D	0.292	0.062
ช	9			2000 ลิตร	A&D	0.293	0.035
ช	14			2500 และ 1840 ลิตร	A&D	0.334	หาค่าไม่ได้
ช	23			2500 ลิตร	D	0.419	0.046

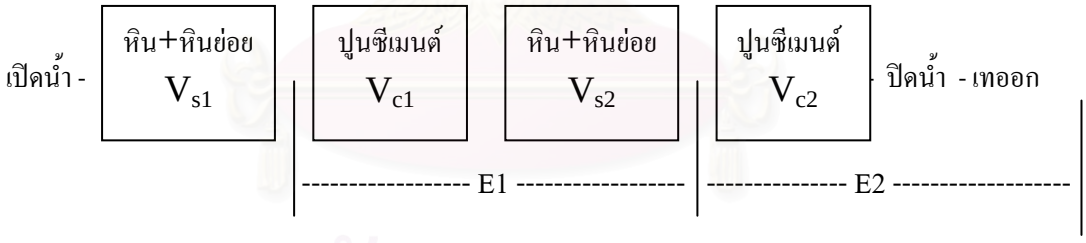
เมื่อ P หมายถึง Pan Type Mixer

D หมายถึง Drum Type Mixer

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

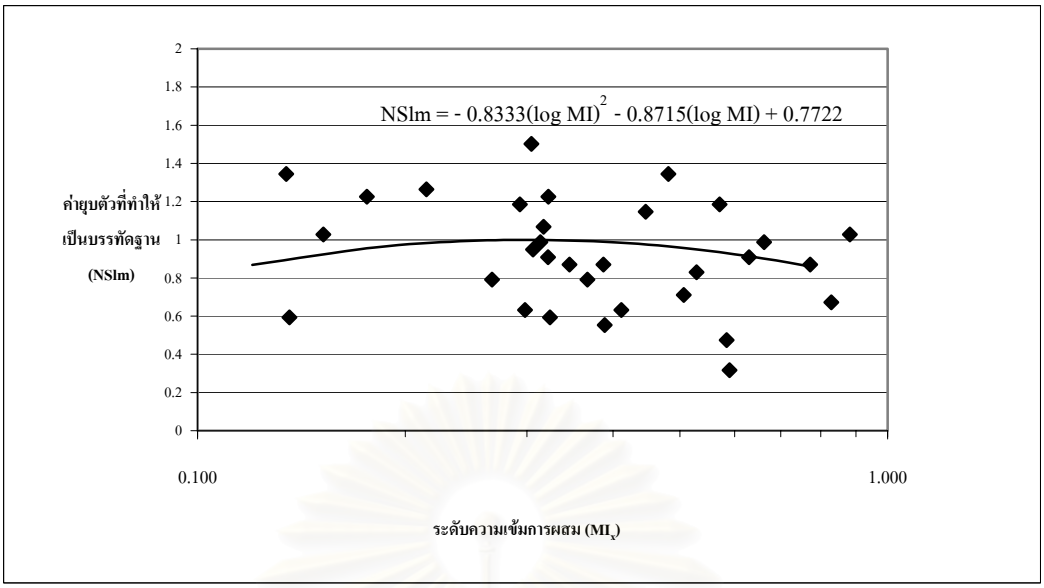


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับพลังงานที่ใช้ในการหมุนเครื่องผสมเปล่าของทุกโรงงานผสมคอนกรีต



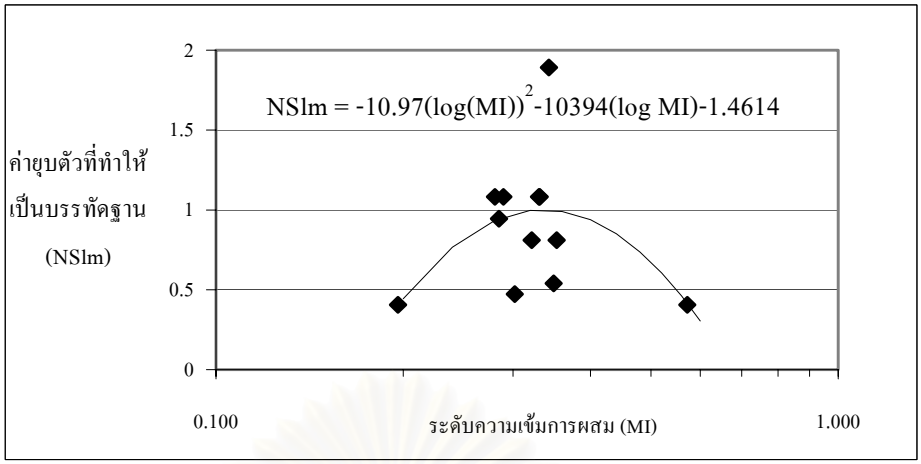
$$I_m = \frac{E_1}{V_{s1} + V_{c1} + V_{s2}} + \frac{E_2}{V_{s1} + V_{c1} + V_{s2} + V_{c2}}$$

รูปที่ 4.2 ลำดับการใส่ส่วนผสมของโรงงาน ค

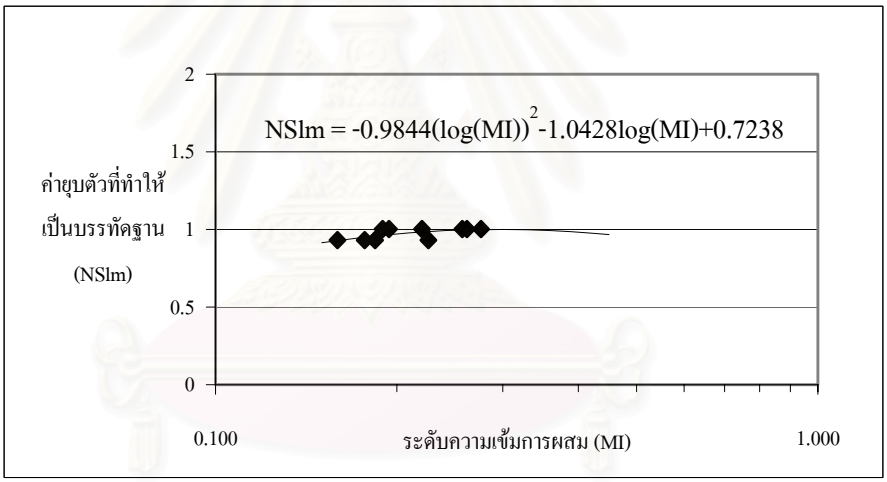


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ค, mix 1 (คอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยและไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

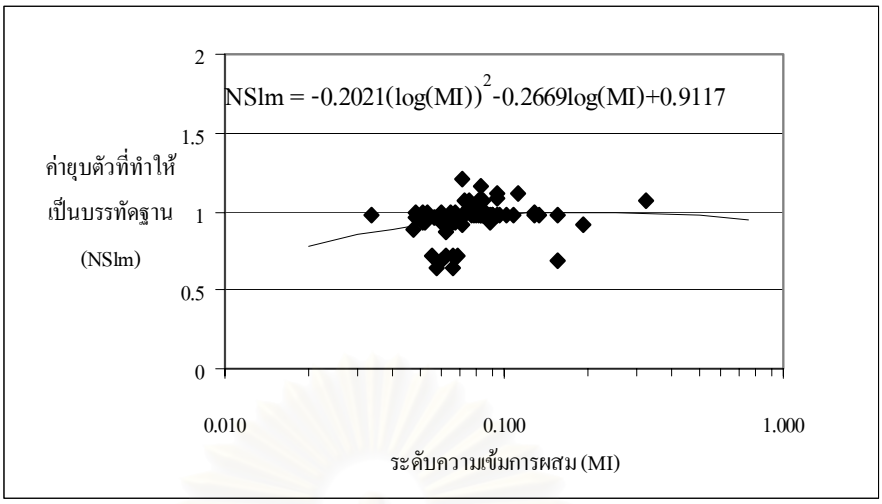


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ง, mix 1 (คอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A&D)



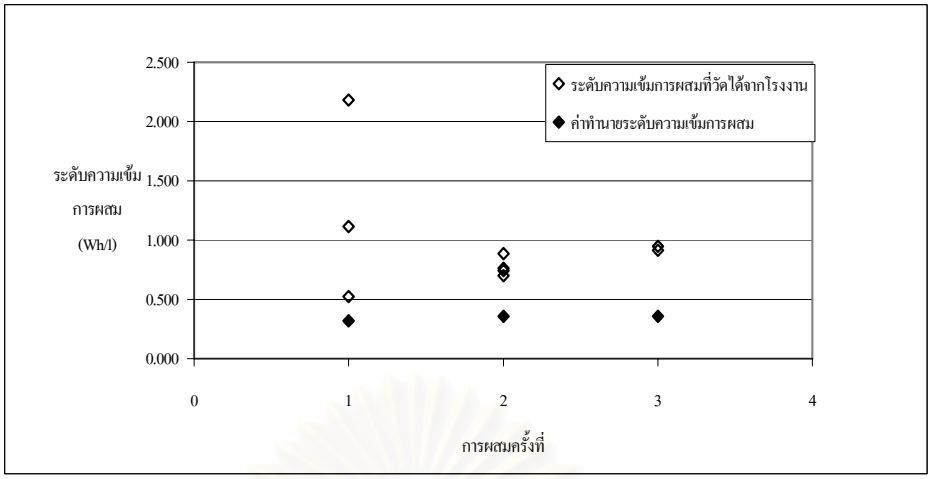
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน จ, mix 3 (คอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



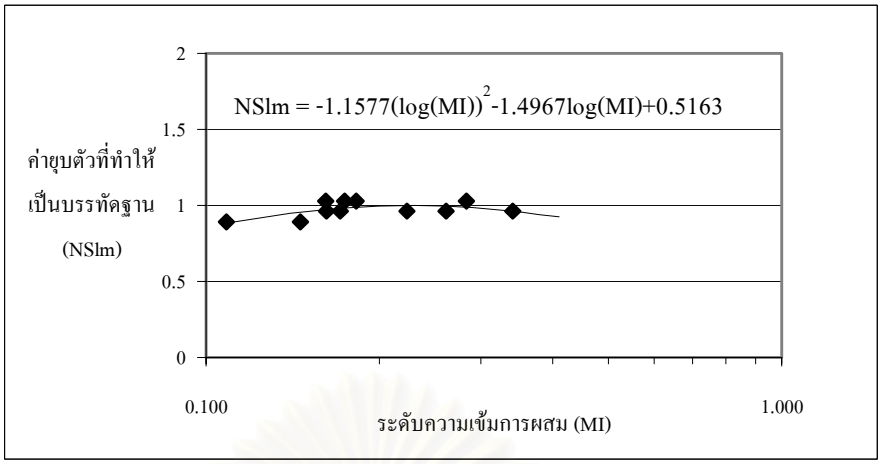
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ช, mix 1 (คอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท D)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

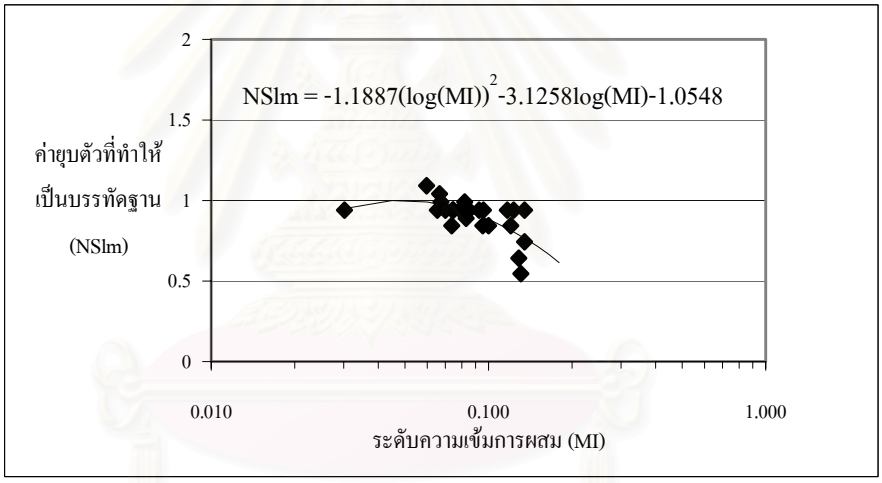


รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบค่านายระดับความเข้มการผสมกับค่าระดับความเข้มการผสมที่ใช้ในโรงงาน ฉ ซึ่งผสมคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแต่ไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

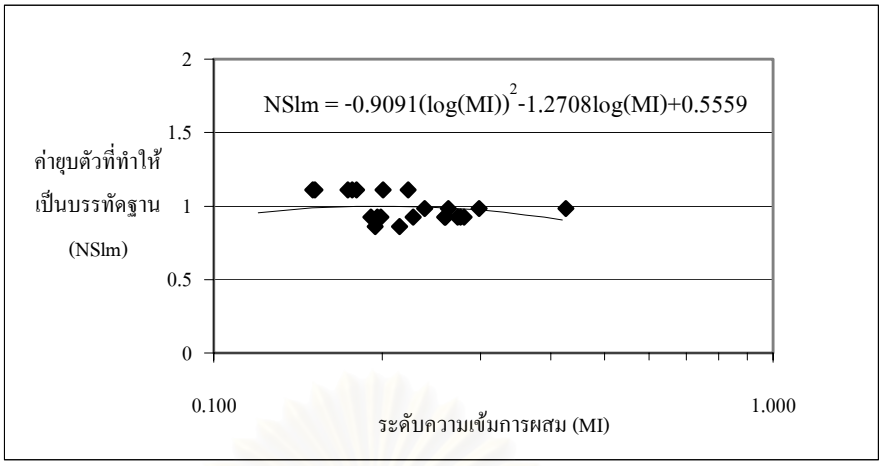


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ก, mix 5 (คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท D)

