

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

“ข้อเสนอปรับปรุงวิธีการออกแบบส่วนผสมของเอซีไอสำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอย
กับสารลดน้ำอย่างแรง ที่มีการยุบตัวเป็นศูนย์”

“A Proposed Modified ACI Mix Design Method for No-Slump Fly Ash Concrete
with Superplasticizer”

คณะผู้วิจัย

1. รศ.ดร.เกษญา เกษมเศรษฐ์
2. นายวุฒิพงษ์ จันทรร

สังกัด

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ชุดโครงการ

“วิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม ปี 2547”

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

สนับสนุนโดยงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.)

และบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. และ บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบุคลากรและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องที่ทำให้งานวิจัยนี้สามารถทำได้สำเร็จ
ดูล่วงได้ด้วยดี โดยงานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
และบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ภายใต้โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว.
ประจำปี 2547 และขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, บริษัทชีก้า (ประเทศไทย)
จำกัด และ บริษัทพิบูลย์คอนกรีต ที่อนุเคราะห์เกล้าลอยและสารลดน้ำอย่างแรงที่ใช้ในงานวิจัย
นอกจากนี้ผู้วิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และ
เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ คณะวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกใน
การทดลองตลอดจนจบการวิจัย และหวังว่างานวิจัยนี้สามารถนำมาให้เป็นแนวทางสำหรับการ
ออกแบบคอนกรีตผสมเกล้าลอยที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ กรณีใช้ร่วมกับสารลดน้ำอย่างแรง ต่อไป

รศ.ดร. เจษฎา เกษมเศรษฐ์
นาย วุฒิพงษ์ จันทรร

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแผนภูมิการออกแบบส่วนผสมสำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ ผสมเถ้าลอยที่ระดับการแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 15, 25 และ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน ในกรณีที่มีการใช้ร่วมกับสารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์ และทำการปรับปรุงวิธีการออกแบบส่วนผสมจากวิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐานสถาบันอเมริกา (ACI 211.3R-97) ซึ่งในการศึกษานี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือผลของการใช้สารลดน้ำอย่างแรงและเถ้าลอยต่อปริมาณน้ำที่ต้องการในส่วนผสม และผลของการใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่มีค่ายุบตัวเป็นศูนย์ ในกรณีที่มีการใช้สารลดน้ำอย่างแรงในปริมาณที่เข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์

ในส่วนแรกได้ทำการทดสอบโดยแบ่งชุดตัวอย่างออกเป็น 3 กลุ่ม โดยแบ่งตามปริมาณสารลดน้ำอย่างแรงที่ใช้ในส่วนผสม ซึ่งปริมาณสารลดน้ำอย่างแรงที่เลือกใช้ได้แก่ ปริมาณการใช้เท่ากับ, น้อยกว่า และมากกว่าจุดที่เข้ากันได้ดีของสารลดน้ำอย่างแรงกับปูนซีเมนต์ร้อยละ ± 50 โดยในแต่ละกลุ่มยังสามารถแบ่งออกเป็น 16 ชุดตัวอย่าง ที่ประกอบด้วยชุดตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานแตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 0.23, 0.28, 0.33 และ 0.38 และในแต่ละค่าของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานจะทำการทดแทนปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 0, 15, 25 และ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน โดยในแต่ละชุดตัวอย่างเมื่อได้ทำการออกแบบส่วนผสมแล้วจึงนำมาทำการทดลองผสม เพื่อหาปริมาณน้ำที่ต้องการในส่วนผสมที่ค่าความชื้นเหลือต่าง ๆ

และในส่วน 2 ได้ทำการทดสอบความสัมพันธ์ของปริมาณร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยกับกำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งทำการทดสอบกำลังอัดของกลุ่มที่มีปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงเท่ากับจุดที่เข้ากันได้ดี ซึ่งกำหนดค่าความชื้นเหลือ(เวลาวิบี)ที่ต้องการเท่ากับ 15 วินาที และทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 1, 7, 14, 28 และ 56 วัน

จากผลการวิจัย ทำให้ทราบปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์ ที่ค่าความชื้นเหลือ(เวลาวิบี)เท่ากับ 15 วินาที อยู่ในช่วงระหว่าง 126 ถึง 166 ลิตร/คอนกรีต 1 ลบ.ม. และเมื่อปรับปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงน้อยกว่าและมากกว่าจุดที่เข้ากันได้ดีร้อยละ ± 50 ปริมาณน้ำที่ต้องการในสัดส่วนผสมอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 101 ถึง 117 และร้อยละ 92 ถึง 100 ของปริมาณการใช้น้ำที่จุดเข้ากันได้ดี ตามลำดับ

จากการทดสอบได้สร้างความสัมพันธ์ ระหว่าง กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 1, 7, 14, 28 และ 56 วัน กับอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15, 25 และ 35 ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงเท่ากับจุดที่เข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์ โดยกำลังอัดเฉลี่ยที่อายุ 28 วัน อยู่ในช่วงระหว่าง 336 ถึง 855 กก./ตร.ซม. และได้นำผลการทดสอบมาทำการปรับปรุงขั้นตอนการออกแบบและตารางที่ใช้ในการออกแบบของวิธีการออกแบบส่วนผสมของเอซีไอ



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ABSTRACT

This thesis aims to create a mix design chart for no-slump concrete, with fly ash replacement of 15 – 35 % and with a superplasticizer at saturation point, and improve the mixture design method from ACI 211.3R-97, A Standard of Practice for Selecting Proportions for No-Slump Concrete. This research is divided into 2 parts. The first part deals with the effect of superplasticizer dosage and fly ash on water requirement in the mixture. The second part deals with the effect of percentage of fly ash-cement replacement on the compressive strength of no-slump concrete with the superplasticizer dosage at saturation point.

In the first part, the experiment consists of 3 series of tests with 3 different superplasticizer dosages, namely, equal to, 50% less than and 50% more than saturation point. Each series of tests is further divided into 16 sets of samples, consisting of 4 water-to-binder ratios, namely, 0.23, 0.28, 0.33 and 0.38, and 4 percentages of fly ash-cement replacement, namely, 0, 15, 25 and 35. In each set of tests, trial mixes are obtained to determine the water requirement for various consistencies.

In the second part, the relationship between percentage of fly ash-cement replacement and the compressive strength of concrete at 1, 7, 14, 28 and 56 days is studied for the case of superplasticizer dosage at saturation point and the vebe time at 15 seconds.

The experiments show that the water requirement at the superplasticizer dosage at saturation point and vebe time at 15 seconds is in the range of 126-166 liter/m³. Moreover, at the superplasticizer dosages of 50% less and 50% more than the saturation point, the water requirement is between 101-117 % and 92-100 % of the water requirement at saturation point, respectively.

The relation between compressive strength at 1, 7, 14, 28 and 56 days and the percentage fly ash-cement replacement of 0, 15, 25 and 35 with the superplasticizer dosage at saturation point are obtained. The 28-day compressive strength of concrete with superplasticizer dosage at saturation point is in the range of 336 to 855 ksc. Finally, the test results are tabulated and a modified mix design method with the inclusion of superplasticizer is proposed.

สารบัญ

หน้า

บทที่ 1 บทนำ

1.1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2. สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	2
1.2.1. คุณสมบัติของเถ้าลอยและคอนกรีตผสมเถ้าลอย	2
1.2.2. การศึกษาคอนกรีตสดที่มีการยวบตัวเป็นศูนย์ที่ผสมเถ้าลอย	3
1.2.3. การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับสารลดน้ำอย่างแรง	5
1.2.4. วิธีการออกแบบคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีค่าการยวบตัวเป็นศูนย์	5
1.3. วัตถุประสงค์ของการศึกษา	6
1.4. ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาเชิงทฤษฎีและ/เชิงประยุกต์	6
1.5. สมมุติฐานการวิจัย	6
1.6. ขอบเขตการศึกษา	7

บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1. ททั่วไป	8
2.2. เถ้าลอย	9
2.2.1. ปฏิกิริยาเคมีของเถ้าลอย	11
2.2.2. การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต	11
2.3. คอนกรีตที่มีค่ายวบตัวเป็นศูนย์	12
2.4. สารลดน้ำอย่างแรง	13
2.4.1. ชนิดของสารลดน้ำอย่างแรง	13
2.4.2. ผลของสารลดน้ำอย่างแรงที่มีต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์	14
2.4.3. คำนียามและค่าที่ใช้ในการคำนวณส่วนผสม	19
2.4.4. การทดสอบความเข้ากันได้ระหว่างปูนซีเมนต์กับสารลดน้ำอย่างแรง	22
2.5. การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่มีค่าการยวบตัวเป็นศูนย์	
ตามมาตรฐาน ACI 211.3R-97	24

บทที่ 3 วิธีการวิจัย

3.1.การจัดเตรียมและจัดเก็บวัสดุในการวิจัย	32
3.2.การทดสอบคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	34
3.3.วิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต	35
3.4.ขั้นตอนการผสมคอนกรีต	39
3.5.การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตตัวอย่าง	40
3.6.การเตรียมชุดตัวอย่าง	41

บทที่ 4 ผลการศึกษาและการทดสอบ

4.1.ผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุ	43
4.2.ผลการทดลองผสมคอนกรีต	44
4.3.ปริมาณสัดส่วนผสมของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์	56
4.4.ผลการทดสอบกำลังอัดและค่าความชื้นเหลือ	61

บทที่ 5 วิเคราะห์และวิจารณ์ผล

5.1.วิเคราะห์ผลของปริมาณการใช้เถ้าลอยกับปริมาณน้ำที่ต้องการในสัดส่วนผสม	65
5.2.วิเคราะห์ผลของปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงต่อปริมาณน้ำที่ต้องการในส่วนผสม	66
5.3.การวิเคราะห์กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และสารลดน้ำอย่างแรง	67
5.4.ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน	70
5.4.1. การพิจารณาช่วงความเชื่อมั่น	76
5.4.2. การพิจารณาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน	77
5.4.3. วิธีการหาช่วงความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน	78

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1. สรุปผลการวิจัย	82
6.2. ข้อเสนอปรับปรุงวิธีการออกแบบส่วนผสมของเอซีไอสำหรับคอนกรีตผสมถั่วลอย กับสารลดน้ำอย่างแรง ที่มีการขุบตัวเป็นศูนย์	83
6.3. ข้อเสนอแนะ	86
บรรณานุกรม	87
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ตารางการคำนวณสำหรับออกแบบส่วนผสมคอนกรีตผสมถั่วลอย ที่มีการขุบตัวเป็นศูนย์ กรณีใช้ร่วมกับสารลดน้ำอย่างแรง	89
ภาคผนวก ข. ข้อมูลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุ	96
ภาคผนวก ค. ผลการทดสอบผสมคอนกรีต	102
ภาคผนวก ง. รายการคำนวณส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ	115
ภาคผนวก จ. ข้อมูลการทดสอบก้อนตัวอย่าง	132
ภาคผนวก ฉ. การปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์แก้ไขความเบี่ยงเบนมาตรฐาน	146
ภาคผนวก ช. ตัวอย่างการออกแบบสัดส่วนผสม	148
ภาคผนวก ซ. บทความสำหรับเผยแพร่	153
ภาคผนวก ฅ. ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์และผลที่ได้รับตลอดโครงการ กิจกรรมที่วางแผนไว้ กับกิจกรรมที่ดำเนินการจริง และ ผลที่ได้รับ ตลอดโครงการ	160
ประวัติผู้เขียน	170

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	การแบ่งชั้นคุณภาพของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618-93	9
2.2	ข้อกำหนดทางกายภาพมาตรฐาน ASTM C 618-97	10
2.3	ค่ายุบตัวและค่า Compacting Factor ของคอนกรีตที่มีมวลรวม 19 และ 38 มม.	13
2.4.1	แสดงค่าความชื้นเหลวที่ทดสอบได้จากการทดสอบค่าการยุบตัวและค่าเวลาวิบี	28
2.4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และกำลังอัดประลัยที่ 28 วัน	28
2.4.3	ปริมาณน้ำที่ต้องการโดยประมาณสำหรับความชื้นเหลวต่างๆ และ ขนาดโตสุดของหิน	29
2.4.4	ปริมาตรของวัสดุหยาบต่อปริมาตรของคอนกรีต	30
2.4.5	ปริมาตรของวัสดุหยาบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีตสำหรับความชื้นเหลวต่าง ๆ	30
3.1	รายการทดสอบวัสดุ	34
4.1	คุณสมบัติของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย	43
4.2	คุณสมบัติของมวลรวม	43
4.3	คุณสมบัติของสารลดน้ำอย่างแรง	44
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับค่าความชื้นเหลว ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่เข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์ (ร้อยละ 0.1)	44
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับค่าความชื้นเหลว ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงน้อยกว่าจุดที่เข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์ ร้อยละ 50 (ร้อยละ 0.5)	48
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับค่าความชื้นเหลว ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงมากกว่าจุดที่เข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์ ร้อยละ 50 (ร้อยละ 1.5)	52
4.7	ปริมาณน้ำที่ต้องการใช้ในสัดส่วนผสมสำหรับค่าความชื้นเหลวเท่ากับ 15 วินาที ที่ ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงในปริมาณต่าง ๆ	57
4.8	ปริมาณสัดส่วนผสมของคอนกรีต 1 ลบ.ม. ในสภาวะอิมตัวผิวแห้ง	60
4.9	ปริมาณสัดส่วนผสมจริงของคอนกรีต 1 ลบ.ม. สำหรับสภาพความชื้นจริง	61
4.10	กำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตตัวอย่างที่อายุการทดสอบต่าง ๆ ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์	62
5.1	ร้อยละปริมาณน้ำที่ต้องการในส่วนผสมสำหรับคอนกรีตที่ค่าความชื้นเหลว (เวลาวิบี) เท่ากับ 15 วินาที เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำที่ต้องการในคอนกรีตที่ไม่ใส่เถ้าลอย	65
5.2	ร้อยละปริมาณน้ำที่ต้องการที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงน้อยกว่า เท่ากับ และ มากกว่าที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์ เทียบกับปริมาณน้ำที่ต้องการที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์	66

ตาราง	หน้า
5.3 ร้อยละของกำลังอัดที่ลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่มีคาร์บอนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย	67
5.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์และค่าสหสัมพันธ์ยกกำลังสอง ของสมการทำนายกำลังอัดที่อายุการทดสอบต่าง ๆ ($fc' = Ce^{\alpha (w/b)}$) ที่ปริมาณการไม่มีและมีคาร์บอนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15, 25 และ 35	71
5.5 ระดับความเชื่อมั่นในช่วง $f_m \pm ks$ และความน่าจะเป็นของค่าที่ต่ำกว่า $f_m - ks$	77
5.6 สัมประสิทธิ์แก้ไขค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดย ACI 318-83	78
5.7 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละชุดตัวอย่าง	79
ข-1 ความถ่วงจำเพาะและร้อยละการดูดซึ่มของมวลรวมหยาบ (ASTM C127)	97
ข-2 ความถ่วงจำเพาะและร้อยละการดูดซึ่มของมวลรวมละเอียด (ASTM C127)	97
ข-3 ความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ (ASTM C188)	98
ข-4 ความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย (ASTM C188)	98
ข-5 หน่วยน้ำหนักของมวลรวมหยาบอบแห้งและกระทุ้งแน่น (ASTM C29)	99
ข-6 หน่วยน้ำหนักของมวลรวมละเอียดอบแห้งและกระทุ้งแน่น (ASTM C29)	99
ข-7 สัดส่วนขนาดคละของมวลรวมหยาบ (ASTM C136)	100
ข-8 สัดส่วนขนาดคละของมวลรวมละเอียด (ASTM C136)	100
ข-9 ความถ่วงจำเพาะของสารลดน้ำอย่างแรง	101
ข-10 ร้อยละปริมาณของแข็งในสารลดน้ำอย่างแรง ซิก้าเมนต์เอฟเอฟ	101
ค.-1 ผลการทดสอบหาค่าความชันเหลวของคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ ที่ $w/b = 0.23$ ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่เข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์(1.0%)	103
ค.-2 ผลการทดสอบหาค่าความชันเหลวของคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ ที่ $w/b = 0.28$ ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่เข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์(1.0%)	104
ค.-3 ผลการทดสอบหาค่าความชันเหลวของคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ ที่ $w/b = 0.33$ ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่เข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์(1.0%)	105
ค.-4 ผลการทดสอบหาค่าความชันเหลวของคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ ที่ $w/b = 0.38$ ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่เข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์(1.0%)	106
ค.-5 ผลการทดสอบหาค่าความชันเหลวของคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ ที่ $w/b = 0.23$ ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงน้อยกว่าร้อยละปริมาณที่เข้ากันได้ดี 50%(0.5%)	107
ค.-6 ผลการทดสอบหาค่าความชันเหลวของคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ ที่ $w/b = 0.28$ ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงน้อยกว่าร้อยละปริมาณที่เข้ากันได้ดี 50%(0.5%)	108

ตาราง	หน้า
ง.- 10 ตารางออกแบบส่วนผสมคอนกรีต $w/b = 0.33$ แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 25 และสารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดี	125
ง.- 11 ตารางออกแบบส่วนผสมคอนกรีต $w/b = 0.33$ แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 35 และสารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดี	126
ง.- 12 ตารางออกแบบส่วนผสมคอนกรีต $w/b = 0.38$ แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 0 และสารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดี	127
ง.- 13 ตารางออกแบบส่วนผสมคอนกรีต $w/b = 0.38$ แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 และ สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดี	128
ง.- 14 ตารางออกแบบส่วนผสมคอนกรีต $w/b = 0.38$ แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 25 และสารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดี	129
ง.- 14 ตารางออกแบบส่วนผสมคอนกรีต $w/b = 0.38$ แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 35 และสารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดี	130
จ.-1 ผลการทดสอบกำลังอัดประลัย	132
จ.-2 ผลการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของคอนกรีต	136
ฉ.-1 เปรียบเทียบ ส.ป.ส. แก้วจากสมการในรูปที่ ฉ-1 กับ ส.ป.ส. แก้วของ ACI	147
ช.-1 ตารางออกแบบส่วนผสมคอนกรีต จากตัวอย่างการประยุกต์ใช้	151
ฉ.- 1 ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ และผลที่ได้รับตลอดโครงการ	161
ฉ.- 2 ตารางเปรียบเทียบกิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ได้ดำเนินการ และผลที่ได้รับจากดำเนินการ	162
ฉ.- 3 Grantt Chart เปรียบเทียบกิจกรรมที่เสนอในข้อเสนอโครงการและที่ทำได้จริง ในงวดที่ 1	164
ฉ.- 4 Grantt Chart เปรียบเทียบกิจกรรมที่เสนอในข้อเสนอโครงการและที่ทำได้จริง ในงวดที่ 2	165
ฉ.- 5 Grantt Chart เปรียบเทียบกิจกรรมที่เสนอในข้อเสนอโครงการและที่ทำได้จริง ในงวดที่ 3	166
ฉ.- 6 เปรียบเทียบ Output กิจกรรมที่เสนอในข้อเสนอโครงการและที่ทำได้จริงในงวดที่ 1	167
ฉ.- 7 เปรียบเทียบ Output กิจกรรมที่เสนอในข้อเสนอโครงการและที่ทำได้จริงในงวดที่ 2	168
ฉ.- 8 เปรียบเทียบ Output กิจกรรมที่เสนอในข้อเสนอโครงการและที่ทำได้จริงในงวดที่ 3	169

สารบัญภาพ

รูป	หน้า
2.1 ชุดเครื่องมือทดสอบเวลาวีบี (Vebe Test)	13
2.2 การดูดซับโมเลกุลของสารลดน้ำอย่างแรงบนผิวเม็ดซีเมนต์	15
2.3 การผลักรันของเม็ดซีเมนต์โดยที่มีโมเลกุลของสารลดน้ำอย่างแรงเป็น ตัวกลางช่วยทำให้เกิดการผลักรัน	15
2.4 การผลักรันระหว่างเม็ดซีเมนต์โดยการทำปฏิกิริยาเสเดอริกจาก โมเลกุลของสารลดน้ำอย่างแรง	16
2.5 การเข้าทำปฏิกิริยาของ โมเลกุลของสารลดน้ำอย่างแรงที่มีน้ำหนัก โมเลกุลต่างกันบนเม็ดซีเมนต์	16
2.6 ลักษณะการกระจายของเม็ดซีเมนต์ที่เวลาต่างกัน โดยในรูป a) ซีเมนต์เพสต์ที่ไม่เติมสารลดน้ำอย่างแรง b) ซีเมนต์เพสต์ที่เติมสารลดน้ำอย่างแรง	17
2.7 แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของอัตราส่วนของ SO_4^{2-} / AlO_2^- ที่มีผลต่อโครงสร้างของคอนกรีต	18
2.8 ส่วนประกอบของสารลดน้ำอย่างแรง	20
2.9 ตัวอย่างการทดสอบความเข้ากันได้และเข้ากันไม่ได้ของปูนซีเมนต์กับสารลดน้ำอย่างแรง ด้วยวิธีมินิสลัมพ์	23
2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะเวลาที่ใช้ในการไหลของซีเมนต์เพสต์ออกจาก โคน กับ เปรอร์เซ็นต์ของสารลดน้ำอย่างแรง ต่อมวลซีเมนต์	24
2.11 แผนภาพแสดงขั้นตอนการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีตที่มีการยวบตัวเป็นศูนย์ตามมาตรฐานอเมริกา	27
3.1 แผนการทำงานและวิธีการดำเนินการ	31
3.2 ภาพแสดงลักษณะการจัดเก็บวัสดุที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ	33
3.3 ถังเก็บสารลดน้ำอย่างแรง	34
3.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีตที่มีการยวบตัวเป็นศูนย์ผสมเข้ากับสารลดน้ำอย่างแรง ที่ปรับปรุงจากวิธีการออกแบบส่วนผสมตามมาตรฐานอเมริกา	36
3.5 วงจรผสมคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง	39
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับค่าความชื้นเหลือ ที่ค่าอัตราส่วน $w/b = 0.23$ ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่เข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์ (ร้อยละ 1)	46
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับค่าความชื้นเหลือ ที่ค่าอัตราส่วน $w/b = 0.28$ ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่เข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์ (ร้อยละ 1)	47

รูป	หน้า	
4.14	เปรียบเทียบปริมาณน้ำที่ต้องการใช้ในสัดส่วนผสม กับ ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ที่อัตราส่วน w/b ต่าง ๆ สำหรับกรณีที่ใช้ปริมาณสารลดน้ำอย่างแรงในปริมาณที่เข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์	58
4.15	เปรียบเทียบปริมาณน้ำที่ต้องการใช้ในสัดส่วนผสม กับ ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ที่อัตราส่วน w/b ต่าง ๆ สำหรับ กรณีที่ใช้ปริมาณสารลดน้ำอย่างแรงในปริมาณมากกว่าจุดที่เข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์ ร้อยละ 50	59
4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดเฉลี่ยกับอายุคอนกรีต ที่ค่าอัตราส่วน w/b = 0.23 ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์	63
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดเฉลี่ยกับอายุคอนกรีต ที่ค่าอัตราส่วน w/b = 0.28 ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์	63
4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดเฉลี่ยกับอายุคอนกรีต ที่ค่าอัตราส่วน w/b = 0.33 ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์	64
4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดเฉลี่ยกับอายุคอนกรีต ที่ค่าอัตราส่วน w/b = 0.38 ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์	64
5.1	กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุการทดสอบ 1 ถึง 56 วัน ที่ไม่มีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย สำหรับอัตราส่วน w/b ต่าง ๆ และปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์	68
5.2	กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุการทดสอบ 1 ถึง 56 วัน ที่มีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 15 สำหรับอัตราส่วน w/b ต่าง ๆ และปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์	68
5.3	กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุการทดสอบ 1 ถึง 56 วัน ที่มีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 25 สำหรับอัตราส่วน w/b ต่าง ๆ และปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์	69
5.4	กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุการทดสอบ 1 ถึง 56 วัน ที่มีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 35 สำหรับอัตราส่วน w/b ต่าง ๆ และปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์	69
5.5	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุต่าง ๆ กับอัตราส่วน w/b ที่ไม่มีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์	72

รูป	หน้า
5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 กับอัตราส่วน w/b ที่ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 25 และปริมาณสารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดี	81
5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 กับอัตราส่วน w/b ที่ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 35 และปริมาณสารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดี	81
6.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีตที่มีการยุบตัวเป็นศูนย์ผสมเถ้าลอยกับสารลดน้ำอย่างแรง ที่ปรับปรุงจากวิธีการออกแบบส่วนผสมตามมาตรฐานอเมริกา	84
ก.1 ตารางคำนวณส่วนผสม	91
จ.-1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แก้ไขค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกับจำนวนก้อนตัวอย่าง	147
ช.- 1 ตัวอย่างการเลือกอัตราส่วน w/b	150
ช.- 2 ตัวอย่างการเลือกปริมาณน้ำที่ใช้ในสัดส่วนผสม	150

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันได้มีการใช้คอนกรีตสดที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์เพิ่มมากขึ้น เช่นใช้ในการก่อสร้างเขื่อน คอนกรีตหล่อสำเร็จ เป็นต้น อันเนื่องมาจากใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างน้อยกว่าคอนกรีตปกติ ซึ่งทำให้ต้นทุนในการก่อสร้างลดลงได้ และในปัจจุบันยังได้มีการนำเถ้าลอยและสารลดน้ำอย่างแรงมาใช้ในงานคอนกรีตกันอย่างแพร่หลาย แต่ในปัจจุบันวิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ นั้นยังไม่ครอบคลุมวิธีการออกแบบคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ กรณีใช้ร่วมกับสารลดน้ำอย่างแรง ซึ่งการใช้สารลดน้ำอย่างแรงนั้นสามารถลดอัตราส่วนน้ำต่อสารเชื่อมประสานลงจากกรณีที่ไม่ใช้สารลดน้ำอย่างแรงได้ ทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจากการที่คอนกรีตที่มีกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นนั้น ทำให้ขนาดของโครงสร้างที่ออกแบบนั้นมีขนาดที่เล็กลง ซึ่งทำให้ต้นทุนการก่อสร้างลดลง และยังเป็นการอนุรักษ์ธรรมชาติทางอ้อมได้อีกด้วย

เถ้าลอยเป็นวัสดุที่ได้จากการเผาถ่านหินเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งจากการศึกษาและวิจัยทำให้ทราบว่า เถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Material) ซึ่งสามารถนำมาใช้ทดแทนปริมาณปูนซีเมนต์ ที่มีราคาแพงกว่าได้ เถ้าลอยสามารถหาภายในประเทศ และมีราคาถูก แต่เนื่องจากเถ้าลอยที่ผลิตในแต่ละแห่งนั้นมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน อันเนื่องมาจากถ่านหินในแต่ละแห่งนั้นมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ซึ่งเถ้าลอยที่ได้มาจากอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง นั้นมีคุณสมบัติที่ได้มาตรฐาน ทำให้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างมากในประเทศ

สารลดน้ำอย่างแรงเป็นสารเคมีที่ใช้ผสมในงานคอนกรีต โดยในการใช้สารลดน้ำอย่างแรงนั้น เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านต่าง ๆ เช่น ความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตสด เป็นต้น ซึ่งสารลดน้ำอย่างแรงจะทำหน้าที่ในการช่วยกระจายอนุภาคซีเมนต์ไม่ให้เกาะติดกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้น้ำสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเม็ดซีเมนต์ได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งเป็นผลให้สามารถลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตที่ความต้องการความสามารถในการเทได้ที่เท่ากันได้ และทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้นด้วย ซึ่งทำให้ต้นทุนในการก่อสร้างและการผลิตคอนกรีตลดลง

ซึ่งในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตในประเทศไทยได้ยึดถือตามมาตรฐานของสถาบันคอนกรีตอเมริกาเป็นส่วนมาก อันเนื่องมาจากวิธีการออกแบบนั้นมีขั้นตอน และวิธีการที่ไม่ยุ่งยาก แต่เนื่องจากวิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตนั้นยังไม่ครอบคลุมในรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับวิธีการออกแบบคอนกรีตสดที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ผสมเถ้าลอย และสารลดน้ำอย่างแรง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะทำการศึกษาปรับปรุงเกี่ยวกับวิธีการออกแบบคอนกรีตสดที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ผสมเถ้าลอย และสารลดน้ำอย่างแรง

1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

1.2.1 คุณสมบัติของเถ้าลอยและคอนกรีตผสมเถ้าลอย

เถ้าลอยเป็นวัสดุที่ได้มาจากกระบวนการเผาถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งจัดเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งที่มีการศึกษาค้นคว้า และวิจัย เกี่ยวกับคุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าลอย (บุรฉัตร ฉัตรวีระ และพิชัย นิमितสกุล (2537) , สมนึก ตั้งเต็มศิริกุล และคณะ (2538) และ เสกสรรค์ ชูทับทิม และคณะ (2542)) และศึกษาผลของการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต (ทิน เกตุรัตน์บวรและคณะ (2541) , วิศวะ จักรไพศาล และชัยโรจน์ จักรไพศาล (2542) และ สมนึก ตั้งเต็มศิริกุลและคณะ (2542)) ซึ่งผลของการศึกษาพบว่า เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะเป็นเถ้าลอยที่มีคุณภาพ สามารถใช้เป็นวัสดุทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ได้ และเมื่อทำการบดเถ้าลอยให้มีขนาดเล็กลง จะสามารถทำให้ผลของกำลังอัดของคอนกรีตดีกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแบบไม่ผ่านการบด และให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ผ่านการบดมีค่าสูงกว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ไม่ใช่เถ้าลอย

ประเสริฐ สุวรรณวิทยา และ สดุดี บุญเหลือหล่อ (2545) ได้ทำการศึกษาวิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะ ซึ่งได้ทำการเปลี่ยนแปลงส่วนผสม โดยกำหนดค่าการยุบตัวอยู่ในช่วง 3-5 ซม. , 8-10 ซม. , และ 15-18 ซม. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ใช้เท่ากับ 0.35 , 0.45 , 0.55 , 0.65 , และ 0.75 รวมทั้งกำหนดสัดส่วนของเถ้าลอยในวัสดุประสานที่ใช้มีค่าเท่ากับ 0 % , 15 % , 30 % , 45 % , และ 60 % โดยทำการหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ ขนาด 7.5 x 7.5 x 7.5 ซม. ซึ่งทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 , 60 , และ 90 วัน พบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนของเถ้าลอยทุก ๆ 10 % ของวัสดุประสาน จะใช้ปริมาณน้ำลดลง 3 % ที่ค่าการยุบตัวที่เท่ากัน และยังได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณน้ำกับค่าการยุบตัว และยังหาค่า cement equivalence factor มาใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับ

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และยังได้เสนอวิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตโดยอ้างอิงวิธีการของ ACI 211-91

สัญญาชัย สอาดกิตินันท์ (2545) ได้ทำการศึกษาการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าลอยแม่เมาะแบบคัดและไม่คัดแยกขนาดโดยปรับปรุงตามมาตรฐานเอซีไอ ทำการศึกษาโดยแบ่งชุดตัวอย่างออกเป็น 4 ชุดตัวอย่าง ตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน ดังนี้ 0.35 ,0.38 ,0.41 และ 0.44 ซึ่งในแต่ละชุดตัวอย่างยังได้ทำการแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ ส่วนผสมที่ไม่ผสมเถ้าลอย(คอนกรีตควบคุม) ส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแบบคัดแยก และส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแบบไม่คัดแยก ซึ่งในการผสมเถ้าลอยในส่วนผสมทั้งแบบคัดแยกและไม่คัดแยก ได้ทำการผสมโดยการแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 15 ,25 , และ 35 ของวัสดุเชื่อมประสาน โดยในแต่ละชุดตัวอย่างได้ทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 1 , 7 , 28 และ 56 วัน และกำหนดค่าการยุบตัวอยู่ในช่วง 5 – 8 ซม. พบว่าความต้องการน้ำของคอนกรีตผสมเถ้าลอยต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย และการใช้เถ้าลอยแบบคัดแยกสามารถลดความต้องการน้ำลงได้อีก ซึ่งความต้องการน้ำ จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานลดลง และยังพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแบบคัดแยกในอัตราส่วนร้อยละ 15-35 มีค่าสูงกว่ากำลังอัดของคอนกรีตควบคุม ตั้งแต่อายุ 7 วันขึ้นไป และกำลังอัดในคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแบบไม่คัดแยกที่อัตราส่วนร้อยละ 25 และ 35 ที่อายุ 28 วัน จะมีค่าใกล้เคียงหรือมากกว่ากำลังอัดของคอนกรีต ควบคุม เมื่อเปรียบเทียบการพัฒนากำลังอัดพบว่า คอนกรีตผสมเถ้าลอยแบบคัดแยก มีการพัฒนากำลังอัดได้ดีกว่า คอนกรีตผสมเถ้าลอยแบบไม่คัดแยก

1.2.2 การศึกษาคอนกรีตสดที่มีการยุบตัวเป็นศูนย์ที่ผสมเถ้าลอย

สิทธิราฤทธิ ปริदानนท์ (2545) ได้ทำการศึกษาเรื่องคอนกรีตซีเมนต์ผสมเถ้าลอยที่มีการยุบตัวเป็นศูนย์ที่ใช้ถ้ำกันเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะเป็นมวลละเอียด ซึ่งทำการศึกษาโดยกำหนดปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในส่วนผสมไม่เกิน 300 กก./ลบ.ม. และใช้อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ซึ่งในแต่ละอัตราการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยนั้น จะมีการใช้ถ้ำกันเตาทดแทนทรายโดยปริมาตรร้อยละ 0 50 และ 100 ซึ่งในการทดสอบได้ควบคุมค่าความชื้นเหลือให้อยู่ในช่วงเวลาวิบี 5 – 10 วินาที และทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 3 7 28 และ 56 วัน พบว่า สัดส่วนการใช้ถ้ำกันเตาเป็นมวลรวมละเอียดทดแทนทราย ร้อยละ 50 ส่งผลทำให้มวลรวมมีขนาดละเอียด

ที่สม่ำเสมอที่สุด และการใช้เถ้านแทนทรายจะทำให้คอนกรีตมีความชื้นเหลวลดลง และยังได้แสดงสร้างกราฟความสัมพันธ์และสมการความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ร้อยละการแทนที่ทรายด้วยเถ้านแทน และกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

ปริญญา จินดาประเสริฐ และ คณะ (2543) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตบดอัดผสมเถ้าลอยและเถ้าแกรบดำ ซึ่งทำการทดสอบ โดยใช้แท่งตัวอย่าง และวิธีการของการบดอัดดินโดยวิธีโมดิฟายด์ พรอคเตอร์ (Modified Proctor) กับแบบหล่อรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 100 มม. สูง 200 มม. และ แบ่งส่วนผสม ออกเป็น 2 แบบ โดยแบบแรกมีส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์,เถ้าลอยที่มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.68 , แกรบดำที่มีปริมาณคาร์บอนเท่ากับร้อยละ 49 และมี ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.10 ,และใช้มวลรวมที่ได้ขนาดตามมาตรฐาน ASTM C-33 และในแบบที่สองได้ใช้ส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ ,เถ้าลอยที่มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.96 ,สารผสมเพิ่ม จำพวก Sulphonated Naphtlene Formaldehyde Condensate ,และใช้มวลรวมที่มีขนาดหยาบกว่ามาตรฐานเล็กน้อย จากการทดสอบพบว่า ความหนาแน่นของคอนกรีตบดอัด ขึ้นอยู่กับความสามารถในการบดอัดของส่วนผสมและขนาดคละของมวลรวม และ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบดอัด ขึ้นอยู่กับ การบดอัด และการทำปฏิกิริยาของสารซีเมนต์ซึ่งจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารซีเมนต์ทั้งเถ้าลอยและแกรบดำสามารถใช้เป็นสารปอซ โซลานทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนในการผสมทำคอนกรีตบดอัดได้ การใช้สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) ทำให้ส่วนผสมเหลวขึ้น และช่วยให้การบดอัดของส่วนผสมที่แห้งทำได้ง่ายขึ้น

เจษฎา เกษมเศรษฐ์ และ ปิติวัฒน์ วัฒนชัย (2545) ได้ทำการศึกษาหาปริมาณที่เหมาะสมของการใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ในการผลิตท่อคอนกรีตสำเร็จรูป ซึ่งในการศึกษาได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน โดยในส่วนแรกเป็นการศึกษาหาปริมาณการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม ซึ่งสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 100 x 200 มม. กับปริมาณร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ในอัตราส่วน ร้อยละ 0, 25, 35, 45 และ 55 โดยน้ำหนัก ซึ่งในการทดลองนี้ได้กำหนดค่าความชื้นเหลว อยู่ในช่วงเวลาวิปี 10 - 18 วินาที และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (w/b) เท่ากับ 0.33 ซึ่งในส่วนแรกนี้พบว่า ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ

ละ 45, 50 และ 55 นั้น สามารถให้กำลังอัดของคอนกรีตผ่านมาตรฐานการผลิตท่อคอนกรีตสำเร็จรูป ชั้นคุณภาพที่ คสท.3 (มอก.128 – 2528) และในส่วนที่สองได้นำผลของการศึกษาในขั้นแรก มาทำการหล่อท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60, 80 และ 100 ซม. แล้วนำมาทดสอบกำลังรับแรงกดของท่อตามมาตรฐาน มอก.128-2528 ซึ่งผลของการศึกษาพบว่า ปริมาณการให้เถ้าลอยที่เหมาะสมสำหรับผลิตท่อ จะแตกต่างกันออกไป ตามขนาดของท่อ โดยปริมาณร้อยละการใช้เถ้าลอยอยู่ในช่วง 45 – 55 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน และปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสม อยู่ในช่วง 110 – 115 กก./ลบ.ม.