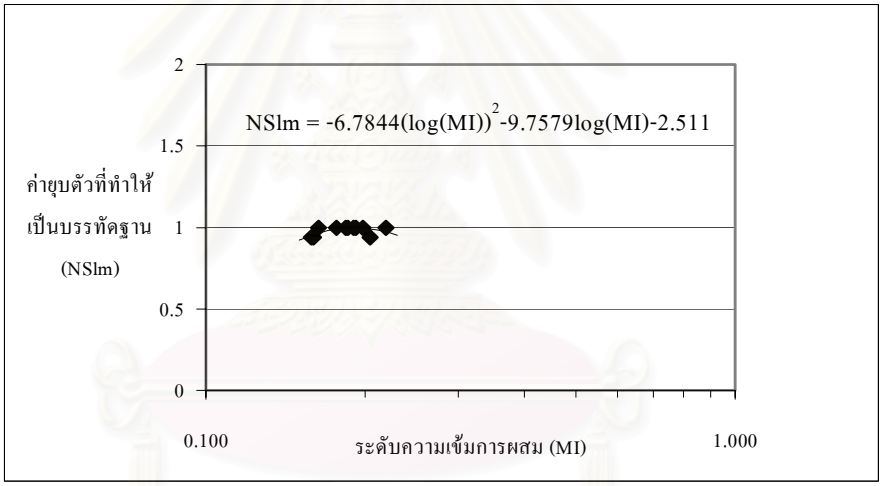


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ก, mix 6 (คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท D)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

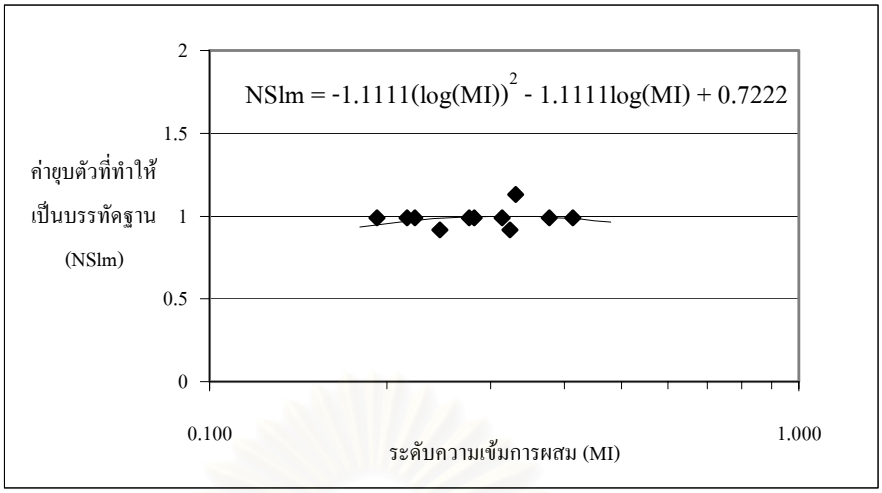


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน จ, mix 5 (คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A)

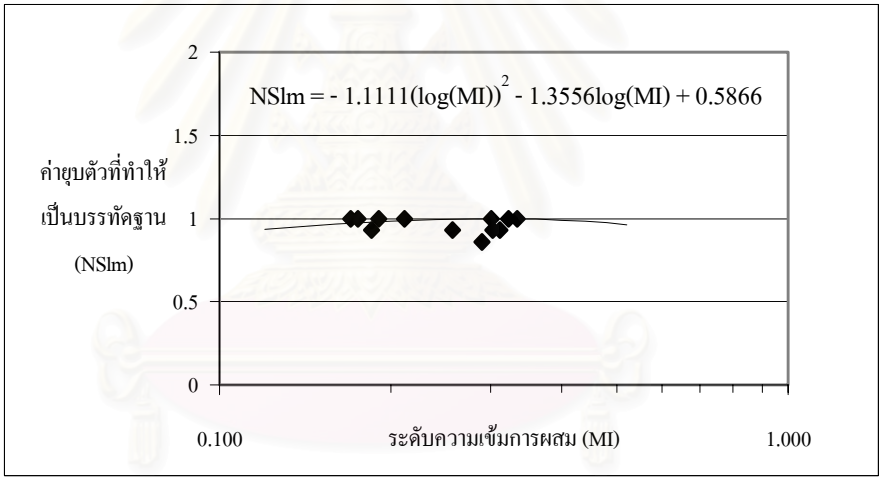


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน จ, mix 13 (คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท D)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

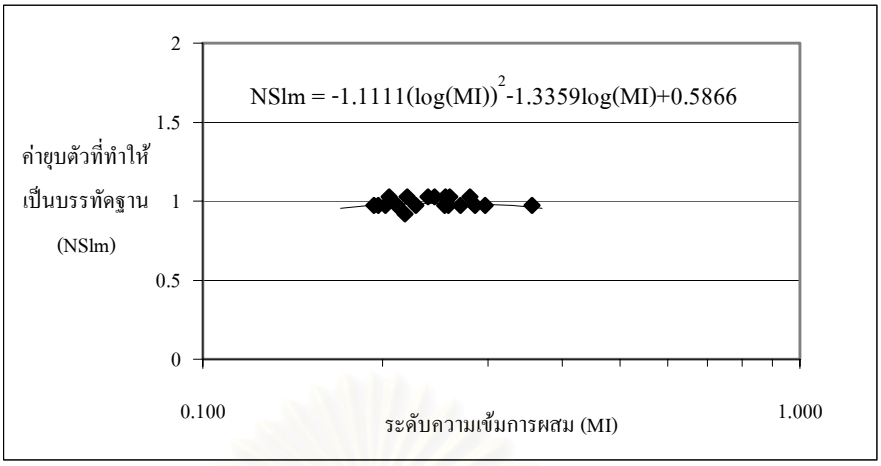


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน จ, mix 6 (คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A)

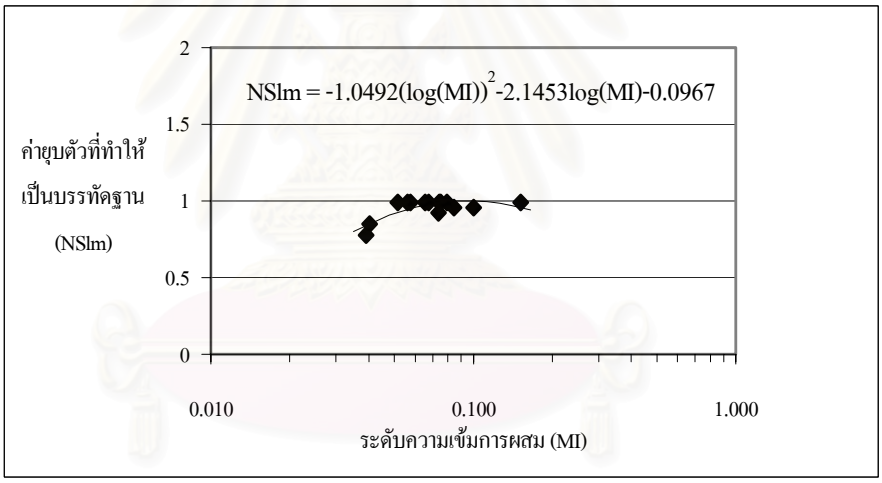


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน จ, mix 14 (คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท D)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

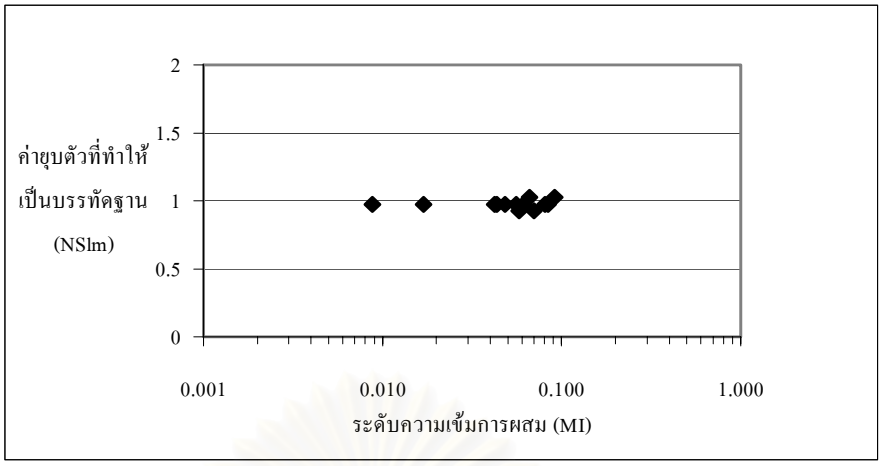


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน จ, mix 10 (คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A)

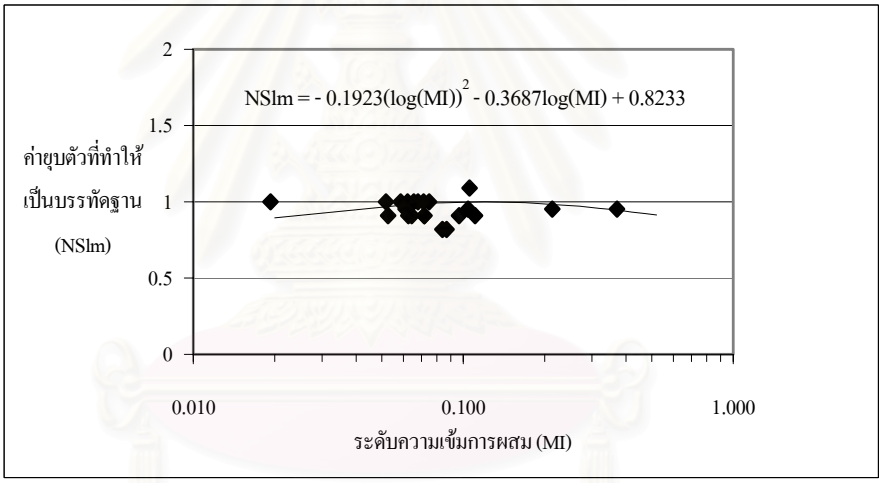


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ช, mix 3 (คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A&D)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

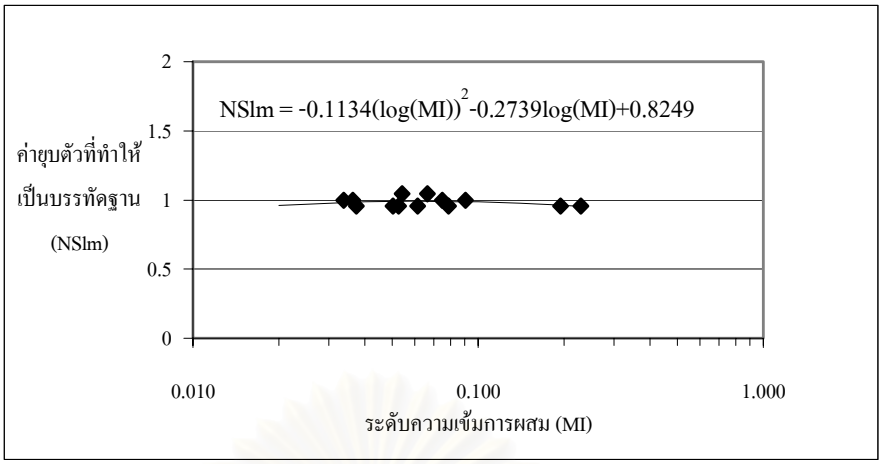


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ช, mix 4 (คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A&D)

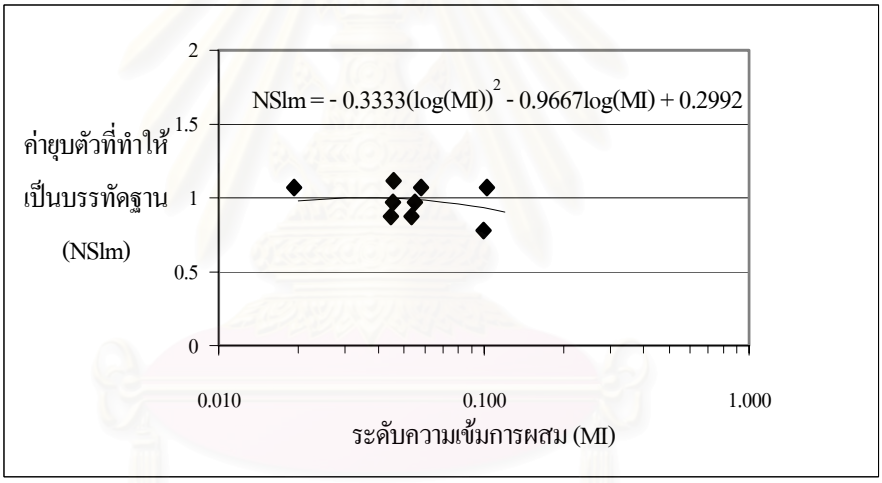


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ช, mix 6 (คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A&D)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

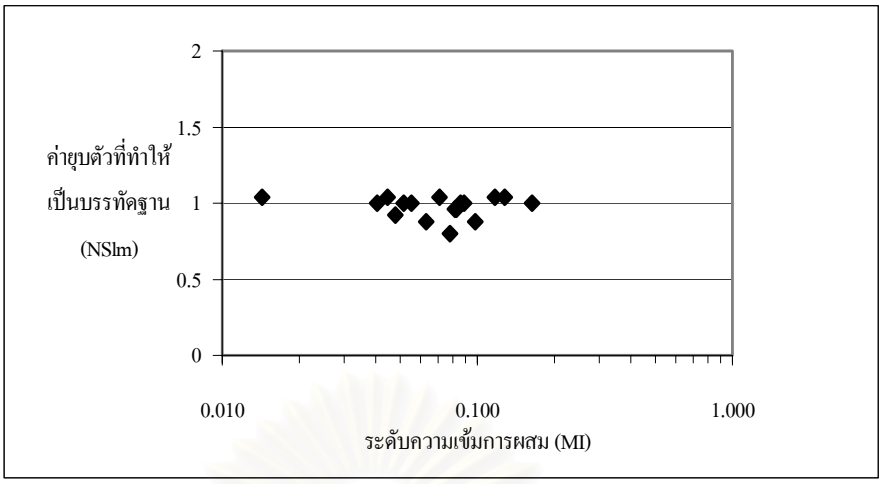


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ช, mix 8 (คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A&D)

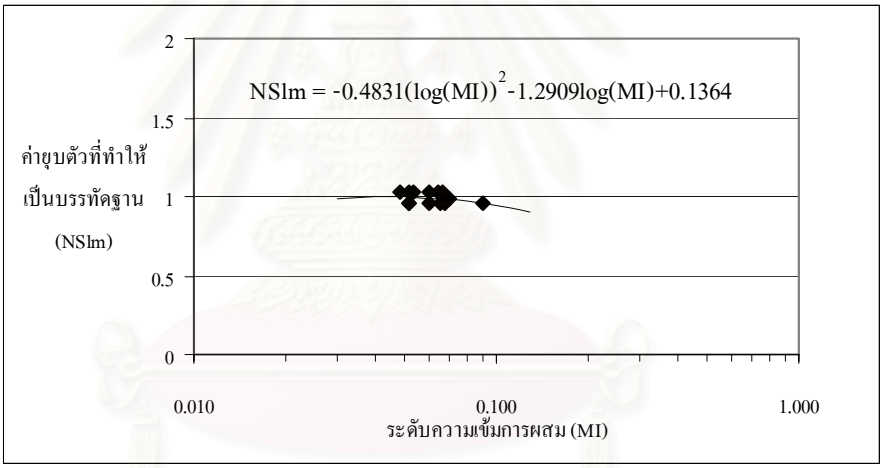


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ช, mix 9 (คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A&D)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

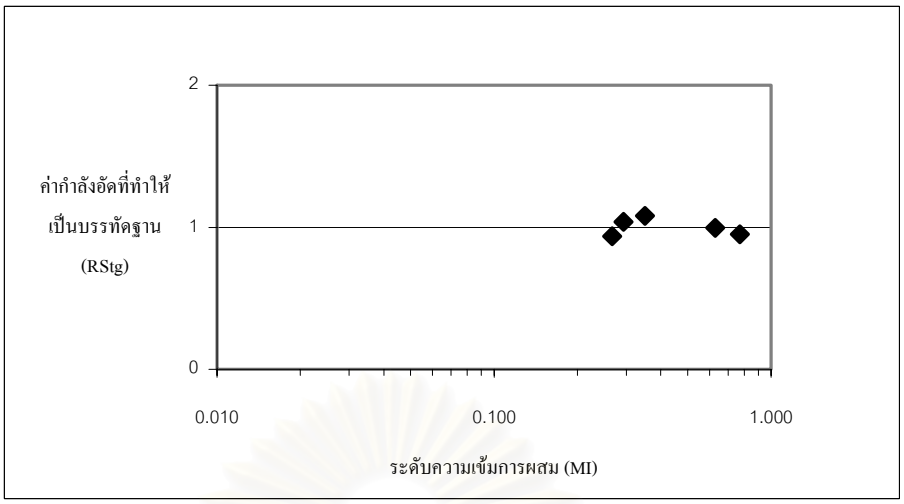


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ช, mix 14 (คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A&D)



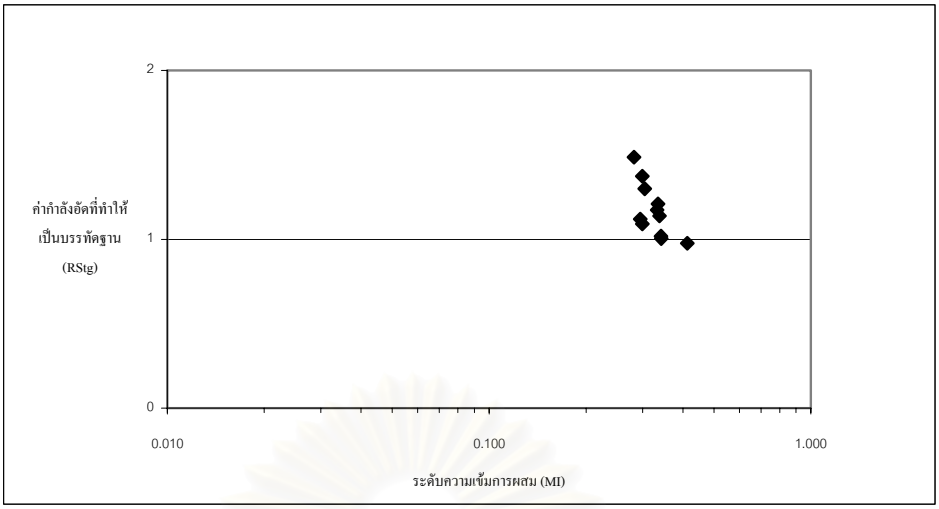
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ช, mix 23 (คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท D)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



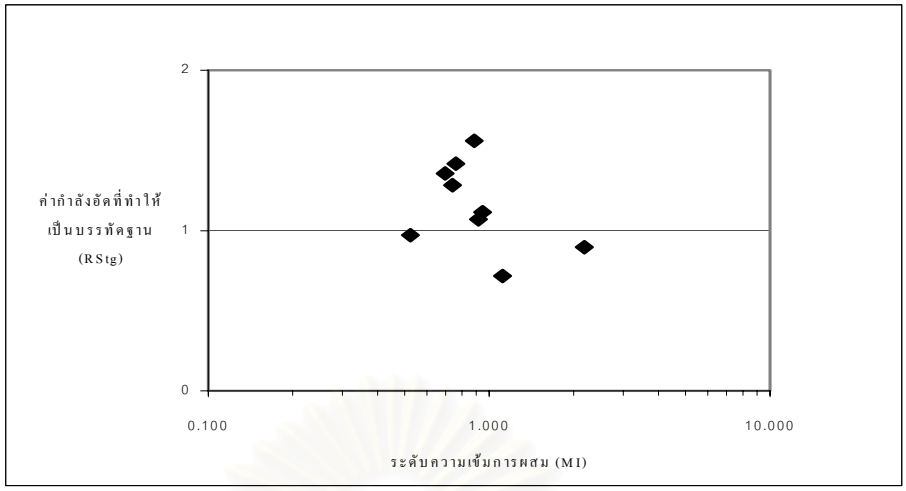
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ากำลังอัดที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ค, (คอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยและไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



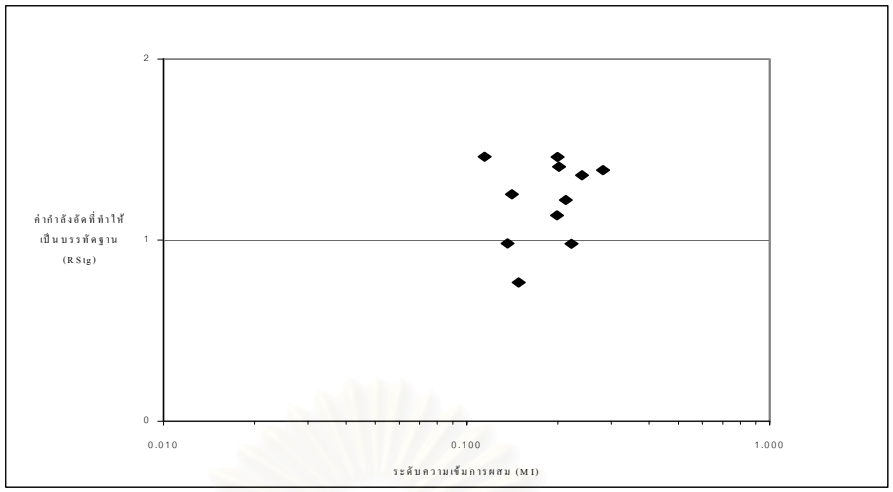
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ากำลังอัดที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ง, (คอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A&D)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

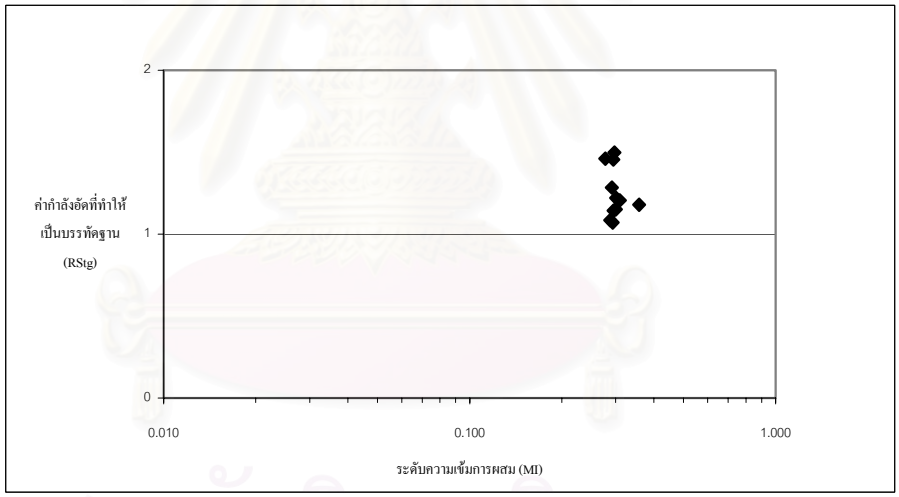


รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ากำลังอัดที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ฉ, (คอนกรีตใช้เถ้าลอยแต่ไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม)

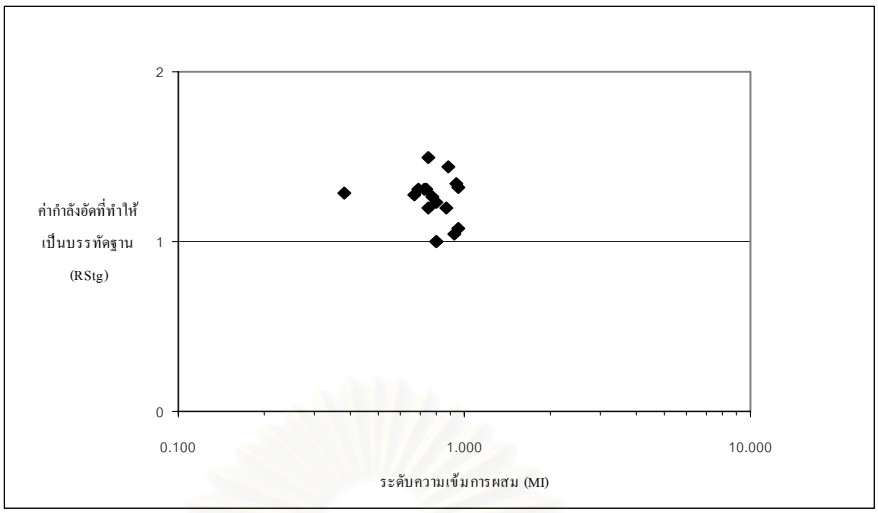
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



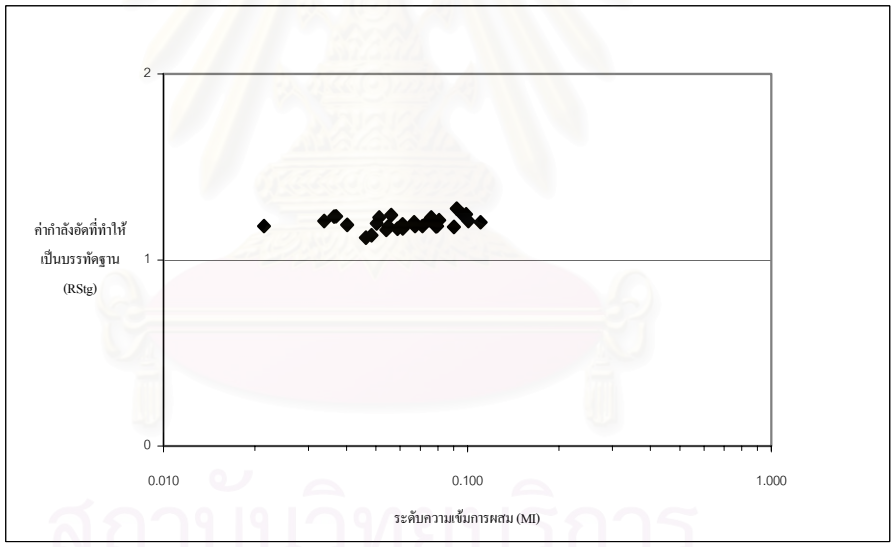
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ากำลังอัดที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ข, (คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A)



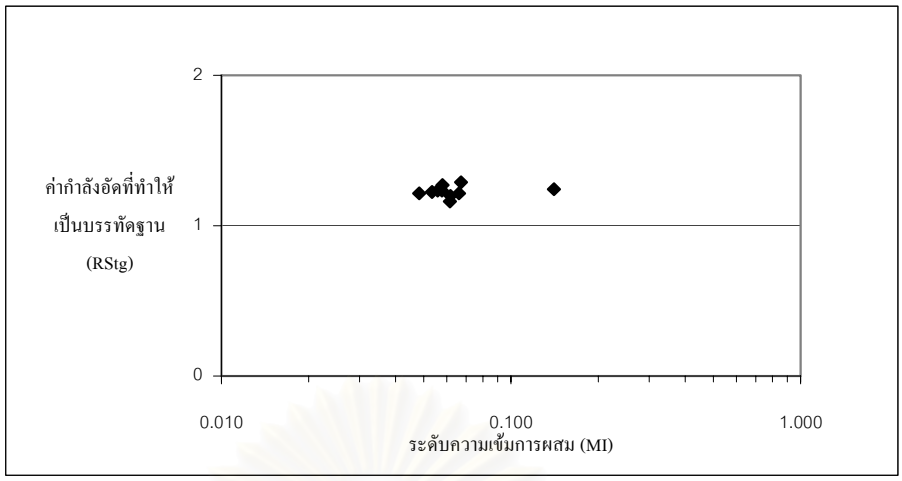
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ากำลังอัดที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ง, (คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A&D)