1.2.3 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับสารลดน้ำอย่างแรง

เอกภพ ทองอินตะ (2545) ได้ทำการทดสอบความเข้ากันได้ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งที่ผลิตในไทยกับสารลดน้ำอย่างแรง ทำการศึกษาโดยนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ หนึ่ง จำนวน 5 ยี่ห้อ กับสารลดน้ำอย่างแรง จำนวน 3 ยี่ห้อ มาทำการทดสอบความเข้ากันได้โดยให้วิธีการวัดความหนืด โดยใช้กรวยเพื่อวัดเวลาในการไหล และ วิธีมินิสลัมพ์ ซึ่งในการทดสอบได้ทำการปรับปริมาณสารลดน้ำอย่างแรงต่อมวลซีเมนต์ เพื่อหาความเข้ากันได้ระหว่างปูนซีเมนต์และสารลดน้ำอย่างแรง พบว่าจุดอิมตัวของสารลดน้ำอย่างแรงขึ้นอยู่กับยี่ห้อของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ร่วม ซึ่งจุดอิมตัวของสารลดน้ำอย่างแรงจะอยู่ในช่วงร้อยละ 0.5 – 2.2 ต่อมวลซีเมนต์ แต่มีสารลดน้ำอย่างแรงกับปูนซีเมนต์บางประเภทที่เข้ากันได้ไม่ดี

1.2.4 วิธีการออกแบบคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์

ปิติวัฒน์ วัฒนชัย (2542) ได้นำเสนอข้อปรับปรุงวิธีการออกแบบส่วนผสมของเอซีไอสำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่แม่ที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ โดยได้ทำการศึกษาความสามารถเทได้ และ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ซึ่งในการทดสอบได้ใช้อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน 4 ค่า ได้แก่ 0.33 , 0.38 , 0.43 และ 0.48 ซึ่งในแต่ละชุดการทดสอบได้แปรผันอัตราส่วนของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยเป็นร้อยละ 15 ,25,และ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน และควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดเป็นศูนย์ มีค่าเวลาวิบีอยู่ระหว่าง 10-15 วินาที ซึ่งทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอกขนาด 100x200 มม. ที่อายุ 7,14,28 และ 56 วัน จากการทดสอบพบว่า เมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความต้องการน้ำของคอนกรีตลดลง และเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานเพิ่มขึ้น ทำให้ความต้องการน้ำลดลงเช่นกัน เมื่อใช้

การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 15 ทำให้ได้กำลังอัดของคอนกรีตดีที่สุด เมื่อเทียบกับอัตราส่วนแทนที่ในอัตราส่วนอื่น ๆ และจากการทดสอบได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน สำหรับออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตผสมเถ้าลอยตามวิธีการของเอซีไอ และสามารถทำนายกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 15, 25 และ 35 ที่อายุ 7, 14, 28 และ 56 วันได้

1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อสร้างแผนภูมิการออกแบบส่วนผสมสำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ ผสมเถ้าลอยที่ระดับการแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณต่าง ๆ กรณีใช้ร่วมกับสารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้กับปูนซีเมนต์ โดยปรับปรุงจากวิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐานสถาบันอเมริกา

1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษาเชิงทฤษฎีและ/หรือเชิงประยุกต์

ได้วิธีการออกแบบคอนกรีตที่มีการยุบตัวเป็นศูนย์ผสมเถ้าลอยและสารลดน้ำอย่างแรง ที่กำลังอัดปกติ โดยปรับปรุงตามมาตรฐานสถาบันคอนกรีตอเมริกา ที่สามารถออกแบบในงานก่อสร้างทั่วไปที่ต้องการใช้คอนกรีตที่มีการยุบตัวเป็นศูนย์ เช่นงานคอนกรีตหล่อสำเร็จ เป็นต้น และสามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตให้ต่ำลง เป็นผลทำให้ค่าใช้จ่ายในงานก่อสร้างถูกลง และยังเป็นการอนุรักษ์ทรัพยากรทางธรรมชาติทางอ้อมอีกด้วย

1.5 สมมุติฐานการวิจัย

- 1.5.1 เถ้าลอยแม่เมาะที่ใช้ในงานคอนกรีตมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัย
- 1.5.2 ปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อผสมเถ้าลอยและสารลดน้ำอย่างแรงในคอนกรีตด้วยการแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่ไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน
- 1.5.3 สารลดน้ำแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์ของสารลดน้ำอย่างแรงขึ้นอยู่กับชนิดของปูนซีเมนต์ โดยไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอย

1.6 ขอบเขตการศึกษา

ทำการศึกษาวิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอยและสารลดน้ำอย่างแรง ที่มีค่ายุบตัวเป็นศูนย์ ซึ่งเลือกใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาด 10x20 ซม. โดยมีขอบเขตของการศึกษาดังนี้

- 1.6.1 ค่าความชื้นเหลว Vebe Test อยู่ในช่วง 10 – 20 วินาที
- 1.6.2 เลือกทำการทดสอบค่าอัตราส่วน W/B ในช่วง 0.23 – 0.38
- 1.6.3 ใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ระหว่างร้อยละ 0 - 35 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน
- 1.6.4 วัสดุที่ใช้ตลอดการทดสอบ
 - ก. วัสดุเชื่อมประสาน
 - ปูนซีเมนต์ : ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราอินทรีเพชร
 - เถ้าลอย : ใช้เถ้าลอยจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
 - ข. วัสดุมวลรวม
 - วัสดุมวลรวมหยาบ : ใช้หินขนาดใหญ่สุด 3/8 นิ้ว
 - วัสดุมวลรวมละเอียด : ใช้ทรายที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดอยู่ระหว่าง 2.4-3.0
 - ค. น้ำ : ใช้น้ำประปา
 - ง. สารลดน้ำอย่างแรง : ใช้สารลดน้ำอย่างแรงประเภท เมลามีนซูเปอร์พลาสติก ไซเซอร์ ยี่ห้อ Sikament FF
- 1.6.5 ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรง เลือกใช้ที่ปริมาณร้อยละที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์ โดยจุดที่เข้ากันได้ดีระหว่างสารลดน้ำอย่างแรง ยี่ห้อ Sikament FF กับปูนซีเมนต์ตราอินทรีเพชร เท่ากับร้อยละ 1.0

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ทัวไป

เป้าหมายหลักของการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต คือ เพื่อคำนวณหาส่วนผสมอันได้แก่ ปูนซีเมนต์ หิน ทราย น้ำ สารผสมเพิ่ม ในปริมาณที่เหมาะสม เพื่อให้คอนกรีตมีคุณสมบัติได้ใกล้เคียงกับความต้องการ ทั้งทางด้านกำลังอัด ความคงทน และความสามารถในการทำงานได้ โดยใช้การทดลองผสมน้อยครั้งที่สุด ซึ่งในการวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการออกแบบส่วนผสมตามมาตรฐานการออกแบบของผสมอเมริกา ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบส่วนผสมที่นิยมใช้กันอย่างมากในปัจจุบัน และยังเป็นวิธีการออกแบบที่เข้าใจง่าย สะดวกต่อการนำไปใช้ ความปลอดภัย และมีประสิทธิภาพสูง ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันทั่วไป แต่เนื่องจากวิธีการออกแบบส่วนผสมตามมาตรฐานอเมริกาไม่ครอบคลุมในการออกแบบในกรณีที่มีการใช้สารผสมเพิ่มเป็นส่วนผสม จึงได้ทำการดัดแปลงวิธีการออกแบบสัดส่วนผสมตามมาตรฐานอเมริกา ซึ่งจะได้นำเสนอในตอนช่วงท้ายต่อไป

ในปัจจุบันการผลิตคอนกรีตได้มีการนำสารผสมเพิ่มมาใช้กันเป็นส่วนมาก เพื่อเป็นการประหยัดและปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตเพื่อให้เป็นไปตามความต้องการของลักษณะการใช้งานคอนกรีต ซึ่งสารผสมเพิ่มคือส่วนผสมของคอนกรีตที่ไม่ใช่ ปูนซีเมนต์ หิน ทราย และน้ำ ซึ่งสามารถแยกออกได้เป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกได้แก่พวกวัสดุทดแทนซีเมนต์ เช่น แกลลวย ซิลิกาฟูม เป็นต้น และอีกส่วนได้แก่พวกสารเคมี เช่น สารลดน้ำอย่างแรง สารหน่วงเวลาการก่อตัว เป็นต้น ซึ่งในการใช้สารผสมเพิ่มนั้น ทำให้คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีความซับซ้อนเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากปัจจัยที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้การทำนายคุณสมบัติของคอนกรีตยุ่งยากมากขึ้นตามไปด้วย และในแต่ละปัจจัยยังมีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวเนื่องกัน เช่น ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตชนิดนั้นขึ้นอยู่กับ ปริมาณน้ำ ปริมาณฟองอากาศ และปริมาณสารลดน้ำอย่างแรง ซึ่งปริมาณฟองอากาศก็มีผลต่อกำลังอัด และความคงทนของคอนกรีต เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิธีการออกแบบสัดส่วนผสมของคอนกรีตผสมแกลลวยและสารลดน้ำอย่างแรงที่มีค่ายุบตัวเป็นศูนย์ โดยศึกษาหาความสัมพันธ์ของกำลังอัดที่อายุ 1, 7, 14, 28 และ 56 วัน กับ อัตราส่วน w/b ในช่วง 0.23 – 0.38 ซึ่งในแต่ละอัตราส่วน w/b ได้ทำการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยแกลลวยร้อยละ 0, 15, 25 และ 35 ของมวลวัสดุเชื่อมประสาน ที่ปริมาณใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุกเข้ากันได้คือปูนซีเมนต์ และหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับค่าความขึ้นเหลว (Vebe time) ในแต่ละชุดการทดลอง

สำหรับเนื้อหาในบทนี้ จะกล่าวถึง ทฤษฎีที่เกี่ยวกับ แกลลวย สารลดน้ำอย่างแรง คุณสมบัติของคอนกรีตผสมแกลลวย คอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ และวิธีการออกแบบส่วนผสมของมาตรฐานสถาบันคอนกรีตอเมริกา

2.2 เถ้าลอย (Fly Ash)

เถ้าลอย หรือ เถ้าถ่านหิน จัดเป็นวัสดุปอซโซลานประเภท สังเคราะห์ เกิดจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าที่มีการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง โดยเถ้าลอยมีความละเอียดใกล้เคียงหรือสูงกว่าปูนซีเมนต์เพียงเล็กน้อย โดยลักษณะทั่วไปจะเป็นรูปทรงกลมตัน ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร (0.001 มม.) ถึง 0.15 มม. โดยความละเอียดของเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง ที่ทำการทดสอบโดยวิธีเบลน มีความละเอียดอยู่ในช่วง 2500 ถึง 3500 ตร.ซม / กรัม ซึ่งเถ้าลอยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ประเภท F และ ประเภท C โดยใช้อ็ครูปประกอบทางเคมีของเถ้าลอยที่ได้หลังจากการเผาถ่านหิน ดังนี้

เถ้าลอยประเภท F เป็นเถ้าลอยที่มีผลรวมของซิลิกาออกไซด์ เฟอริกออกไซด์ และอะลูมินาออกไซด์ มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก เกิดจากการเผาหินประเภท แอนทราไซต์ และบิทูมินัส มีประเภทแคลเซียมออกไซด์น้อยกว่าร้อยละ 5 ดังนั้นเถ้าลอยประเภทนี้บางครั้งจะเรียกว่า เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำ ซึ่งมีคุณสมบัติการเป็นซีเมนต์น้อยหรือแทบจะไม่มี แต่ยังมี คุณสมบัติของวัสดุปอซโซลาน

เถ้าลอยประเภท C เป็นเถ้าลอยที่มีผลรวมของซิลิกาออกไซด์ เฟอริกออกไซด์ และอะลูมินาออกไซด์ มากกว่าร้อยละ 50 ถึง 70 โดยน้ำหนัก เกิดจากการเผาหินประเภทลิกไนต์ และ ซับบิทูมินัส มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อยู่ประมาณ 15 – 23 ดังนั้นเถ้าลอยประเภทนี้บางครั้งจะเรียกว่า เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูง ซึ่งมีคุณสมบัติของซีเมนต์และปอซโซลานในตัวเอง กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ในงานคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยประเภทนี้จะพัฒนาได้อย่างรวดเร็วในช่วงต้นเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอยประเภท F

ตารางที่ 2.1 การแบ่งชั้นคุณภาพของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618-93

ที่มา: ASTM C618-93 (1993)

คุณสมบัติ	ประเภทของเถ้าลอย	
	ชั้นคุณภาพ F	ชั้นคุณภาพ C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ร้อยละ	≥ 70.0	50.0 – 70.0
SO_3 มากที่สุด ร้อยละ	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นมากที่สุด ร้อยละ	3.0	3.0
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ มากที่สุด ร้อยละ	6.0	6.0
ดัชนีกำลัง น้อยที่สุดที่อายุ 7 วัน หรือ 28 วัน ร้อยละ	75.0	75.0

ตาราง 2.1 เป็นตารางที่แสดงการเปรียบเทียบประเภทของเถ้าลอย โดยใช้องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยที่ได้หลังจากการเผ่าถ่านหิน แต่ยังสามารถทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของเถ้าลอยเพื่อนำไปใช้ในงานได้โดยอาศัยหลักทางกายภาพ ซึ่งกำหนดโดย ASTM C 618-97 ดังตารางที่ 2.2

อย่างไรก็ตาม คุณภาพและปริมาณของเถ้าลอยสามารถแปรผันได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ชนิดของถ่านหิน อุณหภูมิที่ใช้เผา ระบบการดักจับเถ้า ดังนั้น เถ้าลอยที่ได้ในแต่ละแห่งการผลิตจึงมีคุณสมบัติที่ไม่เหมือนกัน ซึ่งเถ้าลอยที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้นำมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัด ลำปาง เนื่องจากเป็นแหล่งผลิตเถ้าลอยที่ได้มาตรฐาน

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางกายภาพมาตรฐาน ASTM C 618-97

ที่มา : ASTM C 618-97 (1997)

ข้อกำหนดทางกายภาพ	ประเภทของเถ้าลอย	
	ชั้นคุณภาพ F	ชั้นคุณภาพ C
ความละเอียด (Fineness) : ส่วนที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 หลังการร่อนแบบเปียก มากที่สุดร้อยละ	34	34
ดัชนีกำลัง (Strength activity index) : โดยผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ 7 วัน น้อยที่สุดร้อยละ เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	75	75
28 วัน น้อยที่สุดร้อยละ เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	75	75
ความต้องการน้ำ (Water requirement) : มากที่สุดร้อยละ เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	105	105
ความอยู่ตัว (Soundness) : การขยายตัวหรือการหดตัวโดยวิธี Autoclave มากที่สุดร้อยละ	0.8	0.8
การกำหนดความสม่ำเสมอ (Uniformity requirement) : - ความหนาแน่น มากที่สุดจากค่าเฉลี่ยร้อยละ	5	5
- ส่วนที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 มากที่สุดจากค่าเฉลี่ยร้อยละ	5	5
ผลคูณระหว่าง ร้อยละของน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา กับปริมาณ ร้อยละของที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 (Multiple factor) : มากที่สุด	255	-
การหดตัว (Drying shrinkage) : ของแท่งมอร์ตาร์ที่ 28 วัน ที่แตกต่างจากตัวควบคุมมากที่สุดร้อยละ	0.03	0.03

2.2.1 ปฏิกริยาเคมีของเถ้าลอย

ความสามารถของเถ้าลอยในการรวมตัวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อทำปฏิกิริยาปอซโซลานขึ้นอยู่กับความละเอียดและคุณสมบัติของเถ้าลอย โดยเถ้าลอยที่มีความละเอียดสูงกว่า จะทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าเถ้าลอยที่มีความละเอียดต่ำ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะมีปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำ ซึ่งทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต, แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) หลังจากนั้นเถ้าลอย ซึ่งมีส่วนผสมของซิลิกาออกไซด์และอะลูมินาออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ได้ได้สารแคลเซียมซิลิเกต ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) และไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้ผลิตภัณฑ์เช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ โดยปกติแล้วปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดอย่างช้า ๆ และต่อเนื่องเป็นเวลานาน โดยเริ่มเกิดขึ้นเมื่อมีอายุระหว่าง 7 ถึง 14 วัน และมีปฏิกิริยาไปเรื่อย ๆ โดยถ้าเถ้าลอยมีความละเอียดมากสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็ว

อย่างไรก็ตาม กลไกในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะซับซ้อนกว่าที่นำสารปอซโซลาน ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยตรง เถ้าลอยจะหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนตซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงแรกแต่จะหน่วงแค่ไหนขึ้นอยู่กับปริมาณซัลเฟต ปริมาณอัลคาไลน์ และปริมาณแคลเซียมในเถ้าลอย

2.2.2 การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต

การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต สามารถใช้ได้ในรูปแบบของการทดแทนปูนซีเมนต์ หรือเป็นวัสดุถมช่องว่าง (Filler) เนื่องจากเถ้าลอยมีขนาดเล็ก และมีลักษณะกลม จึงทำให้เมื่อมีการใช้เถ้าลอยจะทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการทำงานได้ดีขึ้น และยังสามารถลดปริมาณการใช้น้ำลงได้ แต่การใช้เถ้าลอยจะทำให้กำลังอัดที่อายุต้น ต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่มีการใช้เถ้าลอย และจากปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุปลายมีค่ามากกว่าคอนกรีตที่ไม่มีการใช้เถ้าลอย ซึ่งในมาตรฐาน ACI 232.2R ได้แนะนำการใช้ปริมาณเถ้าลอยอยู่ในช่วงร้อยละ 15 ถึง 35 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน เพราะการใช้เถ้าลอยมากเกินไปอาจทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำจนไม่สามารถใช้งานได้

All rights reserved

2.3 คอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ (No-Slump Concrete)

คอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์นั้นเป็นคอนกรีตที่มีเนื้อคอนกรีตสดค่อนข้างแห้ง นั่นคือมีค่าการยุบตัว (Slump Test) ประมาณ 0 – 25 มม. เหมาะสำหรับงานคอนกรีตบดอัด และงานคอนกรีตสำเร็จรูปเป็นต้น เนื่องจากคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์นั้นมีความสามารถที่จะขึ้นรูปได้ และมีความรวดเร็วในการถอดแบบ ซึ่งเหมาะกับการใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรม ที่ต้องการกำลังในระยะเวลาที่สั้น เพื่อที่จะได้ทำงานได้อย่างรวดเร็ว

โดยการวัดค่าความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสด สามารถวัดได้จากค่าความชื้นเหลวของคอนกรีตสด ซึ่งวิธีการวัดค่าความชื้นเหลว (Methods for measuring consistency) นั้นมีหลากหลายวิธี แต่ทำการยกตัวอย่างมาเพียง 3 วิธี เนื่องจากเป็นวิธีการที่เกี่ยวข้องกับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ โดยวิธีการวัดค่าความชื้นเหลวที่ยกตัวอย่างได้แก่

2.3.1. วิธีการวัดค่าการยุบตัว (Slump test) วิธีการทดสอบนี้มีขั้นตอนตามมาตรฐาน ASTM C143 ซึ่งเป็นการวัดค่าความชื้นเหลวของคอนกรีตสดที่เป็นที่นิยมมาก เนื่องจากมีวิธีในการทดสอบที่ง่าย และไม่ยุ่งยาก แต่เนื่องจากในคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์เมื่อวัดค่าความชื้นเหลวด้วยวิธีนี้นั้นมีค่าน้อย ดังนั้นวิธีนี้จึงไม่เหมาะสมสำหรับการวัดค่าความชื้นเหลวของคอนกรีตที่มีลักษณะแห้งมาก ๆ

2.3.2. วิธีการวัดค่าสัดส่วนการอัดแน่น (Compacting factor test) วิธีการนี้เหมาะสำหรับคอนกรีตสดที่มีลักษณะแห้งหรือมีความสามารถในการทำงานได้ต่ำ เพราะว่าการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสดที่แห้งที่เพียงเล็กน้อยจะทำให้ค่า Compaction factor เปลี่ยนแปลงไปมาก แต่สำหรับคอนกรีตที่มีความสามารถในการทำงานได้สูง จะให้ค่าที่ไม่ต่างกัน โดยตารางที่ 2.3 ได้แสดงปริมาณความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการวัดค่าสัดส่วนการอัดแน่น กับ ค่าการยุบตัว อย่างไรก็ตามวิธีนี้สามารถใช้ได้ในงานคอนกรีตที่มีขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบไม่เกิน 38 มิลลิเมตร ซึ่งวิธีการทดลองเป็นไปตามมาตรฐาน BS 1881 : Part 3

2.3.3. วิธีการวัดค่าเวลาวิบี (Vebe test) วิธีการวัดค่าเวลา วิบีนี้เหมาะสำหรับคอนกรีตที่ค่อนข้างแห้ง ซึ่งแตกต่างกับวิธีซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้กับคอนกรีตสดที่ไม่สามารถวัดค่าความชื้นเหลวด้วยวิธีวัดค่าการยุบตัวได้ โดยเวลาวิบีที่วัดมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 32 วินาที ซึ่งวิธีนี้ไม่ควรใช้กับส่วนผสมที่มีมวลรวมขนาดใหญ่เกิน 38 มิลลิเมตร โดยการทดสอบปฏิบัติตามมาตรฐาน BS EN 12350-3

ตารางที่ 2.3 ค่ายุบตัวและค่า Compacting Factor ของคอนกรีตที่มีมวลรวม 19 และ 38 มม.

ที่มา ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต (2547)

ระดับความสามารถในการทำงาน	ค่าการยุบตัว (มม.)	ค่า Compacting Factor
ต่ำมาก	0 – 25	0.78
ต่ำ	25 – 50	0.85
ปานกลาง	50 – 100	0.92
สูง	100 - 175	0.95



รูปที่ 2.1 ชุดเครื่องมือทดสอบเวลาวิบี (Vebe Test)

2.4 สารลดน้ำอย่างแรง (Superplasticizer)

2.4.1 ชนิดของสารลดน้ำอย่างแรง

สารลดน้ำอย่างแรงเป็นสารผสมเพิ่มชนิดหนึ่ง ซึ่งมีความสามารถในการช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทได้ที่ดีขึ้น ทำให้สามารถลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตลงได้ เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเดียวกัน สารลดน้ำอย่างแรงที่มีขายตามท้องตลาดนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่ม ซึ่งแบ่งตามคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีได้แก่

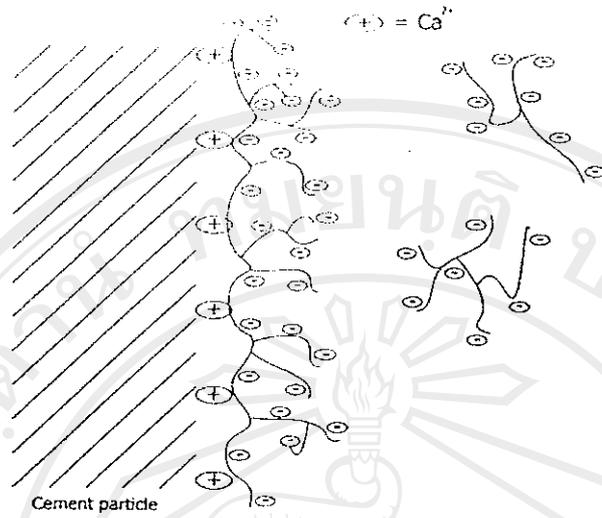
- เมลามีนซูปเปอร์พลาสติกไซเซออร์ (Polycondensate of Formaldehyde and Melamine Sulfonate)
- แนฟทาลีนซูปเปอร์พลาสติกไซเซออร์ (Polycondensate of Formaldehyde and Naphthalene Sulfonate)
- ลิกโนซัลโฟเนตซูปเปอร์พลาสติกไซเซออร์ (Lignosulfonate – based)
- Polyacrylates

2.4.2 ผลของสารลดน้ำอย่างแรงที่มีต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์

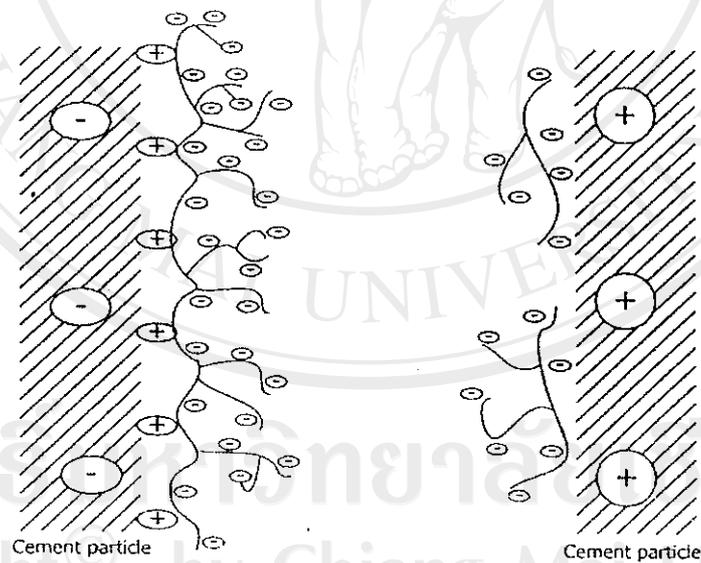
การทำปฏิกิริยาระหว่างสารลดน้ำอย่างแรงกับซีเมนต์นั้นปัจจุบัน ได้มีการศึกษาโดยใช้สมมุติฐานในหลายๆ ด้าน เช่นทางกายภาพ ทางเคมี เป็นต้น ซึ่งจากการศึกษาได้อธิบายปฏิกิริยาของสารลดน้ำอย่างแรงที่ได้กระทำต่อเม็ดซีเมนต์ (Jolicoeur et al.(1994)) ไว้ดังนี้

- รูปที่ 2.2 แสดงการดูดซับโมเลกุลของสารลดน้ำอย่างแรงบนเม็ดซีเมนต์ ซึ่งประจุผิวของซีเมนต์นั้นมีค่าประจุเป็นลบ โดยแคลเซียมไอออน (Ca^{+}) ที่ละลายมาจากสารลดน้ำอย่างแรงบางส่วน ที่เข้ามาจับที่บริเวณผิวของเม็ดซีเมนต์ซึ่งจะช่วยทำให้เม็ดซีเมนต์มีประจุไฟฟ้าเป็นกลาง
- รูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นลักษณะการผลักกันระหว่างเม็ดซีเมนต์สองเม็ด ซึ่งเกิดจากแรงผลักทางไฟฟ้าสถิตย์ (Uchikawa (1994);Uchikawa et al.(1997))
- รูปที่ 2.4 แสดงกรณีที่เกิดแรงผลักแบบสเตอริก (Steric Repulsion) ระหว่างเม็ดซีเมนต์สองเม็ด ซึ่งดูดซับโมเลกุลของสารลดน้ำอย่างแรง ซึ่งทำให้แรงดึงดูดทางไฟฟ้าเป็นกลาง ซึ่งในโพลีไคลด์ซูปเปอร์พลาสติกไซเซออร์จะทำให้เกิดแรงผลักแบบ สเตอริก และแรงผลักทางไฟฟ้าสถิตร่วมกัน ((Uchikawa (1994) ; Uchikawa et al.(1997))

ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน โมเลกุลของสารลดน้ำอย่างแรงนั้นจะไปทำปฏิกิริยากับเม็ดซีเมนต์ที่บริเวณจุดที่ไวต่อการทำปฏิกิริยา (Active Site) ซึ่งในบริเวณนี้เป็นจุดที่ไอออนของ RSO_4^{--} และ SO_4^{--} จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับเม็ดซีเมนต์ด้วยเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งได้แสดงการเข้าทำปฏิกิริยาของโมเลกุลของสารลดน้ำอย่างแรงที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างกัน และในกรณีที่สารลดน้ำอย่างแรงสามารถเอาชนะซัลเฟตไอออนในการเข้าทำที่บริเวณจุดที่ไวต่อการทำปฏิกิริยาได้ จะทำให้สารลดน้ำอย่างแรงไม่สามารถกระจายเม็ดซีเมนต์ได้ ซึ่งเมื่อซัลเฟตไอออนไม่สามารถที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอลูมิเนต เพื่อให้เกิดเอทริงไจท์ ซึ่งเอทริงไจท์นี้จะเป็นตัวชะลอการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ เป็นผลให้ซีเมนต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว

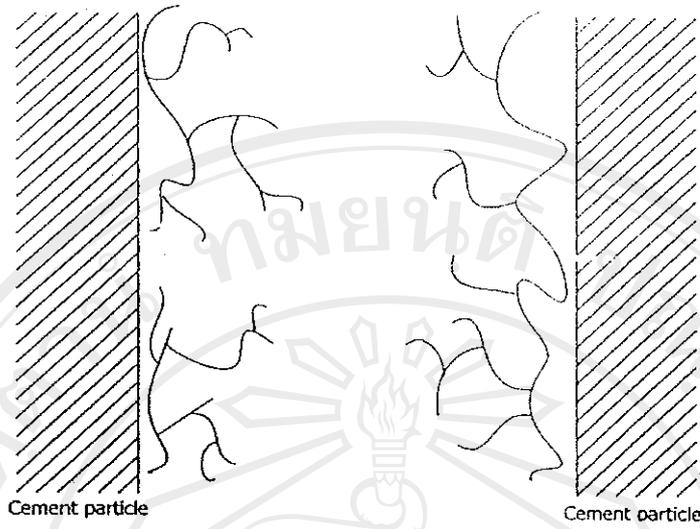


รูปที่ 2.2 การดูดซับโมเลกุลของสารลดน้ำอย่างแรงบนผิวเม็ดซีเมนต์
ที่มา : Aitcin (1998)



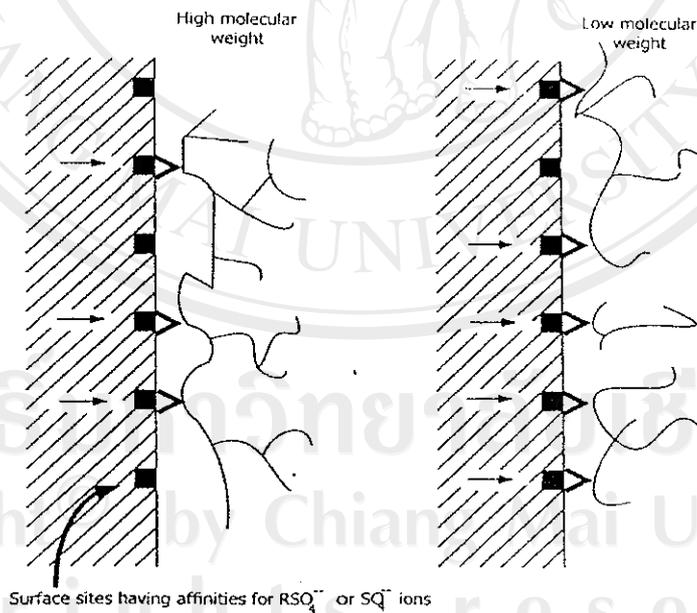
รูปที่ 2.3 การผลักรันของเม็ดซีเมนต์โดยที่มีโมเลกุลของสารลดน้ำอย่างแรงเป็นตัวกลางช่วยทำให้เกิดการผลักรัน

ที่มา : Aitcin (1998)



รูปที่ 2.4 การผลักรันระหว่างเม็ดซีเมนต์โดยการทำให้ปฏิกิริยาสเตอร์ริกจากโมเลกุลของสารลดน้ำอย่างแรง

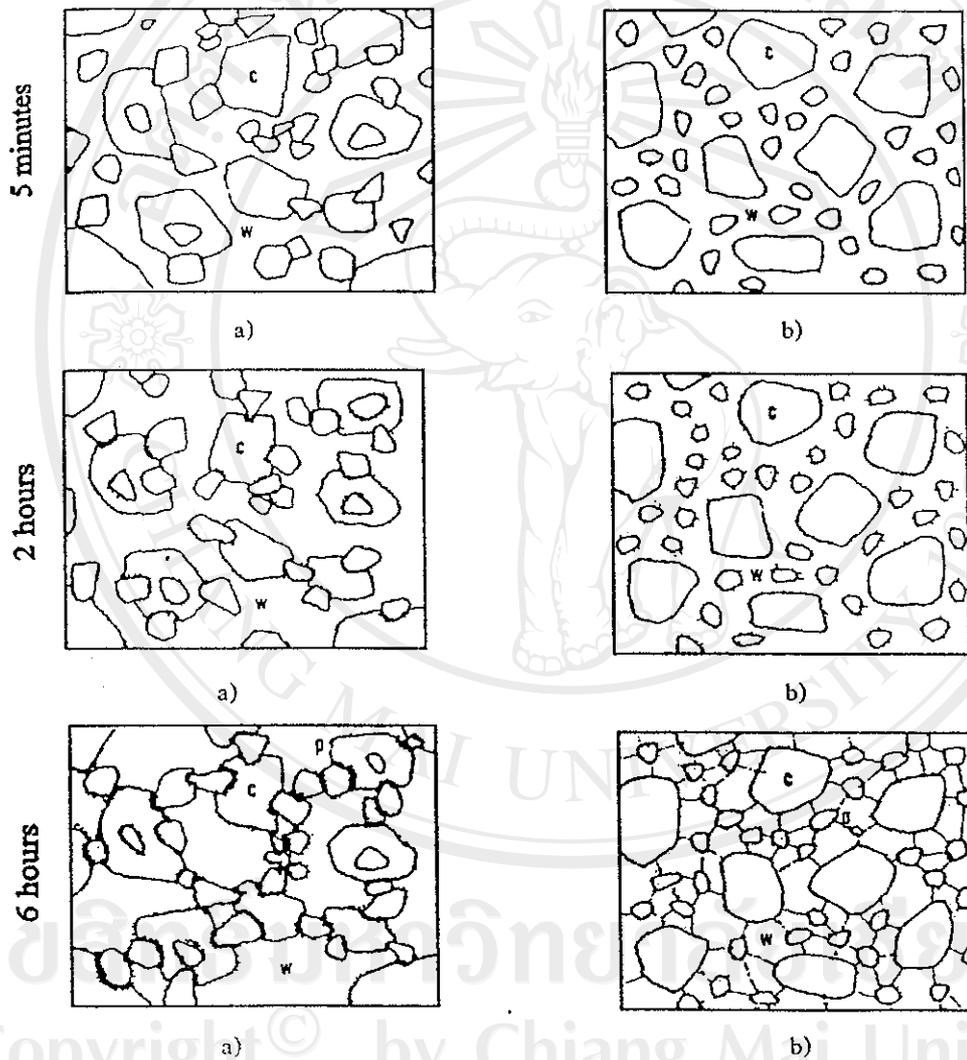
ที่มา : Aitcin (1998)



รูปที่ 2.5 การเข้าทำปฏิกิริยาของโมเลกุลของสารลดน้ำอย่างแรงที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างกันบนเม็ดซีเมนต์

ที่มา : Aitcin (1998)

จากรูปแบบการทำปฏิกิริยาของสารลดน้ำอย่างแรงกับเม็ดซีเมนต์ในรูปแบบต่าง ๆ ทำให้เม็ดซีเมนต์สามารถกระจายตัวออกจากกัน ไม่เกาะเป็นกลุ่มก้อน ดังในรูปที่ 2.6 ที่ได้แสดงถึงการกระจายตัวของเม็ดซีเมนต์ เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ โดยมีและไม่มีสารลดน้ำอย่างแรง ที่ช่วงระยะเวลาต่าง ๆ โดยผลของการใช้สารลดน้ำอย่างแรง นั้นทำให้น้ำสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับเม็ดซีเมนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น และซีเมนต์เพสต์มีความหนืดลดลง เนื่องจากเม็ดซีเมนต์ไม่จับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน



รูปที่ 2.6 ลักษณะการกระจายของเม็ดซีเมนต์ที่เวลาต่างกัน โดยในรูป a) ซีเมนต์เพสต์ที่ไม่เติมสารลดน้ำอย่างแรง b) ซีเมนต์เพสต์ที่เติมสารลดน้ำอย่างแรง
ที่มา : Malier (1992)

นอกจากนี้ยังพบอีกว่า สารลดน้ำอย่างแรงนั้น ไม่ได้มีผลเฉพาะกับปฏิกิริยาไฮเดรชันเท่านั้น แต่ยังมีผลกับการละลายของซัลเฟตและค่าอัตราส่วนของ SO_4^{--} / AlO_2^- ด้วย ซึ่งค่าอัตราส่วน SO_4^{--} / AlO_2^- นี้มีผลต่อการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งถ้าค่าอัตราส่วนของ SO_4^{--} / AlO_2^- นี้มีค่าสูงก็จะทำให้เกิดการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์มีลักษณะเป็นแบบ False Set แต่หากมีค่าอัตราส่วนนี้ต่ำจะทำให้เกิดการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์เป็นแบบ Flash Set ได้ (Vernet (1995)) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.7

$\frac{SO_4^{--}}{AlO_2^-}$	MICROSTRUCTURE		
	Hydration time		
	10 min	1 hour	2 hours
Very high False set			
High Weak false set			
Average Normal slump loss			
Low Weak flash set			
Very low Flash set			

Legend: Clinker, Calcium sulfate, Gypsum needles, Ettringite needles, Ettringite and C-S-H, C₃AH₃ gel

รูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของอัตราส่วนของ SO_4^{--} / AlO_2^- ที่มีผลต่อ

โครงสร้างของคอนกรีต

ที่มา : Aitcin (1998)

2.4.3 คำนียามและค่าที่ใช้ในการคำนวณส่วนผสม

ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงสามารถที่จะแสดงได้ในหลายรูปแบบ อาจจะแสดงอยู่ในรูปของสารละลายที่ใช้ต่อ คอนกรีต 1 ลบ.ม .ซึ่งเป็นการง่ายที่จะใช้ในโรงผสมคอนกรีต อย่างไรก็ตามวิธีแสดงปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงนี้ไม่เหมาะกับการใช้ในงานทดลองและวิจัย เนื่องจากสารลดน้ำอย่างแรงในแต่ละชนิดที่ขายกันตามท้องตลาดต่างมีปริมาณของของแข็ง (Solid content) และ ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ที่ไม่เหมือนกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกให้การแสดงปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรง อยู่ในรูปแบบของร้อยละของปริมาณของแข็งต่อมวลของวัสดุเชื่อมประสาน เพื่อให้สะดวกและง่ายต่อคำนวณหาสัดส่วนผสม

โดยในการที่จะหาปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรง) ลิตร ต่อ 1 ลบ.ม (.ในส่วนผสม จำเป็นที่จะต้องทราบค่าความถ่วงจำเพาะ และปริมาณร้อยละของของแข็ง เพื่อที่จะนำมาคำนวณหาค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบส่วนผสม ซึ่งได้แสดงการหาค่าความถ่วงจำเพาะ ปริมาณของแข็ง และค่าต่าง ๆ ดังนี้

ก. ความถ่วงจำเพาะของสารลดน้ำอย่างแรง (Superplasticizer specific gravity ; G_{sup})

จากรูปที่ 2.8 ความถ่วงจำเพาะของสารลดน้ำอย่างแรงสามารถหาได้จาก

$$G_{sup} = \frac{M_{liq}}{V_{liq}}$$

โดย M_{liq} คือ มวลของสารลดน้ำอย่างแรง) กรัม(
 V_{liq} คือ ปริมาตรของสารลดน้ำอย่างแรง) ลบ.ซม.(

ข. ปริมาณร้อยละของแข็ง (Solid content ; s)

จากรูปที่ 2.8 ปริมาณร้อยละของแข็งของสารลดน้ำอย่างแรงสามารถหาได้จาก

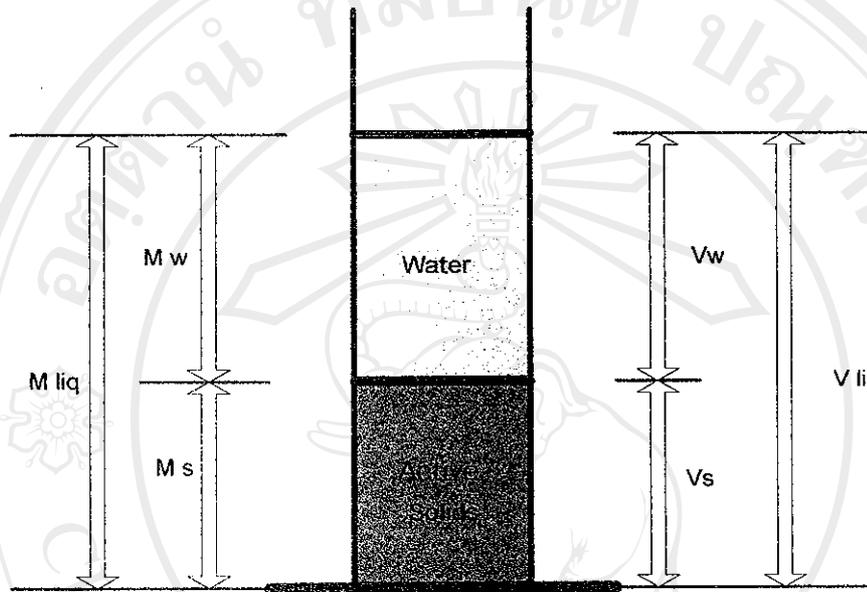
$$S = \frac{M_{sol}}{M_{liq}} \times 100$$

โดย M_{sol} คือ มวลของของแข็งทั้งหมดในสารลดน้ำอย่างแรง) กรัม(
 และจากความสัมพันธ์ของความถ่วงจำเพาะและมวลของ

$$M_{sol} = \frac{S \times M_{liq}}{100} = \frac{S \times G_{sup} \times V_{liq}}{100}$$

มวลของน้ำในสารละลายอย่างแรง (M_w)

เมื่อเราทราบปริมาณการใช้สารละลายอย่างแรงสำหรับผลิตคอนกรีตคุณภาพสูง จึงจำเป็นที่จะต้องคำนวณหาปริมาณน้ำที่มาพร้อมกับสารละลายอย่างแรง เพื่อที่จะทราบอัตราส่วน w/b ที่แท้จริง โดยสามารถคำนวณหาปริมาณน้ำได้จาก



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของสารละลายอย่างแรง

$$M_{liq} = M_w + M_{sol} \quad \text{หรือ} \quad M_w = M_{liq} - M_{sol}$$

จากสมการข้างต้น จะได้ว่า

$$M_w = \frac{M_{sol} \times 100}{S} - M_{sol}$$

$$M_w = M_{sol} \left(\frac{100}{S} - 1 \right) = M_{sol} \left(\frac{100 - S}{S} \right)$$

แทน M_{sol} ในสมการจะได้

$$M_w = \frac{V_{liq} \times s \times G_{sup}}{100} \times \frac{100 - s}{s}$$

$$V_w = V_{liq} \times G_{sup} \times \frac{100 - s}{s}$$

ง. สมการต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณ

กำหนดให้ d คือ ปริมาณร้อยละของแข็งในสารลดน้ำอย่างแรงที่แนะนำจากผู้ผลิตเพื่อให้ได้
ค่าการยุบตัวที่ต้องการ

C คือ ปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน

V_{liq} คือ ปริมาตรของสารลดน้ำอย่างแรง

G_{sup} คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของสารลดน้ำอย่างแรง

S คือ ปริมาณร้อยละของแข็งในสารลดน้ำอย่างแรง

สมการต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณมีดังนี้

$$M_{sol} = C \times \frac{d}{100}$$

และ

$$M_{sol} = \frac{s \times M_{liq}}{100}$$

ดังนั้นจะได้

$$\frac{s \times M_{liq}}{100} = C \times \frac{d}{100}$$

และเมื่อแทน M_{liq} จากลงในสมการ จะได้

$$\frac{s \times G_{sup} \times V_{liq}}{100} = C \times \frac{d}{100}$$

$$V_{liq} = \frac{C \times d}{s \times G_{sup}}$$

จ. มวลของอนุภาคของแข็ง และ ปริมาตรที่ต้องการ

จากที่ทราบ M_{sol} แล้วสามารถหาปริมาตรของสารลดน้ำอย่างแรงสามารถหาได้ความสัมพันธ์
ระหว่าง

$$V_{liq} = \frac{M_{liq}}{G_{sup}} \quad \text{และ} \quad M_{liq} = \frac{M_{sol} \times 100}{s}$$