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ากำลังอัดที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ฉ, (คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท F)



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ากำลังอัดที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ช, (คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท A&D)



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ากำลังอัดที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน โรงงาน ช, (คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่มประเภท D)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ผลของระดับความเข้มการผสมที่มีต่อคุณสมบัติด้านค่ายุบตัวของคอนกรีต

จากการศึกษาผลของระดับความเข้มการผสมที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตที่ได้จาก โรงงานผสมคอนกรีต พบว่าระดับความเข้มการผสมที่เปลี่ยนแปลงไปส่งผลให้คุณสมบัติด้าน ค่ายุบตัวของคอนกรีตเปลี่ยนแปลง โดยสามารถระบุระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมได้ โดยนิยามว่าเป็นระดับความเข้มการผสมที่ทำให้ได้คอนกรีตที่มีค่ายุบตัวสูงที่สุดสำหรับคอนกรีตที่มีสัดส่วนผสมเดียวกัน โดยสามารถพิจารณาจำแนกตามส่วนผสมของคอนกรีตได้ดังนี้

5.1.1.1 คอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยและไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม (คอนกรีตธรรมดา)

จากการศึกษาพบว่าระดับความเข้มการผสมที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้คุณสมบัติด้านค่ายุบตัวของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงและมีค่าความแปรปรวนสูงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากระดับความเข้มการผสมมีผลอย่างชัดเจนต่อคุณสมบัติของคอนกรีตธรรมดา

5.1.1.2 คอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม

สำหรับคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยนั้น พบว่าระดับความเข้มการผสมที่เปลี่ยนแปลงยังคงมีผลอย่างชัดเจนต่อคุณสมบัติของคอนกรีต

5.1.1.3 คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแต่ไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม

ในการวิจัยครั้งนี้พบว่า โรงงานโดยส่วนใหญ่มักไม่ผสมคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแต่ไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่มเพราะมักจะใช้ส่วนผสมทั้งสองควบคู่กัน หรืออย่างน้อยก็ใช้น้ำยาผสมเพิ่มเป็นส่วนผสมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต อย่างไรก็ตามพบว่ามีโรงงานหนึ่งซึ่งผสมคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแต่ไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม แต่เนื่องจากคอนกรีตที่ได้จากโรงงานนี้ได้รับการออกแบบให้มีค่ายุบตัวเป็นศูนย์ ทำให้ไม่สามารถระบุระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมได้ อย่างไรก็ตามพบว่าคอนกรีตที่ได้มีกำลังอัดสูงกว่าที่ออกแบบและเป็นที่ยอมรับได้ของผู้ผลิต

5.1.1.4 คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม

คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและน้ำยาผสมเพิ่ม เป็นคอนกรีตที่เห็นได้อย่างชัดเจนว่าระดับความเข้มการผสมที่เปลี่ยนแปลงมีผลต่อคุณสมบัติด้านค่ายุบตัวของคอนกรีตสดน้อยลงมาก เพราะจะเห็นได้จากเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มการผสมกับค่ายุบตัวที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานจะมีลักษณะค่อนข้างราบ มีความโค้งน้อยจนแทบไม่สามารถระบุได้ว่าระดับความเข้มการผสมมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตอย่างไร

5.1.2 ผลการเปรียบเทียบค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมกับระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่วัดได้จากโรงงาน

จากการศึกษาพบว่า ค่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่วัดได้จากโรงงานผสมมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับค่าทำนาย โดยมีบางโรงงานและคอนกรีตบางสัดส่วนผสมที่วัดค่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมได้ต่ำกว่าค่าทำนาย รวมทั้งมีบางส่วนวัดค่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมได้สูงกว่าค่าทำนาย ซึ่งพบว่าชนิดเครื่องผสม ความจุมากที่สุดของเครื่องผสม ปริมาณการผสมและลำดับการใส่ส่วนผสมที่ต่างกันส่งผลให้ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมจริงที่วัดได้มีค่าแตกต่างกับค่าทำนายอย่างเห็นได้ชัด โดยตารางที่ 5.1 และรูปที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมกับค่าที่วัดได้จากโรงงาน โดยพบว่าค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่ได้แนวคิดจากการศึกษาของบุญไชย(16) และนิพนธ์(17) สามารถใช้ได้ดีกับคอนกรีตที่ผสมโดยเครื่องผสมแบบ Force Type Mixer ที่มีลักษณะเป็น Pan Type และมีลำดับการใส่ส่วนผสมโดยผสมซีเมนต์แห้งก่อนเติมน้ำหรือเทส่วนผสมทั้งหมดลงพร้อม ๆ กัน

พิจารณาคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยหรือน้ำยาผสมเพิ่มนั้น ค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่ได้จากแนวคิดของการศึกษาข้างต้น ยังไม่สามารถทำนายได้อย่างชัดเจน เพราะจะต้องคำนึงถึงผลของชนิดเครื่องผสม และลำดับการใส่ส่วนผสมเป็นสำคัญ

5.1.3 คุณสมบัติของคอนกรีตที่ได้จากโรงงานผสมคอนกรีตในปัจจุบัน

จากการศึกษาพบว่า แม้คอนกรีตที่ได้จะได้รับการผสมด้วยระดับความเข้กมการผสมที่มากน้อยอย่างไร คุณสมบัติของคอกนรีตด้านค่ายุบตัวที่ได้นั้น เป็นที่ยอมรับได้ของผู้ผลิตและลูกค้า แต่เป็นที่สังเกตได้ว่า ในบางกรณีคอนกรีตได้รับการผสมด้วยระดับความเข้มการผสมที่มากกว่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม ทั้งที่คุณสมบัติของคอนกรีตด้านค่ายุบตัวไม่ได้เปลี่ยนแปลงเท่าใดนัก จึงก่อให้เกิดข้อน่าสังเกตว่าคอนกรีตนั้นได้รับพลังงานผสมที่มากเกินกว่าความต้องการหรือไม่หรือคุณสมบัติด้านอื่น ๆ ของคอนกรีตเหล่านั้นดีขึ้นมากน้อยเพียงใด ได้แก่ คุณสมบัติด้านกำลังอัดของคอนกรีตซึ่งในการวิจัยครั้งนี้พบว่าระดับความเข้มการผสมแทบไม่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตเลย ซึ่งอาจเป็นเพราะการออกแบบส่วนผสมซึ่งเผื่อค่ากำลังอัดไว้มากจนอาจเป็นการสิ้นเปลือง ในกรณีนี้ควรได้รับการศึกษาเพิ่มเติมอย่างต่อเนื่อง เพื่อเป็นการพัฒนาการควบคุมคุณภาพของคอนกรีตให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยมีความสิ้นเปลืองน้อยที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ระดับความเข้มการผสมมีผลต่อค่ายุบตัวของคอนกรีตสด โดยพบว่าคอนกรีตที่มีสัดส่วนผสมหนึ่ง ๆ นั้นจะสามารถระบุระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมได้ ซึ่งค่าระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมนี้ ควรจะนำมาเป็นตัวกำหนดว่าคอนกรีตได้รับการผสมเพียงพอหรือไม่ แทนการใช้เวลาในการผสมเป็นตัวกำหนดในปัจจุบัน เพื่อเป็นการลดค่าความแปรปรวนของคุณสมบัติ

ของคอนกรีต ซึ่งนำไปสู่การลดค่าส่วนเผื่อกำลังอัด และการออกแบบส่วนผสมที่เหมาะสมต่อการใช้งานและประหยัดในแง่ของปริมาณวัสดุผสม

5.2.2 ชนิดเครื่องผสม ลำดับการใส่ส่วนผสม และปริมาณการผสม มีผลต่อพลังงานผสม ดังนั้นจึงเป็นตัวกำหนดเวลาในการผสมเพื่อให้ได้ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม แต่เนื่องจากยังไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจนว่าชนิดเครื่องผสม ลำดับการใส่ส่วนผสม และปริมาณการผสมมีผลต่อระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมอย่างไร จึงควรทำการศึกษาต่อไปเนื่องจากการผสมคอนกรีตเพื่อให้ได้ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม จะต้องคำนึงถึงเวลาที่ใช้ในการผสมและพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการผลิต เพราะเป็นปัจจัยหนึ่งในการควบคุมต้นทุนการผลิตคอนกรีต

5.2.3 การใช้เถ้าลอยและน้ำยาผสมเพิ่มทำให้ระดับความเข้มการผสมลดลง รวมทั้งระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมก็ลดลงด้วย ดังนั้นการใช้เถ้าลอยและน้ำยาผสมเพิ่มจึงไม่เพียงช่วยพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีต แต่ยังช่วยให้เป็นการประหยัดในแง่พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผสมด้วย นอกจากนี้ ผลของเถ้าลอยและน้ำยาผสมเพิ่มอื่น ๆ นอกเหนือจากสารลดน้ำอย่างมากควรได้รับการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อให้สามารถนำมาทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมได้อย่างแม่นยำและน่าเชื่อถือมากขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.1 สรุปผลระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีต

โรงงาน	Mix no.	ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม		ค่ายุบตัว (ซม.)		กำลังอัดออกแบบ (กก/ซม.^{2})	ค่าเฉลี่ยกำลังอัดที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน	ประเภทคอนกรีต
		ทำนาย	วัดจากโรงงาน	ออกแบบ	Slm_{max}			
ค	1	0.903	0.200	5 - 8	12.5	350	0.999	A
ง	1	0.330	0.336	7.5 - 12.5	7.5	180	1.062	B
ง	2	0.479	หาค่าไม่ได้	7.5 - 12.5	หาค่าไม่ได้	280	1.215	B
ง	4	0.453	หาค่าไม่ได้	7.5 - 12.5	หาค่าไม่ได้	240	1.312	B
ง	5	0.373	หาค่าไม่ได้	7.5 - 12.5	หาค่าไม่ได้	210	1.092	B
จ	3	0.459	0.295	5 - 10	14.0	210	NA	B
ช	1	0.799	0.219	5 - 10	10.0	450	NA	B
ฉ	1	0.319	หาค่าไม่ได้	NA	NA	350	0.909	C
ฉ	2	0.355	หาค่าไม่ได้	NA	NA	250	1.404	C
ฉ	3	0.355	หาค่าไม่ได้	NA	NA	500	1.092	C
ก	5	0.221	0.226	7.5 - 12.5	14.5	280	NA	D
ก	6	0.264	0.048	17.5 - 22.5	20.0	280	NA	D
ข	1	0.118	หาค่าไม่ได้	5 - 10	หาค่าไม่ได้	180	1.358	D
ข	2	0.129	หาค่าไม่ได้	5 - 10	หาค่าไม่ได้	210	1.387	D
ข	3	0.118	หาค่าไม่ได้	5 - 10	หาค่าไม่ได้	240	1.273	D
ข	4	0.132	หาค่าไม่ได้	5 - 10	หาค่าไม่ได้	280	1.432	D
ข	5	0.121	หาค่าไม่ได้	10 - 15	หาค่าไม่ได้	320	1.117	D
ข	6	0.143	หาค่าไม่ได้	10 - 15	หาค่าไม่ได้	350	0.766	D
ง	6	0.122	หาค่าไม่ได้	7.5 - 12.5	หาค่าไม่ได้	210	1.240	D
ง	7	0.152	หาค่าไม่ได้	7.5 - 12.5	หาค่าไม่ได้	240	1.285	D
ง	8	0.131	หาค่าไม่ได้	7.5 - 12.5	หาค่าไม่ได้	180	1.460	D
ง	9	0.197	หาค่าไม่ได้	7.5 - 12.5	หาค่าไม่ได้	280	1.148	D
ง	10	0.219	หาค่าไม่ได้	7.5 - 12.5	หาค่าไม่ได้	320	1.214	D
จ	5	0.221	0.200	7.5 - 12.5	12.5	240	NA	D
จ	13	0.232	0.191	7.5 - 12.5	16.0	240	NA	D

หมายเหตุ A = คอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยและไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม B = คอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม

C = คอนกรีตใช้เถ้าลอยแต่ไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม D = คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม

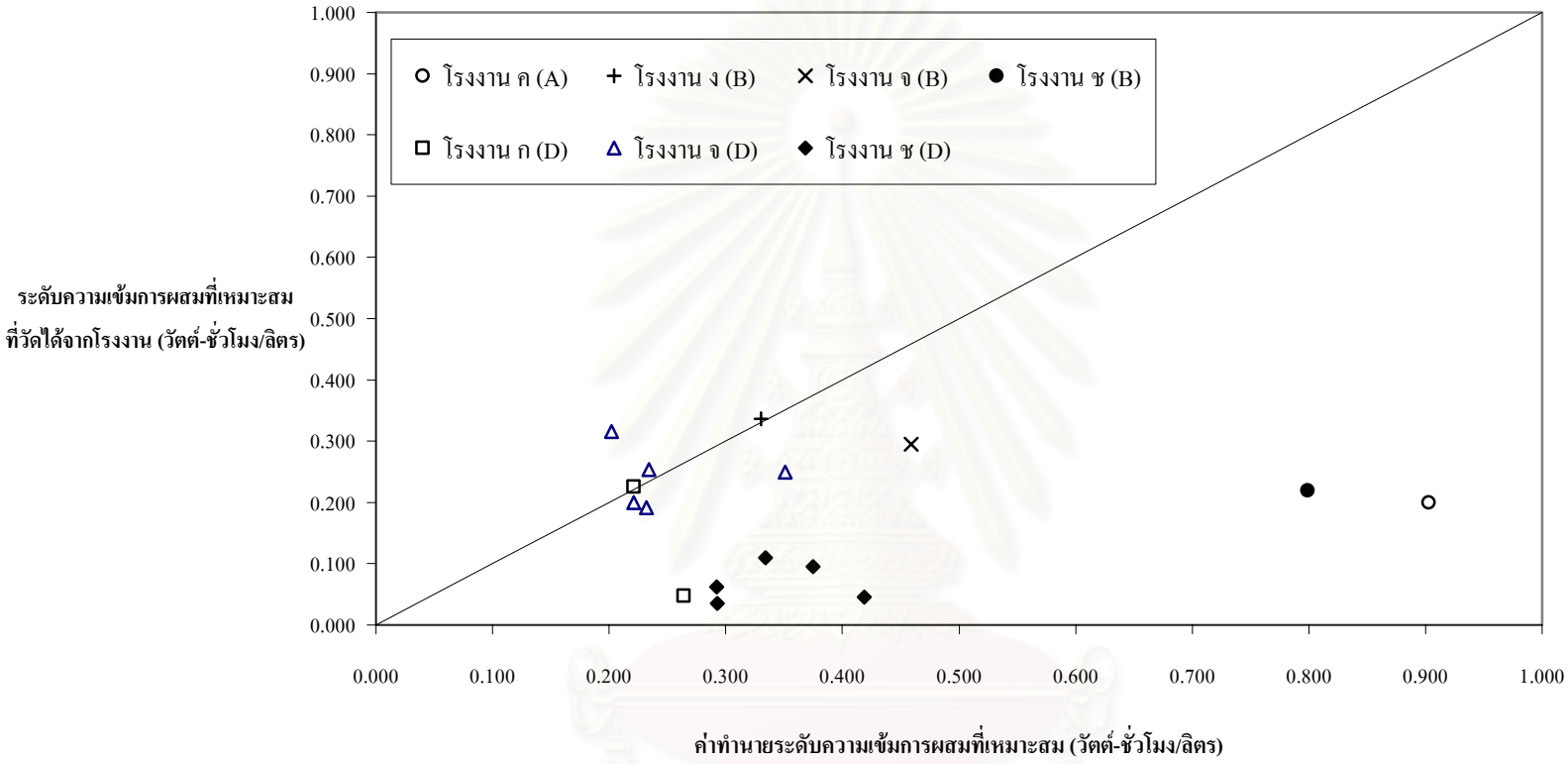
ตารางที่ 5.1 สรุปผลระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีต (ต่อ)

โรงงาน	Mix no.	ระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสม		ค่ายุบตัว (ซม.)		กำลังอัดออกแบบ (กก/ซม.^{2})	ค่าเฉลี่ยกำลังอัดที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน	ประเภทคอนกรีต
		ทำนาย	วัดจากโรงงาน	ออกแบบ	Slm_{max}			
จ	6	0.202	0.316	5 - 10	10.0	240	NA	D
จ	14	0.234	0.254	5 - 10	10.0	240	NA	D
จ	10	0.351	0.250	7.5 - 12.5	18.5	380	NA	D
ช	3	0.375	0.095	7.5 - 12.5	14.0	350	NA	D
ช	4	0.354	หาค่าไม่ได้	15 - 20	20.5	300	NA	D
ช	6	0.334	0.110	5 - 10	11.0	300	NA	D
ช	7	0.364	หาค่าไม่ได้	7.5 - 12.5	หาค่าไม่ได้	280	1.212	D
ช	8	0.292	0.062	5 - 10	12.5	280	1.193	D
ช	9	0.293	0.035	5 - 10	10.0	240	1.012	D
ช	11	0.284	หาค่าไม่ได้	7.5 - 12.5	หาค่าไม่ได้	210	1.205	D
ช	14	0.334	หาค่าไม่ได้	7.5 - 12.5	12.5	300	NA	D
ช	23	0.419	0.046	10 - 20	14.5	350	NA	D
ช	24	0.492	หาค่าไม่ได้	7.5 - 12.5	หาค่าไม่ได้	320	1.223	D

หมายเหตุ A = คอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยและไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม B = คอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม

C = คอนกรีตใช้เถ้าลอยแต่ไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม D = คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



หมายเหตุ A = คอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยและไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม B = คอนกรีตไม่ใช้เถ้าลอยแต่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม
C = คอนกรีตใช้เถ้าลอยแต่ไม่ใช้น้ำยาผสมเพิ่ม D = คอนกรีตใช้เถ้าลอยและใช้น้ำยาผสมเพิ่ม

รูปที่ 5.1 เปรียบเทียบค่าทำนายระดับความเข้มการผสมที่เหมาะสมกับค่าที่วัดได้จากโรงงานผสมคอนกรีต

รายการอ้างอิง

1. ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค, 2537.
2. Fitzpatrick, F.L., and Serkin, W. Effect of Mixing Sequence on the Properties of Concrete. Journal of ACI 21 (October 1949): 137-140.
3. Saeed Khalaf Rejeb. Improving Compressive Strength of concrete by a Two-Step Mixing Method. Cement and concrete Research 26 (1996): 585-592.
4. ASTM Designation: C94-96. Standard Specification for Ready-Mixed Concrete. ASTM 4.02 (April 1996): 42-51.
5. Elvery, R.H. Concrete Production. (n.p.): C.R. Books, 1963.
6. Fulton, F.S. Concrete Technology. (n.p.): The Portland Cement Institute, 1961.
7. H. H. Munger. Effect of order of Mixing on Concrete Strength. J.A.C.I. (Sept ember1948).
8. A.C.I. Standard (614-42). Recommended Practice for Measuring, Mixing and Placing Concrete. J.A.C.I. 16 (June 1945).
9. Waddell, Joseph J. Practical Quality Control for Concrete. (n.p.): McGraw-Hill Book Company, 1962.
10. Higuchi, Y. Coated-Sand Technique Produces High Strength Concrete. Concrete International 2 (April 1980): 75-76.
11. Tamimi, A.K. The Effect of Two Stage mixing Technique on the Properties and the Microstructure of the Concrete Structure. Doctoral Dissertation. Paisley College, 1989.
12. Farran, J. Exixtence d'une aureole de transition entre les granulats d'un mortier ou d/un beton et al pate de ciment hydrate. Consequences sur les proprietes mecaniques. Compte Rendu de l'Academie des sciences, Paris. 1972.
13. Pope, A.W. and Jennings, H.M. The Influence of Mixing on the Microstructure of the Cement Paste Aggregate Interfacial Zone and on the Strength of Mortar. Journal of Materials Science 27 (1992): 6452-6462.
14. P. Rougeron, A. Tagnit-Hamou and P. Laplante. Strength Development of Mortar and Concrete Prepared by the 'Sand Envelope with Cement' Method. Production Methods and Workability of Concrete, 35-44. London: E & FN Spon, 1996.

15. O. Peterson. Swedish Method to Measure Effectiveness of Concrete Mixers. Special Concretes : Workability and Mixing, 39-48. London: E & FN Spon, 1996.

16. Stitmannaithum, B. Effect of Mixing Intensity on Properties of Fresh Concrete Mixed by Pan Type Mixer. A dissertation submitted to the University of Tokyo. Japan, 1992.

17. นิพนธ์ พงษ์ลิมานนท์. ผลของสารลดน้ำอย่างมากต่อระดับความเข้มการผสมของซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้า. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ภาพแสดงโรงงานผสมคอนกรีต

รูปที่ ก1 โรงงาน ก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ก2 เครื่องผสมคอนกรีตของโรงงาน ก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ก3 (a) โรงงาน ข

รูปที่ ก3 (b) โรงงาน ข

รูปที่ ก4 เครื่องผสมคอนกรีตของโรงงาน ข

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ก5 โรงงาน ค

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ก6 (a) เครื่องผสมคอนกรีตของโรงงาน ค

รูปที่ ก6 (b) เครื่องผสมคอนกรีตของโรงงาน ค

รูปที่ ก7 (a) โรงงาน ง

รูปที่ ก7 (b) โรงงาน ง

รูปที่ ก8 (a) เครื่องผสมคอนกรีตของโรงงาน ง

รูปที่ ก8 (b) เครื่องผสมคอนกรีตของโรงงาน ง

รูปที่ ก9 โรงงาน จ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ก10 (a) เครื่องผสมคอนกรีตของโรงงาน จ

รูปที่ ก10 (b) เครื่องผสมคอนกรีตของโรงงาน จ

รูปที่ ก11 (a) โรงงาน ฉ

รูปที่ ก11 (b) โรงงาน ฉ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ก12 (a) เครื่องผสมคอนกรีตของโรงงาน ฉ

รูปที่ ก12 (b) เครื่องผสมคอนกรีตของโรงงาน ฉ

รูปที่ ก13 (a) โรงงาน ช

รูปที่ ก13 (b) โรงงาน ช

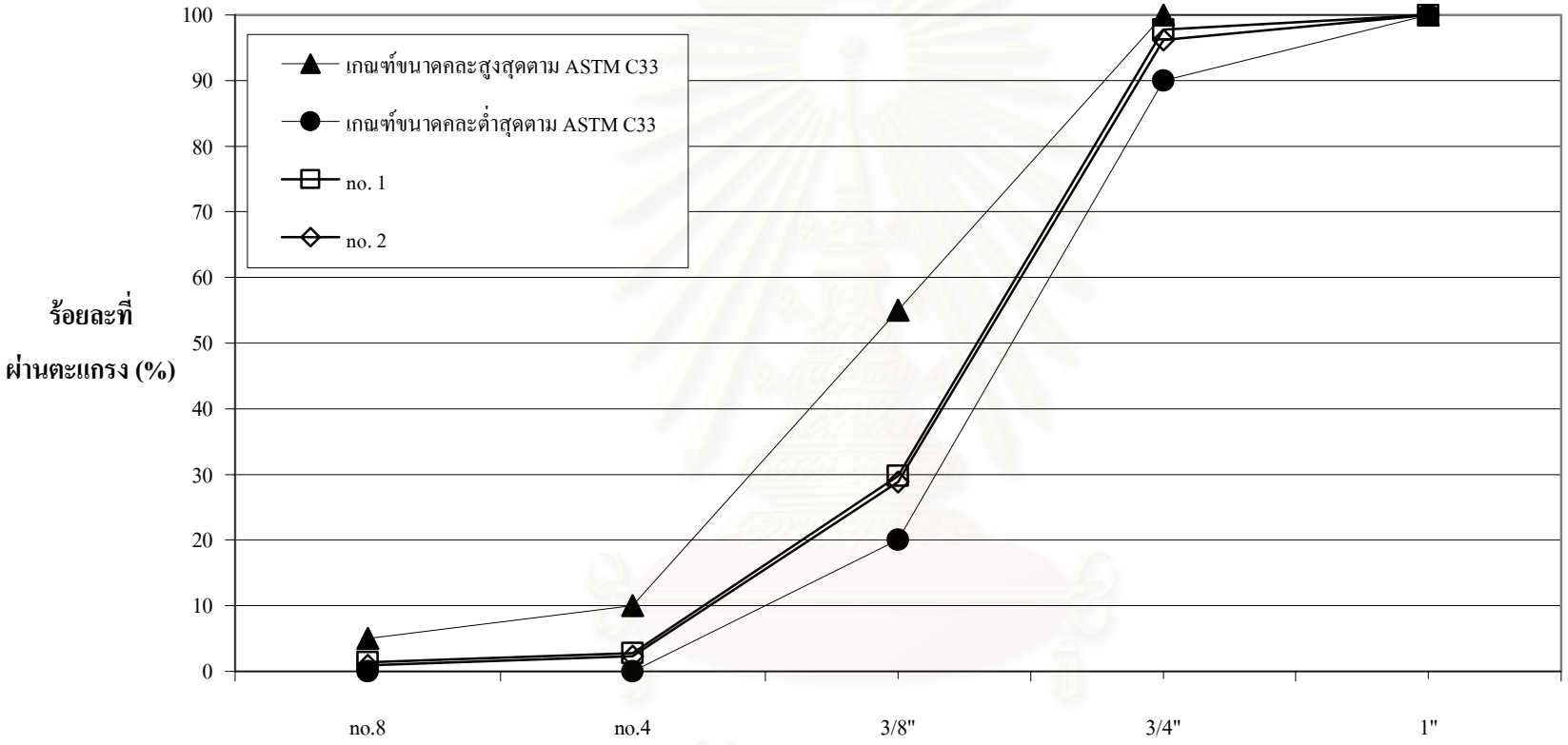
รูปที่ ก14 (a) เครื่องผสมคอนกรีตของโรงงาน ช