จะได้ดังแสดงว่า

$$V_{liq} = \frac{M_{sol} \times 100}{G_{sup} \times s}$$

ณ ปริมาตรของอนุภาคของแข็งในปริมาตรของสารลดน้ำอย่างแรง

จากรูปที่ 2.8 จะได้ว่า

$$V_{sol} = V_{liq} - V_w$$

เมื่อแทน V_w จากสมการ จะความสัมพันธ์ดังนี้

$$V_{sol} = V_{liq} - V_{liq} \times G_{sup} \times \frac{100-s}{100}$$

$$V_{sol} = V_{liq} \left(1 - G_{sup} \times \frac{100-s}{100} \right)$$

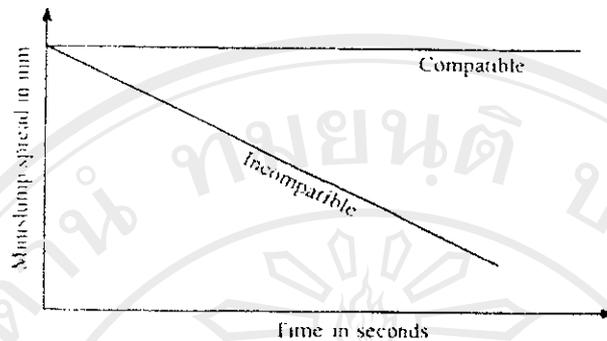
2.4.4 การทดสอบความเข้ากันได้ระหว่างปูนซีเมนต์กับสารลดน้ำอย่างแรง

วิธีการทดสอบความเข้ากันได้ของระหว่างปูนซีเมนต์กับสารลดน้ำอย่างแรงที่นิยมใช้กันมีอยู่ 2 วิธี ได้แก่

- **วิธีมินิสลัมพ์ (Minislump Method)** เป็นวิธีทดสอบที่คล้ายกับการทำ Slump test แต่ ใช้ Slump cone ที่ขนาดเล็กกว่า ซึ่งเรียกว่า Minicone และใช้ซีเมนต์เพสต์ โดยผสมกันระหว่างปูนซีเมนต์ น้ำ และ สารลดน้ำอย่างแรงในการทดสอบ ทำการทดสอบ โดยการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของซีเมนต์เพสต์ที่ไหลแผ่ออกมาหลังจาก ยก Minicone ซึ่งความเข้ากันได้ระหว่างสารลดน้ำอย่างแรงกับปูนซีเมนต์ที่ใช้ร่วมกันนั้นจะพิจารณาจาก กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง เวลา กับ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของซีเมนต์เพสต์ ถ้าขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลาง ไม่เกิดเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป แสดงว่า สารลดน้ำอย่างแรงกับปูนซีเมนต์นั้น สามารถเข้ากันได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และ เปอร์เซ็นต์ของสารลดน้ำอย่างแรงต่อมวลซีเมนต์ที่เริ่มทำให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง คงที่ คือค่าเปอร์เซ็นต์ที่เหมาะสมของสารลดน้ำอย่างแรง กับ ปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นค่าที่ สารลดน้ำอย่างแรง ไม่มีผลต่อการไหลของซีเมนต์เพสต์ กล่าวคือเมื่อใส่สารลดน้ำอย่างแรงมากกว่าเปอร์เซ็นต์ที่เหมาะสมนี้ สารลดน้ำอย่างแรงจะไม่สามารถลดค่า ความสูญเสียความสามารถในการทำงานของคอนกรีตได้มากกว่ากรณีที่ใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่เปอร์เซ็นต์ที่เหมาะสม

Materials selection

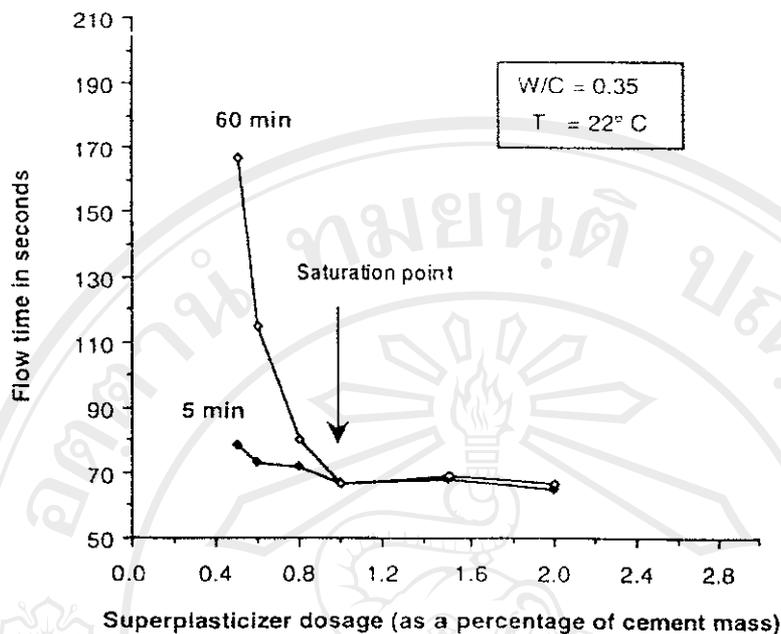
W/C = 0.35 T = 20°C



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการทดสอบความเข้ากันได้และเข้ากันไม่ได้ของปูนซีเมนต์กับสารลดน้ำอย่างแรง ด้วยวิธีมินิสลัมพ์

ที่มา : Aitcin (1998)

- วิธีการจับเวลาที่ซีเมนต์เพสต์ใช้ในการไหลจากโคน (Marsh cone method) เป็นวิธีที่ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์มากกว่าวิธีมินิสลัมพ์ ซึ่งทำให้ความคลาดเคลื่อนของอัตราส่วนผสมที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย วิธีการทดสอบ วัดระยะเวลาที่ใช้ในการไหลของซีเมนต์เพสต์ออกจาก โคนที่เปอร์เซ็นต์ของสารลดน้ำอย่างแรงต่อมวลซีเมนต์ ต่าง ๆ กัน โดยทำการทดสอบหลังจากผสมเป็นเวลา 5 นาที และ 60 นาที ความเข้ากันได้ของสารลดน้ำอย่างแรงกับปูนซีเมนต์นั้นจะพิจารณาจาก เส้นกราฟที่เวลา 5 นาที และเส้นกราฟที่เวลา 60 นาที ของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะเวลาที่ใช้ในการไหลออกจาก โคน กับ เปอร์เซ็นต์ของสารลดน้ำอย่างแรง ถ้าเส้นกราฟทั้งสองใกล้เคียงกัน แสดงว่าสารลดน้ำอย่างแรงกับปูนซีเมนต์ที่ใช้ร่วมกันสามารถเข้ากันได้ และจุดที่เส้นกราฟที่เวลา 5 นาที กับเส้นกราฟที่เวลา 60 นาที เริ่มมาแตะกัน หรือ อยู่ใกล้กัน ซึ่งจุดนั้นเรียกว่าจุดอิ่มตัว (Saturation point) ซึ่งค่าของเปอร์เซ็นต์ของสารลดน้ำอย่างแรงที่จุดนี้คือค่าร้อยละที่เข้ากันได้ดีของสารลดน้ำอย่างแรงกับปูนซีเมนต์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะเวลาที่ใช้ในการไหลของซีเมนต์พิเศษออกจาก โคน กับ เปอร์เซ็นต์ของสารลดน้ำอย่างแรง ต่อมวลซีเมนต์
ที่มา : Aitcin (1998)

ซึ่งจากการศึกษาของ เอกภพ (2545) พบว่า ปริมาณที่เหมาะสมของการใช้สารลดน้ำอย่างแรง นั้นขึ้นอยู่กับชนิดและยี่ห้อของสารลดน้ำอย่างแรงกับยี่ห้อของปูนซีเมนต์ งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ตราอินทรีเพชร และ สารลดน้ำอย่างแรง ยี่ห้อ ซิก้าแมนต์ เอฟเอฟ (Sikament FF) ซึ่งปริมาณร้อยละที่เข้ากันได้ดีของการใช้สารลดน้ำอย่างแรงกับปูนซีเมนต์ เท่ากับ ร้อยละ 1.0 ของปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน

2.5 การออกแบบคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ตามมาตรฐานอเมริกา (ACI211.3R-97)

ขั้นตอนการออกแบบตามมาตรฐานอเมริกา ACI 211.3R-97 นี้ เป็นวิธีการออกแบบส่วนผสม สำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ (No-Slump Concrete) โดยที่วัดความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสดด้วย วิธี Vebe Test ซึ่งขอบเขตของค่าความข้นเหลวอยู่ระหว่าง 0-32 วินาที แต่วิธีการออกแบบส่วนผสมนี้มีข้อจำกัด คือไม่มีการใช้สารผสมเพิ่ม ยกเว้นสารกักกระจาย ฟองอากาศ (air – entraining admixture) โดยสมมุติฐานของการออกแบบ คือกำลังอัดของ คอนกรีตจะขึ้นอยู่กับ อัตราส่วน w/c และปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้น และค่าความข้นเหลวนั้นจะ ขึ้นอยู่กับ ปริมาณน้ำ ขนาดโศศุคของมวลรวมหยาบ และปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้น โดยวิธีการ

ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่มีค่ายุบตัวเป็นศูนย์ตามมาตรฐานอเมริกา (ACI 211.3R-97) ได้แสดงดังในรูปที่ 2.11 โดยมีรายละเอียดของการออกแบบดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เลือกค่าความชื้นเหวและกำลังของคอนกรีตที่ต้องการ

ค่าความชื้นเหวของคอนกรีตที่ต้องการแสดงไว้ในตารางที่ 2.4.1

ขั้นตอนที่ 2 เลือกขนาดหินใหญ่สุด (MSA)

มวลรวมที่มีขนาดใหญ่กว่านั้นมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่ามวลรวมที่มีขนาดเล็ก ทำให้ต้องการมอร์ต้าร์น้อยกว่าเพื่อให้ความสามารถในการทำงานที่เท่ากัน ดังนั้นในคอนกรีตปกติเพื่อที่จะให้ประหยัดจึงมีการเลือกใช้ MSA ที่มีค่ามากที่สุด ซึ่งค่า MSA ต้องไม่เกิน 1/5 ของส่วนที่แคบที่สุดระหว่างด้านของไม้แบบ, 1/3 ของความลึกของแผ่นพื้น หรือ 3/4 ของระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมที่น้อยที่สุด

ขั้นตอนที่ 3 เลือกอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

โดยการเลือกอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต้องการขึ้นอยู่กับกำลังของคอนกรีตที่ต้องการและการเลือกใช้สารกักกระจายฟองอากาศ ซึ่งได้แสดงในตารางที่ 2.4.2 ซึ่งอัตราส่วน w/c อยู่ในช่วง 0.33 ถึง 0.80 โดยกำลังอัดสูงสุดในข้อแนะนำเท่ากับ 500 กก./ตร.ซม.

ขั้นตอนที่ 4 ประมาณปริมาณน้ำและอากาศ

ปริมาณน้ำที่ต้องการจะเป็นตัวกำหนดค่าความชื้นเหว ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดโตสุดของหิน โดยสามารถหาได้จากตารางที่ 2.4.3

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาปริมาณของปูนซีเมนต์

จากขั้นตอนที่ 2 และ 3 เมื่อเลือกอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ กับปริมาณน้ำที่ต้องการ จะสามารถหาปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในส่วนผสมได้ โดย

$$\text{ปริมาณปูนซีเมนต์} = \text{ปริมาณน้ำที่เลือกใช้} / \text{อัตราส่วน w/c}$$

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาปริมาณมวลรวมหยาบ

โดยตารางที่ 2.4.4 จะเป็นอัตราส่วนของปริมาตรของวัสดุผสมหยาบต่อปริมาณของคอนกรีต โดยขึ้นอยู่กับขนาด โดสด และ โมดูลัสความละเอียดของทราย และตารางที่ 5 จะเป็นปริมาณของวัสดุหยาบ โดยขึ้นอยู่กับค่าความชื้นเหลวและขนาด โดสดของหิน โดยในการหาปริมาณมวลรวมหยาบหาได้จาก

$$\text{ปริมาณมวลรวมหยาบ} = \text{หน่วยน้ำหนักในสภาพแห้งและกระทุ้งแน่นของหิน} \times \text{ค่าในตารางที่ 4} \times \text{ค่าในตารางที่ 5}$$

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณหาปริมาณมวลรวมละเอียด

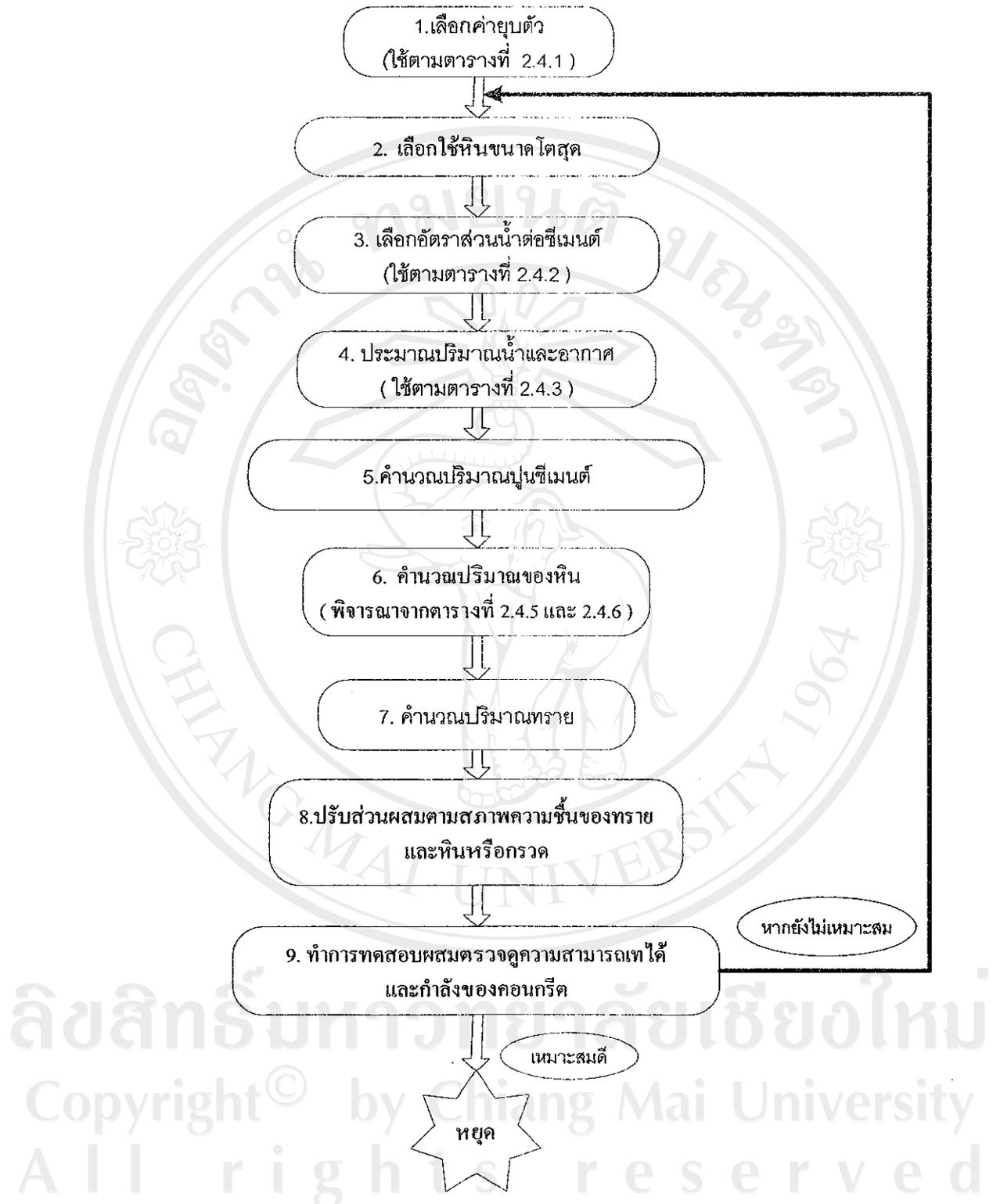
หลังจากที่หาน้ำหนักต่อปริมาตรของมวลรวมหยาบ ปูนซีเมนต์ น้ำและปริมาณอากาศได้แล้ว ปริมาณทรายก็สามารถคำนวณหาได้โดยนำเอาปริมาตรของมวลรวมหยาบ ปูนซีเมนต์ น้ำและปริมาณอากาศ นำมาหักลบกับปริมาตรของคอนกรีตซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 ลบ.ม. โดยปริมาตรที่ได้จะเป็นปริมาตรของมวลรวมละเอียด เมื่อหารปริมาตรที่ได้ด้วยค่าความถ่วงจำเพาะแล้ว ก็จะได้ปริมาณของทรายออกมา

ขั้นตอนที่ 8 ปรับแก้ส่วนผสมตามสภาพความชื้นของทรายและหิน

เนื่องจากปริมาณมวลรวมที่ใช้ก่อนหน้านี้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง แต่ในสภาพความเป็นจริงแล้วมวลรวมไม่ได้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง ทำให้ต้องมีการปรับแก้ปริมาณน้ำ ตามสภาพความชื้นจริงของมวลรวม

ขั้นตอนที่ 9 การทดลองผสม

เมื่อทำการคำนวณปริมาณส่วนผสมที่ต้องการได้เรียบร้อยแล้ว นำมาผสมเพื่อทดสอบความชื้นเหลว และ กำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งถ้าค่าความชื้นเหลวมีลักษณะเหลวกว่าที่ต้องการสามารถปรับแก้ความชื้นเหลว โดยการลดการปริมาณน้ำ แต่ถ้าแห้งมากไป ก็ให้ทำการเพิ่มปริมาณการใช้น้ำ ส่วนถ้ากำลังอัดน้อยกว่ากำลังอัดที่ต้องการแล้ว ให้ทำการปรับลดอัตราส่วน w/c ลง



รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงขั้นตอนการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีตที่มีการยุบตัวเป็นศูนย์
ตามมาตรฐานอเมริกา

ที่มา : ACI Committee 211.3R-97

ตารางที่ 2.4.1 แสดงค่าความชื้นเหลือที่ทดสอบได้จากการทดสอบค่าการยุบตัวและค่าเวลาวิบัติ

ที่มา : ACI Committee 211.3R-97 (2000)

ลักษณะของความชื้นเหลือ	ค่าการยุบตัว มม.	Vebe วินาที
แห้งมาก	-	32-18
กระด้างมาก	-	18-10
กระด้าง	0-25	10-5
ปานกลาง	25-75	5-3
เปียก	75-125	3-0
และ	125-190	-

ตารางที่ 2.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และกำลังอัดประลัยที่ 28 วัน

ที่มา : ACI Committee 211.3R-97 (2000)

กำลังอัดประลัยที่ 28 วัน , กก./ตร.ซม.	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ , โดยน้ำหนัก	
	คอนกรีตที่ไม่มีสารกักกระจาย	คอนกรีตที่มีสารกักกระจาย
	ฟองอากาศ	ฟองอากาศ
500	0.33	-
450	0.38	-
400	0.43	0.34
350	0.48	0.40
300	0.55	0.46
250	0.62	0.53
200	0.70	0.61
150	0.80	0.71

ตารางที่ 2.4.3 ปริมาณน้ำที่ต้องการโดยประมาณสำหรับความชื้นเหลวต่างๆ และ ขนาดโมดูลของหิน

ที่มา : ACI Committee 211.3R-97 (2000)

ลักษณะ	ความชื้นเหลว		ร้อยละของน้ำ สัมพัทธ์	ปริมาณน้ำต่อปริมาตรคอนกรีตสำหรับแต่ละขนาดโมดูลของหิน (มม.)				
	ค่าการดูดน้ำ, มม.	Vebe, วินาที		10	15	20	25	40
คอนกรีตที่ไม่มีสารกึ่งกระจายฟองอากาศ								
แห้งมาก	-	32-18	78	178	169	157	148	139
กระด้างมาก	-	18-10	83	187	187	169	157	148
กระด้าง	0-25	10-5	88	199	193	178	169	157
ปานกลาง	25-75	5-3	92	208	199	187	178	163
เปียก	75-125	3-0	100	228	217	199	193	178
และ	125-190	-	106	243	228	214	208	187
ร้อยละปริมาณอากาศโดยประมาณในคอนกรีตที่ไม่กักอากาศ								
				3	2.5	2	1.5	1
คอนกรีตที่มีสารกึ่งกระจายฟองอากาศ								
แห้งมาก	-	32-18	78	157	148	139	133	125
กระด้างมาก	-	18-10	83	169	157	148	139	133
กระด้าง	0-25	10-5	88	178	169	157	148	139
ปานกลาง	25-75	5-3	92	187	175	166	157	148
เปียก	75-125	3-0	100	202	193	178	178	157
และ	125-190	-	106	217	208	193	187	169
ร้อยละปริมาณอากาศโดยเฉลี่ยที่เหมาะสม				8	7	6	5	4.5

ตารางที่ 2.4.4 ปริมาตรของวัสดุหยาบต่อปริมาตรของคอนกรีต

ที่มา : ACI Committee 211.3R-97 (2000)

ขนาดโศดของ หิน , มม.	ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบในสภาพแห้งต่อหน่วยปริมาตรของคอนกรีต				
	สำหรับ				
	โมดูลัสความละเอียดของทรายต่าง ๆ (ลบ.ม.)				
	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20
10	0.50	0.48	0.46	0.44	0.42
15	0.59	0.57	0.55	0.53	0.51
20	0.66	0.64	0.62	0.60	0.58
25	0.71	0.69	0.67	0.65	0.63
40	0.76	0.74	0.72	0.70	0.68

ตารางที่ 2.4.5 ปริมาตรของวัสดุหยาบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีตสำหรับความชันเหลวต่าง ๆ

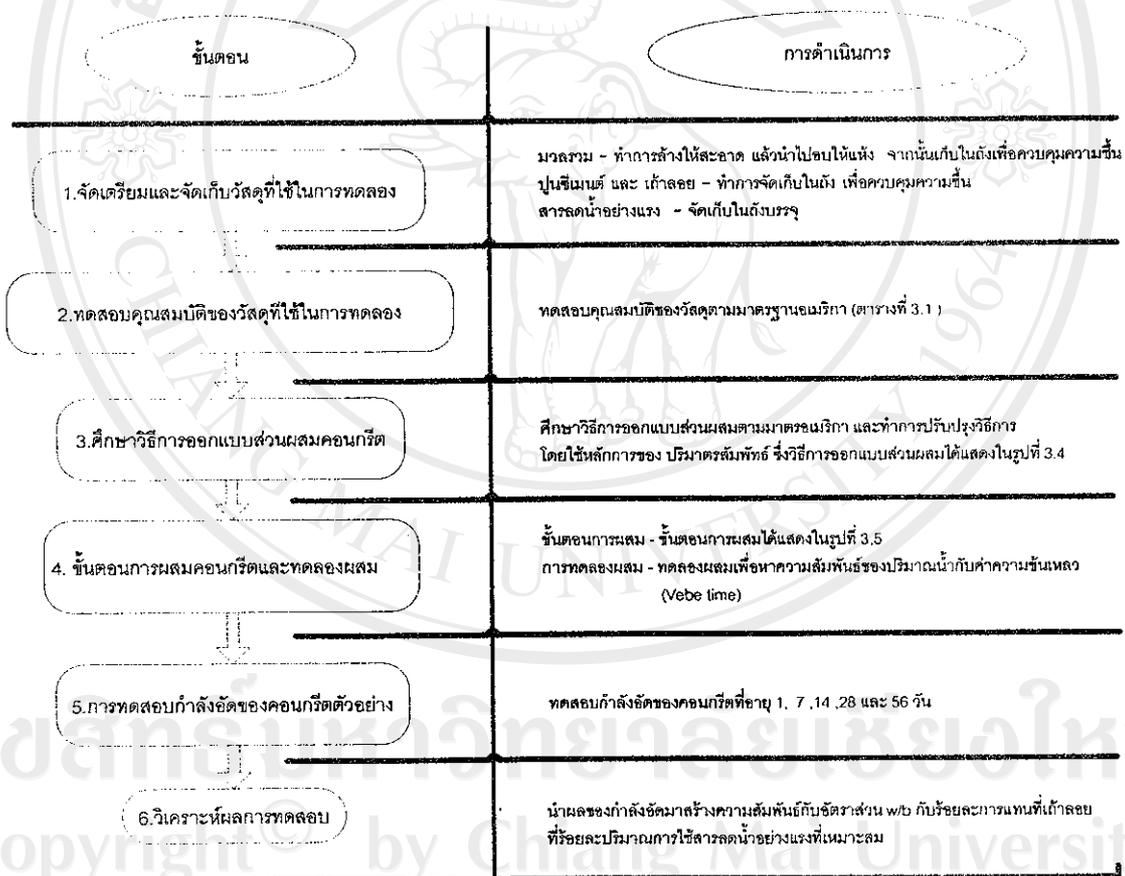
ที่มา : ACI Committee 211.3R-97 (2000)

ความชันเหลว			ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบในสภาพแห้งต่อปริมาตรของคอนกรีต โดยแสดงเป็นร้อยละของตารางที่ 4				
ลักษณะ	ค่าการ ยุบตัว, มม.	Vebe , วินาที	ขนาดโศดของหิน)มม.(
			10	15	20	25	40
แห้งมาก	-	32-18	190	170	145	140	130
กระด้างมาก	-	18-10	160	145	130	125	125
กระด้าง	0-25	10-5	135	130	115	115	120
ปานกลาง	25-75	5-3	108	106	104	106	109
เปียก	75-125	3-0	100	100	100	100	100
และ	125-190	-	97	98	100	100	100

บทที่ 3
วิธีการวิจัย

ในแผนงานของการวิจัยนี้ได้แสดงในรูปที่ 3.1 โดยสามารถที่จะแบ่งเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1. การจัดเตรียมและจัดเก็บวัสดุที่ใช้ในการทดลอง
2. ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง
3. ศึกษาวิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต
4. ขั้นตอนการผสมคอนกรีตและทดลองผสม
5. การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตตัวอย่าง
6. วิเคราะห์ผลการทดสอบ



รูปที่ 3.1 แผนการทำงานและวิธีการดำเนินการ

ซึ่งรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนได้แสดงดังนี้

3.1. การเตรียมและจัดเก็บวัสดุในการวิจัย

ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการทดลองนี้ ประกอบด้วย

3.1.1. มวลรวมหยาบ

มวลรวมหยาบที่ใช้ในการทดสอบนี้มีขนาดใหญ่สุดเท่ากับ 3 / 8 นิ้ว ซึ่งในการเตรียมมวลรวมหยาบนั้น จะทำการล้างมวลรวมหยาบบนตะแกรงเบอร์ 4 จากนั้นก็นำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชม. เสร็จแล้วนำมาทิ้งไว้ให้เย็นในอากาศ เป็นเวลา 4 ชม. หลังจากนั้นนำไปเก็บในถัง ที่ประกอบด้วยถุงดำซ้อนกัน 2 ชั้น เพื่อควบคุมความชื้นของตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.2

3.1.2. มวลรวมละเอียด

มวลรวมละเอียด ได้เลือกใช้ทรายแม่น้ำ โดยการทำกรปรับสภาพ โดยทำการล้างเอาฝุ่นออก แล้วนำไปอบในเตาอบ เป็นเวลาอย่างน้อย 48 ชม. แล้วปล่อยให้เย็นในอากาศประมาณ 4 ชม. แล้วนำไปจัดเก็บในถังเช่นเดียวกับ มวลรวมหยาบ

3.1.3. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลองเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตรา อินทรีเพชร โดยการจัดเก็บ เก็บไว้ในถังเช่นเดียวกับ มวลรวมหยาบและละเอียด

3.1.4. ฝัากลอย

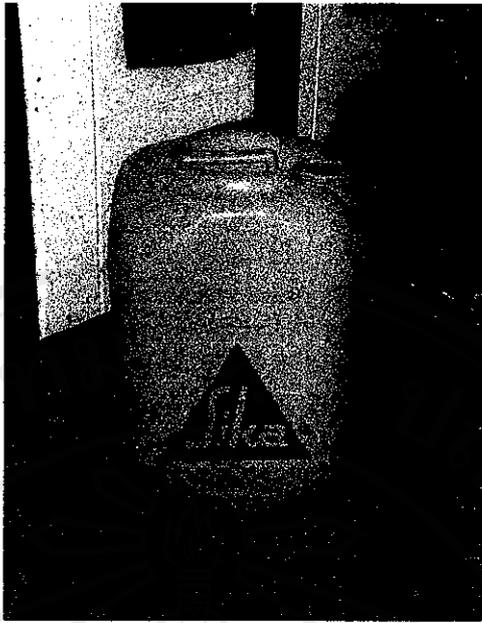
ฝัากลอยที่ใช้เป็นฝัากลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัด ลำปาง โดยการ จัดเก็บ เก็บไว้ในถังเช่นเดียวกับ ปูนซีเมนต์ ดังรูปที่ 3.2

3.1.5. สารลดน้ำอย่างแรง (Superplasticizer)

สารลดน้ำอย่างแรง ได้เลือกใช้สารลดน้ำอย่างแรงประเภทเมลามีน ซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ ยี่ห้อ Sikament FF โดยจัดเก็บในถังบรรจุสารลดน้ำอย่างแรง และจัดเก็บไว้ในที่ร่ม ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ภาพแสดงลักษณะการจัดเก็บวัสดุที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 3.3 ถังเก็บสารลดน้ำอย่างแรง

3.2.ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดสอบคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งวิธีการทดสอบได้ปฏิบัติตามวิธีการทดสอบวัสดุตามมาตรฐานอเมริกา (ASTM) ซึ่งในการทดสอบคุณสมบัติวัสดุได้ทดสอบตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รายการทดสอบวัสดุ

วัสดุ	คุณสมบัติ	มาตรฐานการทดสอบ
ปูนซีเมนต์	<ul style="list-style-type: none"> • ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ 	ASTM C188
เถ้าลอย	<ul style="list-style-type: none"> • ความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย 	ASTM C188*
มวลรวมหยาบ	<ul style="list-style-type: none"> • ความถ่วงจำเพาะและร้อยละการดูดซึม • หน่วยน้ำหนักในสภาพอบแห้งและกระทุ้งแน่น • สัดส่วนขนาดคละและขนาดใหญ่สุด 	ASTM C127 ASTM C29 ASTM C136
มวลรวมละเอียด	<ul style="list-style-type: none"> • ความถ่วงจำเพาะและร้อยละการดูดซึม • หน่วยน้ำหนักในสภาพอบแห้งและกระทุ้งแน่น • สัดส่วนขนาดคละ และ โมดูลัสความละเอียด 	ASTM C128 ASTM C 29 ASTM C136

หมายเหตุ *ใช้วิธีเดียวกันกับการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

3.3 วิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

วิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอยกับสารลดน้ำอย่างแรง ที่มีการยุบตัวเป็นศูนย์ เป็นวิธีการที่ได้ทำการปรับปรุงวิธีการออกแบบส่วนผสมของ ACI 211.3R-97 (2000) โดยอาศัยหลักการของ ปริมาตรสัมบูรณ์ (Absolute Volume) ซึ่งวิธีการออกแบบส่วนผสมนี้ได้แสดงในรูปที่ 3.4 และรูปแบบของตารางการคำนวณ รวมถึงวิธีการคำนวณหาส่วนผสมของคอนกรีตได้นำเสนอไว้ในภาคผนวก ก. โดยในการออกแบบส่วนผสมนี้ ได้ทำการศึกษาคอนกรีตที่มีการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานเท่ากับ 0.23 ถึง 0.38 และในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานได้ใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน ร้อยละ 0 ,15 ,25 และ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน ซึ่งแต่ละชุดการทดสอบได้ทดลองผสมเพื่อหาความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมกับค่าความชื้นเหลวของแต่ละส่วนผสม โดยที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงได้เท่ากับร้อยละ 0.5 , 1.0 และ 1.5 ของมวลของวัสดุเชื่อมประสาน ส่วนในการทดสอบหาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานกับกำลังอัด ได้เลือกใช้สารลดน้ำอย่างแรงในปริมาณที่จุดเข้ากัน ได้ดีกับปูนซีเมนต์

ขั้นตอนการออกแบบมีดังนี้

3.3.1 เลือกค่าความชื้นเหลว โดยวัดจากเวลาวิบี (Vebe time) ซึ่งกำหนดค่าเวลาวิบี อยู่ในช่วงระหว่าง 10 - 20 วินาที

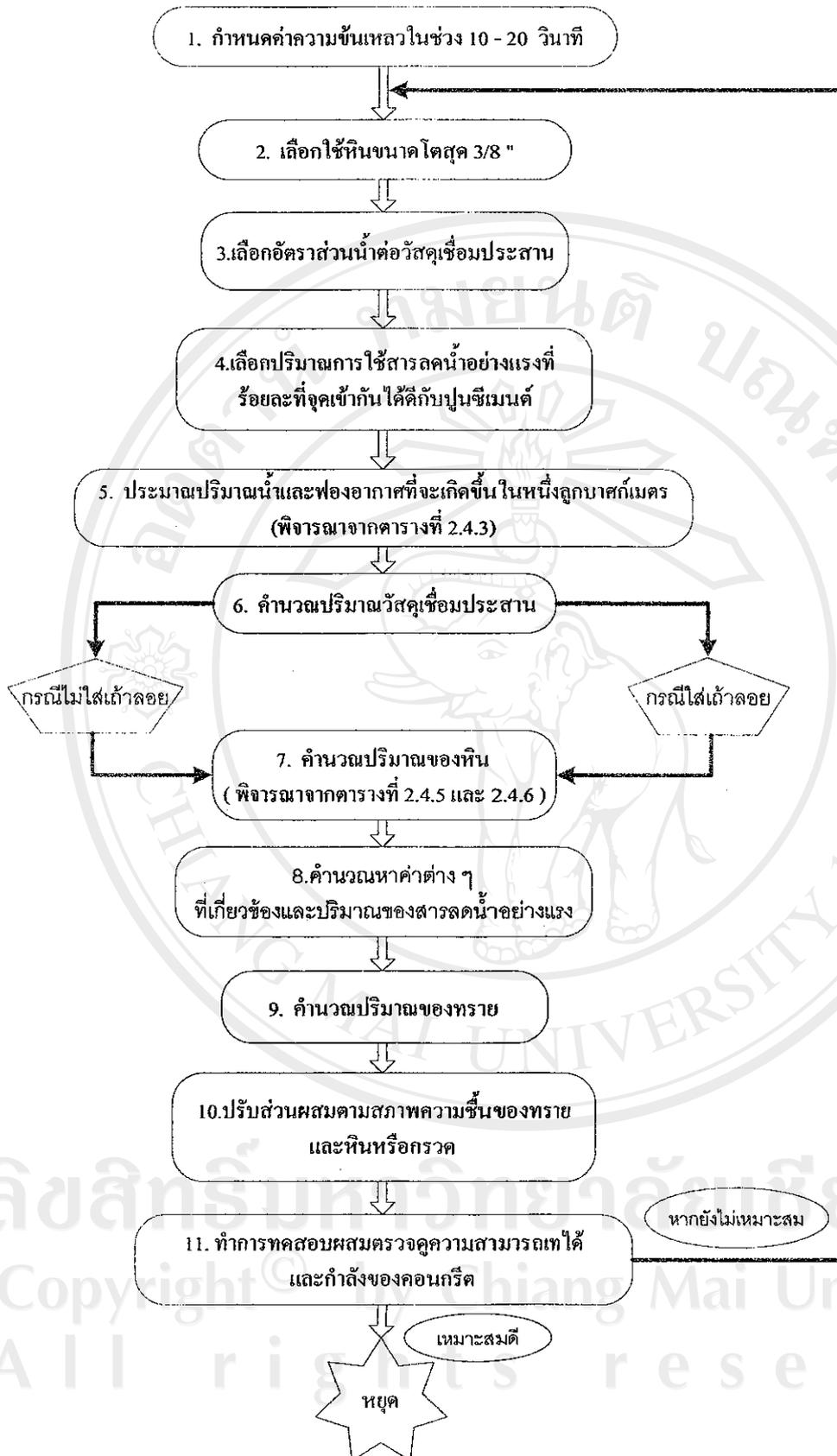
3.3.2 เลือกขนาดใหญ่สุดของหิน การเลือกขนาดหินใหญ่สุดขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้างได้แก่ ความกว้าง ระยะห่างระหว่างเหล็กเส้น ขนาดใหญ่สุดของหินต้องไม่ใหญ่จนไม่สามารถเทคอนกรีตลงแบบหล่อ ได้ทั่วไปแล้วจะกำหนดขนาดใหญ่สุดของหินไว้ไม่เกิน

1 /5 ของค้ำานในที่แคบที่สุดของแบบหล่อ

1 /3 ของความหนาของแผ่นพื้น

3 /4 ของระยะช่องว่างที่น้อยที่สุดระหว่างเหล็กเสริมแต่ละเส้นหรือแต่ละมัด

สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ขนาดหินใหญ่สุด เท่ากับ 3/8 นิ้ว เพื่อให้สามารถทำงานได้ง่าย เนื่องจาก คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบขนาด มีความสามารถในการงานได้ของคอนกรีตสดดีกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่มีขนาดใหญ่



รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนการออกแบบสัดส่วนคอนกรีตที่มีการชุบตัวเป็นศูนย์ผสมแล้ว
ลดยกับสารลดน้ำอย่างแรง ที่ปรับปรุงจากวิธีการออกแบบส่วนผสมตามมาตรฐานอเมริกา

3.3.3 เลือกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน สำหรับวิธีการออกแบบส่วนผสม ตามมาตรฐานอเมริกา ได้แนะนำไว้ไม่เกิน 0.33 สำหรับคอนกรีตที่ต้องการกำลังอัด ประมาณ 500 กก./ตร.ซม. แต่สำหรับงานวิจัยนี้ได้มีการใช้สารลดน้ำอย่างแรง และแก้ ลอย ทำให้สามารถลดอัตราส่วน w/b ลงได้ จากที่แนะนำ จึงเลือกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ เชื่อมประสาน เท่ากับ 0.23, 0.28, 0.33 และ 0.38 ตามลำดับ โดยในแต่ละอัตราส่วน จะแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 0, 15, 25, และ 35 ตามลำดับ

3.3.4 ประมาณปริมาณน้ำและอากาศ ปริมาณน้ำที่ต้องการจะเป็นตัวกำหนดค่า ความชื้นเหลว ซึ่งขึ้นอยู่กับ ขนาดโศศุค รูปร่างของหิน และ สัดส่วนขนาดคละ คุณภาพ ปูนซีเมนต์ และ ประเภทของสารลดน้ำอย่างแรง

3.3.5 เลือกปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรง โดยปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่าง แรงได้เลือกใช้ที่ร้อยละที่เหมาะสม ซึ่งร้อยละที่เหมาะสมนี้ จะขึ้นอยู่กับยี่ห้อของ ปูนซีเมนต์และสารลดน้ำอย่างแรง โดยในการทดลองนี้ได้เลือกใช้สารลดน้ำอย่างแรง ตรา ซิก้าเมนต์เอฟเอฟ และปูนซีเมนต์ตราเพชร ซึ่งมีปริมาณร้อยละที่จุคเข้ากันได้ดีกับ ปูนซีเมนต์เท่ากับ ร้อยละ 1 ซึ่งในการทดลองผสมหาความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำที่ใช้ใน ส่วนผสมกับค่าความชื้นเหลว ได้ทำการศึกษาที่ปริมาณสารลดน้ำอย่างแรงในอัตราส่วน ร้อยละ 0.5 ,1.0 และ 1.5 เพื่อศึกษาผลของปริมาณการใช้สารลดน้ำในปริมาณต่าง ๆ กับ ความสามารถในการลดปริมาณน้ำ

3.3.6 คำนวณหาปริมาณปูนซีเมนต์ และ เถ้าลอย โดยสามารถคำนวณหาได้จาก

$$b = \frac{w'}{R_{wb}}$$

โดยที่ b = ปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน

w' = ปริมาณน้ำ

R_{wb} = อัตราส่วน w/b ที่เลือก

จากนั้นก็สามารคคำนวณหาปริมาณเถ้าลอยได้ดังนี้

$$f = \frac{P}{100} \times b$$

โดยที่ f = ปริมาณเถ้าลอย

P = ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

และ ปริมาณปูนซีเมนต์จาก

$$c = b - f$$

โดยที่ c = ปริมาณปูนซีเมนต์

3.3.7 คำนวณหาปริมาณมวลรวมหยาบ ขึ้นอยู่กับขนาดใหญ่สุด ค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย ค่าความชื้นเหลวที่ใช้ และค่าหน่วยน้ำหนักของหิน

3.3.8 คำนวณหาค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องและปริมาณของสารลดน้ำอย่างแรง ซึ่งค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณประกอบด้วย มวลของแข็งที่ต้องการ , ปริมาตรของสารลดน้ำอย่างแรง , ปริมาตรของน้ำที่มากับสารลดน้ำอย่างแรง และปริมาตรของของแข็ง ซึ่งคำนวณได้จาก

$$M_{sol} = \frac{d}{100} \times b$$

โดยที่ d = ร้อยละที่เหมาะสมของการใช้สารลดน้ำอย่างแรงกับปูนซีเมนต์

M_{sol} = มวลของของแข็งในสารลดน้ำอย่างแรง

$$V_{liq} = \frac{M_{sol} \times 100}{S \times G_{sup}}$$

โดยที่ V_{liq} = ปริมาตรของสารลดน้ำอย่างแรงในรูปแบบของเหลว

S = ร้อยละของแข็ง

G_{sup} = ค่าความถ่วงจำเพาะของสารลดน้ำอย่างแรง

$$V_w = V_{liq} \times G_{sup} \frac{(100 - S)}{100}$$

$$V_{sol} = V_{liq} - V_w$$

โดยที่ V_w = ปริมาตรของน้ำในสารลดอย่างแรง

V_{sol} = ปริมาตรของของแข็ง

3.3.9 คำนวณปริมาณมวลรวมละเอียด เมื่อทราบปริมาณของวัสดุผสมอื่นทั้ง

หมดแล้ว ปริมาณทรายก็สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$S = 1000 - A$$

โดยที่ S = ปริมาณทราย มีหน่วยเป็น ลิตร

A = ปริมาตรวัสดุทั้งหมดยกเว้นทราย มีหน่วยเป็นลิตร

จากนั้นถ้าต้องการปริมาณทรายโดยน้ำหนัก ก็สามารถหาได้จาก

$$s = G_s \times S$$

โดยที่ s = ปริมาณทรายโดยน้ำหนัก มีหน่วยเป็นกิโลกรัม

G_s = ค่าความถ่วงจำเพาะของทราย

3.3.10 ปรับส่วนผสมตามความชื้นมวลรวม และปริมาณน้ำในสารลดน้ำอย่างแรง ในสภาพจริงทราย และ หินไม่ได้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง บางครั้งทรายและหินมีสภาพแห้งหรือเปียกกว่าสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง เมื่อนำไปผสมคอนกรีตจะทำให้ปริมาณน้ำที่ใช้คลาดเคลื่อนไป กล่าวคือ ในกรณีที่ทรายและหินมีสภาพแห้งเกินไป ปริมาณน้ำที่ใส่เข้าไป บางส่วนจะถูกหินและทรายดูดซับเอาไว้ ทำให้ปริมาณน้ำที่ใช้น้อยกว่าความเป็นจริง หรือในกรณีที่ทราย และหินมีสภาพที่เปียกเกินไป ปริมาณน้ำส่วนเกินก็จะเข้าไปรวมกับปริมาณน้ำที่ใส่เข้าไป ทำให้มีปริมาณน้ำในส่วนผสมมากกว่าความเป็นจริง ซึ่งปริมาณน้ำที่เปลี่ยนไปจะมีผลโดยตรงกับกำลังอัดคอนกรีต ดังนั้นก่อนจะนำส่วนผสมที่ได้คำนวณได้มาใช้จะต้องมีการปรับส่วนผสมใหม่ตามสภาพความชื้นจริงของมวลรวม และปริมาณน้ำที่มากับสารลดน้ำอย่างแรง เพื่อให้ได้ปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมตามที่ต้องการ

3.4 ขั้นตอนการผสมคอนกรีตและทดลองผสม

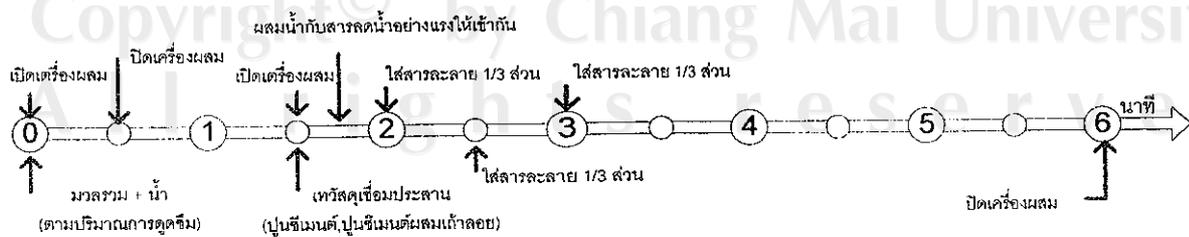
โดยในการผสมคอนกรีตในแต่ละครั้งนั้น ได้มีการกำหนดระยะเวลาและขั้นตอนที่ใช้ในการผสม ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

3.4.1 ตรวจสอบสภาพ และเตรียมแบบหล่อ โดยการประกอบแบบและทาน้ำมันให้พร้อมใช้งาน

3.4.2 ชั่งน้ำหนักวัสดุที่ใช้ผสม ได้แก่ น้ำ ปูนซีเมนต์ ทราย หิน และสารลดน้ำอย่างแรง ตามที่ออกแบบส่วนผสม (ใช้ตารางการคำนวณในภาคผนวก ก.)