รูปที่ ก14 (b) เครื่องผสมคอนกรีตของโรงงาน ช

ภาคผนวก ข

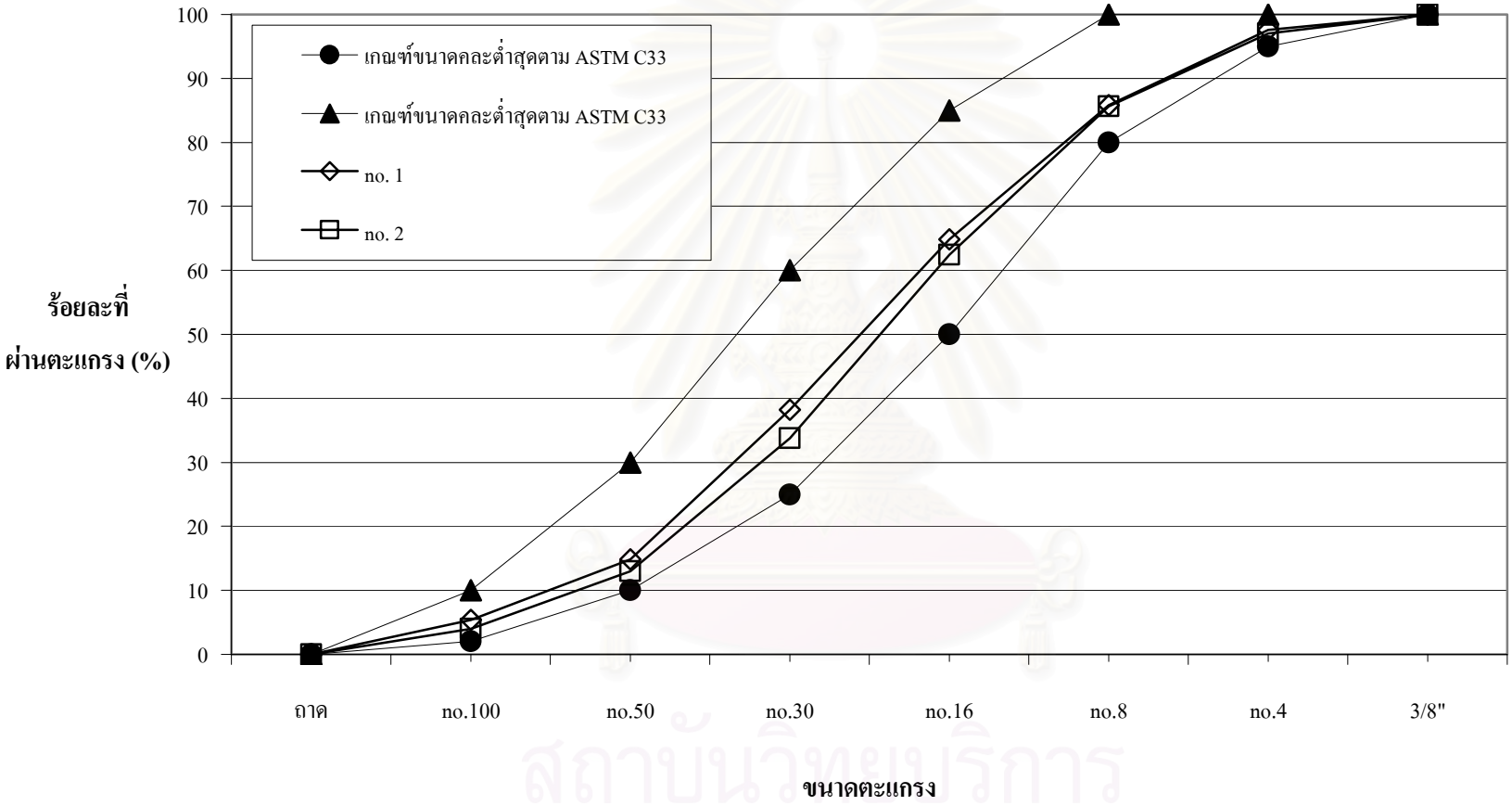
รูปแสดงขนาดคละของมวลรวม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



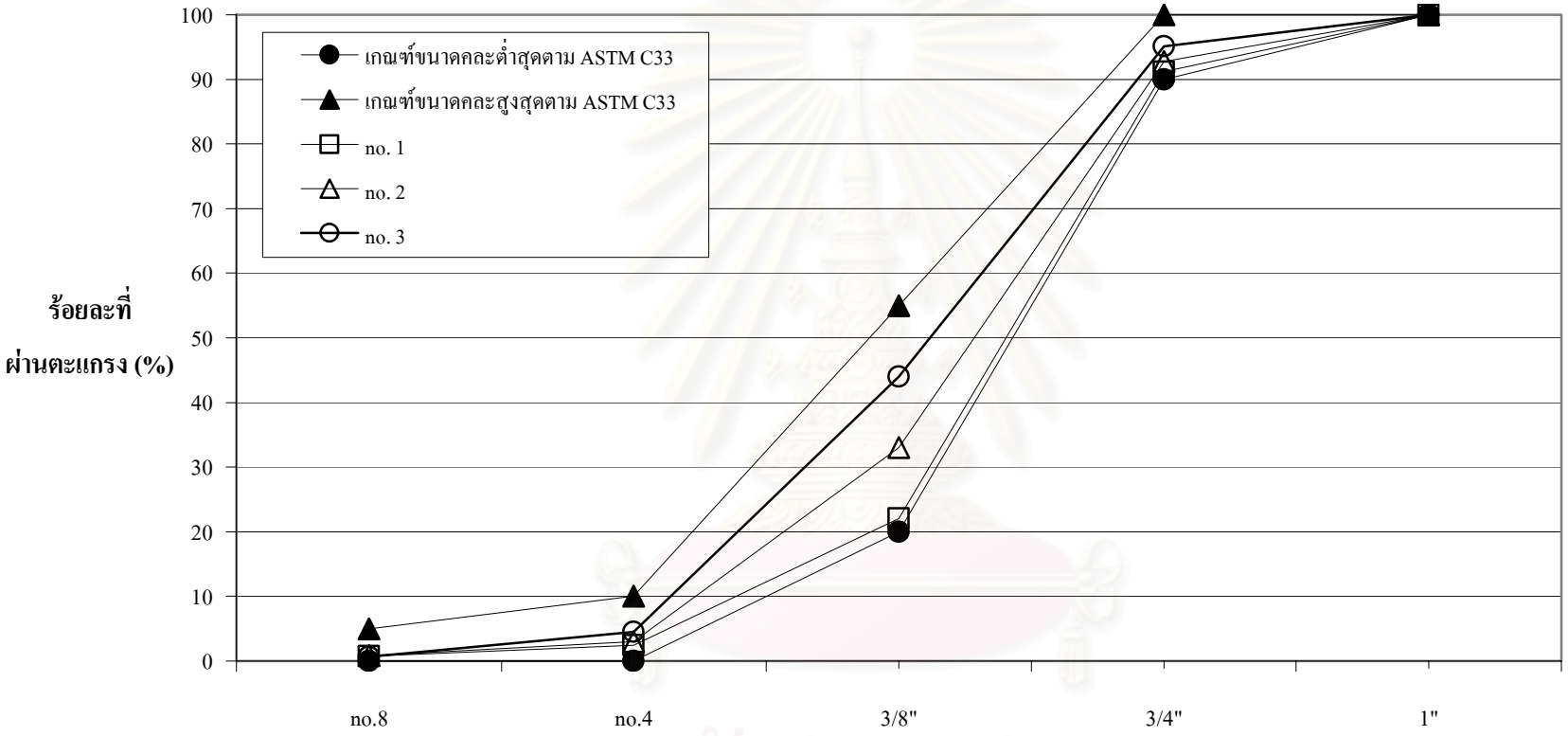
รูปที่ ข.1 สัดส่วนขนาดคละของหิน โรงงาน ก และ จ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



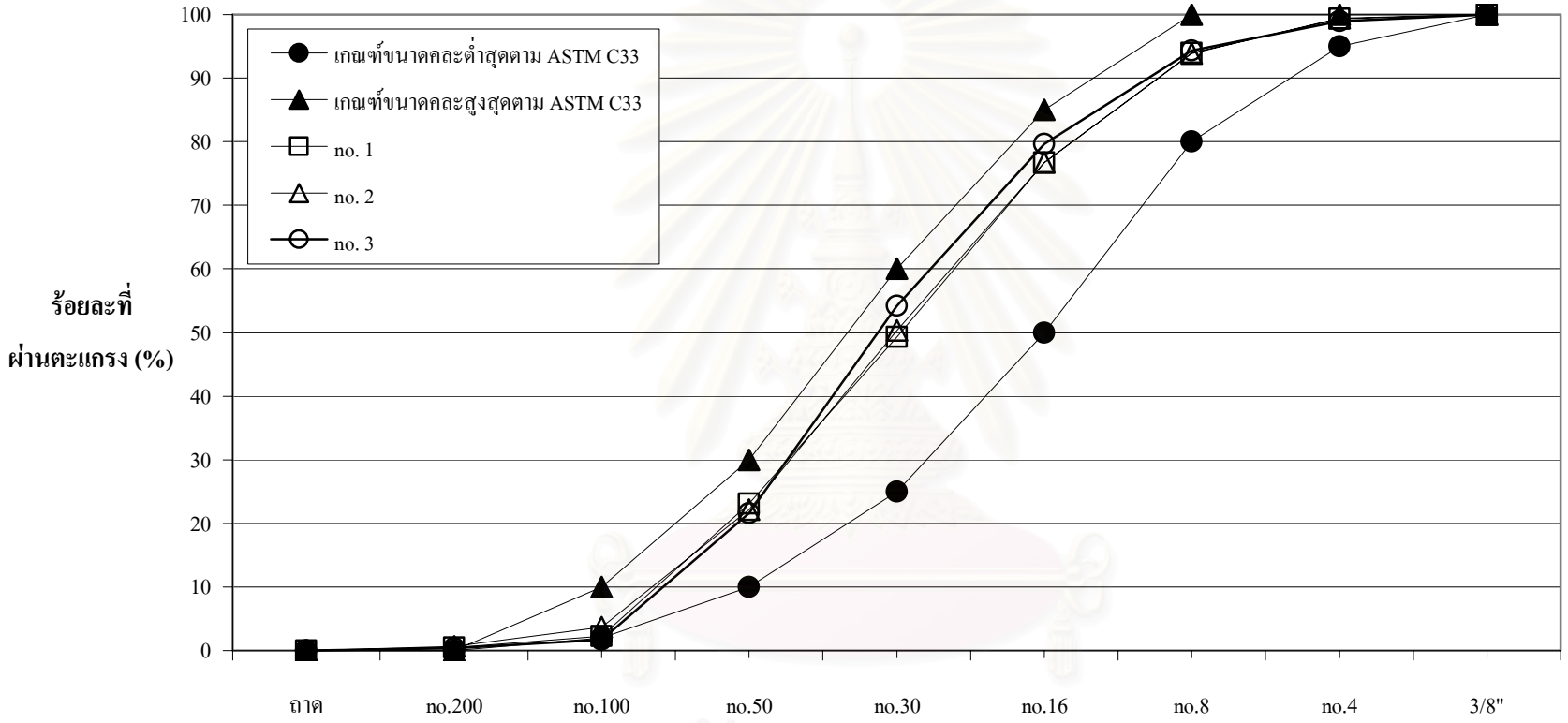
รูปที่ ข.2 สัดส่วนขนาดคละของทราย โรงงาน ก และ จ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



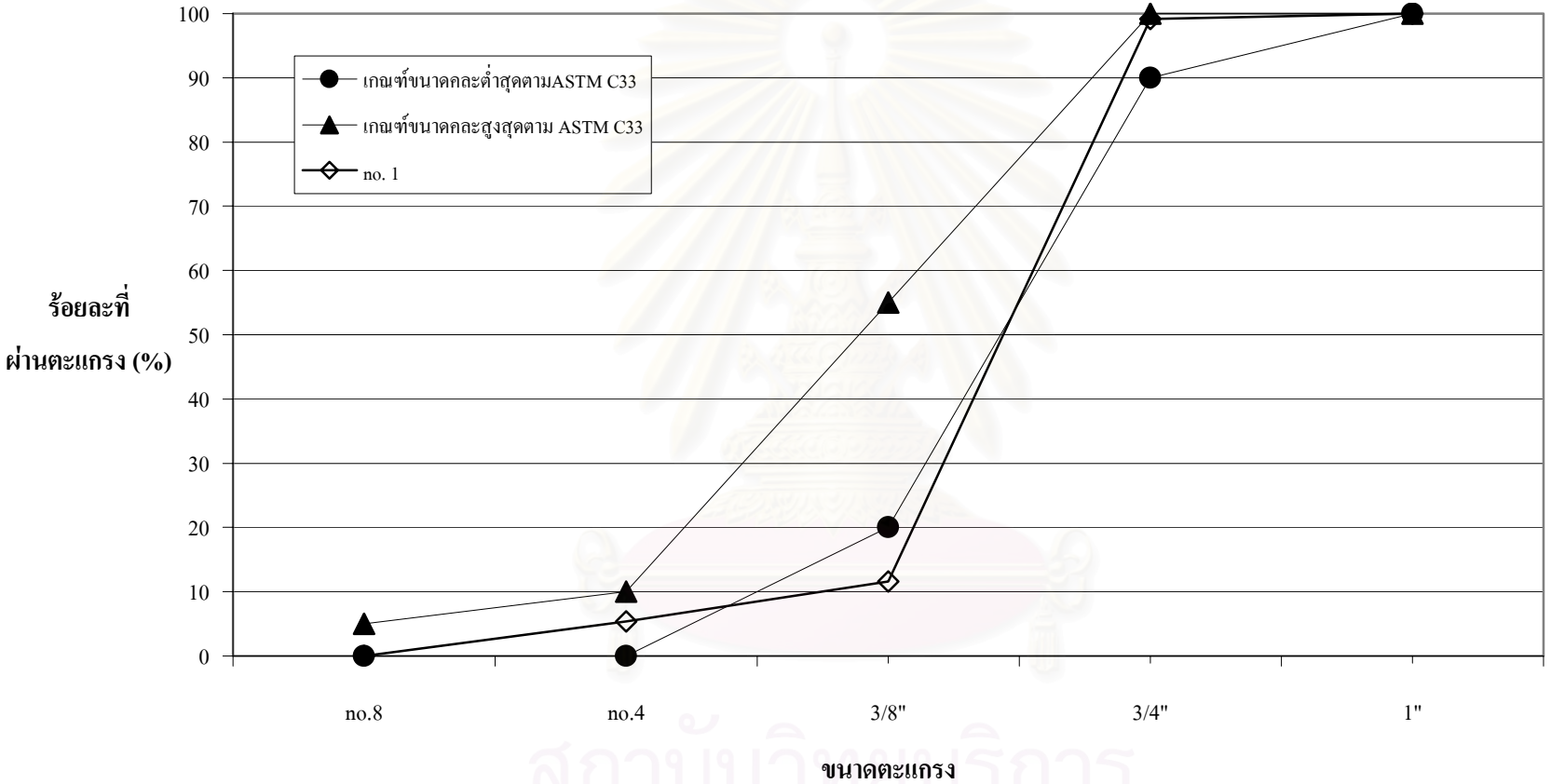
รูปที่ ข.3 สัดส่วนขนาดคละของหิน โรงงาน ข