3.4.3 ทำความสะอาดเครื่องผสม และเครื่องมือวัดค่าความชื้นเหลว โดยใช้น้ำประปาล้าง แล้วใช้ผ้าเช็ดพอหมาด ๆ ให้เครื่องมือที่สัมผัสกับคอนกรีตอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง เพื่อป้องกันการดูดซึมน้ำเนื่องจากเครื่องมือ เพื่อที่จะป้องกันการสูญเสียของน้ำที่ใช้ในการผสม

3.4.4 ทำการผสมปูนทรายและน้ำในเครื่องผสมก่อนการผสมจริง โดยใช้อัตราส่วนเดียวกับส่วนผสมที่ผสมจริง จากนั้นเทปูนทรายลงเครื่องผสมให้เคลือบผิวทั้งหมดแล้วเทส่วนเกินทิ้ง เพื่อลดการสูญเสียปูนทรายในส่วนผสมจริงขณะทำการผสม



รูปที่ 3.5 วงจรผสมคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง

3.4.5 นำวัสดุเทลงในเครื่องผสม โดยมีขั้นตอนดังรูปที่ 3.5 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- ก. เทหินและทรายลงในเครื่องผสม แต่เนื่องจากหินและทรายที่ใช้ในการทดสอบได้ทำการควบคุมความชื้น โดยมีความชื้นอยู่มากกว่าความชื้นในสภาพแห้งด้วยเตาอบเล็กน้อย จึงทำการผสมน้ำส่วนหนึ่ง เพื่อลดปัญหาของการเกิดปัญหาเรื่องการสูญเสียค่าความยุบตัว (Slump Loss) จากนั้นทำการเปิดเครื่องคลุกเคล้าให้เข้ากันเป็นเวลา 30 วินาที และปิดเครื่องทิ้งไว้ประมาณ 1 นาที
- ข. เทปูนซีเมนต์และเถ้าลอยลงในเครื่องผสม เปิดเครื่องผสมเป็นเวลา 30 วินาที ระหว่างนั้นทำการผสมน้ำกับสารลดน้ำอย่างแรงให้เข้ากัน จากนั้นทำการเติมสารละลายส่วนที่เหลือลงไป โดยแบ่งสารละลายออกเป็น 3 ส่วน ทำการใส่สารละลายลงไปทีละส่วน โดยในแต่ละส่วนจะทำการใส่ห่างกันเป็นเวลา 30 วินาที เมื่อผสมสารละลายลงไปหมดแล้ว ทำการเปิดเครื่องทิ้งไว้ อีกทิ้งไว้อีกประมาณ 3 นาที

3.4.6 เมื่อผสมคอนกรีตเสร็จแล้วนำคอนกรีตออกจากเครื่องผสม และทำการตรวจวัดค่าความชื้นเหลือของคอนกรีต โดยใช้เครื่อง Vebe test โดยถ้าค่าความชื้นเหลือเป็นไปตามที่ต้องการ ก็นำไปเทลงในแบบหล่อที่เตรียมไว้ เพื่อนำไปทดสอบกำลังอัดต่อไป แต่ถ้าไม่ได้ตามที่ต้องการก็เริ่มทำการผสมใหม่ โดยถ้าความชื้นเหลวมากเกินไป สามารถปรับแก้ได้ โดยการลดปริมาณน้ำ แต่ถ้าความชื้นเหลวน้อยเกินไป ก็ทำการเพิ่มปริมาณน้ำ พร้อมกับปรับปริมาณส่วนผสมใหม่อีกครั้ง

3.5 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตตัวอย่าง

ในการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต โดยจุดสำคัญในการทดสอบ ก็เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (w/b) กับกำลังอัดของคอนกรีตที่มีการยุบตัวเป็นศูนย์ในกรณีที่ใส่เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนต่างๆ โดยใช้ร่วมกับสารลดน้ำอย่างแรงที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์ ซึ่งเลือกใช้ค่าอัตราส่วน w/b เท่ากับ 0.23 ,0.28 ,0.33 และ 0.38 สำหรับปริมาณการใช้เถ้าลอยในการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีเมนต์ ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักดังนี้ 0% ,15% ,25% และ 35% ซึ่งในตารางที่ 3.2 ได้แสดงจำนวนตัวอย่างและอายุการทดสอบของการทดลองนี้

3.6 การเตรียมชุดตัวอย่าง

ในการทดสอบกำลังอัดจะเตรียมตัวอย่างทรงกระบอกขนาด 100x200 มม. แยกออกเป็น 4 ชุด ตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (w/b) ดังนี้ 0.23,0.28,0.33 และ 0.38 ตามลำดับ โดยแปรผันปริมาณร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 0, ร้อยละ 15, ร้อยละ 25 และ ร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน ซึ่งในแต่ละสัดส่วนผสมเลือกใช้ปริมาณสารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์ และในแต่ละสัดส่วนผสมทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 1, 7, 14, 28 และ 56 วัน ตามลำดับ โดยในแต่ละชุดทดสอบกำลังอัดใช้ก้อนตัวอย่างชุดละ 5 ตัวอย่าง ซึ่งได้แสดงในตารางที่ 3.2

โดยที่ สัญลักษณ์ที่ใช้ในการทดสอบ รูปแบบ NS-WB-PP%-@S-D

NS	หมายถึง	คอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์
WB	หมายถึง	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (w/b)
PP	หมายถึง	ปริมาณร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย
S	หมายถึง	ร้อยละของปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรง
D	หมายถึง	อายุวันที่ทดสอบ

การอ่านสัญลักษณ์

ตัวอย่าง NS-0.33-00%-@1.0-28 หมายถึง คอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ ที่มีอัตราส่วน w/b เท่ากับ 0.33 โดยที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงร้อยละ 1 และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน

ตารางที่ 3.2 แสดงวิธีการออกแบบการทดสอบและเตรียมก่อนตัวอย่าง

W/B	ทดสอบที่อายุต่างๆ																
	0% (คอนกรีตความคุม)				15%				25%				35%				
	1 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	1 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	1 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	1 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน
0.23	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
0.28	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
0.33	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
0.38	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

จำนวนก้อนตัวอย่างสำหรับการรับเปอร์เซ็นต์การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย
ทดสอบที่อายุต่างๆ

บทที่ 4

ผลการศึกษาและทดสอบ

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุ

การทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง จะใช้วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ซึ่งคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ส่วนรายละเอียดการทดสอบได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข.

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

ที่มา ผลการทดสอบเถ้าลอยโดยฝ่ายวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

คุณสมบัติ	ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย
Chemical Composition		
SiO ₂ (%)	20.20	40.89
Fe ₂ O ₃ (%)	2.92	13.33
Al ₂ O ₃ (%)	5.42	19.79
CaO (%)	63.82	14.54
MgO (%)	1.50	2.08
SO ₃ (%)	2.30	2.71
LOI (%)	2.92	0.35
Specific Gravity	3.15	2.20
Fineness (Wet sieve, >45 μm.%)	-	37.5

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของมวลรวม

คุณสมบัติ	ทราย		หิน 3/8"	
	Sieve No.	Passing (%)	Sieve No.	Passing (%)
ขนาดกละ	#4	98.64	1"	100
	#8	88.37	3/4"	100
	#16	65.94	1/2"	100
	#30	33.69	3/8"	87.91
	#50	13.19	#4	1.73
	#100	2.95		
ความถ่วงจำเพาะสถานะอบแห้ง	2.53		2.70	
ความถ่วงจำเพาะสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง	2.56		2.72	
ค่าความดูดซึม	1.14		0.76	

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของสารลดน้ำอย่างแรง

ที่มา ผลการทดสอบฝ่ายควบคุมคุณภาพการผลิต บริษัท ชิก้า ประเทศไทย จำกัด

รายการ	คุณสมบัติทางกายภาพ	
	ผลการทดสอบ	เกณฑ์ที่ยอมรับของผลิตภัณฑ์
SG @ 25° C	1.200	1.190 - 1.210
pH @ 25° C	9.29	9.0 - 10.0
ปริมาณร้อยละของแข็ง	35.30	34.5 - 36.0
Viscosity @ 25° C	19.0	15.0 - 30.0

4.2 ผลการทดลองผสมคอนกรีต

วิธีการคำนวณหาปริมาณของสัดส่วนผสมคอนกรีต สามารถทำได้โดยใช้ตารางการคำนวณที่ได้นำเสนอไว้ในภาคผนวก ก. ซึ่งเมื่อได้ปริมาณของสัดส่วนผสมตามที่ได้ออกแบบแล้ว นำส่วนผสมมาทำการทดลองผสมเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับค่าความขึ้นเหลว (Vebe time) ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงเท่ากับ, น้อยกว่า และมากกว่า จุดที่เข้ากันได้ของสารลดน้ำอย่างแรงกับปูนซีเมนต์ร้อยละ ± 50 โดยผลการทดสอบได้แสดงในตารางที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ และแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ปริมาณน้ำกับค่าความขึ้นเหลวในอัตราส่วน w/b ต่าง ๆ ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.16

ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับค่าความขึ้นเหลว (Vebe time) ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่เข้ากันได้กับปูนซีเมนต์ (ร้อยละ 1.0)

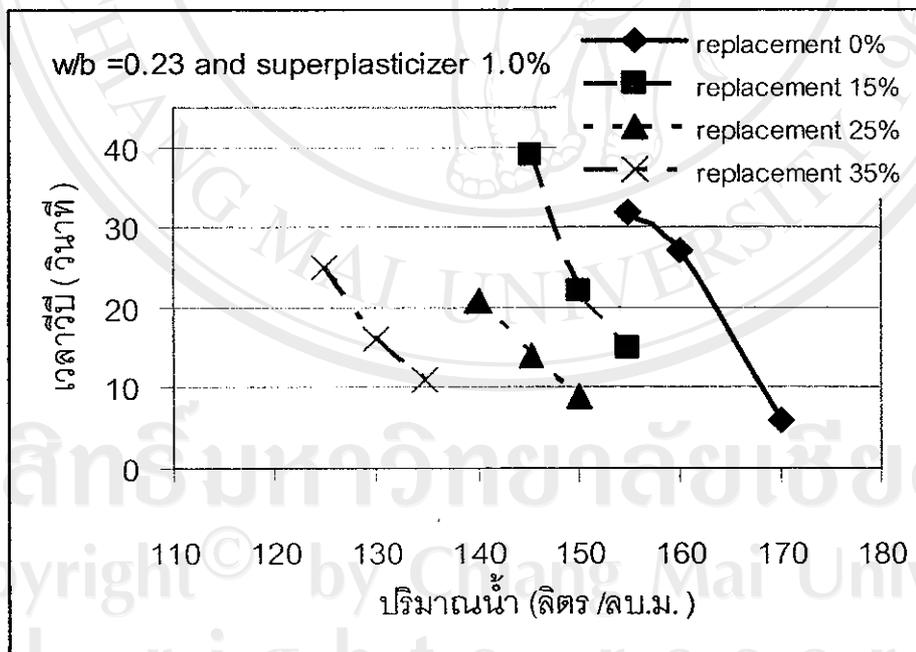
สัดส่วนผสม	ปริมาณน้ำที่ใช้ (ลิตร)	เวลาขึ้น (วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	ค่าความขึ้นเหลว
NS-0.23-00%-@1.0	155	32	31	56
	160	27		
	170	6		
NS-0.23-15%-@1.0	145	39	29	75
	150	22		
	155	15		
NS-0.23-25%-@1.0	140	21	32	62
	145	14		
	150	9		
NS-0.23-35%-@1.0	125	25	31	75
	130	16		
	135	11		

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

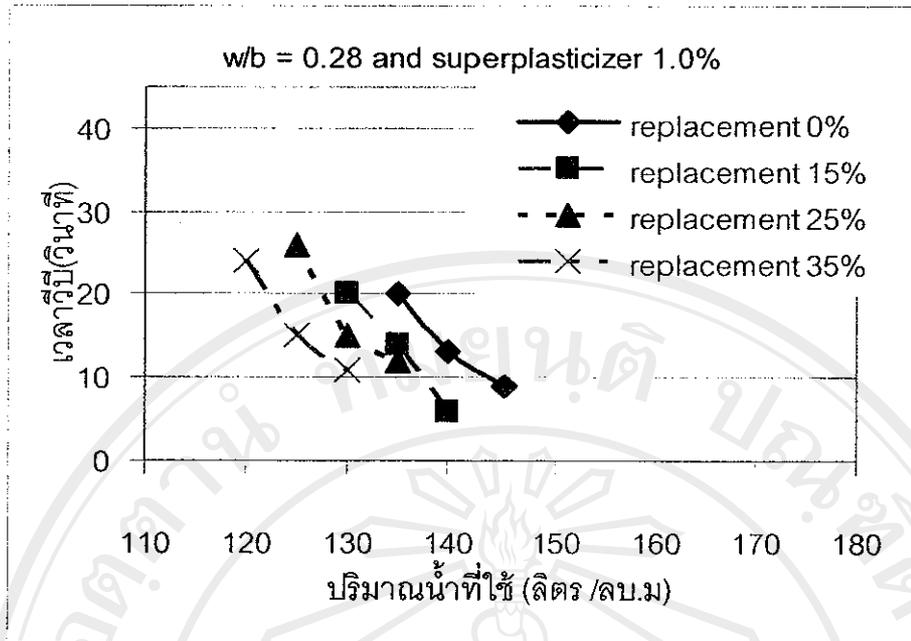
สัดส่วนผสม	ปริมาณน้ำใช้ (ลิตร)	เวลาบีบ (วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์
NS-0.28-00%>@1.0	135	20	27	82
	140	13		
	145	9		
NS-0.28-15%>@1.0	130	20	27	82
	135	14		
	140	6		
NS-0.28-25%>@1.0	125	26	31	75
	130	15		
	135	12		
NS-0.28-35%>@1.0	120	24	33	69
	125	15		
	130	11		
NS-0.33-00%>@1.0	130	28	33	69
	135	15		
	140	11		
NS-0.33-15%>@1.0	120	38	33	69
	125	23		
	130	17		
NS-0.33-25%>@1.0	120	27	32	76
	125	19		
	130	13		
NS-0.33-35%>@1.0	115	38	32	76
	120	24		
	125	16		

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

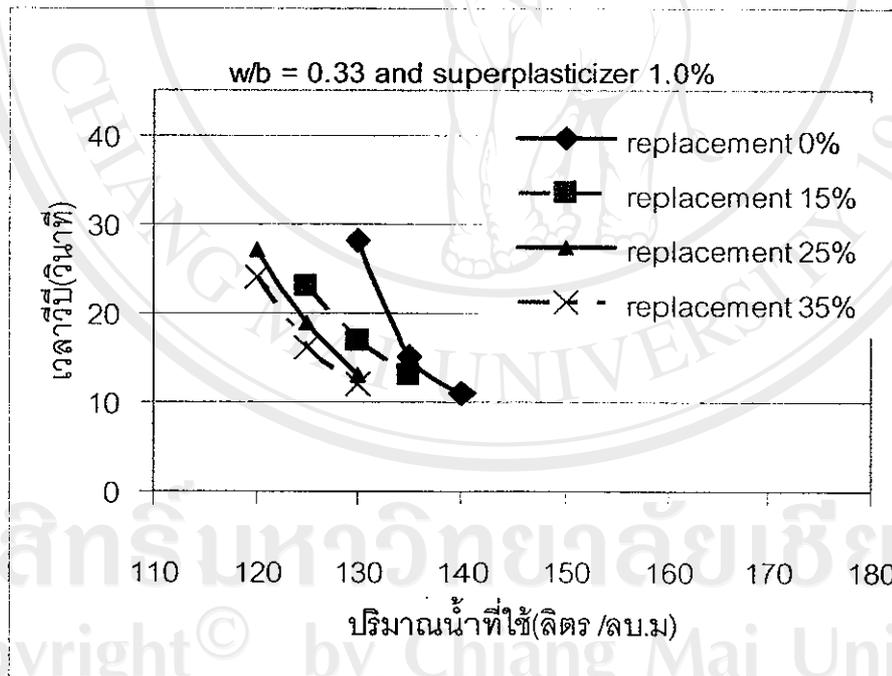
สัดส่วนผสม	ปริมาณน้ำที่ใช้ (ลิตร)	เวลาวย (วินาที)	ความหนาแน่น (%)	สภาพการ ล้มเหลว
NS-0.38-00%-@1.0	130	28	30	83
	135	20		
	140	13		
NS-0.38-15%-@1.0	125	31	30	83
	130	20		
	135	14		
NS-0.38-25%-@1.0	125	27	30	83
	130	16		
	135	12		
NS-0.38-35%-@1.0	120	29	30	75
	125	17		
	130	14		



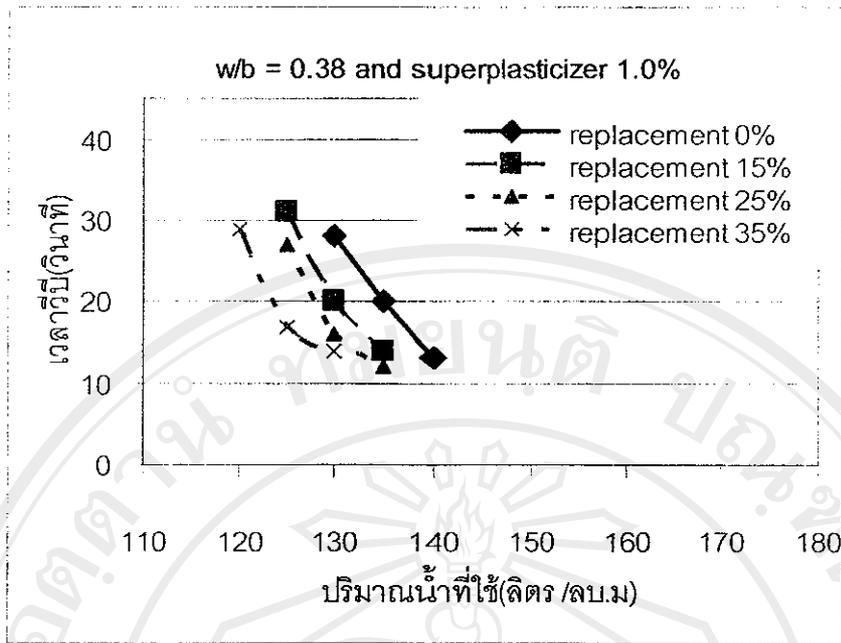
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับค่าความข้นเหลว ที่ค่าอัตราส่วน w/b = 0.23 ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่เข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์ (ร้อยละ 1.0)



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับค่าความขึ้นเหลว ที่ค่าอัตราส่วน $w/b = 0.28$ ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่เข้ากันได้กับปูนซีเมนต์ (ร้อยละ 1)



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับค่าความขึ้นเหลว ที่ค่าอัตราส่วน $w/b = 0.33$ ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่เข้ากันได้กับปูนซีเมนต์ (ร้อยละ 1)



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับค่าความข้นเหลว ที่ค่าอัตราส่วน $w/b = 0.38$ ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่เข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์ (ร้อยละ 1)

ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับค่าความข้นเหลว (Vebe time) ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงน้อยกว่าปริมาณที่เข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 (ร้อยละ 0.5)

สัดส่วนผสม	ปริมาณน้ำที่ใช้ (ลิตร)	เวลาวีบี (วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	ความสัมพันธ์
NS-0.23-00% - @0.5	160	29	30	82
	165	17		
	170	13		
NS-0.23-15% - @0.5	155	26	30	82
	160	14		
	165	8		
NS-0.23-25% - @0.5	145	21	29	91
	150	14		
	155	10		
NS-0.23-35% - @0.5	130	28	29	91
	135	16		
	140	12		

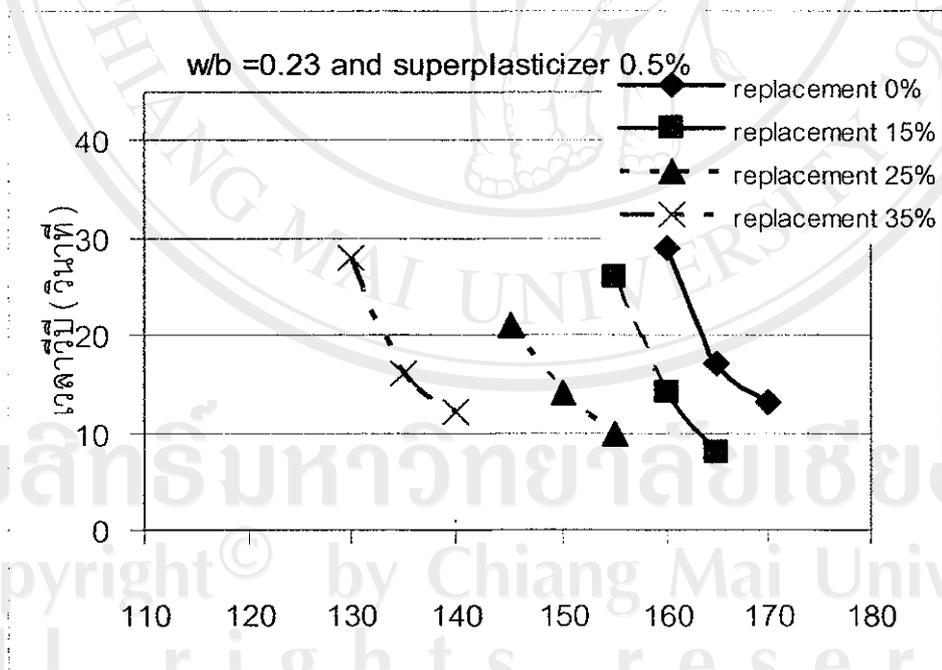
ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

ลักษณะผสม	ปริมาณน้ำที่ใช้ (ลิตร)	เวลาบีบ (วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์
NS-0.28-00%-@0.5	155	27	29	83
	160	17		
	165	11		
NS-0.28-15%-@0.5	145	16	29	83
	150	12		
	155	9		
NS-0.28-25%-@0.5	130	25	29	83
	135	17		
	140	14		
NS-0.28-35%-@0.5	125	27	27	82
	130	19		
	135	14		
NS-0.33-00%-@0.5	150	25	28	82
	155	18		
	160	10		
NS-0.33-15%-@0.5	135	24	28	82
	140	16		
	150	5		
NS-0.33-25%-@0.5	130	24	28	82
	135	17		
	140	12		
NS-0.33-35%-@0.5	125	21	29	83
	130	17		
	135	13		

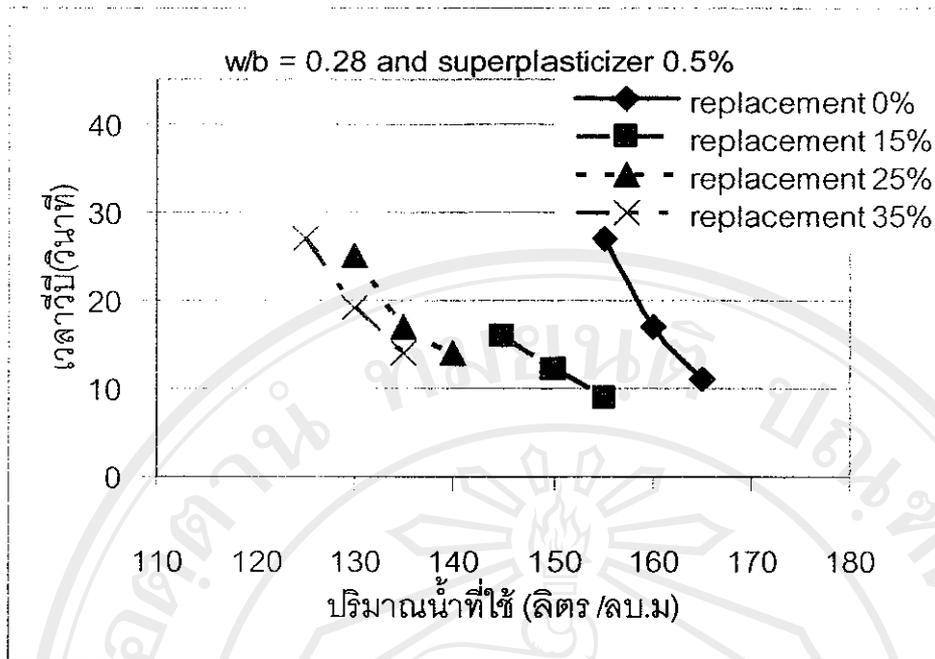
เลขหมู่.....
 สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

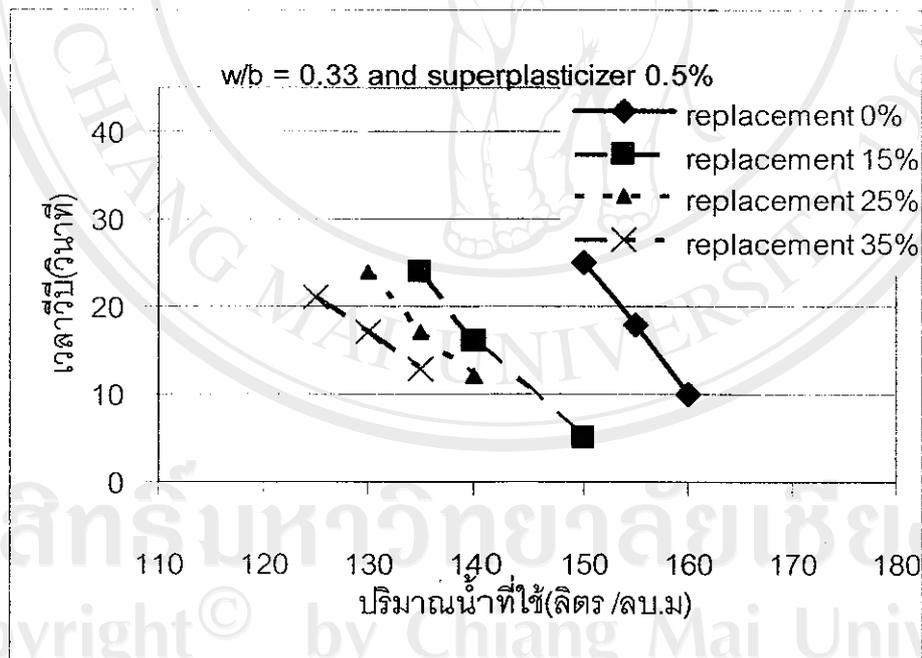
ตัวอย่างผสม	ปริมาณน้ำที่ใช้ (ลิตร)	เวลาอบ (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์
NS-0.38-00%-@0.5	145	22	30	82
	150	18		
	155	9		
NS-0.38-15%-@0.5	140	32	30	75
	145	19		
	150	12		
NS-0.38-25%-@0.5	135	22	28	83
	140	16		
	145	12		
NS-0.38-35%-@0.5	130	20	30	83
	135	15		
	140	9		



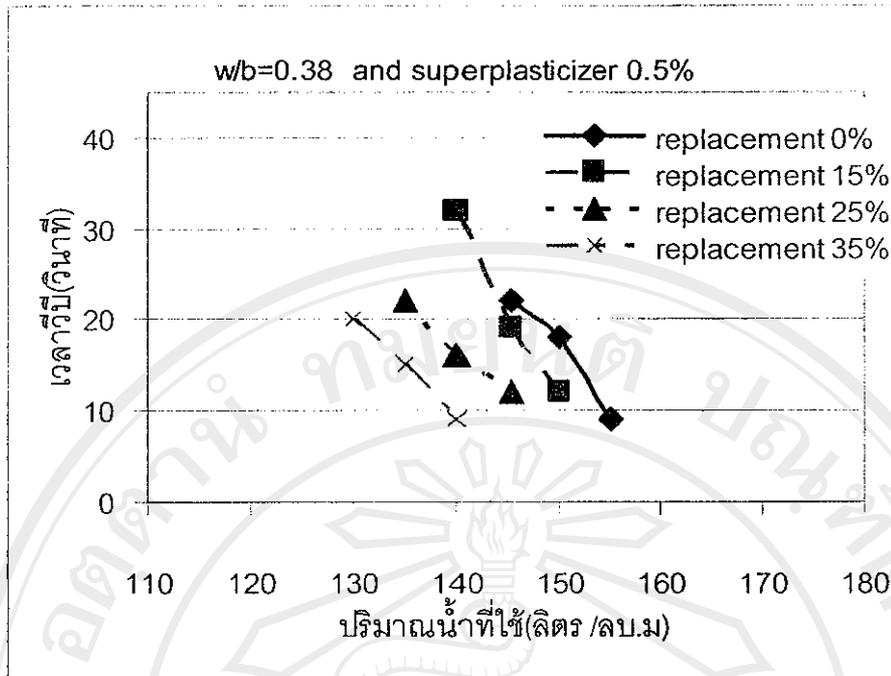
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับค่าความชื้นเหลือ ที่ค่าอัตราส่วน w/b = 0.23 ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงน้อยกว่าจุดที่เข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์ ร้อยละ 50 (ร้อยละ 0.5)



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับค่าความขึ้นเหลว ที่ค่าอัตราส่วน w/b = 0.28 ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงน้อยกว่าจุดที่เข้ากันได้คือกับปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 (ร้อยละ 0.5)



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับค่าความขึ้นเหลว ที่ค่าอัตราส่วน w/b = 0.33 ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงน้อยกว่าจุดที่เข้ากันได้คือกับปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 (ร้อยละ 0.5)



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับค่าความข้นเหลว ที่ค่าอัตราส่วน $w/b = 0.38$ ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงน้อยกว่าจุดที่เข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 (ร้อยละ 0.5)

ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับค่าความข้นเหลว ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงมากกว่าปริมาณที่เข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์ ร้อยละ 50 (ร้อยละ 1.5)

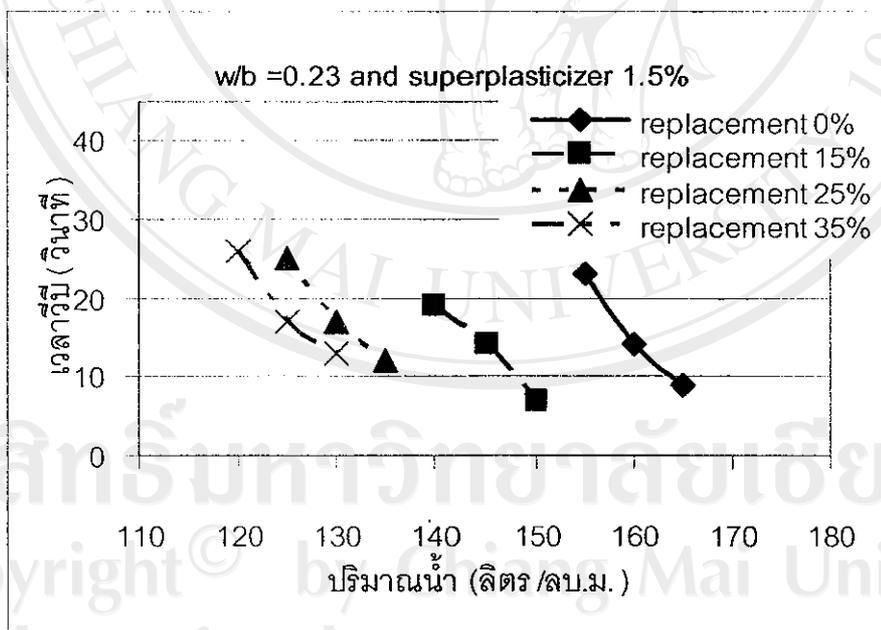
รหัสของคอนกรีต	ปริมาณน้ำที่ใช้ (ลิตร)	เวลาไหล (วินาที)	ค่าความข้นเหลว (s)	ค่าความข้นเหลว (วินาที)
NS-0.23-00%-@1.5	155	23	30	82
	160	14		
	165	9		
NS-0.23-15%-@1.5	140	19	30	82
	145	14		
	150	7		
NS-0.23-25%-@1.5	125	25	31	91
	130	17		
	135	12		
NS-0.23-35%-@1.5	120	26	31	91
	125	17		
	130	13		

ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

สัดส่วนผสม	ปริมาณน้ำที่ใช้ (ลิตร)	เวลาบีบ (วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์
NS-0.28-00%-@1.5	130	25	31	83
	135	16		
	140	10		
NS-0.28-15%-@1.5	125	26	30	83
	130	17		
	135	12		
NS-0.28-25%-@1.5	120	27	30	91
	125	19		
	130	13		
NS-0.28-35%-@1.5	120	24	31	83
	125	15		
	130	10		
NS-0.33-00%-@1.5	125	24	29	83
	130	17		
	135	12		
NS-0.33-15%-@1.5	120	35	30	75
	125	21		
	130	13		
NS-0.33-25%-@1.5	125	20	27	82
	130	12		
	135	7		
NS-0.33-35%-@1.5	115	24	28	82
	120	17		
	125	13		

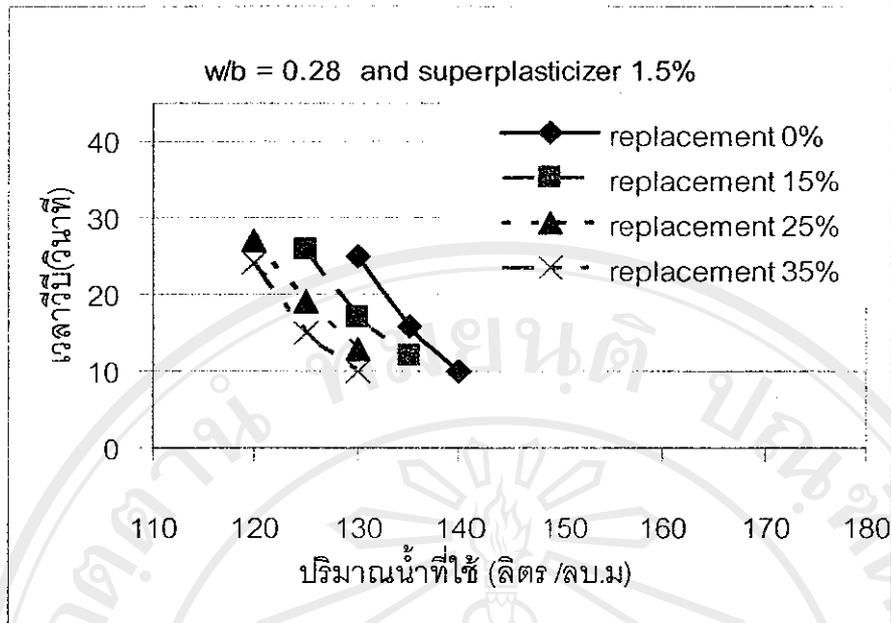
ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

สัดส่วนผสม	ปริมาณน้ำที่ใช้ (ลิตร)	เวลาซีป (วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์
NS-0.38-00%-@1.5	130	26	29	83
	135	18		
	140	13		
NS-0.38-15%-@1.5	125	28	30	83
	130	16		
	135	13		
NS-0.38-25%-@1.5	125	24	30	91
	130	15		
	135	11		
NS-0.38-35%-@1.5	120	26	30	83
	125	14		
	130	12		

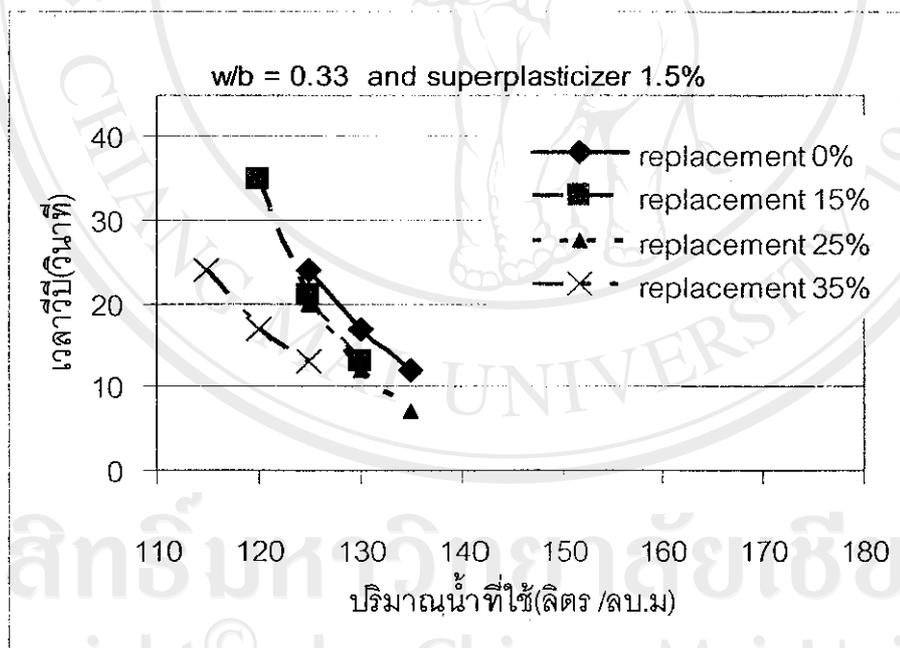


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับค่าความชื้นเหลว ที่ค่าอัตราส่วน w/b = 0.23

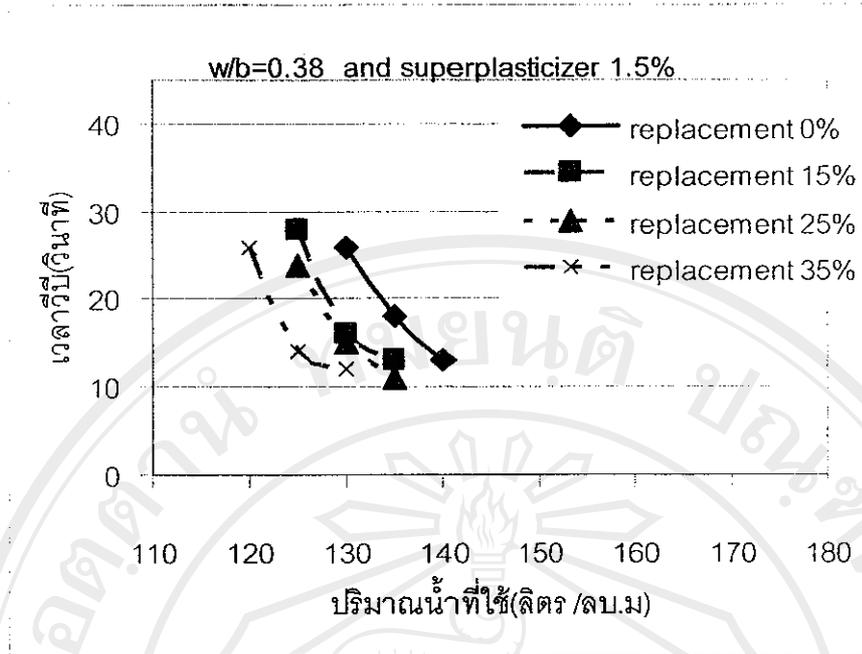
ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงมากกว่าจุดที่เข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 (ร้อยละ 1.5)



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับค่าความชันเหลว ที่ค่าอัตราส่วน $w/b = 0.28$ ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงมากกว่าจุดที่เข้ากัน ได้ดีกับปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 (ร้อยละ 1.5)



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับค่าความชันเหลว ที่ค่าอัตราส่วน $w/b = 0.33$ ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงมากกว่าจุดที่เข้ากัน ได้ดีกับปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 (ร้อยละ 1.5)



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับค่าความชื้นเหลว ที่ค่าอัตราส่วน $w/b = 0.38$ ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงมากกว่าจุดที่เข้ากันได้คือกับปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 (ร้อยละ 1.5)

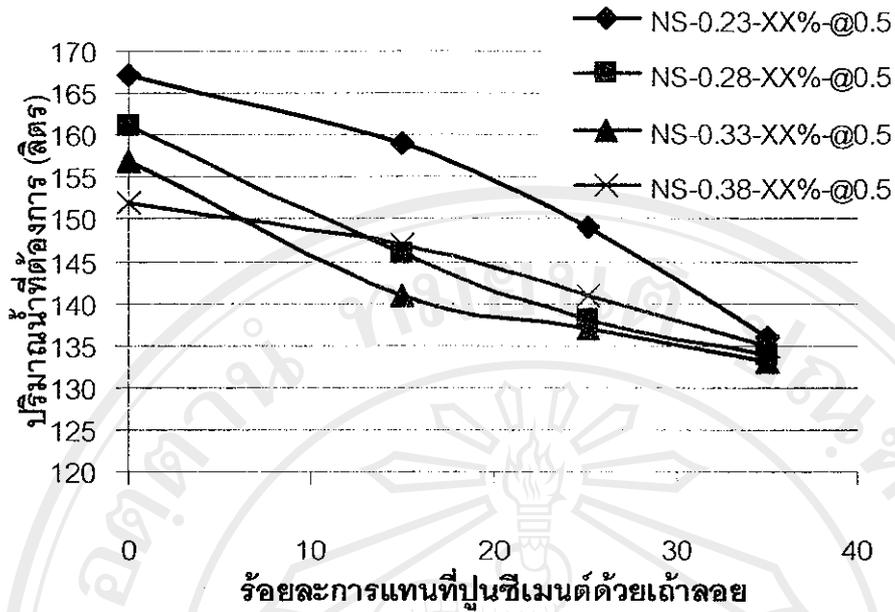
4.3 ปริมาณสัดส่วนผสมของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีค่ายุบตัวเป็นศูนย์

เมื่อได้ทำการทดลองผสมเพื่อหาปริมาณความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ต้องการและค่าความชื้นเหลวแล้ว จากนั้นกำหนดค่าความชื้นเหลว(เวลาวิบี)ที่ต้องการเท่ากับ 15 วินาที ซึ่งจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับค่าความชื้นเหลวที่ได้แสดงในรูปที่ 4.1 ถึง 4.16 สามารถหาปริมาณน้ำที่ต้องการในสัดส่วนผสม ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงในปริมาณต่าง ๆ ซึ่งในตารางที่ 4.7 ได้แสดงปริมาณน้ำที่ต้องการในสัดส่วนผสม ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงในปริมาณน้อยกว่า, เท่ากับ และมากกว่า จุดที่เข้ากันได้คือร้อยละ ± 50 และในรูปที่ 4.13 ถึง 4.15 ได้แสดงการเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่ต้องการใช้ในสัดส่วนผสม ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงในปริมาณน้อยกว่า, เท่ากับ และมากกว่า จุดที่เข้ากันได้คือร้อยละ ± 50

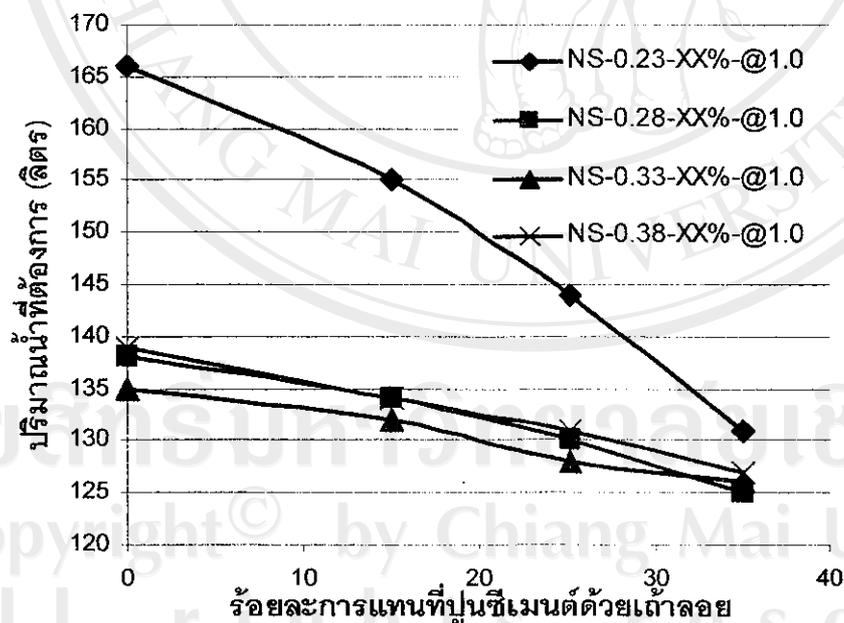
ตารางที่ 4.7 ปริมาณน้ำที่ต้องการใช้ในสัดส่วนผสมสำหรับค่าความชื้นเหลวเท่ากับ 15
วินาที ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงในปริมาณต่าง ๆ

อัตราส่วน w/b	ร้อยละของมวลที่ ตายแล้ว	ปริมาณน้ำที่ต้องการ สำหรับปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรง (ลิตร)		
		ร้อยละ 0.5	ร้อยละ 1.0	ร้อยละ 1.5
0.23	0	167	166	159
	15	159	155	144
	25	149	144	132
	35	136	131	127
0.28	0	161	138	136
	15	146	134	132
	25	138	130	128
	35	134	125	125
0.33	0	157	135	132
	15	141	132	129
	25	137	128	128
	35	133	126	123
0.38	0	152	139	138
	15	147	134	131
	25	141	131	130
	35	135	127	124

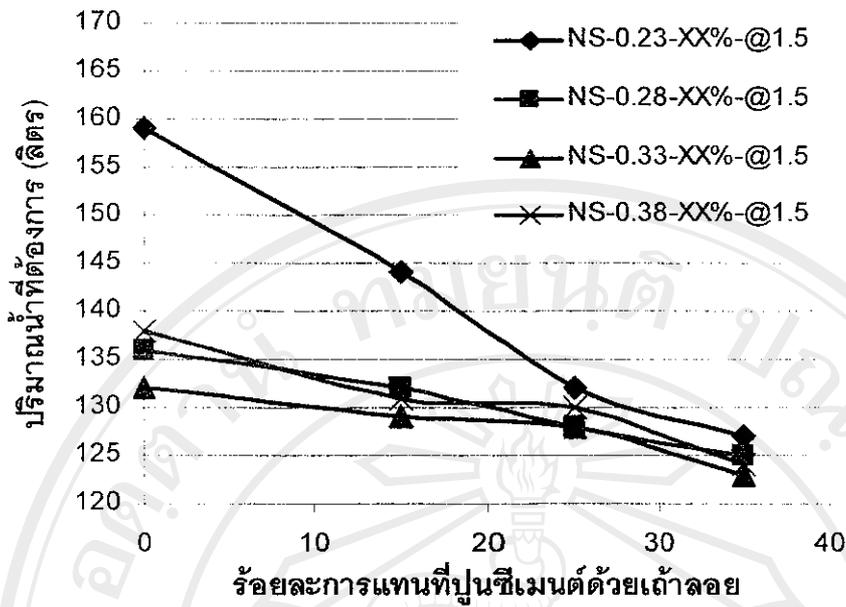
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบปริมาณน้ำที่ต้องการใช้ในสัดส่วนผสม กับ ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ที่อัตราส่วน w/b ต่าง ๆ สำหรับกรณีที่ใช้ปริมาณสารลดน้ำอย่างแรงในปริมาณน้อยกว่าจุดที่เข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์ ร้อยละ 50



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบปริมาณน้ำที่ต้องการใช้ในสัดส่วนผสม กับ ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ที่อัตราส่วน w/b ต่าง ๆ สำหรับกรณีที่ใช้ปริมาณสารลดน้ำอย่างแรงในปริมาณที่เข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบปริมาณน้ำที่ต้องการใช้ในสัดส่วนผสม กับ ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ที่อัตราส่วน w/b ต่าง ๆ สำหรับ กรณีที่ใช้ปริมาณสารลดน้ำอย่างแรงในปริมาณมากกว่าจุดที่เข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์ ร้อยละ 50

เมื่อได้ปริมาณน้ำที่ต้องการจากนั้นมาทำการออกแบบสัดส่วนผสม โดยสัดส่วนผสมที่ใช้ในการทดลองได้แสดงในตารางที่ 4.8 ซึ่งปริมาณสัดส่วนผสมที่แสดงนั้นเป็นปริมาณที่แสดงไว้ในสัดส่วนผสมที่สภาพอิมพัลวี่แห้ง และในสัดส่วนผสมจริงได้ทำการปรับแก้ปริมาณน้ำตามสภาพความชื้นจริงของมวลรวม โดยสัดส่วนผสมที่ปรับแก้แล้ว ได้แสดงในปริมาณสัดส่วนผสมและค่าความชื้นเหลือในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.8 ปริมาณสัดส่วนผสมของคอนกรีต 1 ลบ.ม. ในสภาวะอัดตัวผิวแห้ง

ชนิดตัวอย่าง	สัดส่วนผสมคอนกรีต 1 ลบ.ม. ในสภาวะอัดตัวผิวแห้ง (กก./ลบ.ม.)					อัตราส่วนผสม อย่างแรง
	น้ำ	ปูนซีเมนต์	แฉะลอย	หิน	ทราย	
NS-0.23-00%-@1.0	165	722	0	1089	437	7.22
NS-0.23-15%-@1.0	155	573	101	1089	469	6.74
NS-0.23-25%-@1.0	144	470	157	1089	517	6.26
NS-0.23-35%-@1.0	131	370	199	1089	582	5.70
NS-0.28-00%-@1.0	138	493	0	1089	697	4.93
NS-0.28-15%-@1.0	134	407	72	1089	694	4.79
NS-0.28-25%-@1.0	130	348	116	1089	701	4.64
NS-0.28-35%-@1.0	125	290	156	1089	714	4.46
NS-0.33-00%-@1.0	135	409	0	1089	774	4.09
NS-0.33-15%-@1.0	132	340	60	1089	768	4.00
NS-0.33-25%-@1.0	128	291	97	1089	776	3.88
NS-0.33-35%-@1.0	126	248	134	1089	773	3.82
NS-0.38-00%-@1.0	138	363	0	1089	805	3.63
NS-0.38-15%-@1.0	133	298	53	1089	810	3.50
NS-0.38-25%-@1.0	131	259	86	1089	807	3.45
NS-0.38-35%-@1.0	127	217	117	1089	816	3.34

ตารางที่ 4.9 ปริมาณสัดส่วนผสมจริงของคอนกรีต 1 ลบ.ม. สำหรับสภาพความชื้นจริง

ชื่อตัวอย่าง	สัดส่วนผสมคอนกรีต 1 ลบ.ม. ที่กล่าวหาความชื้นจริง (กก./ลบ.ม.)					ค่าเฉลี่ย ตัวอย่างจริง
	น้ำ	ปูนซีเมนต์	เศษสอย	ทราย	กรวด	
NS-0.23-00%-@1.0	166	722	0	1081	432	17.04
NS-0.23-15%-@1.0	156	573	101	1081	464	15.91
NS-0.23-25%-@1.0	146	470	157	1081	511	14.78
NS-0.23-35%-@1.0	135	370	199	1081	576	13.45
NS-0.28-00%-@1.0	145	493	0	1081	690	11.63
NS-0.28-15%-@1.0	141	407	72	1081	687	11.30
NS-0.28-25%-@1.0	137	348	116	1081	693	10.96
NS-0.28-35%-@1.0	133	290	156	1081	706	10.54
NS-0.33-00%-@1.0	144	409	0	1081	766	9.66
NS-0.33-15%-@1.0	141	340	60	1081	760	9.44
NS-0.33-25%-@1.0	137	291	97	1081	767	9.16
NS-0.33-35%-@1.0	135	248	134	1081	765	9.01
NS-0.38-00%-@1.0	148	363	0	1081	796	8.57
NS-0.38-15%-@1.0	143	298	53	1081	801	8.26
NS-0.38-25%-@1.0	142	259	86	1081	799	8.14
NS-0.38-35%-@1.0	138	217	117	1081	807	7.89

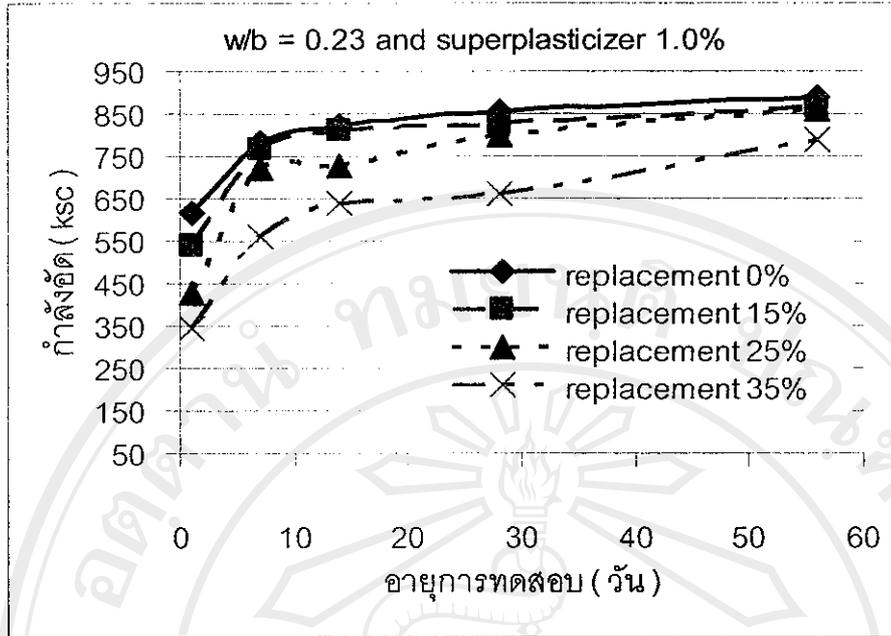
4.4 ผลการทดสอบกำลังอัดและค่าความชื้นเหลือ

เมื่อได้ปริมาณสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ต้องการมาทำการผสม โดยขึ้นคอนการผสมได้ปฏิบัติตามวงจรการผสมตามขั้นตอนที่แสดงในรูปที่ 3.5 แล้วนำคอนกรีตสดมาทำการหล่อแท่งคอนกรีตตัวอย่างขนาด 100x200 มม. และเมื่อทำการหล่อแท่งตัวอย่างคอนกรีตตามจำนวนที่ได้แสดงในตารางที่ 3.2 แล้ว จากนั้นได้ทำการแบ่งคอนกรีตที่หล่อแล้วแบ่งออกเป็น 2 ชุดตัวอย่าง โดยในชุดตัวอย่างที่ 1 ได้แก่ชุดตัวอย่างที่ต้องการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่ 1 วัน เป็นจำนวน 5 ก้อน มาทำการวัดขนาด และชั่งน้ำหนัก จากนั้นมาทำการเคลือบส่วนปลายด้วยกัมมะถัน แล้วทดสอบกำลังอัดเมื่อถึงอายุที่ต้องการ และนำส่วนที่สอง ได้แก่ คอนกรีตที่ต้องการทดสอบที่อายุ 7, 14, 28 และ 56 วัน มาทำการบ่มในน้ำ จากนั้นนำขึ้นจากน้ำก่อนถึงอายุการทดสอบที่ต้องการเป็นเวลา 1 วัน และเมื่อถึงอายุตามที่ต้องการแล้วนำไปทดสอบกำลังอัดตามขั้นตอนข้างต้น โดย

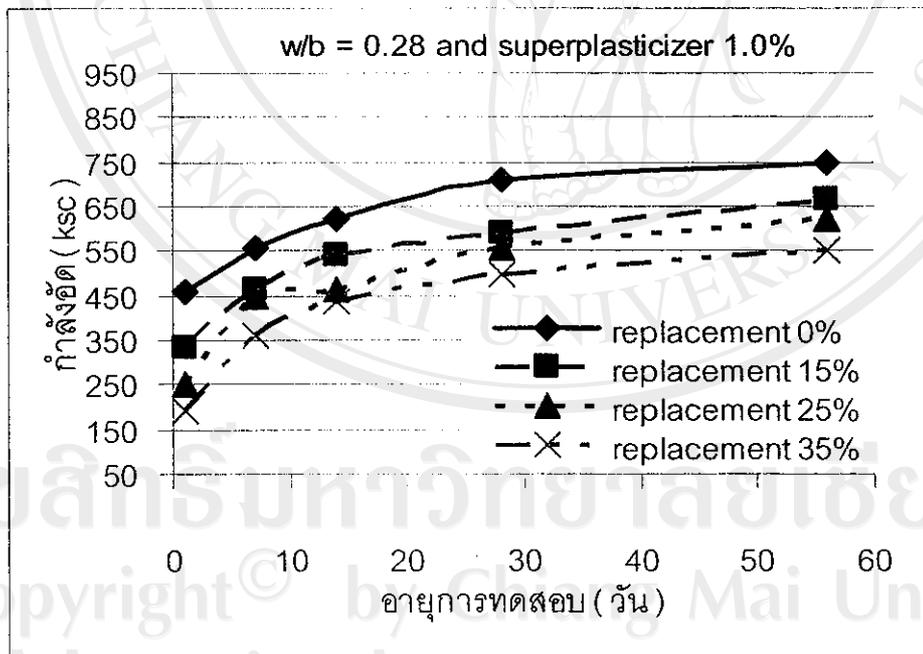
ค่ากำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตตัวอย่างได้แสดงในตารางที่ 4.10 และในรูปที่ 4.16 ถึง 4.19 ได้แสดงการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตตัวอย่าง

ตารางที่ 4.10 กำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตตัวอย่างที่อายุการทดสอบต่าง ๆ

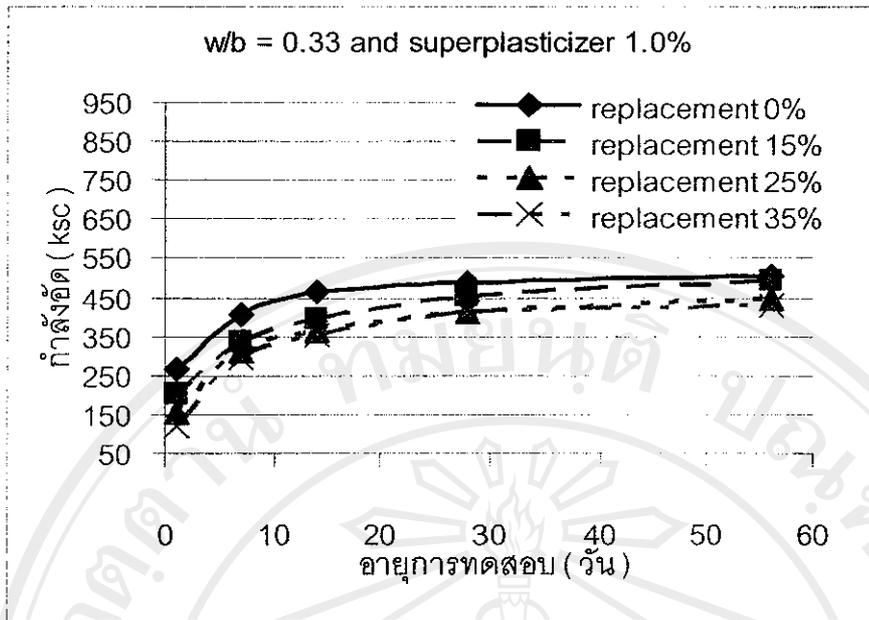
อัตราส่วน w/b	ร้อยละการ แทนที่ด้วย เถ้าลอย	กำลังอัดเฉลี่ยที่อายุการทดสอบ (ksc)					เวลาวิบัติ (วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์
		1 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน			
0.23	0	616	783	824	855	887	13	29	91
	15	541	768	811	827	864	16	30	91
	25	430	720	726	800	859	14	28	83
	35	345	562	637	663	787	13	29	91
0.28	0	459	559	622	709	750	15	31	87
	15	335	466	539	588	668	14	30	91
	25	250	450	464	556	621	12	29	91
	35	189	362	437	498	553	13	30	91
0.33	0	264	407	462	488	504	13	28	91
	15	204	338	396	452	494	16	29	83
	25	156	314	367	415	448	15	29	83
	35	119	294	354	412	430	16	28	82
0.38	0	177	298	350	398	411	13	24	81
	15	150	272	311	368	409	17	25	72
	25	126	245	296	345	390	14	22	80
	35	107	223	240	336	390	16	21	80



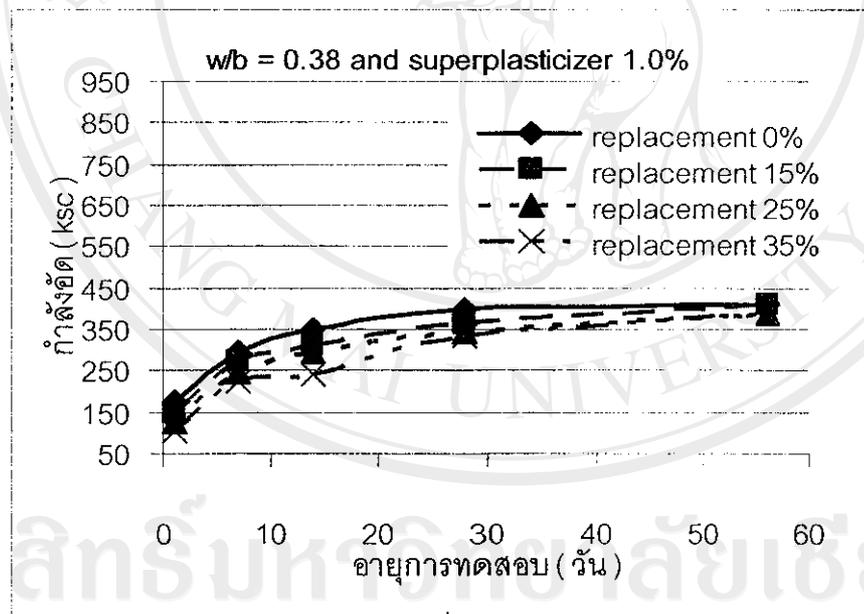
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดเฉลี่ยกับอายุคอนกรีต ที่ค่าอัตราส่วน w/b = 0.23 ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดเฉลี่ยกับอายุคอนกรีต ที่ค่าอัตราส่วน w/b = 0.28 ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดเฉลี่ยกับอายุคอนกรีต ที่ค่าอัตราส่วน $w/b = 0.33$ ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้กับปูนซีเมนต์



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดเฉลี่ยกับอายุคอนกรีต ที่ค่าอัตราส่วน $w/b = 0.38$ ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้กับปูนซีเมนต์

บทที่ 5

วิเคราะห์และวิจารณ์ผล

5.1.วิเคราะห์ผลของปริมาณการใช้เถ้าลอยกับปริมาณน้ำที่ต้องการในสัดส่วนผสม

เนื่องจากอนุภาคของเถ้าลอยมีลักษณะกลมตัน ทำให้ซีเมนต์เพสต์ขึ้นไหลได้ดีขึ้น ซึ่งทำให้ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสดดีขึ้น ความชื้นเหลือที่เท่ากันนั้น ทำให้สามารถลดปริมาณน้ำที่ใช้ในสัดส่วนผสมลงได้ จากผลการทดลองผสมพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในทุกสัดส่วนผสม ทำให้ปริมาณความต้องการน้ำในสัดส่วนผสมลดลง ดังแสดงในตารางที่ 5.1 ได้แสดงร้อยละของปริมาณน้ำที่ต้องการในส่วนผสมต่าง ๆ ที่ค่าความชื้นเหลือ (เวลาวิบี) เท่ากับ 15 วินาที เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย

ตารางที่ 5.1 ร้อยละปริมาณน้ำที่ต้องการในส่วนผสมสำหรับคอนกรีตที่ค่าความชื้นเหลือ (เวลาวิบี) เท่ากับ 15 วินาที เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำที่ต้องการในคอนกรีตที่ไม่ใส่เถ้าลอย

w/b	ปริมาณร้อยละการแทนที่	ร้อยละปริมาณน้ำที่ต้องการ ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรง		
		ร้อยละ 0.5	ร้อยละ 1.0	ร้อยละ 1.5
0.23	0	100	100	100
	15	95	93	91
	25	89	87	83
	35	81	79	80
0.28	0	100	100	100
	15	91	97	97
	25	86	94	94
	35	83	91	92
0.33	0	100	100	100
	15	90	98	98
	25	87	95	97
	35	85	93	93
0.38	0	100	100	100
	15	97	96	95
	25	93	94	94
	35	89	91	90

5.2. วิเคราะห์ผลของปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงต่อปริมาณน้ำที่ต้องการในส่วนผสม

และเนื่องจากการใช้สารลดน้ำอย่างแรงนั้น ทำให้อุณหภูมิของปูนซีเมนต์กระจายตัวได้ดียิ่งขึ้น ทำให้น้ำสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับเม็ดซีเมนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น และทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความหนืดลดลง จากการที่เม็ดซีเมนต์ไม่จับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งทำให้ปริมาณน้ำที่ต้องการใช้ในสัดส่วนผสมลดลง ที่ค่าความชื้นเหลวที่เท่ากัน จากการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณน้ำที่ต้องการในส่วนผสมลดลง ดังนั้นในการออกแบบสัดส่วนผสมจึงจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงผลของปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงด้วย และในตารางที่ 5.2 ได้แสดงร้อยละของปริมาณน้ำที่ต้องการของสัดส่วนผสม เทียบกับปริมาณน้ำที่ต้องการที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์

ตารางที่ 5.2 ร้อยละปริมาณน้ำที่ต้องการที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงน้อยกว่าเท่ากับ และมากกว่าที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์ เทียบกับปริมาณน้ำที่ต้องการที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์

w/b	ปริมาณร้อยละการแทนที่	ร้อยละปริมาณน้ำที่ต้องการ ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรง		
		ร้อยละ 0.5	ร้อยละ 1.0	ร้อยละ 1.5
0.23	0	101	100	96
	15	103	100	93
	25	103	100	92
	35	104	100	97
0.28	0	117	100	99
	15	109	100	99
	25	106	100	98
	35	107	100	100
0.33	0	116	100	98
	15	107	100	98
	25	107	100	100
	35	106	100	98
0.38	0	109	100	99
	15	110	100	98
	25	108	100	99
	35	106	100	98

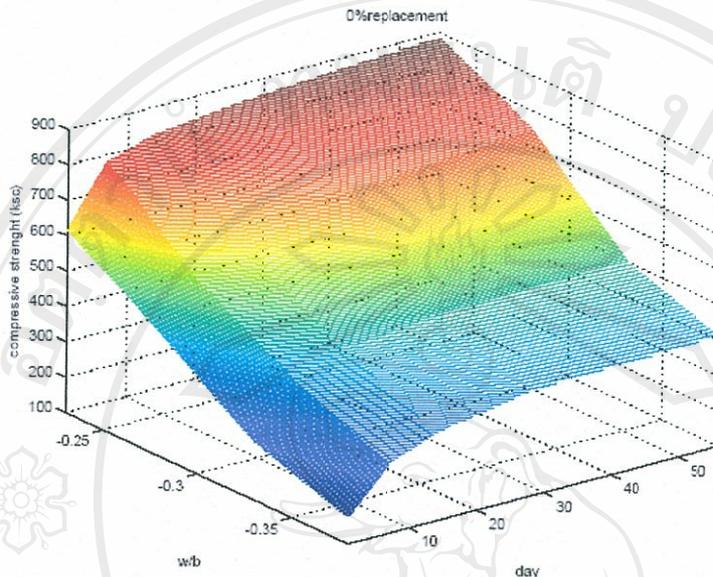
5.3. การวิเคราะห์กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และสารลดน้ำอย่างแรง

จากผลของกำลังอัดเฉลี่ยที่ได้แสดงในบทที่ 4 พบว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานเดียวกัน เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย จะทำให้กำลังเฉลี่ยของคอนกรีตลดลงในทุก ๆ อายุการทดสอบ โดยที่กำลังอัดเฉลี่ยที่อายุทดสอบช่วงต้น คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจะมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอยอย่างมาก ซึ่งลดลงสูงสุดถึงร้อยละ 58 ของกำลังอัดคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย และกำลังอัดที่อายุทดสอบช่วงปลายของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ยังคงมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอยแต่ต่ำกว่าไม่มากนัก โดยร้อยละของกำลังอัดที่ลดลงได้ในตารางที่ 5.3

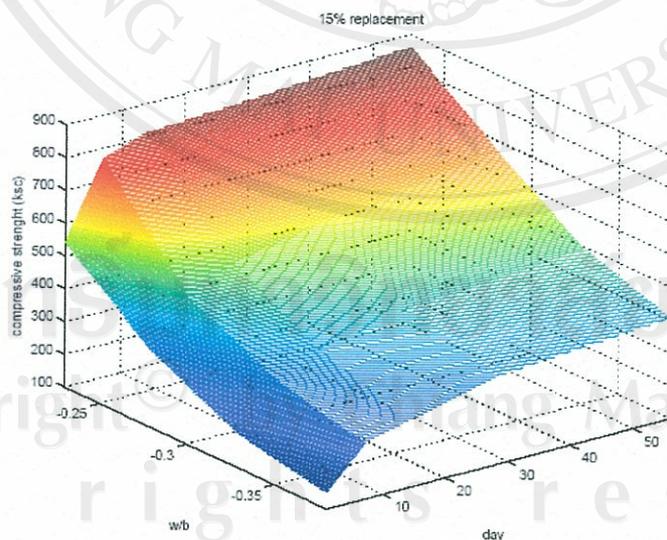
ตารางที่ 5.3 ร้อยละของกำลังอัดที่ลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

อัตราส่วน w/b	ร้อยละการ ทดแทน	ร้อยละของกำลังอัดที่ลดลง เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย				
		1	7	14	28	56
0.23	0	100	100	100	100	100
	15	12	2	1	3	3
	25	30	8	12	14	4
	35	44	28	23	22	11
0.28	0	100	100	100	100	100
	15	26	17	13	17	11
	25	45	20	25	22	17
	35	58	44	30	30	26
0.33	0	100	100	100	100	100
	15	23	17	14	7	2
	25	41	23	21	15	11
	35	56	28	24	16	15
0.38	0	100	100	100	100	100
	15	15	9	13	7	1
	25	29	18	15	14	6
	35	39	26	31	15	2

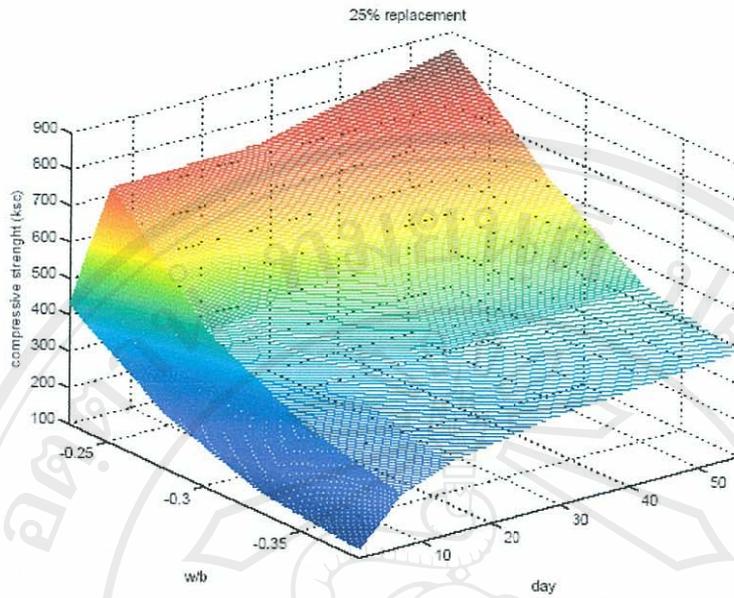
เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วน w/b ต่อกำลังอัดเฉลี่ย พบว่า เมื่ออัตราส่วน w/b เพิ่มขึ้น กำลังอัดของคอนกรีตที่ไม่มีการแทนที่ และคอนกรีตที่การทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 15 ถึงร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน มีค่าลดลงในทุก ๆ อายุการทดสอบ เช่นเดียวกับกรณีที่ไม่มีการใช้สารลดน้ำอย่างแรง ดังรูปที่ 5.1 ถึง 5.4



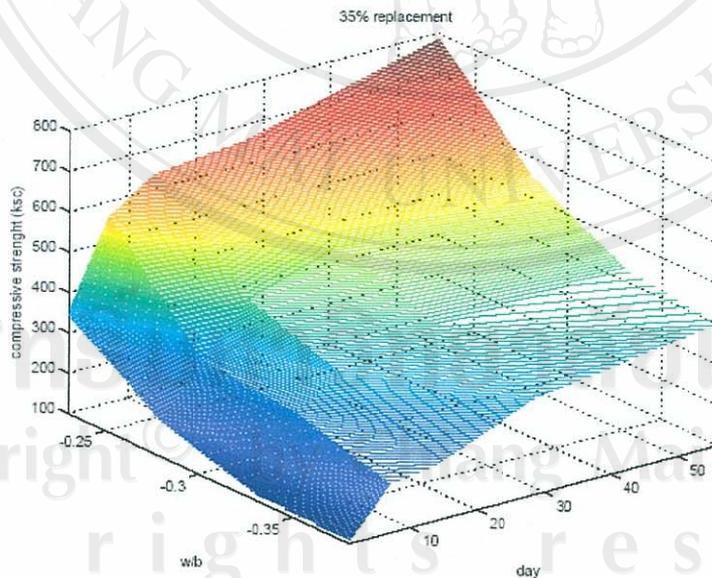
รูปที่ 5.1 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุการทดสอบ 1 ถึง 56 วัน ที่ไม่มีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย สำหรับอัตราส่วน w/b ต่าง ๆ และปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์



รูปที่ 5.2 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุการทดสอบ 1 ถึง 56 วัน ที่มีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 15 สำหรับอัตราส่วน w/b ต่าง ๆ และปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์



รูปที่ 5.3 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุการทดสอบ 1 ถึง 56 วัน ที่มีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 25 สำหรับอัตราส่วน w/b ต่าง ๆ และปริมาณการใช้น้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์



รูปที่ 5.4 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุการทดสอบ 1 ถึง 56 วัน ที่มีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 35 สำหรับอัตราส่วน w/b ต่าง ๆ และปริมาณการใช้น้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์

5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน

การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน จะใช้วิธีการเลือกชนิดความสัมพันธ์ โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ยกกำลังสอง (R^2) ถ้าความสัมพันธ์แบบใดให้ค่าดังกล่าวใกล้เคียงหนึ่งมากที่สุด แสดงว่าข้อมูลมีความสัมพันธ์ตามนั้น จากการวิเคราะห์ เมื่อให้ความสัมพันธ์ของกราฟทุกชุดเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล โดยมีรูปแบบดังสมการ

$$y = Ce^{\alpha x} \quad (5.1)$$

โดยให้ Y แทน กำลังประลัย (f'_c)
 X แทน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (w/b)
 C และ α เป็น ค่าคงที่ใด

พบว่า กราฟทั้งหมดมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ยกกำลังสอง (R^2) ใกล้เคียงหนึ่ง ดังรูปที่ และ ซึ่งเมื่อพิจารณาสมการของ Abrams ดังสมการ

$$f'_c = \frac{A}{B^{w/c}} \quad (5.2)$$

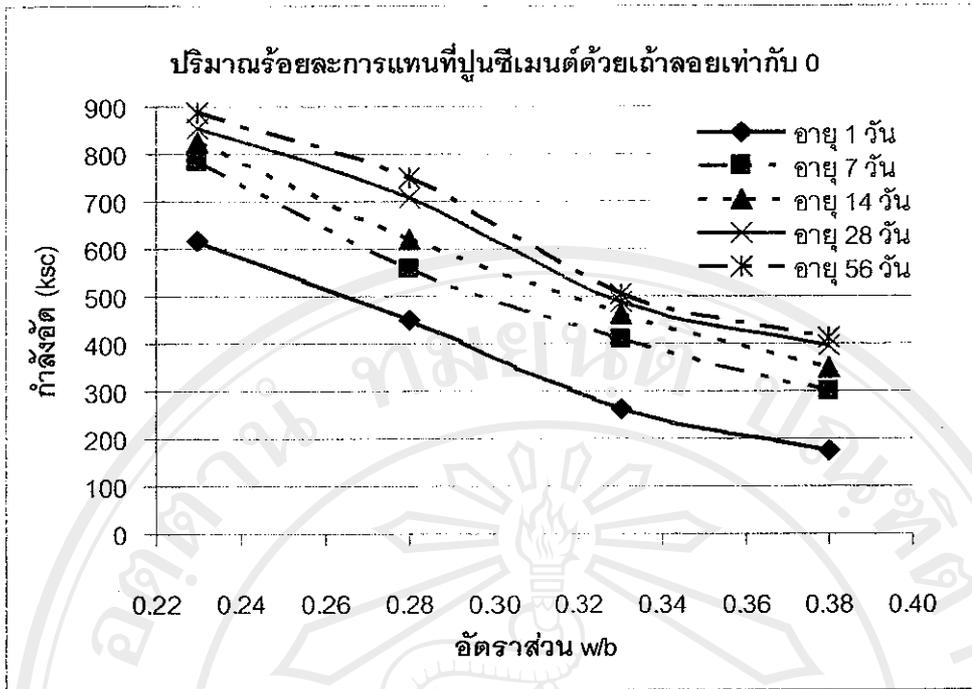
โดยที่ f'_c คือ กำลังอัดของคอนกรีต
 w/c คือ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์
 และ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับวัสดุผสมและสถานะแวดล้อม

พบว่า สมการที่ 5.1 ก็คือสมการของ Abrams นั้นเอง โดย A และ B ในสมการที่ (5.2) คือ C และ e^α ในสมการ ตามลำดับ ซึ่ง C และ e^α มีค่าแสดงในสมการความสัมพันธ์ตามรูปที่ และ แสดงว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน ยังคงเป็นไปตามกฎของ Abrams เช่นเดียวกับความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน

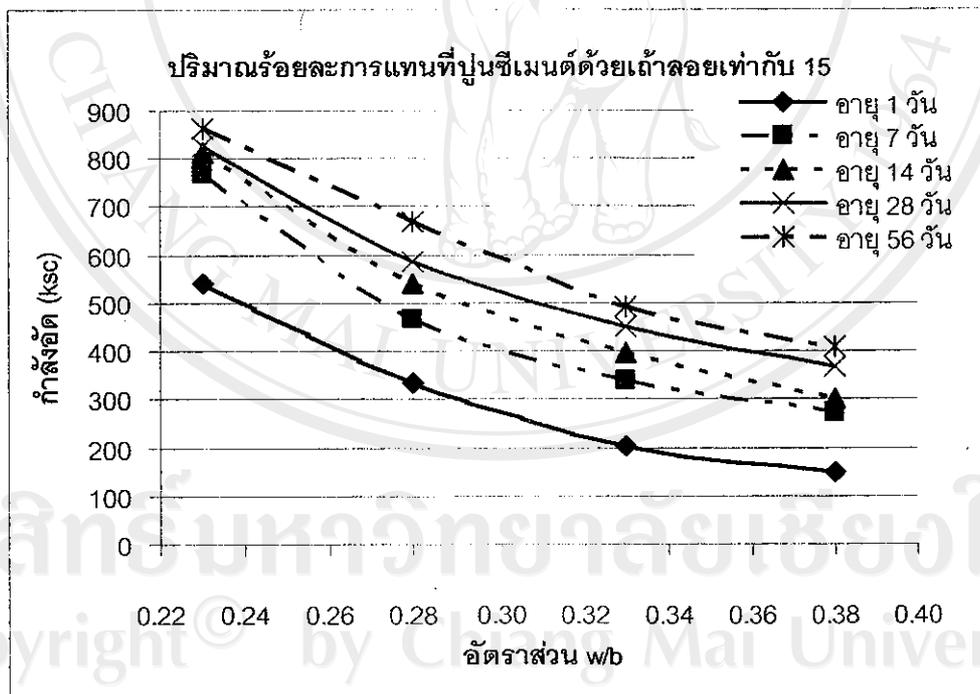
นำกำลังอัดของสัดส่วนผสมต่าง ๆ ที่อายุการทดสอบ 1, 7, 14, 28 และ 56 วัน มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานที่มีปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอยในปริมาณต่าง ๆ มาเปรียบเทียบกับที่อายุ 1, 7, 14, 28 และ 56 วัน ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 5.5 ถึง 5.8 และสมการทำนายกำลังอัดของแต่ละสัดส่วนผสมได้แสดงในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์และค่าสหสัมพันธ์กำลังสอง ของสมการทำนายกำลังอัด ที่อายุการทดสอบต่าง ๆ ($f'c = C e^{(w/h)}$) ที่ปริมาณการไม่มีและมีแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแก้วลอย ร้อยละ 15, 25 และ 35

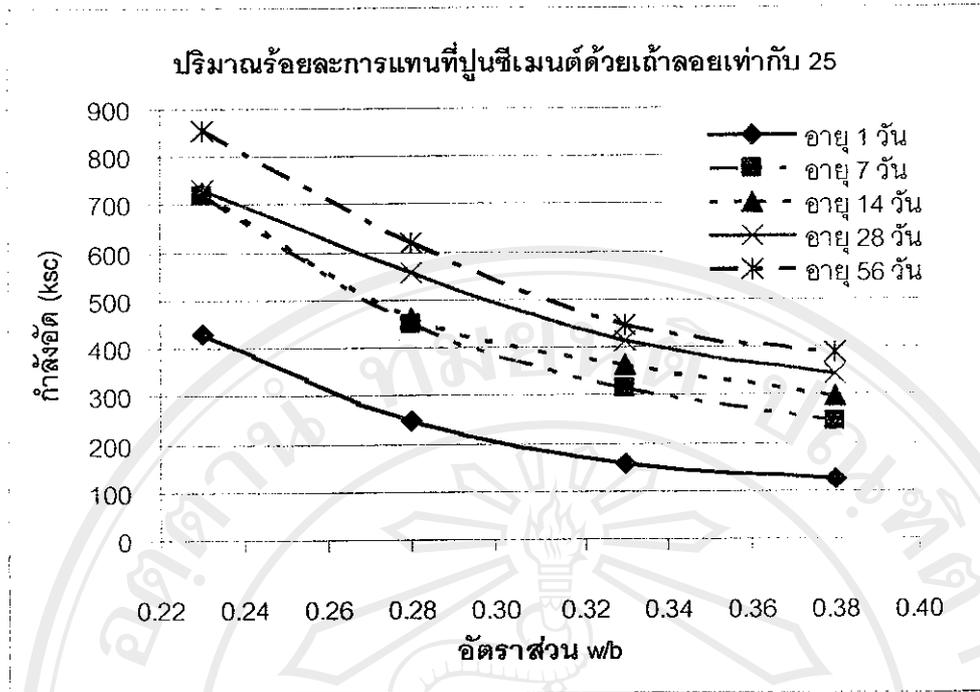
ร้อยละการแทนที่ ด้วยแก้วลอย	อายุการทดสอบ (วัน)	C	α	R ²
0	1	4642.3	-8.6016	0.991
	7	3400.1	-6.419	0.9997
	14	3088.1	-5.7424	0.9999
	28	2985.7	-5.3427	0.9822
	56	3170.8	-5.4109	0.9751
15	1	3862	-8.6942	0.9892
	7	3494.1	-6.9052	0.9679
	14	3497.3	-6.5202	0.9902
	28	2750.4	-5.3802	0.987
	56	2783.5	-5.1237	0.993
25	1	2761.6	-8.392	0.9719
	7	3550.6	-7.183	0.9809
	14	2605.7	-5.8593	0.9639
	28	2348.7	-5.1371	0.9918
	56	2859	-5.399	0.9736
35	1	1931	-7.9861	0.9196
	7	1871.9	-5.7192	0.8942
	14	2652	-6.2783	0.9867
	28	1793.2	-4.4481	0.9889
	56	2081.6	-4.5216	0.9239



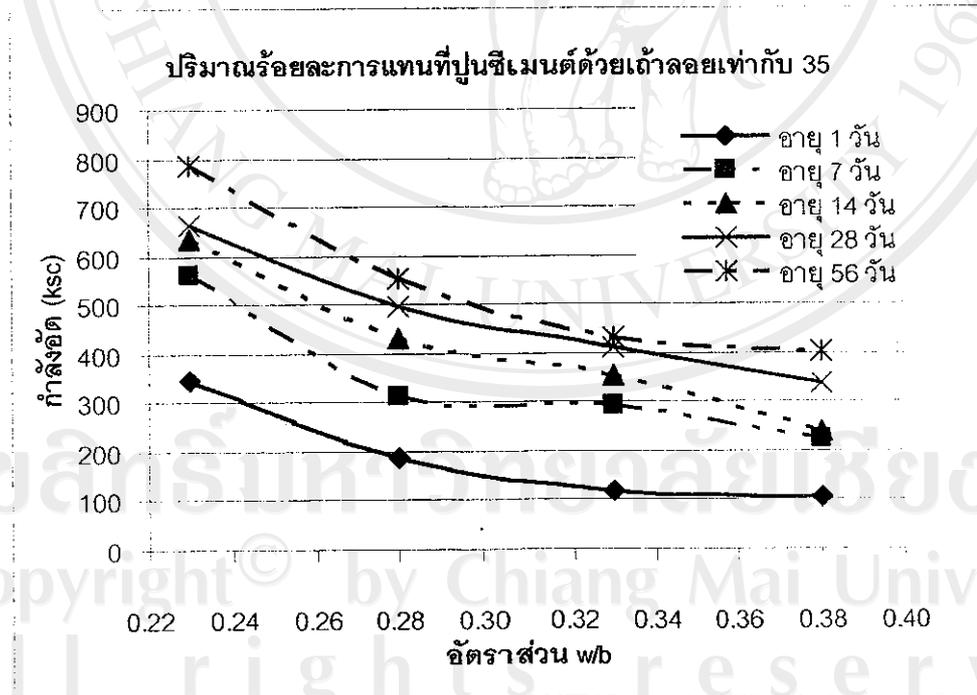
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุต่าง ๆ กับอัตราส่วน w/b ที่ไม่มีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์



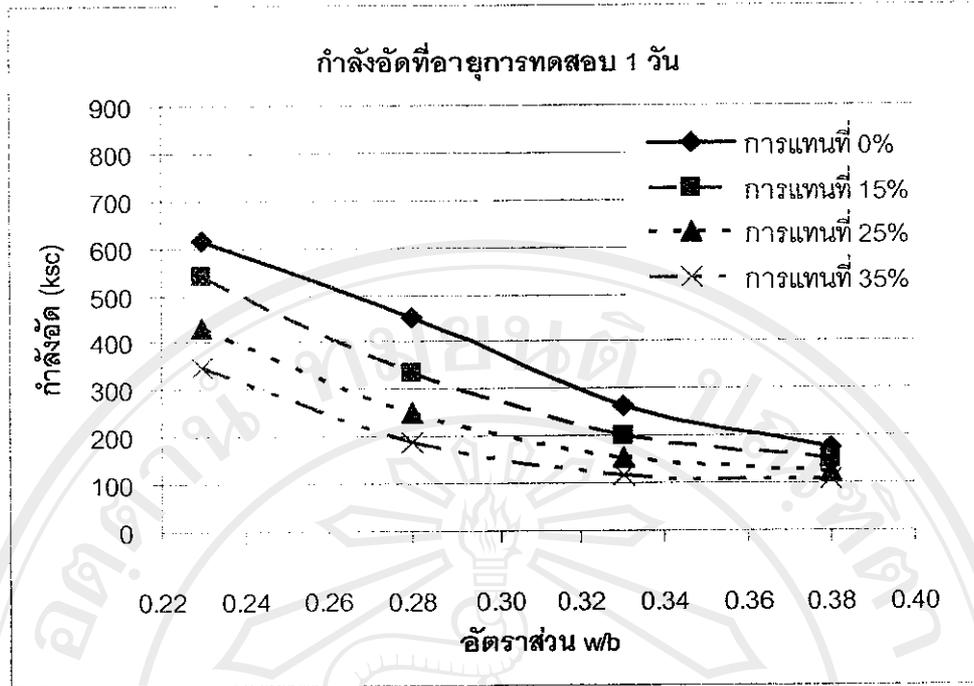
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุต่าง ๆ กับอัตราส่วน w/b ที่มีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 15 และปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์



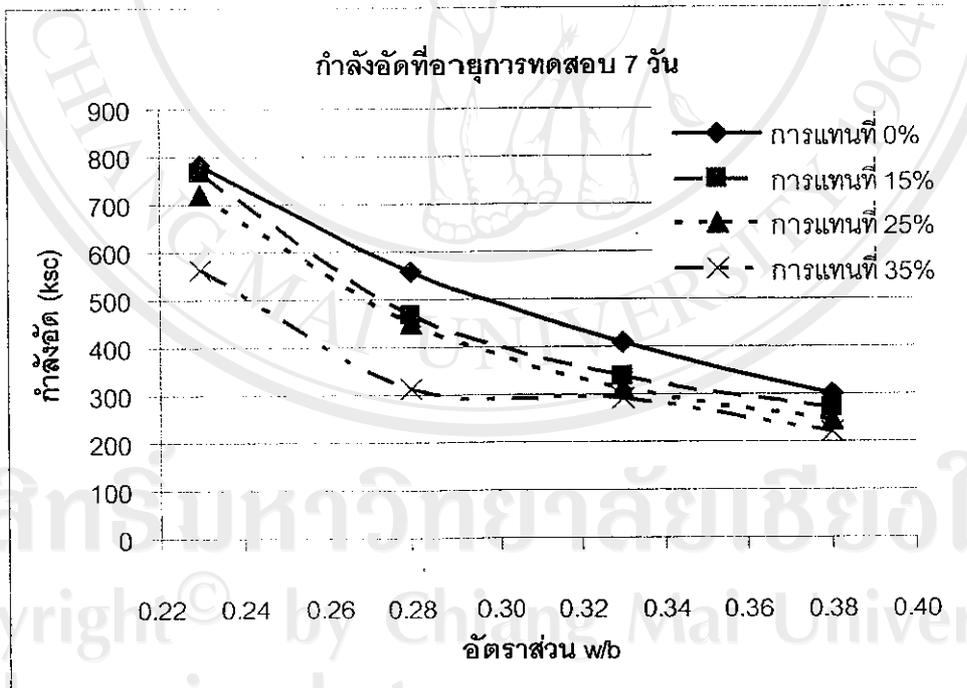
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุต่าง ๆ กับอัตราส่วน w/b ที่มีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 25 และปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์



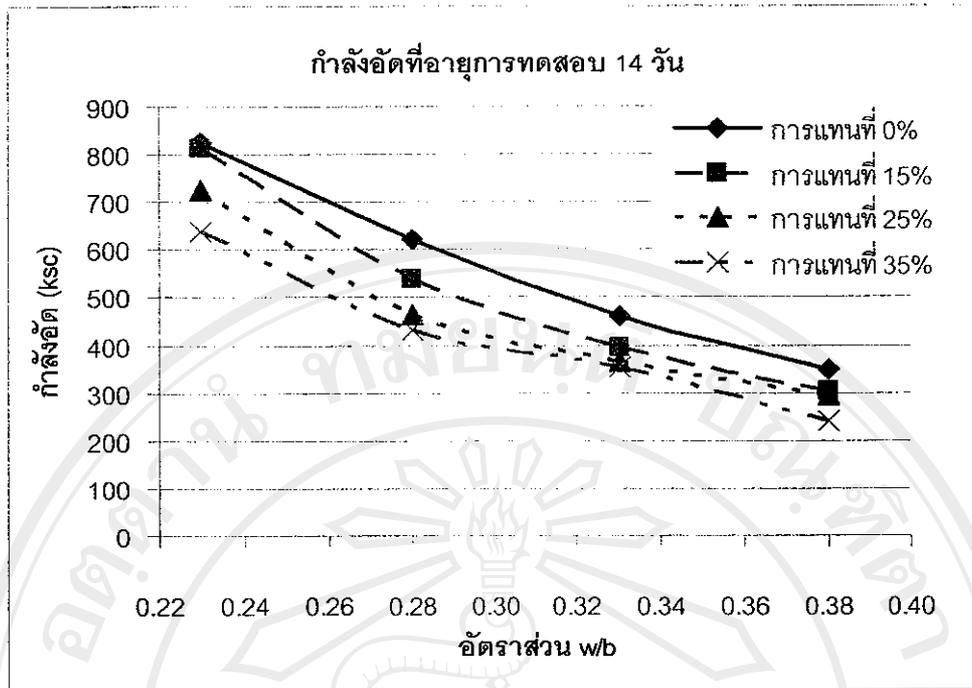
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุต่าง ๆ กับอัตราส่วน w/b ที่มีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 35 และปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์



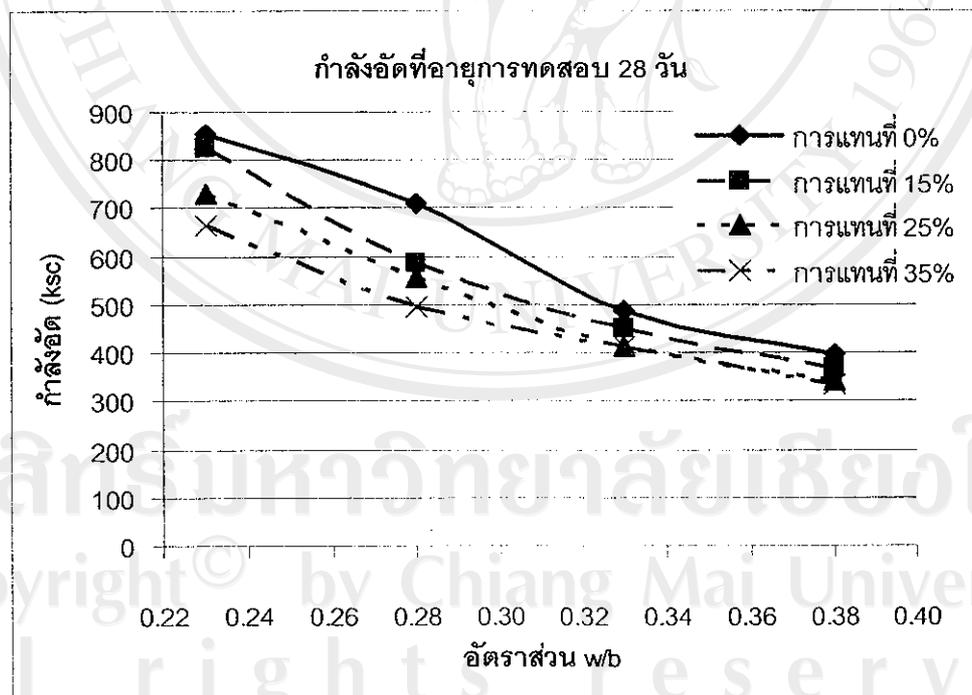
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุการทดสอบ 1 วันกับอัตราส่วน w/b ที่ปริมาณการที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ ต่าง ๆ และปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดี



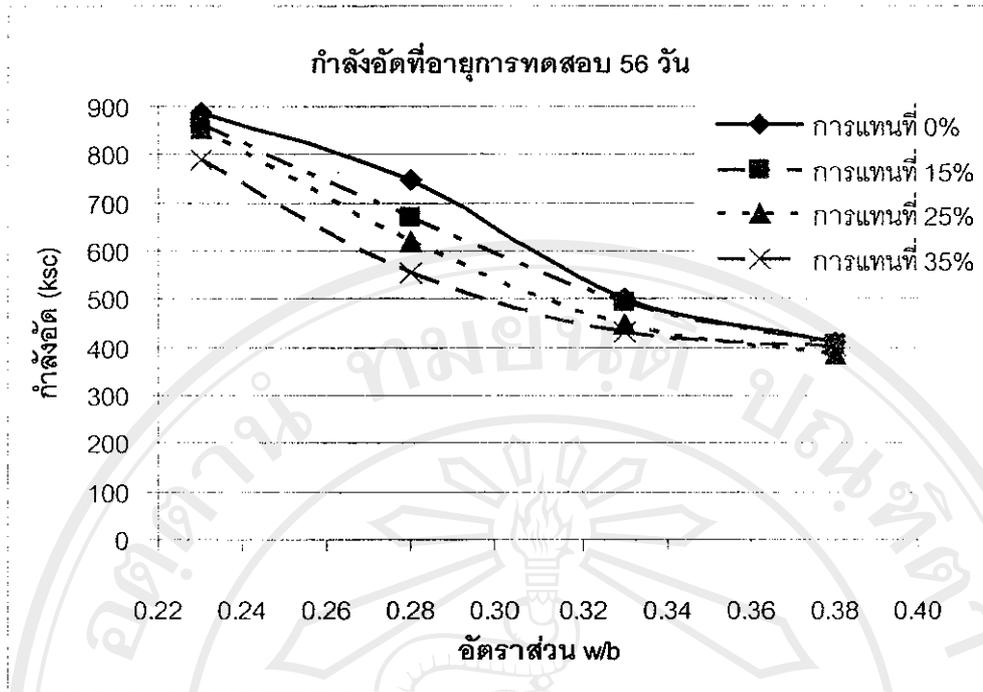
รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุการทดสอบ 7 วันกับอัตราส่วน w/b ที่ปริมาณการที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ ต่าง ๆ และปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดี



รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุการทดสอบ 14 วันกับอัตราส่วน w/b ที่ปริมาณการที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ ต่าง ๆ และปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดี



รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุการทดสอบ 28 วันกับอัตราส่วน w/b ที่ปริมาณการที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ ต่าง ๆ และปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดี



รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุการทดสอบ 56 วันกับอัตราส่วน w/b ที่ปริมาณการที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ ต่าง ๆ และปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดี

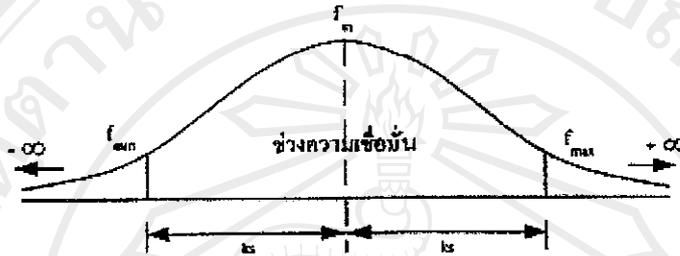
แต่เนื่องจากรูปดังกล่าวได้จากผลการทดสอบกำลังอัดเฉลี่ยจากก้อนตัวอย่างชุดละ 5 ตัวอย่าง ซึ่งทำการควบคุมวัสดุและกระบวนการผสม เป็นอย่างดี ซึ่งในการนำไปใช้งานจริงอาจไม่สามารถควบคุมวัสดุ และกระบวนการผสมได้เหมือนในห้องทดลอง ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตที่นำไปใช้งานจริงมีโอกาสสูงที่จะมีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยที่ได้จากห้องทดลอง ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาขึ้นได้ หากนำไปใช้โดยไม่ได้ทำการปรับแก้ ดังนั้นจึงต้องทำการปรับแก้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานก่อนที่จะนำไปใช้ในงานจริง จึงต้องสร้างความน่าเชื่อถือเพื่อให้เกิดความมั่นใจว่า สามารถนำไปใช้งานจริงได้อย่างปลอดภัย ซึ่งมีวิธีการพิจารณาปรับแก้ดังนี้

5.4.1 การพิจารณาช่วงความเชื่อมั่น

วิธีการทำให้ข้อมูลการทดสอบในห้องทดลองมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้งานจริงได้อย่างปลอดภัยมากยิ่งขึ้น จะต้องสร้างระดับความเชื่อมั่น (Confidence Level) เพื่อให้ครอบคลุมค่าความผิดพลาดที่อาจเกิดจากปัจจัยต่าง ๆ ของสภาพการทำงานในห้องทดลองกับสภาพการทำงานจริง เช่น การควบคุมวัสดุ วิธีการผสม คนที่ทำการผสม เป็นต้น โดยทั่วไปแล้ว การกำหนดระดับความเชื่อมั่น ในทางสถิตินิยมกำหนดให้มีค่ามากกว่า ร้อยละ 90 จึงจะถือว่าครอบคลุมข้อมูลทั้งหมดได้อย่างเพียงพอ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความต้องการความถูกต้องของงานนั้น ๆ

ด้วย สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ในการตรวจสอบความถูกต้องของ ข้อมูลผลการทดสอบ

การหาช่วงความเชื่อมั่น จะสมมุติให้ ข้อมูลการทดสอบกำลังอัดมีการกระจายแบบปกติ (Normal or Gaussian Distribution) ดังนั้นช่วงความเชื่อมั่นสามารถอธิบายได้โดยอาศัยเส้น โด่งปกติ ดังแสดงในรูปที่ จากรูป f_m คือค่าเฉลี่ยของข้อมูล f_{min} f_{max} คือค่าของข้อมูลที่น้อย และมากที่สุดที่ยังอยู่ในช่วงความเชื่อมั่น ตามลำดับ k คือช่วงความเชื่อมั่น และความน่าจะเป็นที่ กำลังอัดคอนกรีตจะมีค่าน้อยกว่า $f_m - ks$ (คอนกรีตกำลังตก)



รูปที่ 5.14 เส้น โด่งปกติแสดงขอบเขตช่วงความเชื่อมั่น

ตารางที่ 5.5 ระดับความเชื่อมั่นในช่วง $f_m \pm ks$ และความน่าจะเป็นของค่าที่ต่ำกว่า $f_m - ks$ ที่มา : A.M.Neville and J.J.Brooks (1990)

สัมประสิทธิ์ความน่าจะเป็น	ระดับความเชื่อมั่นในช่วง $f_m \pm ks$ (ร้อยละ)	ความน่าจะเป็นของค่าที่ต่ำกว่า $f_m - ks$ (ร้อยละ)
1.00	68.2	15.9 (1 ใน 6)
1.64	90.0	5.0 (1 ใน 20)
1.96	95.0	2.5 (1 ใน 40)
2.33	98	1.0 (1 ใน 100)
3.00	99.7	0.15 (1 ใน 700)

5.4.2 การพิจารณาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เนื่องจากในการปฏิบัติค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหาได้จากการทดสอบก้อนตัวอย่างจริง ซึ่งในแต่ละชุดก็จะมีค่าแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับการควบคุมการผสม สำหรับการนำมาใช้จะพิจารณาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลทุกชุด จากผลการทดสอบก้อนตัวอย่างชุดละ 5 ก้อน แล้ววัดค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล 80 ชุด แต่เนื่องจากตามมาตรฐาน ACI 318-83 กำหนดไว้ว่าตัวอย่างที่ทำการทดสอบเพื่อหาความเบี่ยงเบนมาตรฐานจะต้องทำการทดสอบตัวอย่างชุดเดียวกันไม่น้อยกว่า 30 ตัวอย่าง ส่วนกรณีที่ทำการทดสอบตัวอย่างน้อยกว่า 30 ตัวอย่างและต้องการหาค่า

เบี่ยงเบนมาตรฐาน จะต้องทำการแก้ไขค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานที่หาได้โดยปกติด้วยค่าสัมประสิทธิ์แก้ไข ดังแสดงในตารางที่ 5.5

สำหรับการทดสอบก้อนตัวอย่างชุดละ 5 ก้อน สัมประสิทธิ์แก้ไขค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานสามารถหาได้โดยวิธีการเทียบค่านอกช่วงจากตารางที่ ซึ่งจะได้สัมประสิทธิ์แก้ไขค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.45 (ภาคผนวก จ.) ดังนั้นค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานทั้ง 80 ค่าสำหรับงานวิจัยนี้จะต้องปรับแก้โดยการคูณด้วยสัมประสิทธิ์แก้ไขก่อนแล้วจึงใช้ค่านี้ใช้หารระดับความเชื่อมั่นของข้อมูลที่ร้อยละ 95 ในขั้นต่อไป

ตารางที่ 5.6 สัมประสิทธิ์แก้ไขค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานโดย ACI 318-83
ที่มา : A.M.Neville and J.J.Brooks (1990)

จำนวนตัวอย่างที่ทดสอบ	สัมประสิทธิ์แก้ไขค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน
15	1.16
20	1.08
25	1.03
30 หรือมากกว่า	1.00

5.4.3 วิธีการหาช่วงความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน

จากรูปที่ 5.14 ค่ากำลังอัดที่น้อยที่สุดของความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สามารถหาได้โดย

$$f'_{\min} = f'_m - ks' \quad (5.4)$$

โดยที่ f'_{\min} คือ ค่ากำลังอัดที่น้อยที่สุดที่อยู่ในช่วงความเชื่อมั่น

f'_m คือ ค่ากำลังอัดเฉลี่ย ซึ่งได้จากผลการทดสอบ

k คือ สัมประสิทธิ์ความน่าจะเป็นซึ่งที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 มีค่าเท่ากับ 1.96

s' คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของแต่ละชุด โดยในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับค่าที่ได้แสดงไว้ในตาราง ง-1 คูณด้วยสัมประสิทธิ์แก้ไข

ดังนั้นกำลังอัดที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 มีค่าดังสมการ

$$F'c = f'c - (1.96)(1.45)s$$

$$F'c = f'c - (2.84)s \quad (5.5)$$

โดยที่ $F'c$ คือ กำลังอัดที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

$f'c$ คือ กำลังอัดเฉลี่ยของแต่ละชุดตัวอย่าง

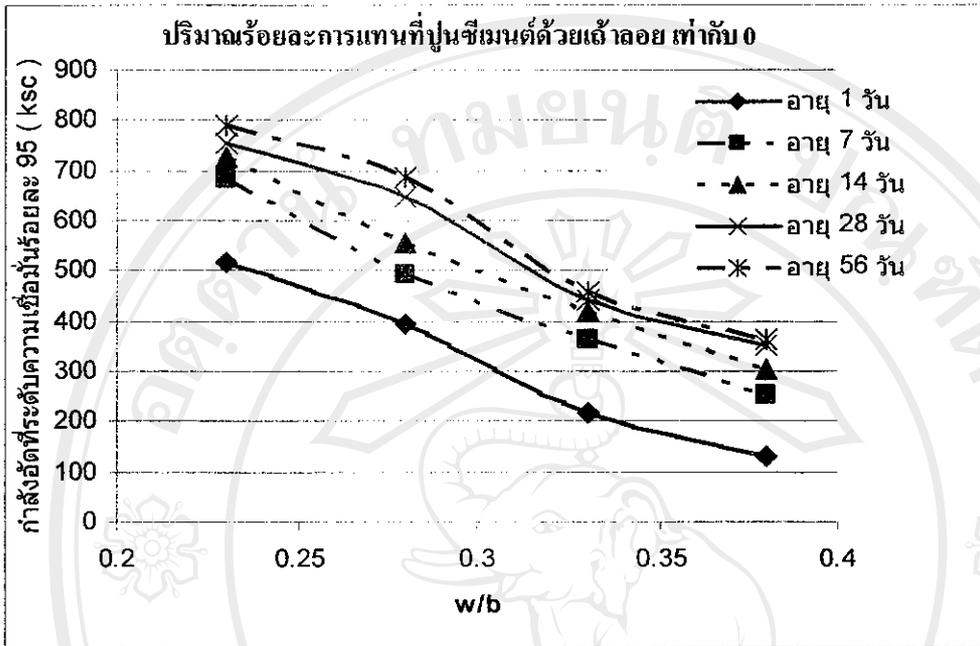
s คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของแต่ละชุด

จากสมการ สามารถนำไปปรับปรุงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานเพื่อให้เหมาะกับการนำไปใช้งาน ซึ่งผลจากการปรับแก้ได้แสดงในรูปที่ 5.15, 5.16, 5.17 และ 5.18 สำหรับกำลังอัดที่อายุ 1, 7, 14, 28 และ 56 วัน ตามลำดับ โดยตารางที่ 5.6 ได้แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละชุดตัวอย่าง

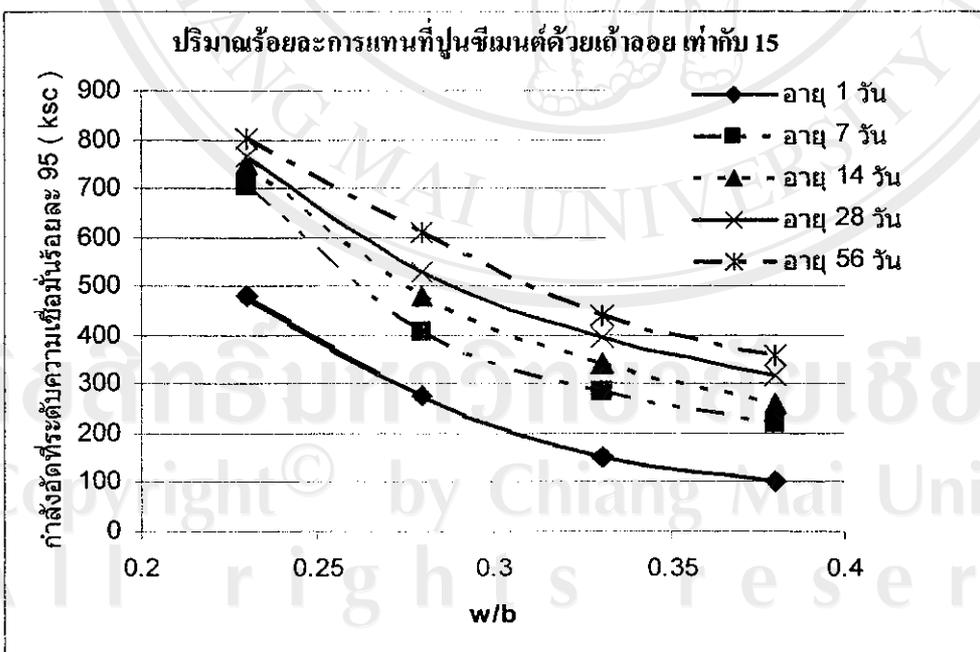
ตาราง 5.7 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละชุดตัวอย่าง

ชุดตัวอย่าง	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของคอนกรีตที่อายุการทดสอบ (กก./ตร.ซม.)					
	1 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน	เฉลี่ย
NS-0.23-00%-@1.0	54.57	19.28	28.12	31.79	40.51	34.85
NS-0.23-15%-@1.0	38.6	25.52	12.51	17.38	16.05	22.01
NS-0.23-25%-@1.0	13.12	60.51	40.66	41.23	29.49	37.00
NS-0.23-35%-@1.0	15.83	26.19	30.9	36.25	36.7	29.17
NS-0.28-00%-@1.0	26.36	33.33	19.91	14.07	17.74	22.28
NS-0.28-15%-@1.0	16.54	16.87	25.05	21.06	22.68	20.44
NS-0.28-25%-@1.0	10.44	21.57	16.93	17.11	27.17	18.64
NS-0.28-35%-@1.0	6.19	14.54	10.79	6.38	16.24	10.83
NS-0.33-00%-@1.0	14.16	9.88	21.09	18.57	16.35	16.01
NS-0.33-15%-@1.0	9.7	21.22	23.8	22.97	19.52	19.44
NS-0.33-25%-@1.0	10.25	12.77	11.36	20.29	10.01	12.94
NS-0.33-35%-@1.0	7.56	16.38	24	19.65	20.64	17.65
NS-0.38-00%-@1.0	9.08	10.22	17.71	17.62	27.13	16.35
NS-0.38-15%-@1.0	7.33	14.12	22.77	15.95	29.06	17.85
NS-0.38-25%-@1.0	9.98	22.26	15.17	20.61	18.96	17.40
NS-0.38-35%-@1.0	5.09	7.67	10.17	20.61	14.49	11.61

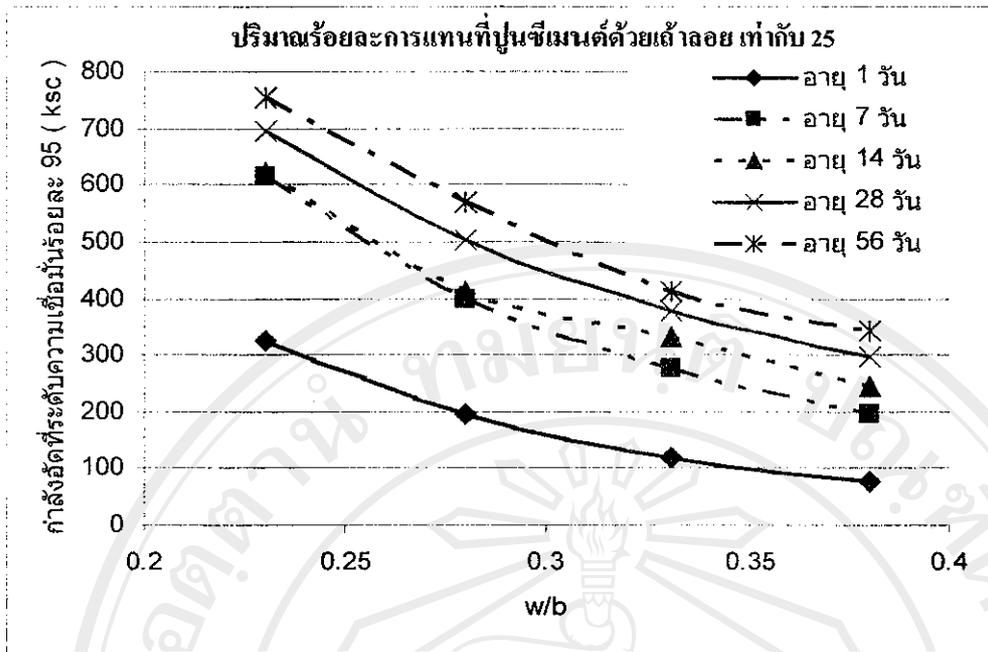
โดยความสัมพันธ์นี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ ที่มีการผสมเถ้าลอยและสารลดน้ำอย่างแรงเป็นส่วนผสมได้ และยังสามารถนำมาทำการปรับปรุงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานของวิธีการออกแบบของเอซีไอ อีกด้วย



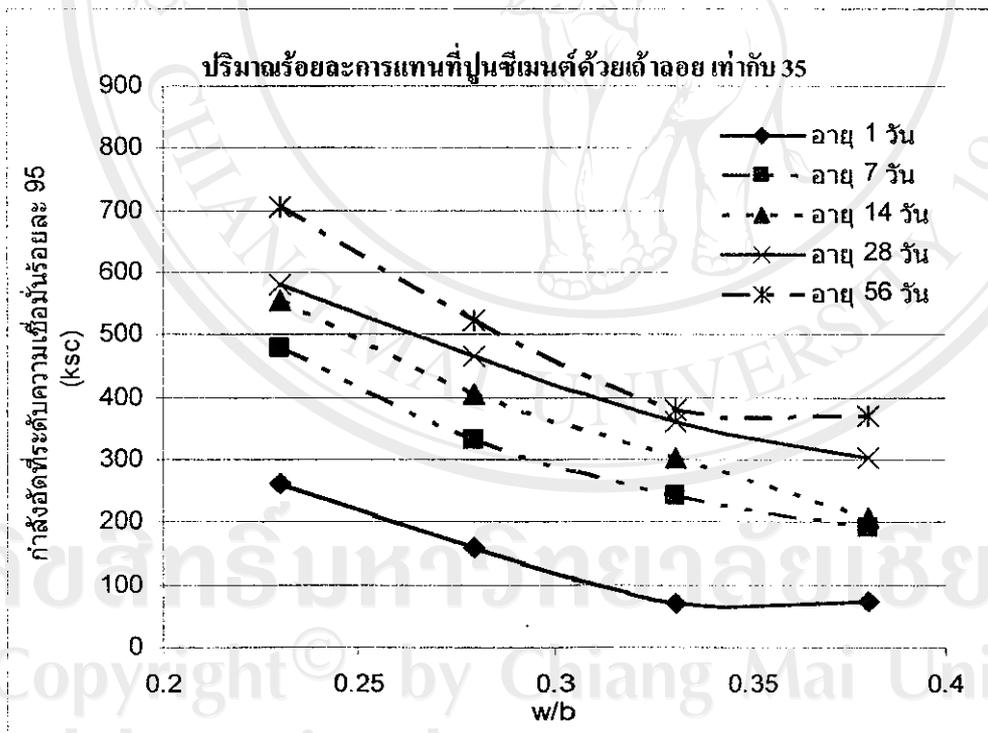
รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 กับอัตราส่วน w/b ที่ไม่มีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และปริมาณสารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดี



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 กับอัตราส่วน w/b ที่ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 และปริมาณสารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดี



รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 กับอัตราส่วน w/b ที่ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 25 และปริมาณสารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้



รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 กับอัตราส่วน w/b ที่ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 35 และปริมาณสารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้

บทที่ 6

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลงานวิจัย

จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

6.1.1 จากผลการวิจัย ทำให้ได้ความสัมพันธ์ ระหว่างปริมาณน้ำที่ต้องการกับค่าความชื้นเหลวที่ต้องการ ในกรณีที่มีการนำเถ้าลอยและสารลดน้ำอย่างแรงมาเป็นส่วนผสม โดยปริมาณน้ำที่ต้องการ สำหรับปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดี และที่ความชื้นเหลว (เวลาวิปี) เท่ากับ 15 วินาที อยู่ในช่วงระหว่าง 126 ถึง 166 ลิตรต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.