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



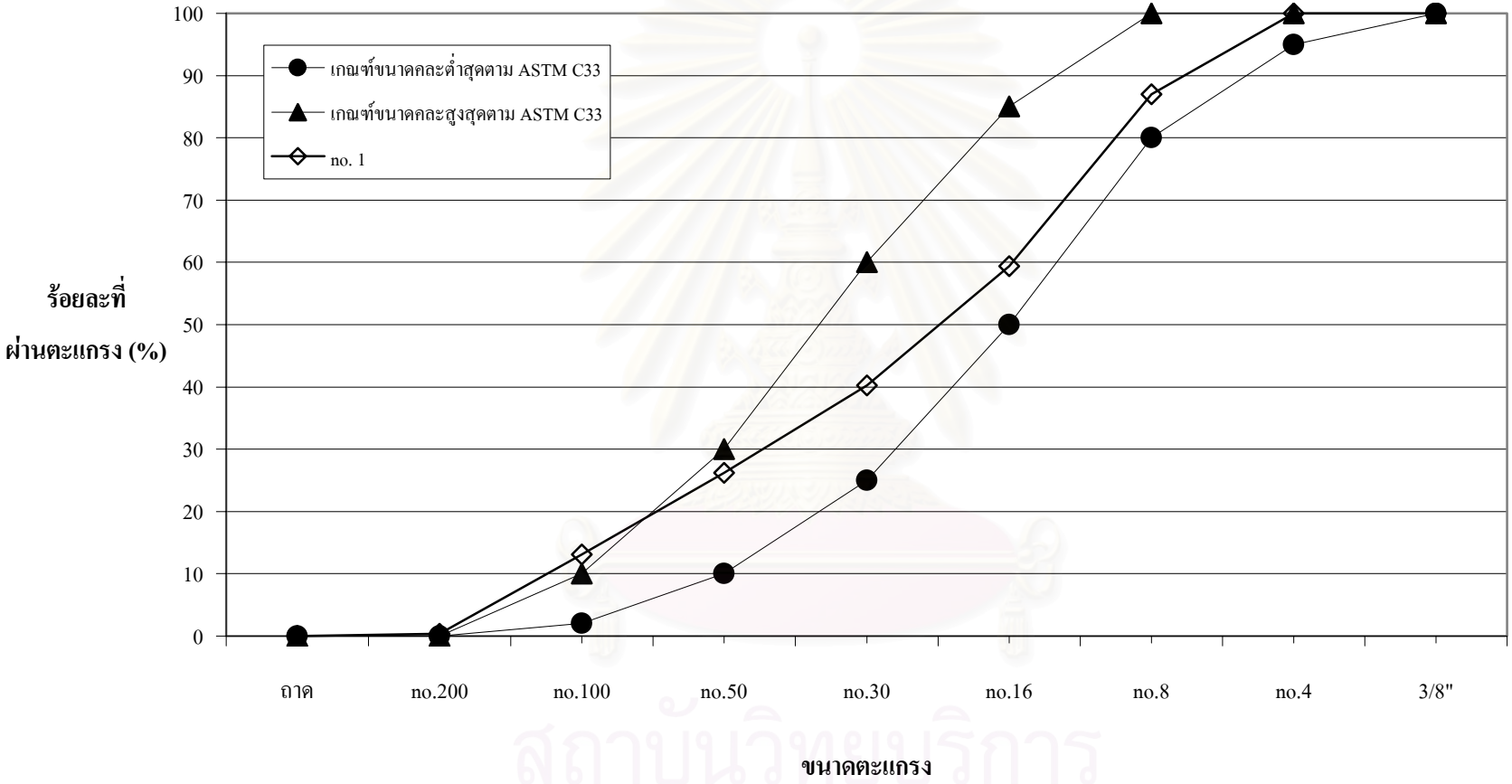
รูปที่ ข.4 สัดส่วนขนาดคละของทราย โรงงาน ข

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



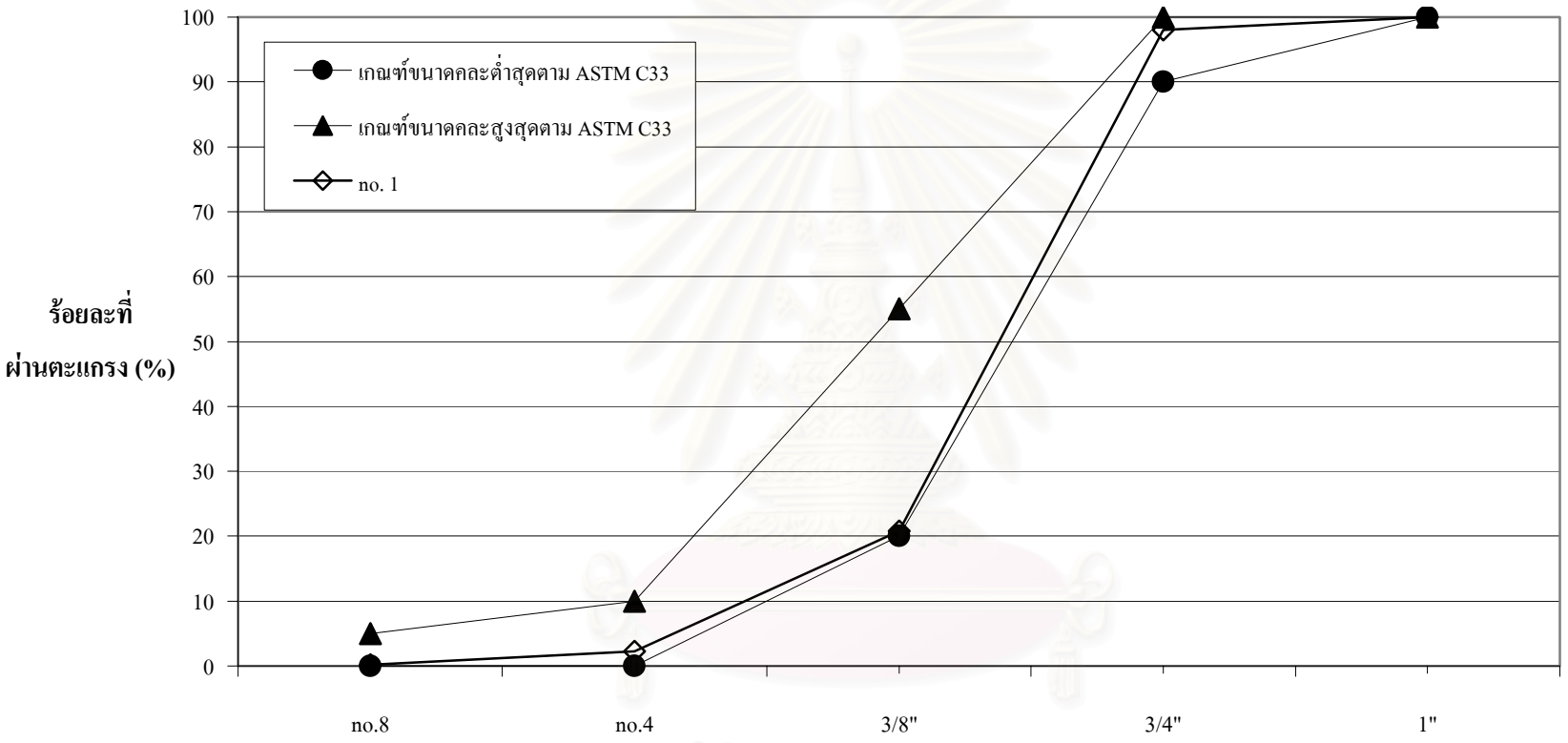
รูปที่ ข.5 สัดส่วนขนาดคละของหิน โรงงาน ค

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



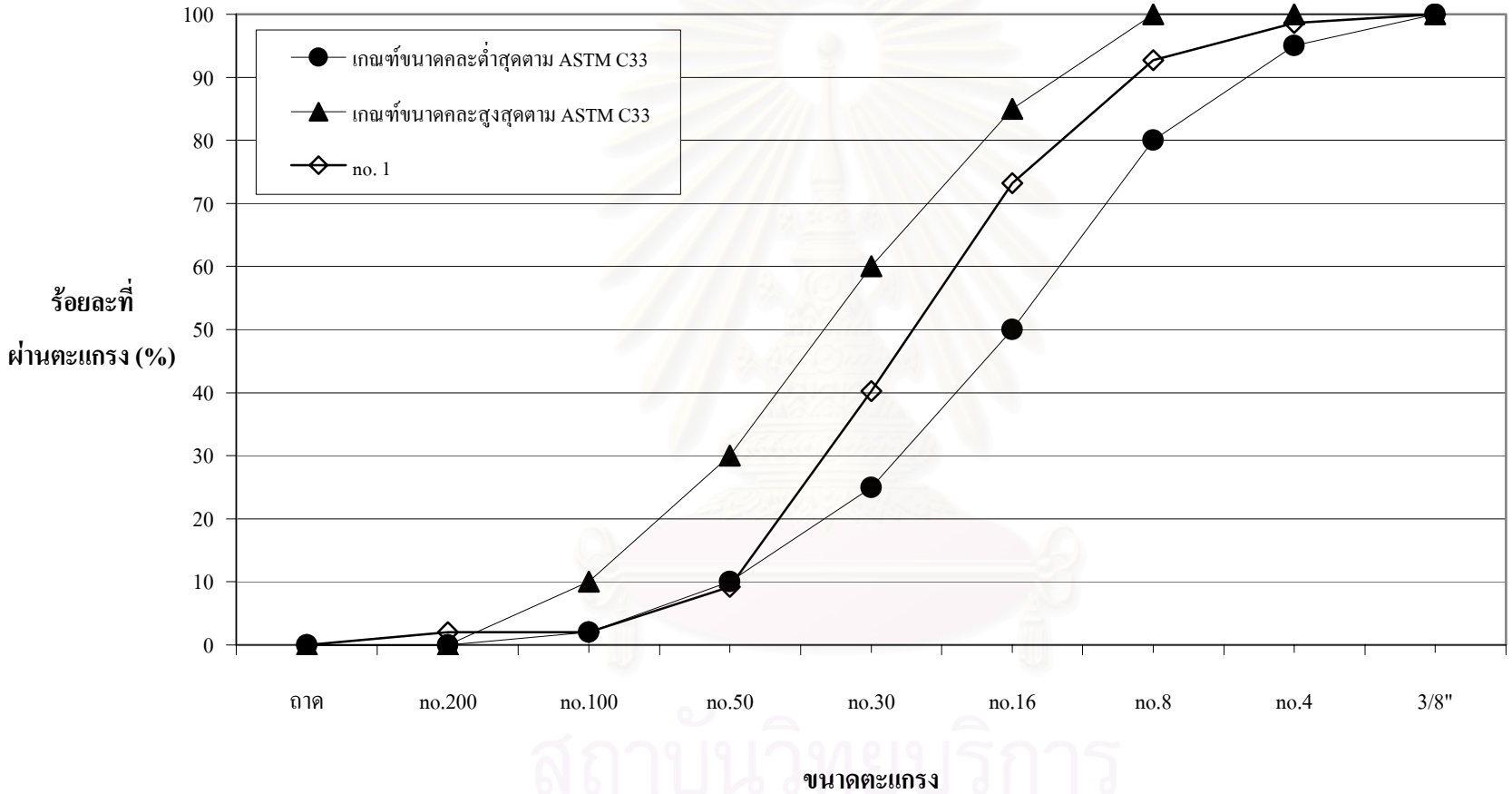
รูปที่ ข.6 สัดส่วนขนาดคละของทราย โรงงาน ค

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



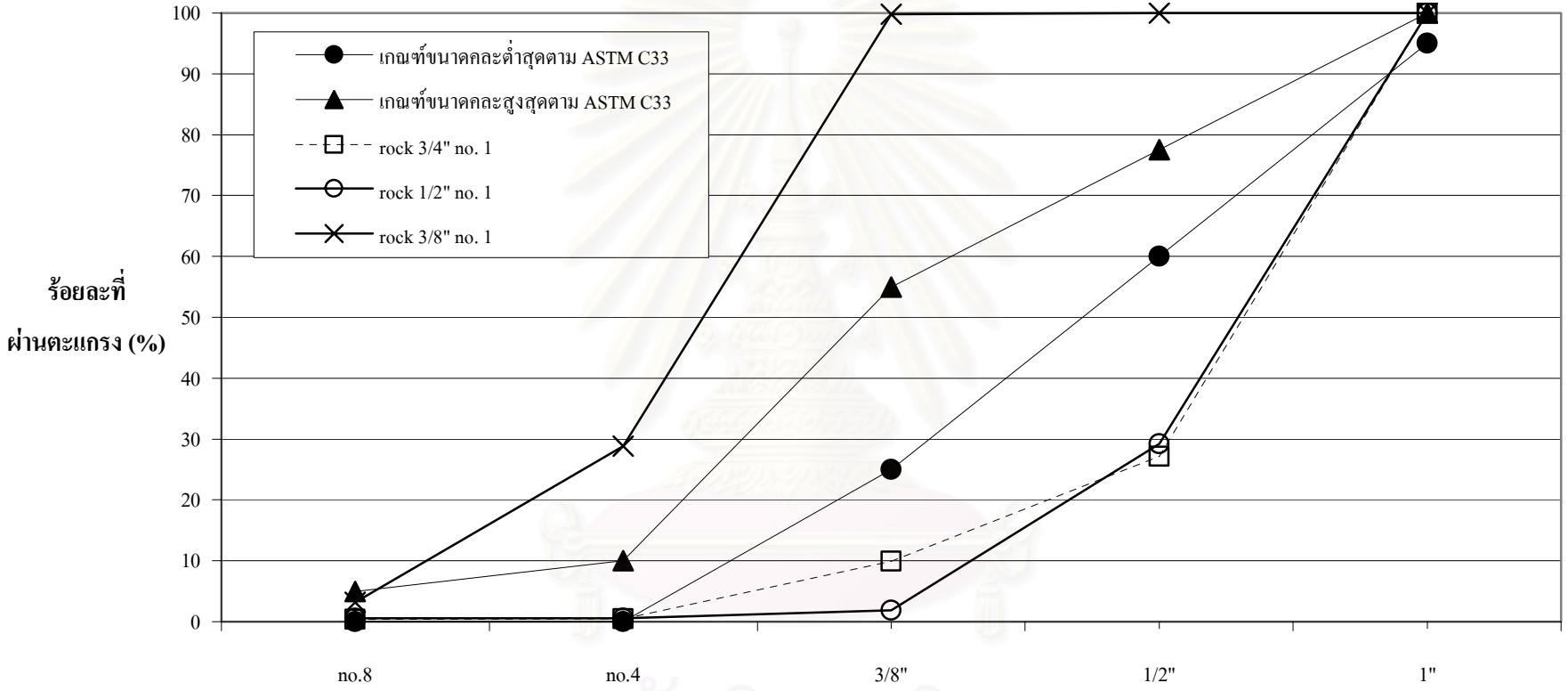
รูปที่ ข.7 สัดส่วนขนาดคละของหิน โรงงาน ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