6.1.2 เมื่อปริมาณการใช้เถ้าลอยทดแทนเพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณน้ำที่ต้องการในสัดส่วนผสมลดลง ปริมาณน้ำที่ต้องการที่ปริมาณการใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 ถึงร้อยละ 35 อยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 97 ถึงร้อยละ 79 ของคอนกรีตที่ไม่มีการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

6.1.3 และเมื่อปรับปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงเพิ่มมากขึ้น สามารถทำให้ปริมาณน้ำที่ต้องการลดลง โดยเมื่อปรับปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงให้ต่ำกว่าและมากกว่าจุดที่เข้ากันได้ ร้อยละ ± 50 ปริมาณน้ำที่ต้องการในสัดส่วนผสมอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 101 ถึงร้อยละ 117 และร้อยละ 92 ถึงร้อยละ 100 เมื่อเทียบกับปริมาณน้ำที่ต้องการที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดี ตามลำดับ

6.1.4 จากผลการวิเคราะห์กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและสารลดน้ำอย่างแรงที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ ที่อายุต่าง ๆ พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตลดลง เมื่อปริมาณการใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น เช่นเดียวกับคอนกรีตที่ไม่ใช้สารลดน้ำอย่างแรงเป็นส่วนผสม โดยกำลังอัดเฉลี่ยที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 ถึงร้อยละ 35 ลดลงอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 3 ถึง ร้อยละ 30 ของคอนกรีตที่ไม่มีการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

6.1.5 กำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ ซึ่งมีเถ้าลอยและสารลดน้ำอย่างแรงเป็นส่วนผสมเพิ่ม ที่อายุการทดสอบ 28 วัน อยู่ในช่วงระหว่าง 336 ถึง 855 กก./ตร.ซม. ซึ่งสามารถนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดเฉลี่ยที่อายุต่าง ๆ กับอัตราส่วน w/b เพื่อสำหรับนำมาใช้ในการออกแบบส่วนผสม ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 5.15 ถึง 5.18

6.2 ข้อเสนอปรับปรุงวิธีการออกแบบส่วนผสมของเอซีไอสำหรับคอนกรีตผสมถ้ำลอยและสารลดน้ำอย่างแรง ที่มีค่ายุบตัวเป็นศูนย์

การศึกษาการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ้ำลอยที่ร้อยละ 15, 25 และ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน และปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงเท่ากับ, มากกว่า และน้อยกว่าที่จุดเข้ากันได้ดี ร้อยละ ± 50 ซึ่งมีผลต่อปริมาณน้ำที่ต้องการในสัดส่วนผสม โดยปริมาณน้ำที่ต้องการในสัดส่วนผสมที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรง เท่ากับ, น้อยกว่า และ มากกว่าจุดที่เข้ากันได้ดี ร้อยละ ± 50 ได้แสดงในตารางที่ 4.4 ถึง 4.6 ตามลำดับ

และผลของการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานที่ปริมาณร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ้ำลอย ร้อยละ 15 ถึง ร้อยละ 35 ได้แสดงอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้น ดังรูปที่ 5.15 ถึง 5.18

ซึ่งการปรับปรุงวิธีการออกแบบส่วนของเอซีไอ สำหรับคอนกรีตผสมถ้ำลอยและสารลดน้ำอย่างแรงที่มีค่ายุบตัวเป็นศูนย์ ได้ทำการเพิ่มขั้นตอนในการเลือกใช้ปริมาณสารลดน้ำอย่างแรง และการคำนวณหาปริมาณของสารลดน้ำอย่างแรง และได้ทำการปรับปรุงขั้นตอนที่เกี่ยวข้อง โดยทำการปรับแก้ขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 6.1 ซึ่งรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนการออกแบบมีดังนี้

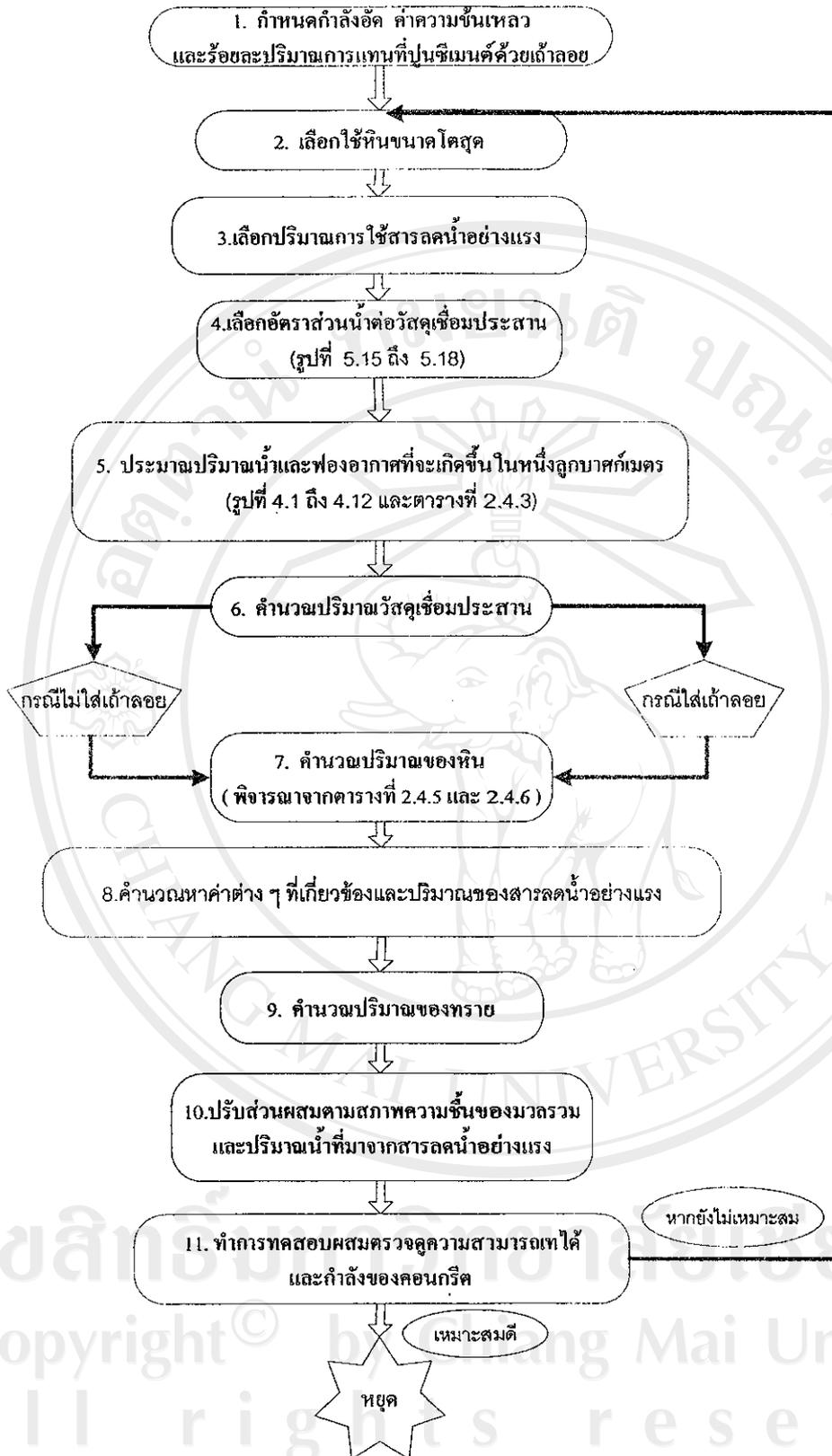
6.2.1 เลือกค่ากำลังอัด, ความชื้นเหลว และปริมาณร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ้ำลอยที่ต้องการ โดยในการเลือกค่ากำลังอัด, ความชื้นเหลว และปริมาณร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ้ำลอยที่ต้องการนั้น ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ออกแบบ ส่วนผสม โดยกำหนดให้เหมาะสมกับความต้องการคุณภาพของคอนกรีตและราคาต้นทุนการผลิต

6.2.2 เลือกขนาดใหญ่สุดของหิน การเลือกขนาดหินใหญ่สุดขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้างได้แก่ ความกว้าง ระยะห่างระหว่างเหล็กเส้น ขนาดใหญ่สุดของหินต้องไม่ใหญ่จนไม่สามารถเทคอนกรีตลงแบบหล่อได้ทั่วไปแล้วจะกำหนดขนาดใหญ่สุดของหินไว้ไม่เกิน

1 / 5 ของค้ำานในที่แคบที่สุดของแบบหล่อ

1 / 3 ของความหนาของแผ่นพื้น

3 / 4 ของระยะช่องว่างที่น้อยที่สุดระหว่างเหล็กเสริมแต่ละเส้นหรือแต่ละมัด



รูปที่ 6.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีตที่มีการยุบตัวเป็นศูนย์ผสม เถ้าลอยกับสารลดน้ำอย่างแรง ที่ปรับปรุงจากวิธีการออกแบบส่วนผสมตามมาตรฐานอเมริกา

6.2.3 เลือกปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรง การเลือกปริมาณสารลดน้ำอย่างแรงได้ทำการเลือกตามคำแนะนำของผู้ผลิต หรือที่จุดเข้ากัน ได้ดีของสารลดน้ำอย่างแรงกับปูนซีเมนต์ที่เลือกใช้

6.2.4 เลือกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน จากค่ากำลังอัดที่อายุการทดสอบที่ต้องการและปริมาณการเลือกใช้ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ซึ่งสามารถหาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานได้จากความสัมพันธ์ของกำลังอัดที่อายุการทดสอบต่างๆ กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน ที่ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 ถึง ร้อยละ 35 ได้แสดงในรูปที่ 5.15 ถึงรูปที่ 5.18

6.2.5 ประมาณปริมาณน้ำและอากาศ ปริมาณน้ำที่ต้องการจะเป็นตัวกำหนดค่าความชื้นเหลือ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงและปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย โดยสามารถหาได้จากรูปที่ 4.1 ถึง รูปที่ 4.12

6.2.6 กำหนดหาปริมาณปูนซีเมนต์ และ เถ้าลอย โดยสามารถคำนวณได้จากปริมาณน้ำที่ต้องการในส่วนผสม กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน

6.2.7 กำหนดหาปริมาณมวลรวมหยาบ ปริมาณมวลรวมหยาบจะขึ้นอยู่กับมวลรวมที่เลือกใช้ และค่าความชื้นเหลือที่ต้องการ

6.2.8 กำหนดหาค่าต่างๆ ที่เกี่ยวข้องและปริมาณของสารลดน้ำอย่างแรง ซึ่งค่าต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณประกอบด้วย มวลของแข็งที่ต้องการ , ปริมาตรของสารลดน้ำอย่างแรง , ปริมาตรของน้ำที่มากับสารลดน้ำอย่างแรง และปริมาตรของของแข็ง ซึ่งคำนวณได้แสดงในบทที่ 3

6.2.9 กำหนดปริมาณมวลรวมละเอียด เมื่อทราบปริมาตรของวัสดุผสมอื่นทั้งหมดแล้ว สามารถหาปริมาณของทรายได้จาก ปริมาตรของส่วนผสมทั้งหมดต้องเท่ากับ 1 ลบ.ม.

6.2.10 ปรับส่วนผสมตามความชื้นมวลรวม และปริมาณน้ำในสารลดน้ำอย่างแรง ในสภาพจริงทราย และ หินไม่ได้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง บางครั้งทรายและหินมีสภาพแห้งหรือเปียกกว่าสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง เมื่อนำไปผสมคอนกรีตจะทำให้ปริมาณน้ำที่ใช้คลาดเคลื่อนไป ดังนั้นก่อนจะนำส่วนผสมที่ได้คำนวณได้มาใช้จะต้องมีการปรับ

ส่วนผสมใหม่ตามสภาพความชื้นจริงของมวลรวม และปริมาณน้ำที่มากับสารลดน้ำอย่างแรง เพื่อให้ได้ปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมตามที่ต้องการ

6.3 ข้อเสนอแนะ

6.3.1 ข้อเสนอปรับปรุงวิธีการออกแบบส่วนผสมของเอซีไอจากงานวิจัยนี้ เป็นเพียงแนวทางในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต โดยใช้ ปูนซีเมนต์ ตราอินทรีเพชร, etailoy จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ และสารลดน้ำอย่างแรง ยี่ห้อ Sikament FF เป็นส่วนผสมเท่านั้น หากมีการเปลี่ยนแปลงวัสดุที่ใช้ในการผสม อาจนำมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบอย่างคร่าว ๆ หรือเป็นค่าเบื้องต้นสำหรับการทดลองผสมได้ ซึ่งอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้

6.3.2 เนื่องจากมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้มีการควบคุมให้อยู่ในสภาพที่แห้งมาก และเวลาที่ใช้ในการผสมไม่นานเพียงพอสำหรับการดูดซึมของมวลรวม จึงทำให้ปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมมากกว่าปริมาณน้ำที่ต้องการจริง ดังนั้นในการทำงานจริงที่ใช้มวลรวมที่มีความชื้นสูง สามารถลดปริมาณน้ำที่ต้องการในสัดส่วนผสมลงได้

6.3.3 เนื่องจากการศึกษามุ่งเน้นผลของการใช้สารลดน้ำอย่างแรงและetailoy ต่อปริมาณน้ำที่ต้องการ และกำลังอัดของคอนกรีตผสมetailoyและสารลดน้ำอย่างแรง จึงมีขอบเขตจำกัด เช่น ใช้หินขนาด 3/8 นิ้ว, สารลดน้ำอย่างแรงประเภท เมลามีนซูเปอร์พลาสติกไซเซออร์ เป็นต้น เพราะฉะนั้นเพื่อให้สามารถใช้งานได้กว้างมากขึ้น จึงควรทำการศึกษาผลของปริมาณน้ำที่ต้องการและกำลังอัดของคอนกรีต เมื่อวัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมเปลี่ยนไป

6.3.4 การนำetailoyมาเป็นส่วนผสม สามารถทำให้ต้นทุนในการผลิตลดลงได้ แต่การใช้etailoyทดแทนปูนซีเมนต์นั้นทำให้กำลังอัดลดลง ดังนั้นในการพิจารณาปริมาณการใช้etailoy มาใช้ควรคำนึงจุดที่เหมาะสมทั้งด้านราคาและกำลังอัดที่ต้องการสำหรับอายุทดสอบที่ต้องการ

บรรณานุกรม

- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, สุรเชษฐ์ จีงเกษมโชคชัย และวราภรณ์ คุณาวานากิจ (2542). "การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต", การสัมมนาทางวิชาการสาขา วิศวกรรมโยธา .
- ทิน เกตุรัตน์บวร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และเอกภพ อังศุวัฒนา (2541). "การใช้เถ้าถ่านหินแยกขนาดจากแม่เมาะในงานคอนกรีตกำลังสูง". วารสาร กฟผ., 2,36-45.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ, สมศักดิ์ เมตะนันท์, สุรเชษฐ์ มั่งมีศรี และ ธีรวัฒน์ ลินศิริ (2543) " คุณสมบัติของคอนกรีตบดอัดผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบดำ ", การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 6
- ปิติวัฒน์ วัฒนชัย (2542) " ข้อเสนอขอปรับปรุงวิธีการออกแบบส่วนผสมของเอซีไอสำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ ". วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- วิศว จักรไพศาล และชัยโรจน์ จักรไพศาล (2542). "ผลของเถ้าลอยในปฏิกิริยาปอซโซลานิกของคอนกรีตสมรรถนะสูง". วารสาร กฟผ. , 1, 60-67.
- สมชัย กกกำแหง , นรินทร์ แก้วไพเราะ และ กิตติ ชินเชษฐ์ (2540) " การใช้เถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะผสมทดแทนซีเมนต์เพื่อทำคอนกรีตที่มีเถ้าลอยทดแทนซีเมนต์ในอัตราสูงแห่งชาติ ครั้งที่ 4
- สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, พงศ์ศักดิ์ จิตวุฒิไกร, นิตยา ประทีปทินทอง, ศุภกิจ สวัสดิ์กิติธรรม และศิวาล ทาทอง (2542). "การออกแบบสัดส่วนผสมของคอนกรีตผสมเถ้าลอย", การสัมมนาเรื่องการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.
- เอกภพ ทองอินดีะ (2545) " ทดสอบความเข้ากันได้ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งที่ผลิตในไทยกับสารลดน้ำอย่างแรง ". วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ACI Committee 211.3R-97 (2000), "Standard Practice for Selecting Proportions for No-Slump Concrete", American Concrete Institute.
- Aitcin,P.- C. (1998).High-Performance Concrete.1st Edition.London: E & FN Spon.
- Jolicoeur , C.,Nkinamubazi ,P.- C.,Simard,M-A. and Piotte,M.(1994).Progress in Understanding the Functional Properties of Superplasticizer in Frest Concrete,ACI SP-148,63-88.

- Malier, Y. (1992). High performance Concrete from Material to Structure. London: E & FN Spon.
- Vernet, C. (1995). Mécanismes Chimiques d'interactions ciment-adjuvants, CTS Spa. Guerville Service Physico-Chimie du Ciment, Janvier, 10.



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



ตารางการคำนวณสำหรับออกแบบส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย
ที่มีการยุบตัวเป็นศูนย์ กรณีใช้ร่วมกับสารลดน้ำอย่างแรง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ภาคผนวก ก

ตารางการคำนวณสำหรับออกแบบส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีการยุบตัวเป็นศูนย์
กรณีใช้ร่วมกับสารลดน้ำอย่างแรง

การคำนวณออกแบบส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการของเอซีไอ โดยดัดแปลงตาราง
มาจากการคำนวณจากวิธีการของ Aitcin P.C. (1998) รูปแบบตารางในรูปที่ ก-1 ซึ่งในแต่ละช่องของตารางสามารถ
หาได้ดังนี้

ตาราง ก.	เป็นตารางแสดงค่าคุณสมบัติของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย
ตาราง ข.	เป็นตารางแสดงค่าของคุณสมบัติของมวลรวม
ตาราง ค.	เป็นตารางแสดงค่าคุณสมบัติของสารลดน้ำอย่างแรง
ตาราง ง.	เป็นตารางแสดงค่ารายการ การคำนวณหาน้ำหนักอบแห้ง ของมวลรวมหยาบใน คอนกรีต 1 ลบ.ม.
ตาราง จ.	เป็นตารางแสดงรายการคำนวณส่วนผสม ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ช่องที่ 1 ระบุค่า W/B ที่ต้องการเลือกใช้

ช่องที่ 2 ระบุปริมาณน้ำที่ต้องการใช้ในส่วนผสม

ช่องที่ 3 จำนวนหาปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน (binder) ที่ต้องการ จาก
ปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่ต้องการ = (ค่าในช่องที่ 2) / (ค่าในช่องที่ 1)

ช่องที่ 4-1 จำนวนปริมาณซีเมนต์ที่ใช้โดยที่
ปริมาณซีเมนต์ = ค่าในช่องที่ 3 x เปอร์เซนต์ซีเมนต์ที่ใช้

ช่องที่ 4-2 จำนวนปริมาณเถ้าลอยที่ใช้โดยที่
ปริมาณซีเมนต์ = ค่าในช่องที่ 3 x เปอร์เซนต์เถ้าลอยที่ใช้

ช่องที่ 5 จำนวนหินในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง โดยที่
ปริมาณหิน = นน. หินอบแห้งต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม. (จากตาราง ง.)
x [1 + Wabs ของหิน]

รูปที่ ก-1 ตารางคำนวณส่วนผสม

ตารางออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสมคอนกรีตผสมถ้ำลอย อัตราส่วน W/B เท่ากับ แทนที่ด้วยถ้ำลอยร้อยละ

W/B = ที่ความชื้นแฉะ V_{cube test} ที่ใช้และใช้หินขนาดใหญ่สุด =

ตาราง ก.			ตาราง ข.		
ตาราง ก.	Gc	%	มวลรวม	G _{รวม}	%
ปูนซีเมนต์			มวลรวมทราย		
ถ้ำลอย			มวลรวมละเอียด		

$W_h = W_{tot} - W_{abs}$ $M = M_{std} (1 - W_h)$

ตาราง ก.

สารลดน้ำอย่างแรง		M sol. = C x $\frac{d}{100}$	V _{liq} = $\frac{M_{sol} \times 100}{G \times G_{sup}}$	V _{sup} = V _{liq} x G _{sup} $\frac{(100-s)}{100}$	V _{sol} = V _{liq} - V _{sup}
ค่า จพ. (G _{sup})	ร้อยละของน้ำ C (%)				

ตาราง ง.	หน่วยน้ำหนัก (กก. /ลบ.ม.)	ปริมาณต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.(ลบ.ม.)	หน่วยน้ำแข็งต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.
หิน			

- ร้อยละของปริมาณวัสดุผสมต่อหนึ่งหน่วยคอนกรีต = _____
- ออกแบบก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x200 มม. จำนวน = _____ ก้อน
- คิดเป็นปริมาณคอนกรีตที่ต้องใช้ = _____ ลบ.ม.
- เพื่อความสูญเสียระหว่างผสม = _____ %
- เพราะฉะนั้นต้องการปริมาณคอนกรีต = _____ ลบ.ม.

ตาราง จ.	1	2	3	4	5		6
วัสดุ	ปริมาณ กก. /ลบ.ม.	ปริมาตร ลิตร /ลบ.ม.	ปริมาตรที่สถานะอื่นต่อผิวแห้ง กก. /ลบ.ม.	ปรับแก้ ปริมาณน้ำ ลิตร /ลบ.ม.	ปริมาณที่ปรับแก้แล้ว (กก.)		Trial batch
					1 m ³		
น้ำ	2	2	2		2		2
ปูนซีเมนต์	3	3-1			4-1		25-1
ถ้ำลอย	4-2	3-2	4-1		4-2		25-2
มวลรวมหยาบ	3	3			1		2
มวลรวมละเอียด		1		2	1		2
อากาศ	เปอร์เซ็นต์ 6	1	0				
สารลดน้ำอย่างแรง	7			2	2		2
ผลรวม		1		2			3

ช่องที่ 6 เปอร์เซ็นต์ของฟองอากาศที่เกิดในคอนกรีต พิจารณาตามมาตรฐานอเมริกา (ACI 211.3R)।

ช่องที่ 7 ระบุปริมาณร้อยละของสารลดน้ำอย่างแรงที่ต้องการเลือกใช้ ซึ่งเลือกใช้ที่ปริมาณที่เหมาะสมกับปูนซีเมนต์

ช่องที่ 8-1 คำนวณปริมาตรของซีเมนต์ต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม. โดยที่

$$\text{ปริมาตรซีเมนต์} = \frac{\text{ค่าในช่องที่ 4-1}}{\text{ถพ.ของซีเมนต์ (ตาราง ก.)}}$$

ช่องที่ 8-2 คำนวณปริมาตรของเถ้าลอยต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม. โดยที่

$$\text{ปริมาตรเถ้าลอย} = \frac{\text{ค่าในช่องที่ 4-2}}{\text{ถพ.ของเถ้าลอย (ตาราง ก.)}}$$

ช่องที่ 9 คำนวณปริมาตรของหินต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม. โดยที่

$$\text{ปริมาตรหิน} = \frac{\text{ค่าในช่องที่ 5}}{\text{ถพ.ของหิน (ตาราง ข.)}}$$

ช่องที่ 10 คำนวณปริมาตรของฟองอากาศ โดยที่

$$\text{ปริมาตรอากาศ} = \frac{\text{ค่าในช่องที่ 6} \times 1000}{100}$$

ช่องที่ 11 ปริมาตรของแข็งซึ่งบรรจุอยู่ในสารลดน้ำอย่างแรง, V_{sol} จากการคำนวณในช่อง H (ตาราง ค.)

ช่องที่ 12 แสดงถึงปริมาตรโดยรวมของส่วนผสม (Total mix volume) , (1000 l/m³)

ช่องที่ 13 คำนวณปริมาตรทราย โดยที่

$$\text{ปริมาตรทราย} = 1000 - (\text{ค่าในช่อง 2,8-1,8-2,9,10,11})$$

ช่องที่ 14 ปริมาณทรายอัดตัวผิวแห้ง = ค่าในช่องที่ 10 x ถพ.ของทรายอัดตัวผิวแห้ง (ตาราง ข.)

ช่องที่ 15 ระบุค่ามวลของอนุภาคของแข็งในสารลดน้ำอย่างแรง , M_{sol} จาก
การคำนวณในช่อง E (ตาราง ค.)

ช่องที่ 16 จำนวนน้ำหนักคอนกรีตที่สภาพอิ่มตัวผิวแห้ง โดยที่
น้ำหนักคอนกรีต = ผลรวมของค่าในช่องสมสที่ 3

ช่องที่ 17 จำนวนปริมาณของหินในคอนกรีต 1 ลบ.ม. ที่มีการปรับแก้
ความชื้นแล้ว โดยที่
ปริมาณหิน = $\frac{\text{ค่าในช่องที่ 5} \times (1 + (\text{ค่า Wh ของหินจากตาราง ข.}))}{100}$

ช่องที่ 18 จำนวนค่าการปรับแก้ น้ำในหิน โดยที่
ปริมาณน้ำในหินที่ต้องปรับแก้ = ค่าในช่องที่ 5 - ค่าในช่องที่ 17

ช่องที่ 19 จำนวนปริมาณของทรายในคอนกรีต 1 ลบ.ม. ที่มีการปรับแก้
ความชื้นแล้ว โดยที่
ปริมาณทราย = $\frac{\text{ค่าในช่องที่ 14} \times (1 + (\text{ค่า Wh ของทรายจากตาราง ข.}))}{100}$

ช่องที่ 20 จำนวนค่าการปรับแก้ น้ำในทราย โดยที่
ปริมาณน้ำในทรายที่ต้องปรับแก้ = ค่าในช่องที่ 14 - ค่าในช่องที่ 19

ช่องที่ 21 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการปรับแก้จากน้ำที่มากับสารลดน้ำอย่างแรง
จากการคำนวณในช่อง G โดยค่าในช่องนี้จะเป็นค่าติดลบ

ช่องที่ 22 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการปรับแก้ทั้งหมด คือผลรวมของช่องที่ 18, 20
และ 21

ช่องที่ 23 จำนวนปริมาณน้ำหลังจากการปรับแก้แล้ว = ช่องที่ 2 + ช่องที่ 22

ช่องที่ 24 ปริมาตรของสารลดน้ำอย่างแรง (V_{sq}) จากการคำนวณในช่อง F
(ตาราง ค.)



ข้อมูลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง ข- 1 ความถ่วงจำเพาะและร้อยละการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ (ASTM C127)

รายการ	การทดสอบ		ค่าเฉลี่ย
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	
น้ำหนักของมวลรวมหยาบในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง, กรัม	645.29	776.46	-
น้ำหนักตะกร้าลวดเหล็กในน้ำ, กรัม	677	683	-
น้ำหนักตะกร้าลวดเหล็ก+มวลรวมหยาบในน้ำ, กรัม	1087	1172	-
น้ำหนักมวลรวมหยาบในน้ำ, กรัม	410	489	-
น้ำหนักของมวลรวมหยาบอบแห้ง, กรัม	640.29	770.75	-
ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมในสถานะอบแห้ง	2.72	2.68	2.70
ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง	2.74	2.70	2.72
ร้อยละการดูดซึมน้ำ, %	0.78	0.74	0.76

ตาราง ข- 2 ความถ่วงจำเพาะและร้อยละการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด (ASTM C127)

รายการ	การทดสอบ		ค่าเฉลี่ย
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	
ปริมาตรกระบอกตวง, มล.	500	500	-
น้ำหนักขวดทดลอง, กรัม	348.8	348.8	-
น้ำหนักของมวลรวมในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง, กรัม	500.03	500.12	-
น้ำหนักน้ำ+มวลรวม+ขวดทดลอง, กรัม	1137.58	1139.86	-
น้ำหนักน้ำ 500 มล.+ขวดทดลอง, กรัม	833.79	833.79	-
น้ำหนักของมวลรวมในสถานะอบแห้ง, กรัม	494.29	494.63	-
ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมในสถานะอบแห้ง	2.52	2.55	2.53
ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง	2.55	2.58	2.56
ร้อยละการดูดซึมน้ำ, %	1.16	1.11	1.14

ตาราง ข- 3 ความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ (ASTM C188)

รายการ	การทดสอบ		ค่าเฉลี่ย
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	
ปริมาณน้ำมันก๊าดก่อนใส่ปูนซีเมนต์ ,มล	0.8	0.7	-
น้ำหนักขวดทดลอง+น้ำมันก๊าด , กรัม	377.53	381.59	-
ปริมาณน้ำมัน+ปูนซีเมนต์ ,มล	20.3	19.9	-
น้ำหนักขวดทดลอง+น้ำมันก๊าด+ปูนซีเมนต์ , กรัม	438.92	442.11	-
ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์	3.15	3.15	3.15

ตาราง ข - 4 ความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย (ASTM C188)

รายการ	การทดสอบ		ค่าเฉลี่ย
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	
ปริมาณน้ำมันก๊าดก่อนใส่เถ้าลอย ,มล	0.3	0.5	-
น้ำหนักขวดทดลอง+น้ำมันก๊าด , กรัม	376.26	381.51	-
ปริมาณน้ำมัน+เถ้าลอย ,มล	19.5	19.8	-
น้ำหนักขวดทดลอง+น้ำมันก๊าด+เถ้าลอย , กรัม	418.25	424.05	-
ความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย	2.19	2.20	2.20

ตาราง ข - 5 หน่วยน้ำหนักของมวลรวมหยาบอบแห้งและกระทุ้งแน่น (ASTM C29)

รายการ	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ค่าเฉลี่ย
น้ำหนักกระบอกตวง , กรัม	3030	3030	-
น้ำหนักกระบอกตวง+หินอบแห้งกระทุ้งแน่น , กรัม	7550	7530	-
น้ำหนักกระบอกตวง+น้ำ , กรัม	6000	6000	-
น้ำหนักหินอบแห้งกระทุ้งแน่น , กรัม	4520	4500	-
น้ำหนักน้ำ , กรัม	2970	2970	-
ปริมาตรกระบอกตวง , ลบ.ม.	2.98	2.98	-
หน่วยน้ำหนักหิน , กก./ลบ.ม.	1517	1510	1513

หมายเหตุ อุณหภูมิของน้ำ 21 องศาเซลเซียส

ความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 998 กก/ลบ.ม.

ตาราง ข - 6 หน่วยน้ำหนักของมวลรวมละเอียดอบแห้งและกระทุ้งแน่น (ASTM C29)

รายการ	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ค่าเฉลี่ย
น้ำหนักกระบอกตวง , กรัม	3030	3030	-
น้ำหนักกระบอกตวง+ทรายอบแห้งกระทุ้งแน่น , กรัม	7685	7663	-
น้ำหนักกระบอกตวง+น้ำ , กรัม	6000	6000	-
น้ำหนักทรายอบแห้งกระทุ้งแน่น , กรัม	4655	4633	-
น้ำหนักน้ำ , กรัม	2970	2970	-
ปริมาตรกระบอกตวง , ลบ.ม.	2.98	2.98	-
หน่วยน้ำหนักทราย , กก./ลบ.ม.	1562	1555	1558

หมายเหตุ อุณหภูมิของน้ำ 21 องศาเซลเซียส

ความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 998 กก/ลบ.ม.

ตาราง ข - 7 สัดส่วนขนาดคละของมวลรวมหยาบ (ASTM C136)

ขนาด ตะแกรง	ชุดที่ 1			ชุดที่ 2			ค่าเฉลี่ย		
	ค้ำง (ร้อยละ)	ค้ำงสะสม (ร้อยละ)	ผ่าน (ร้อยละ)	ค้ำง (ร้อยละ)	ค้ำงสะสม (ร้อยละ)	ผ่าน (ร้อยละ)	ค้ำง (ร้อยละ)	ค้ำงสะสม (ร้อยละ)	ผ่าน (ร้อยละ)
1"	0	0	100	0	0	100	0	0	100
3/4"	0	0	100	0	0	100	0	0	100
1/2"	0	0	100	0	0	100	0	0	100
3/8"	11.61	11.61	88.39	12.57	12.57	87.43	12.09	12.09	87.91
# 4	86.73	98.34	1.66	85.63	98.2	1.8	86.18	98.27	1.73
ถัด	1.66	100	0	1.8	100	0	1.73	100	0
รวม	100.00			100.00			100.00		

ขนาดโตสุดเท่ากับ 3/8 นิ้ว

ตาราง ข - 8 สัดส่วนขนาดคละของมวลรวมละเอียด (ASTM C136)

ขนาด ตะแกรง	ชุดที่ 1			ชุดที่ 2			ค่าเฉลี่ย		
	ค้ำง (ร้อยละ)	ค้ำงสะสม (ร้อยละ)	ผ่านสะสม (ร้อยละ)	ค้ำง (ร้อยละ)	ค้ำงสะสม (ร้อยละ)	ผ่านสะสม (ร้อยละ)	ค้ำง (ร้อยละ)	ค้ำงสะสม (ร้อยละ)	ผ่านสะสม (ร้อยละ)
#4	2.22	2.22	97.78	2.82	2.82	97.18	1.36	1.36	98.64
#8	14.06	16.28	83.72	13.24	16.06	83.94	10.27	11.63	88.37
#16	20.57	36.85	63.15	19.64	35.70	64.30	22.43	34.06	65.94
#30	20.66	57.51	42.49	20.7	56.40	43.60	26.25	60.31	39.69
#50	23.92	81.43	18.57	24.92	81.32	18.68	26.50	86.81	13.19
#100	15.86	97.29	2.71	16.16	97.48	2.52	10.24	97.05	2.95
ถัด	2.71	100	0.00	2.52	100	0.00	2.95	100	0.00
รวม	100.00			100.00			100.00		

ค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.91

ตาราง ข - 9 ความถ่วงจำเพาะของสารลดน้ำอย่างแรง

รายการ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
น้ำหนักกระบอกตวง , กรัม	848.94	812.33	-
นน.กระบอกตวง และ นน.สารลดน้ำอย่างแรง , กรัม	2045.52	2019.95	-
น้ำหนักของสารลดน้ำอย่างแรง , กรัม	1196.58	1207.62	-
ปริมาตรของสารลดน้ำอย่างแรง , มล.	1000	1000	-
ความถ่วงจำเพาะ	1.20	1.21	1.20

ตาราง ข - 10 ร้อยละปริมาณของแข็งในสารลดน้ำอย่างแรง ซีก้าเมนต์เอฟเอฟ

รายการ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
น้ำหนักถาด , กรัม	127.66	154.59	-
นน.ถาด และ สารลดน้ำอย่างแรง , กรัม	245.38	271.33	-
นน.ถาด และ สารลดน้ำอย่างแรงอบแห้ง , กรัม	169.28	195.72	-
น้ำหนักสารลดน้ำอย่างแรง , กรัม	117.72	116.74	-
น้ำหนักสารลดน้ำอย่างแรงอบแห้ง , กรัม	41.62	41.13	-
ร้อยละปริมาณของแข็งในสารลดน้ำอย่างแรง	35.4	35.2	35.3

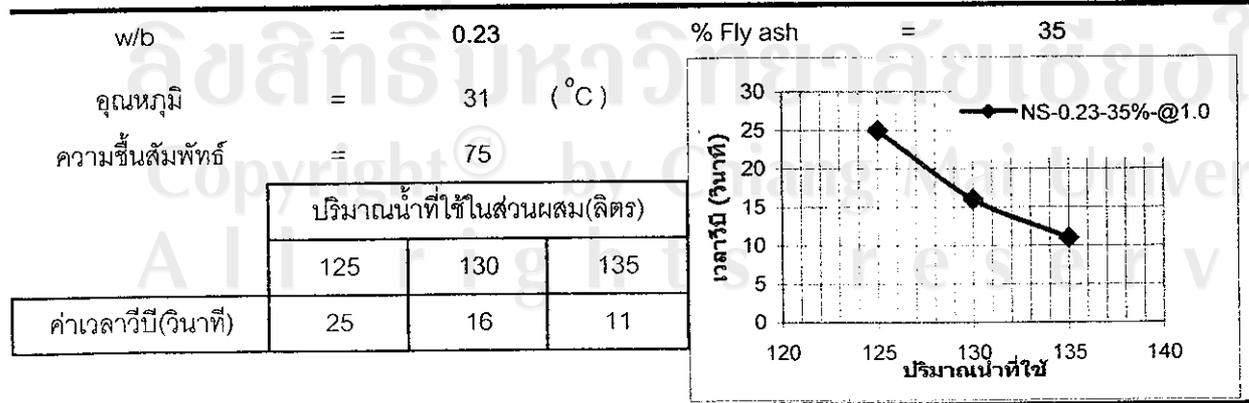
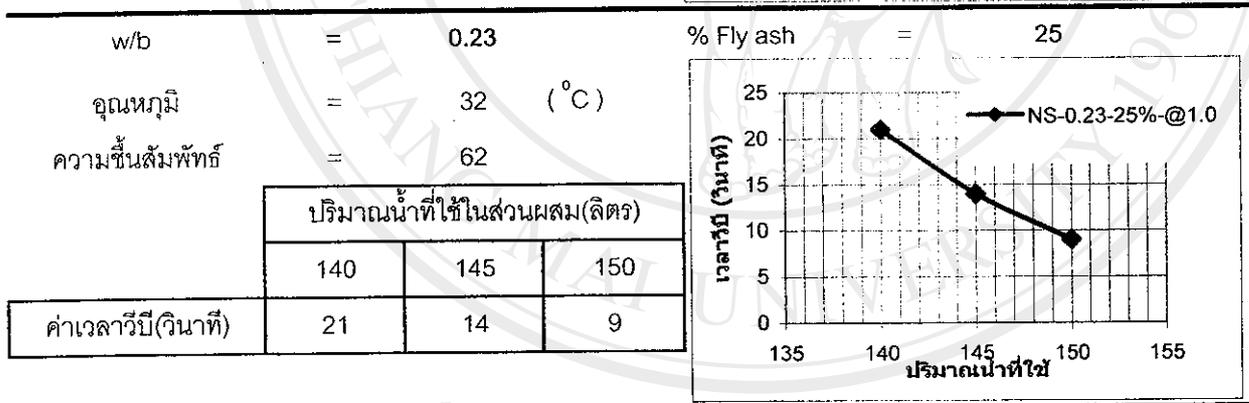
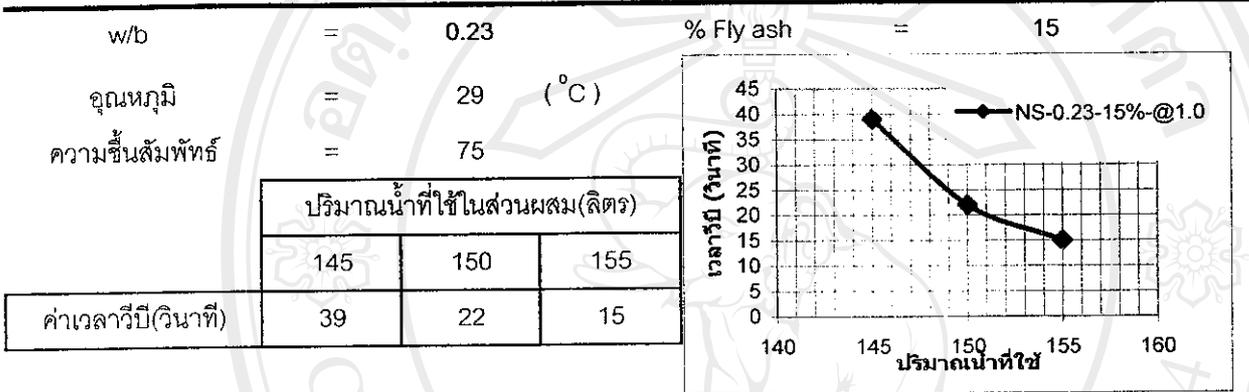
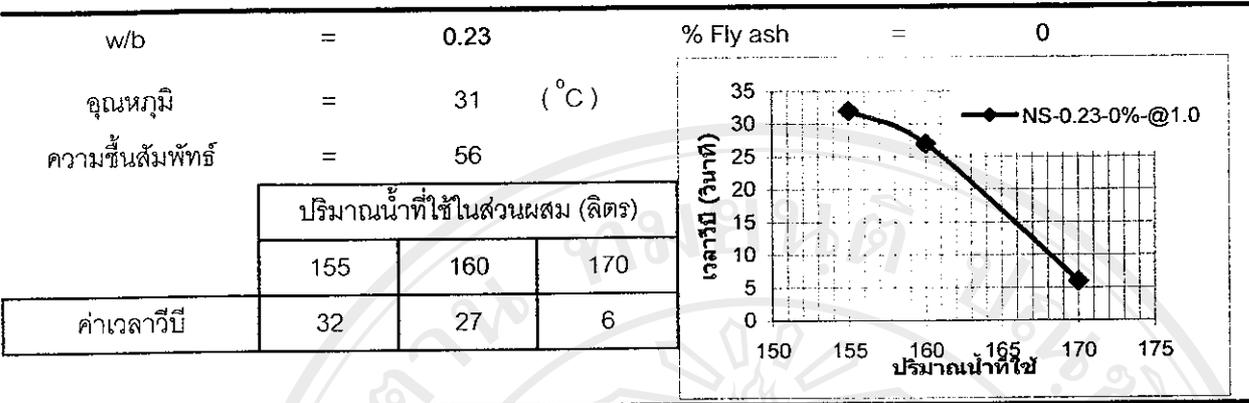


ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

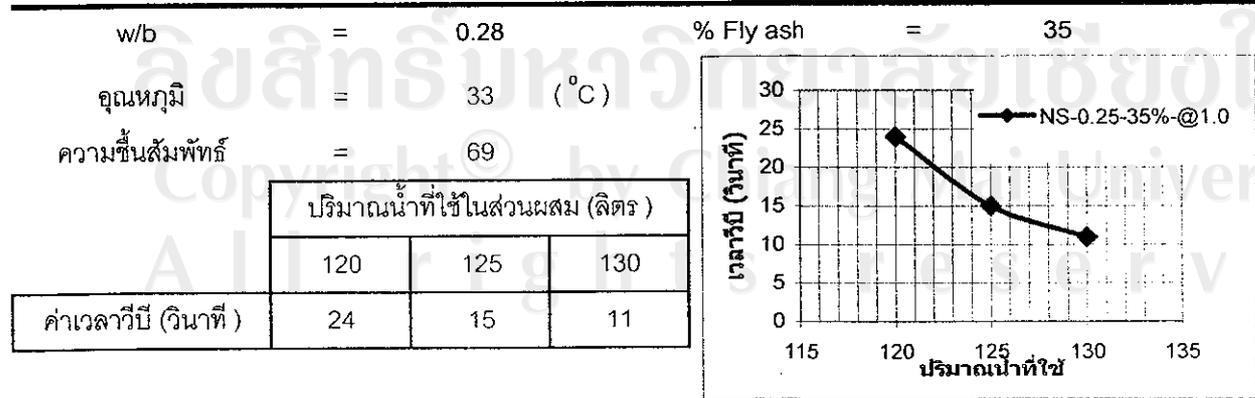
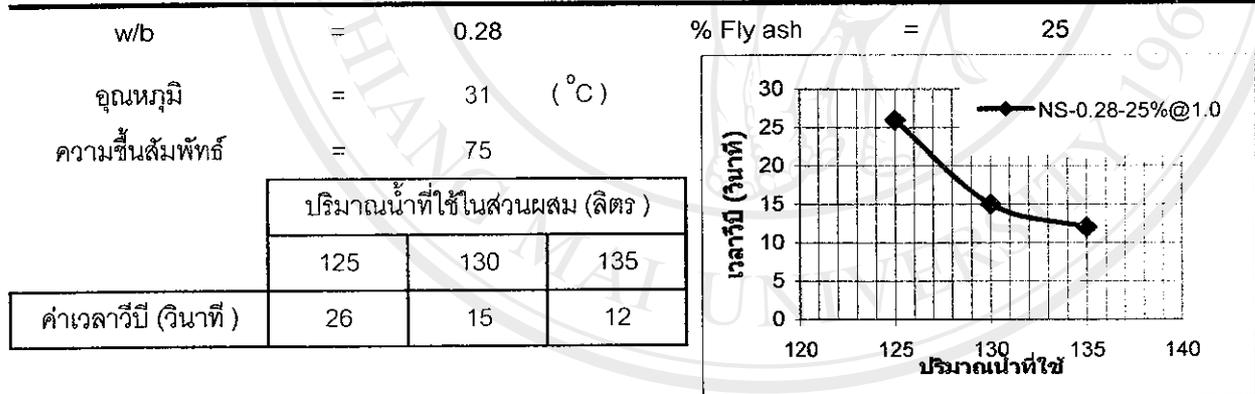
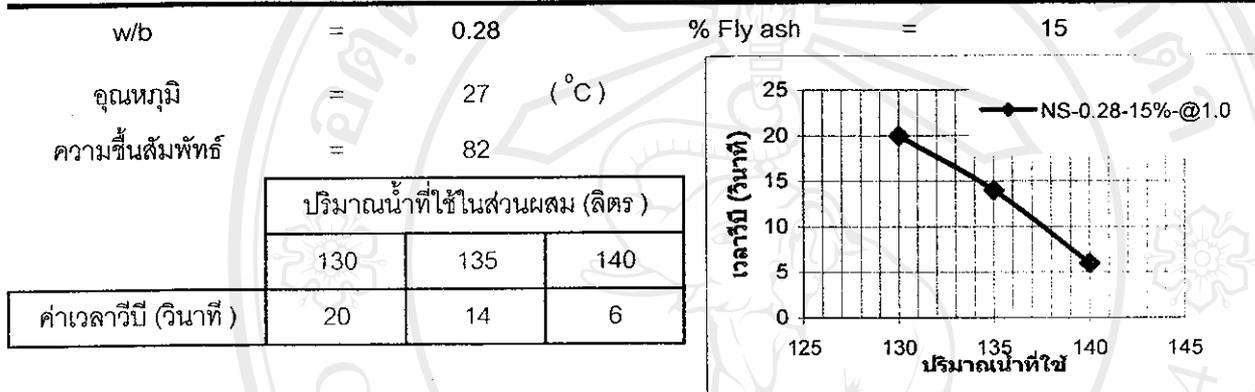
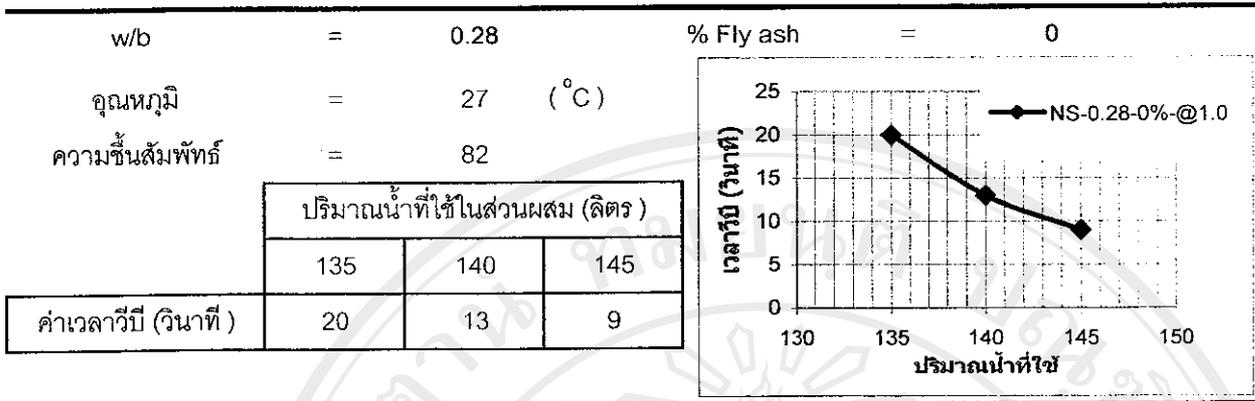
ผลการทดสอบ การหาค่าความชื้นเหลือของคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ ที่ $w/b = 0.23$

ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่เข้ากันได้กับปูนซีเมนต์(1.0%)



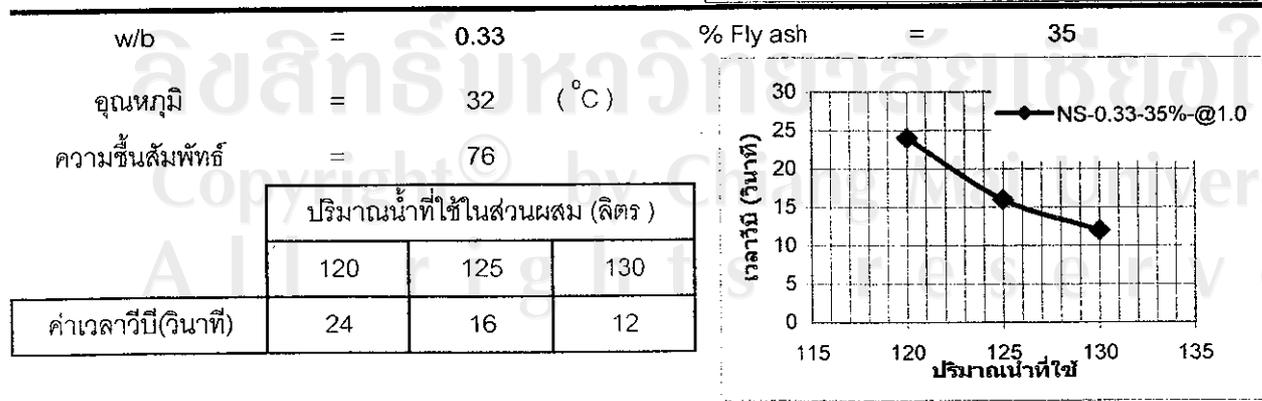
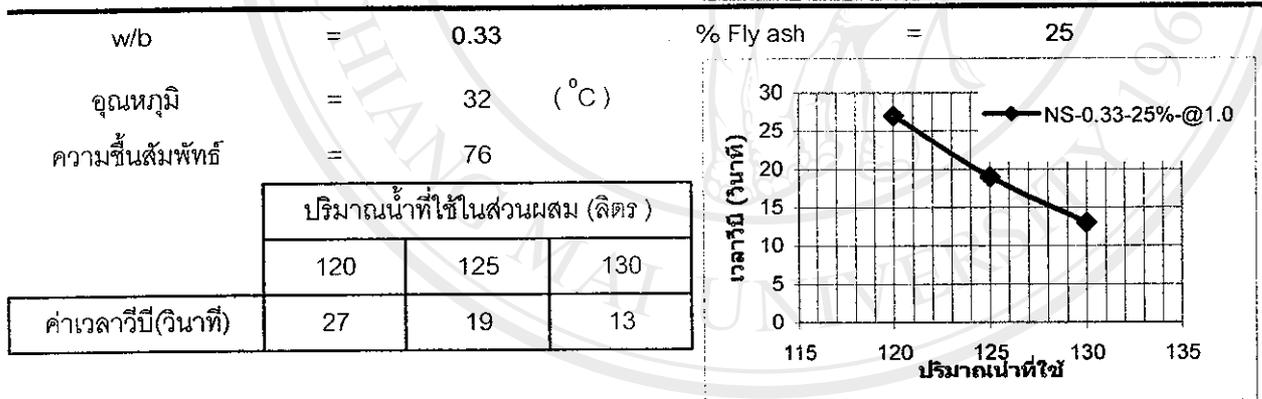
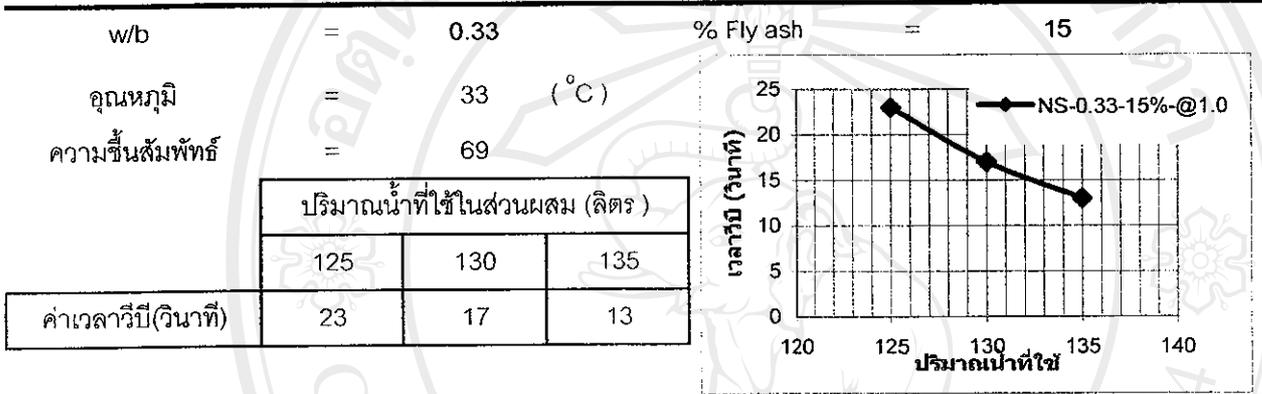
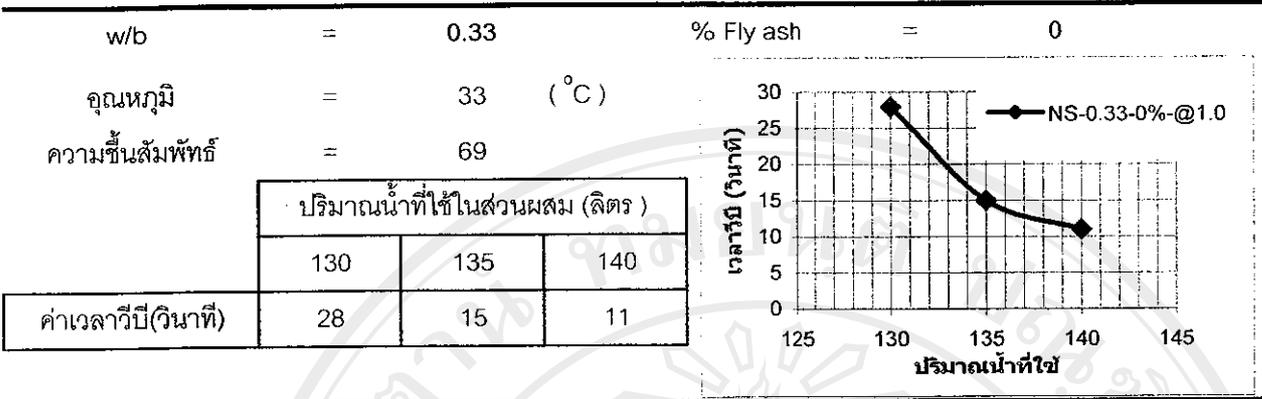
ผลการทดสอบ การหาค่าความชื้นเหลือของคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ ที่ $w/b = 0.28$

ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่เข้ากันได้กับปูนซีเมนต์(1.0%)



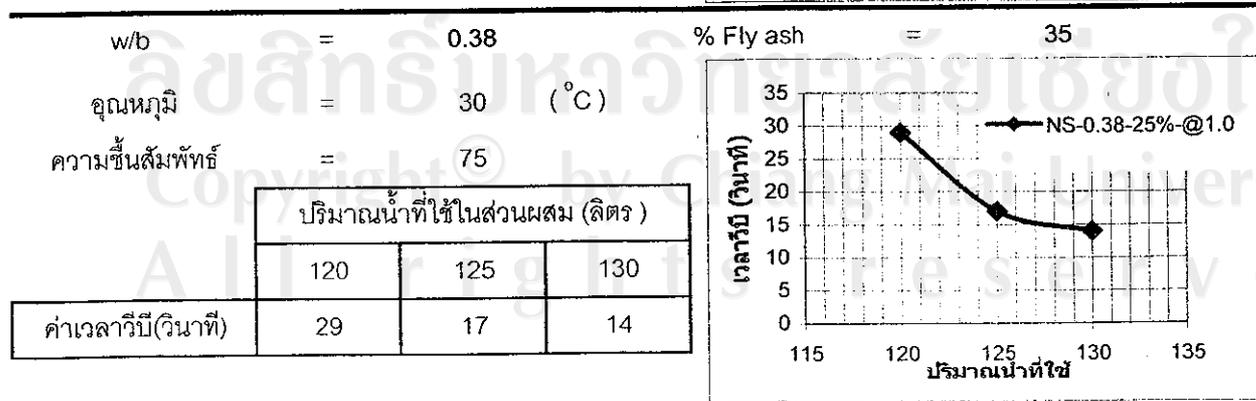
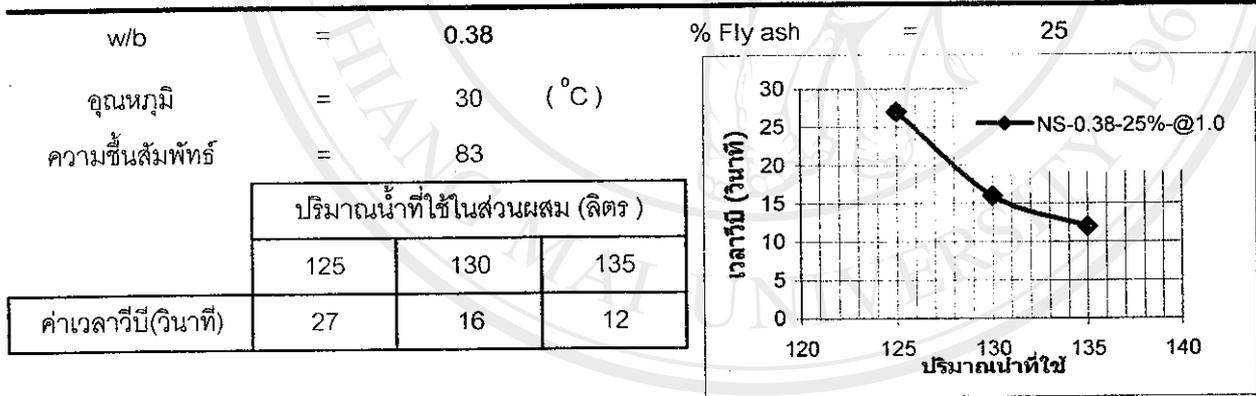
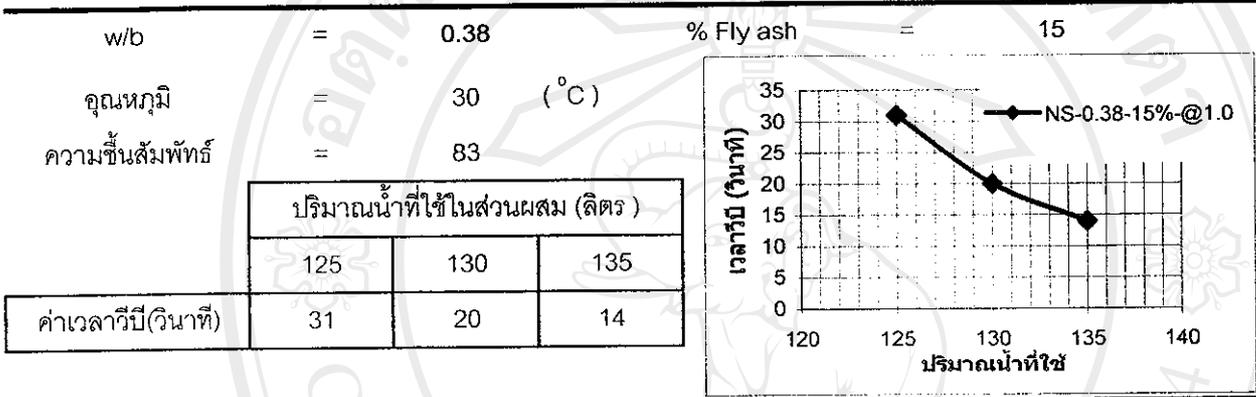
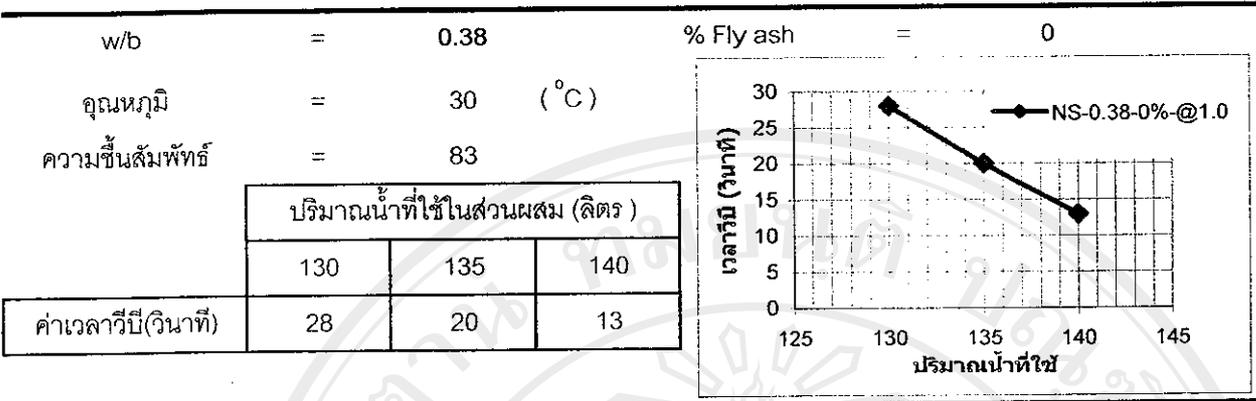
ผลการทดสอบ การหาค่าความชื้นเหลือของคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ ที่ w/b = 0.33

ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่เข้ากันได้กับปูนซีเมนต์(1.0%)



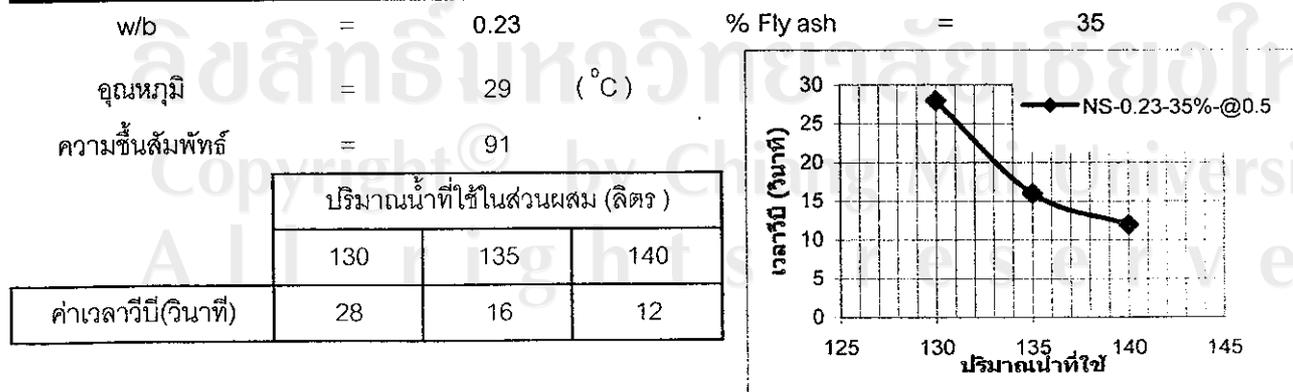
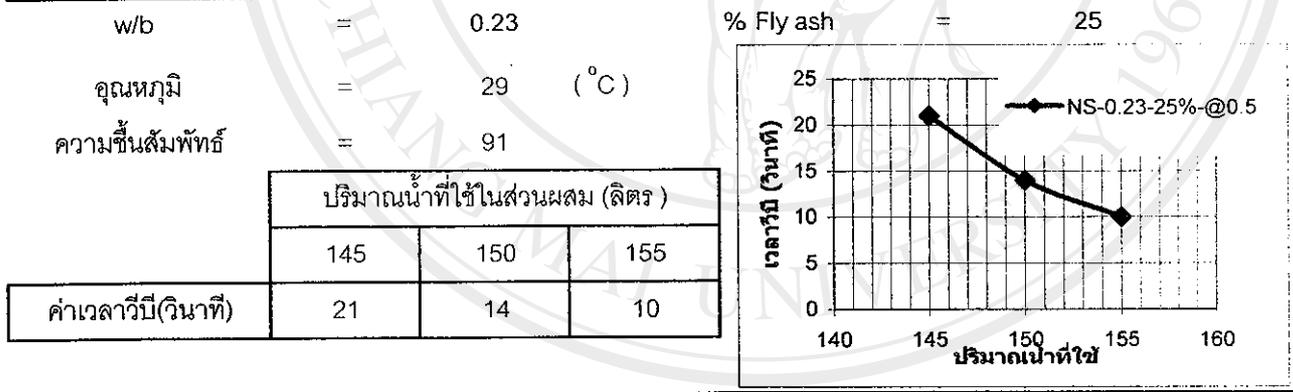
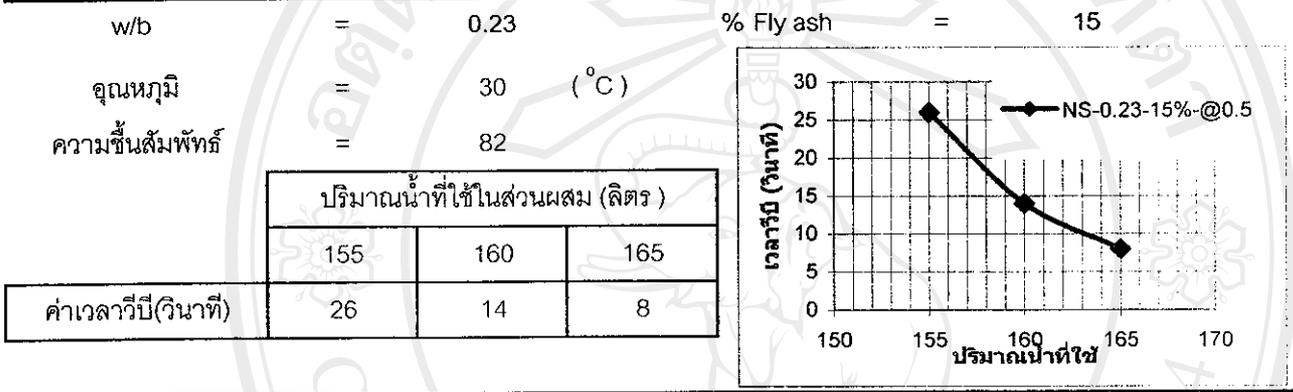
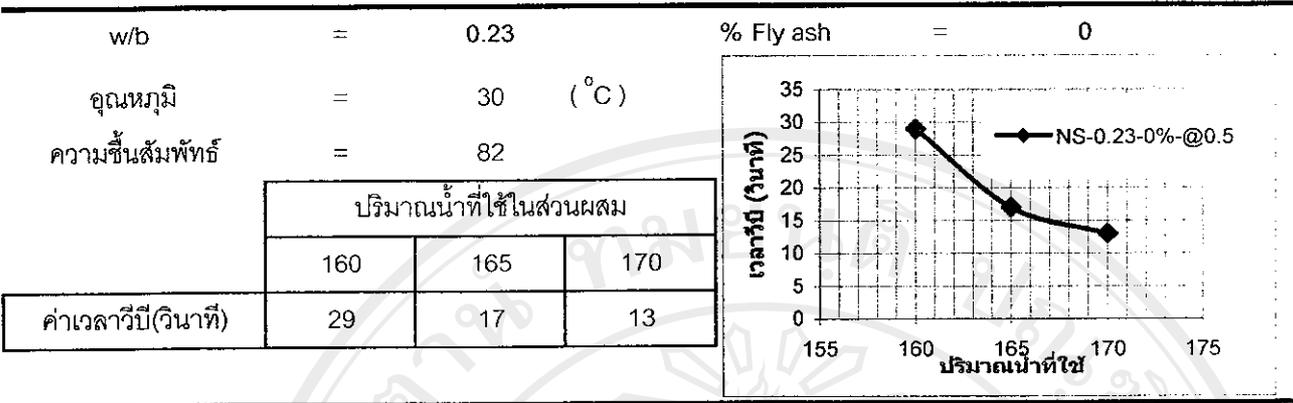
ผลการทดสอบ การหาค่าความชื้นเหลือของคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ ที่ w/b = 0.38

ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่เข้ากันได้กับปูนซีเมนต์(1.0%)



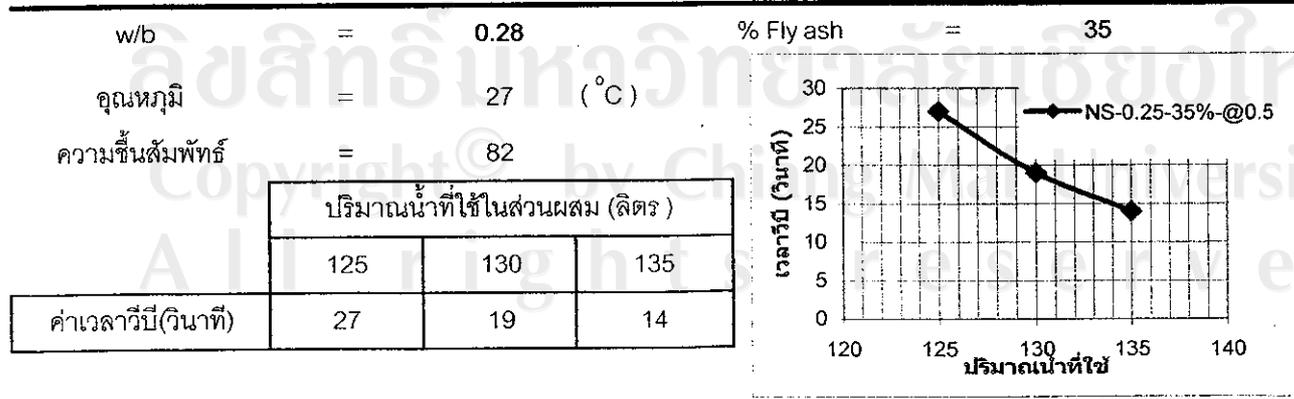
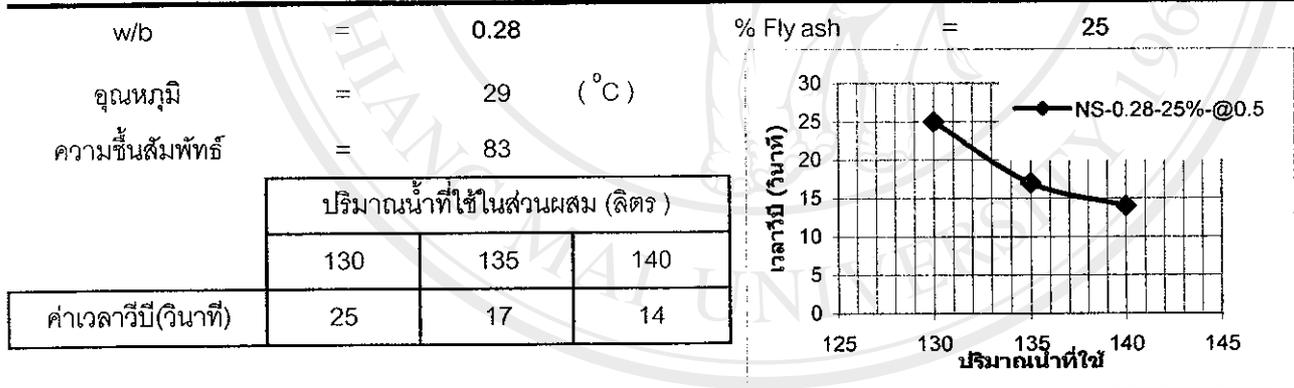
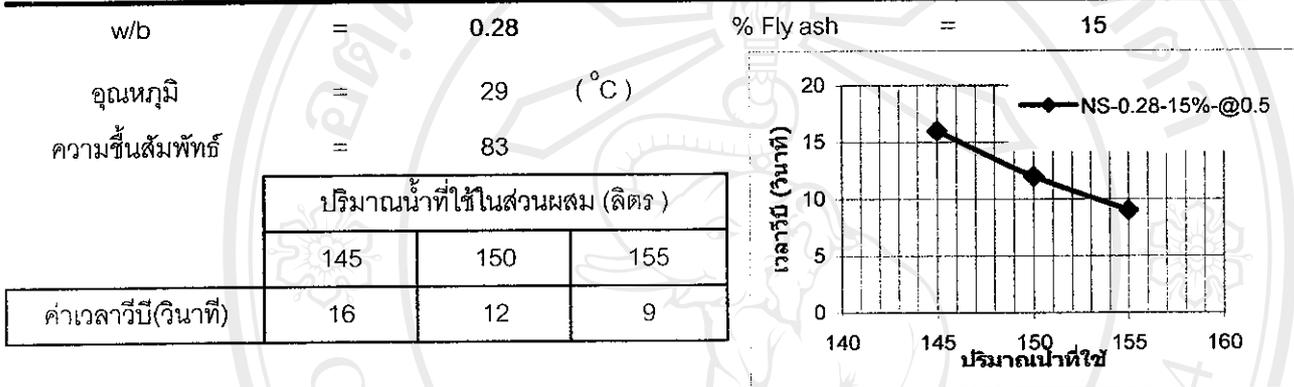
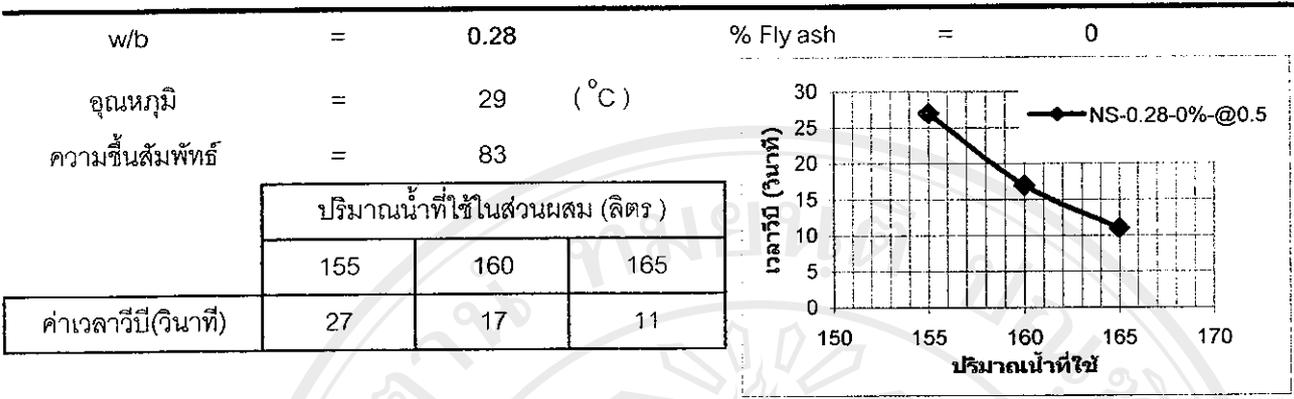
ผลการทดสอบ การหาค่าความชื้นเหลวของคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ ที่ $w/b = 0.23$

ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงน้อยกว่าร้อยละปริมาณที่เข้ากันได้ดี 50%(0.5%)



ผลการทดสอบ การหาค่าความชื้นเหลือของคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ ที่ $w/b = 0.28$

ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงน้อยกว่าร้อยละปริมาณที่เข้ากันได้ดี 50%(0.5%)



ผลการทดสอบ การหาค่าความชื้นเหลือของคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ ที่ $w/b = 0.33$

ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงน้อยกว่าร้อยละปริมาณที่เข้ากันได้ 50%(0.5%)

w/b	=	0.33	% Fly ash	=	0
อุณหภูมิ	=	28 (°C)			
ความชื้นสัมพัทธ์	=	82			
		ปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสม (ลิตร)			
		150	155	160	
ค่าเวลาวิปี(วินาที)		25	18	10	

ปริมาณน้ำที่ใช้ (ลิตร)	เวลาวิปี (วินาที)
150	25
155	18
160	10

w/b	=	0.33	% Fly ash	=	15
อุณหภูมิ	=	28 (°C)			
ความชื้นสัมพัทธ์	=	82			
		ปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสม (ลิตร)			
		135	140	150	
ค่าเวลาวิปี(วินาที)		24	16	5	

ปริมาณน้ำที่ใช้ (ลิตร)	เวลาวิปี (วินาที)
135	24
140	16
150	5

w/b	=	0.33	% Fly ash	=	25
อุณหภูมิ	=	28 (°C)			
ความชื้นสัมพัทธ์	=	82			
		ปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสม (ลิตร)			
		130	135	140	
ค่าเวลาวิปี(วินาที)		24	17	12	

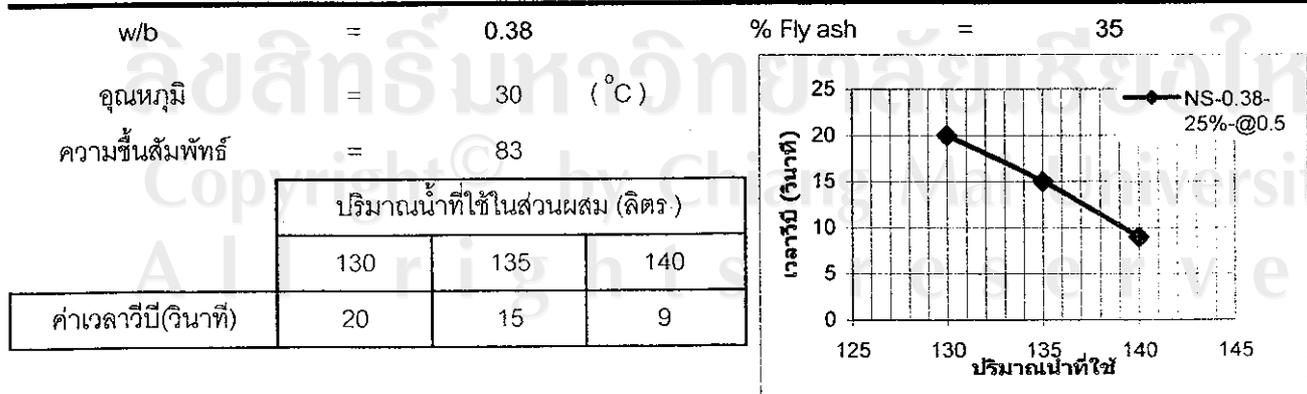
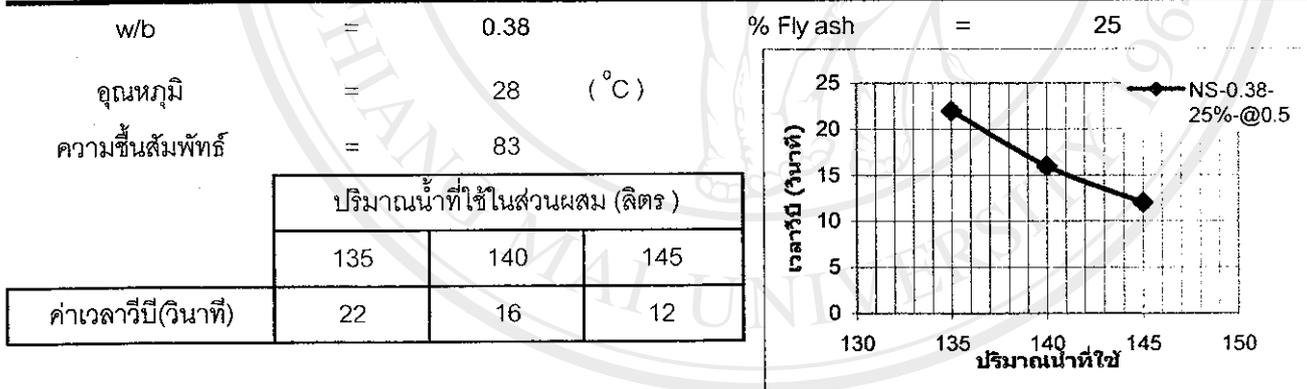
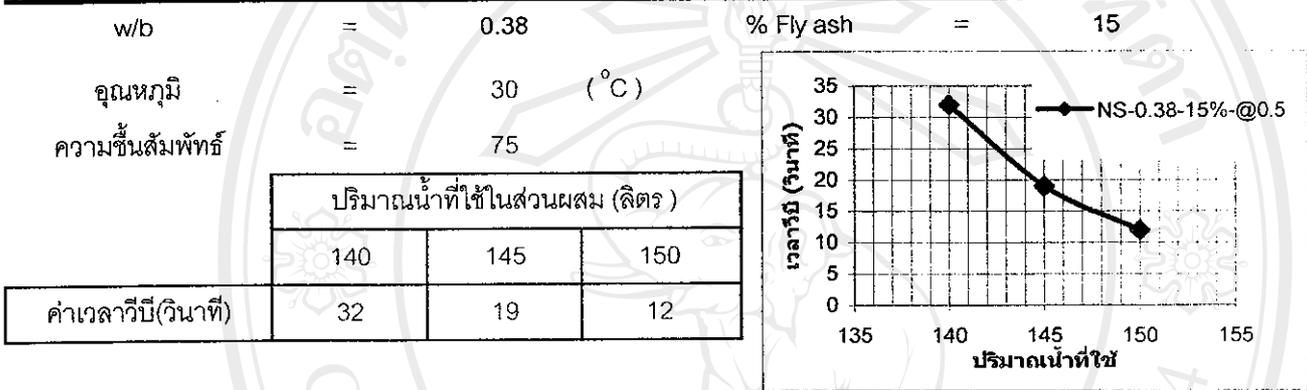
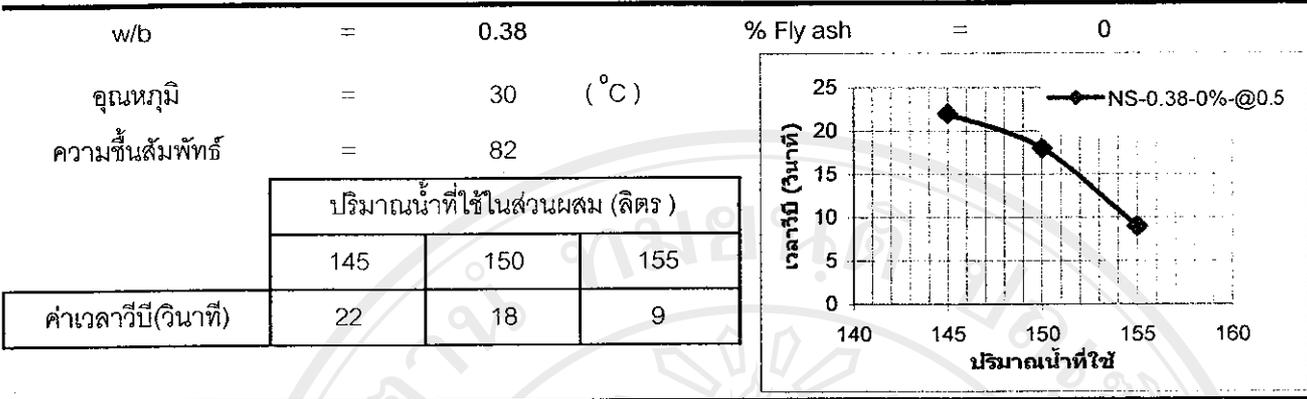
ปริมาณน้ำที่ใช้ (ลิตร)	เวลาวิปี (วินาที)
130	24
135	17
140	12

w/b	=	0.33	% Fly ash	=	35
อุณหภูมิ	=	29 (°C)			
ความชื้นสัมพัทธ์	=	83			
		ปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสม (ลิตร)			
		125	130	135	
ค่าเวลาวิปี(วินาที)		21	17	13	

ปริมาณน้ำที่ใช้ (ลิตร)	เวลาวิปี (วินาที)
125	21
130	17
135	13

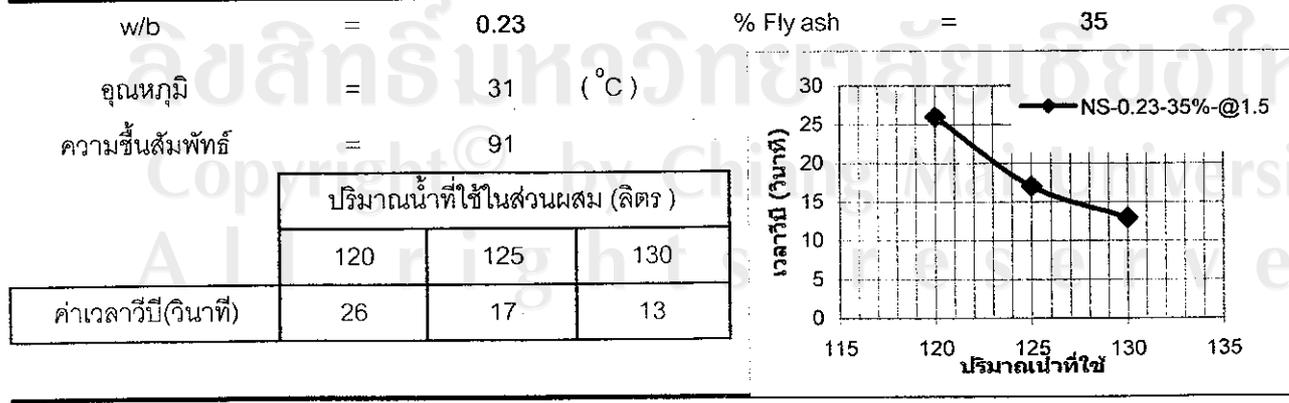
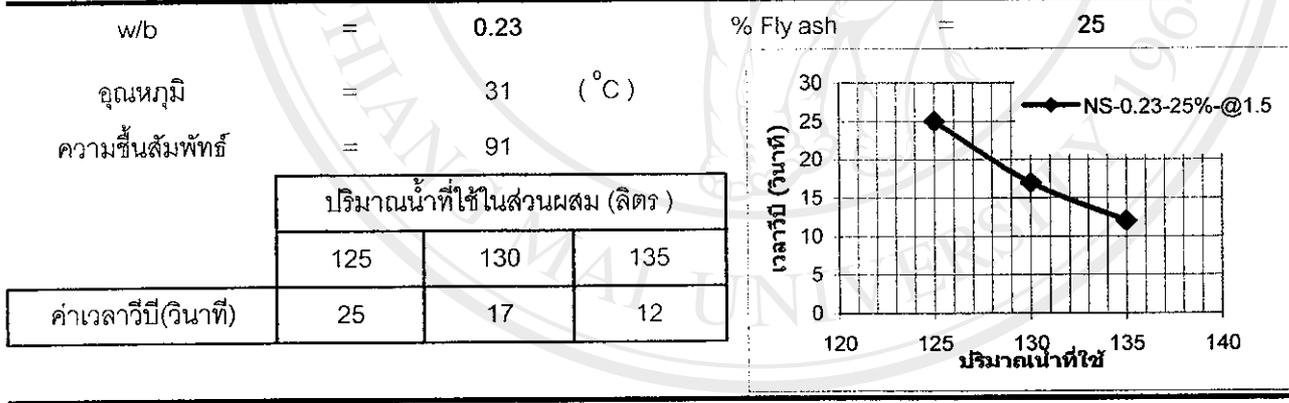