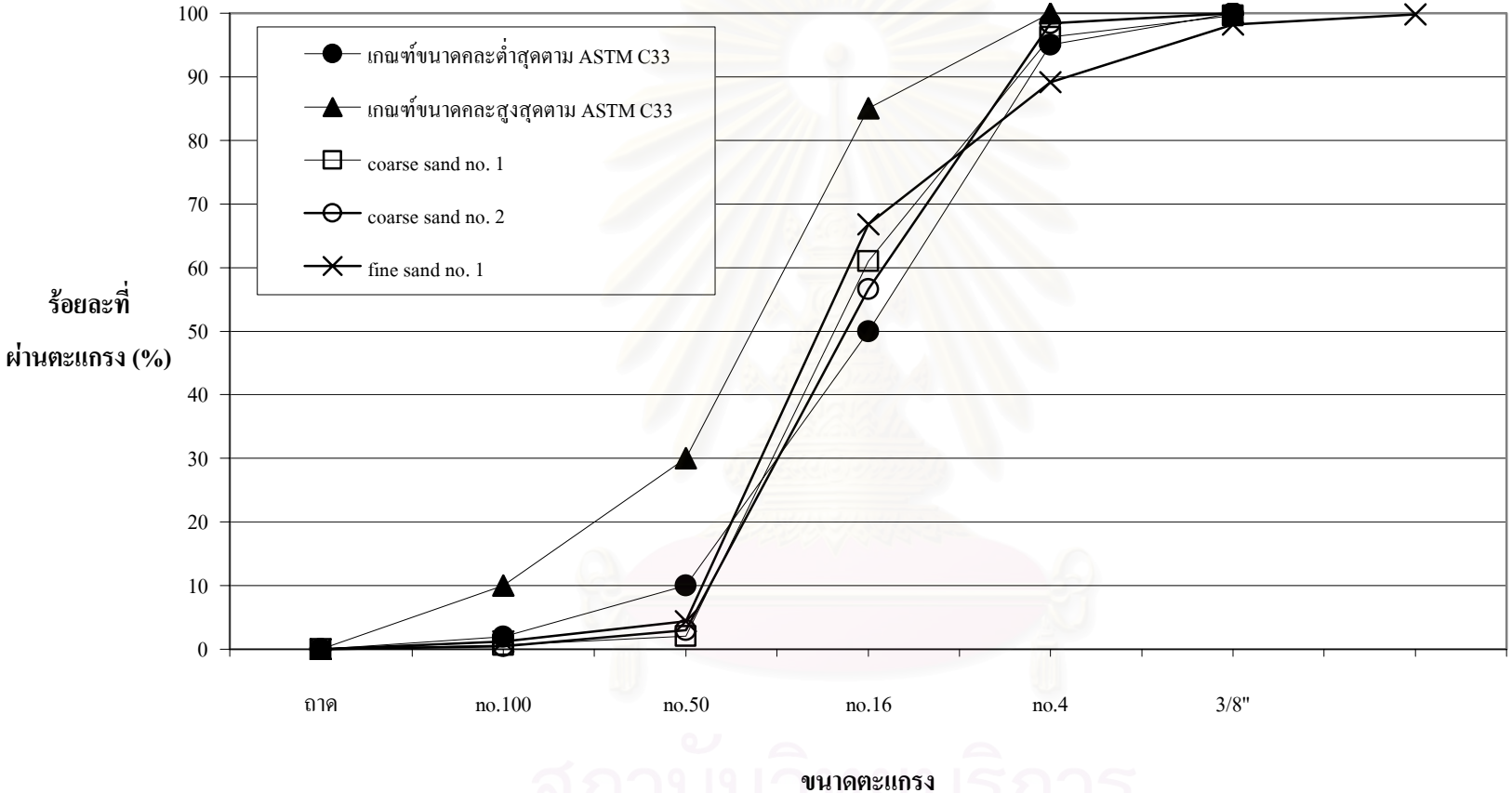
รูปที่ ข.8 สัดส่วนขนาดคละของทราย โรงงาน ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



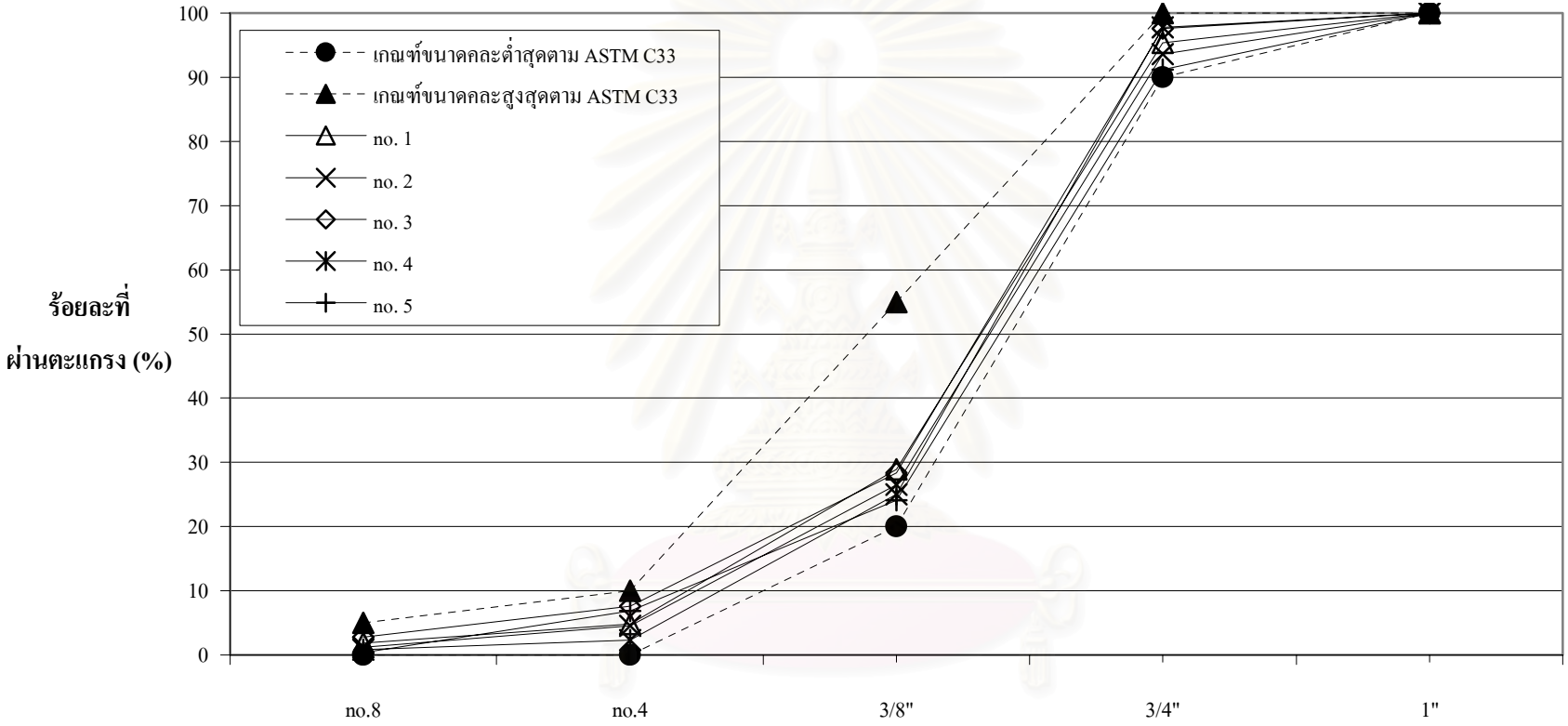
รูปที่ ข.9 สัดส่วนขนาดคละของหิน โรงงาน ฉ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



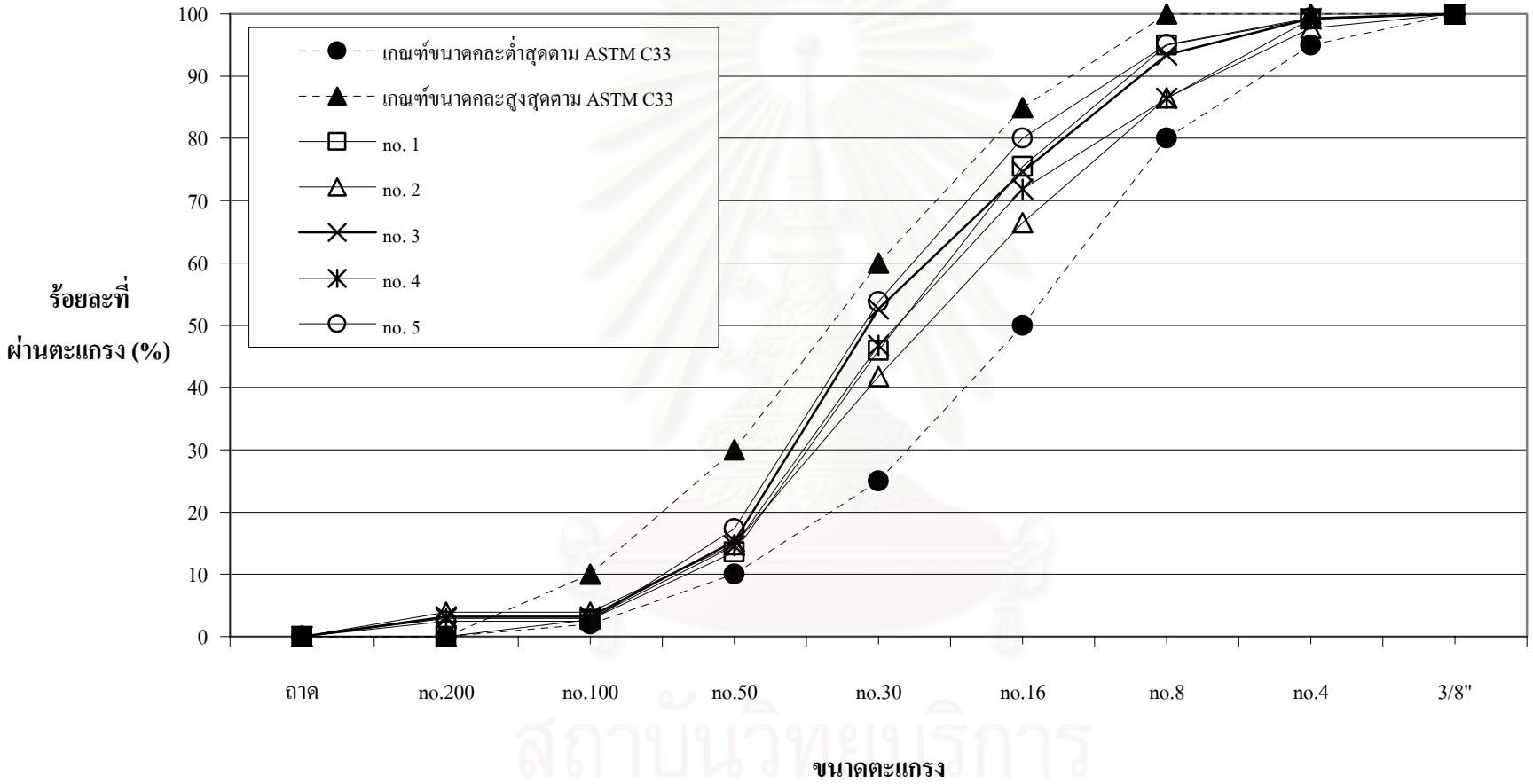
รูปที่ ข.10 สัดส่วนขนาดคละของทราย โรงงาน ฉ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.11 สัดส่วนขนาดคละของหิน โรงงาน ช

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.12 สัดส่วนขนาดคละของทราย โรงงาน ช

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสุดารัตน์ ปีนะภา เกิดเมื่อวันที่ 25 มีนาคม พ.ศ.2519 ที่จังหวัดบุรีรัมย์ ได้รับการศึกษาในชั้นประถมศึกษาที่ โรงเรียนชุมชนบ้านบัวและโรงเรียนเสนศิริอนุสรณ์ ชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนบุรีรัมย์พิทยาคม สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีการศึกษา 2539 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ในปีการศึกษา 2541

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย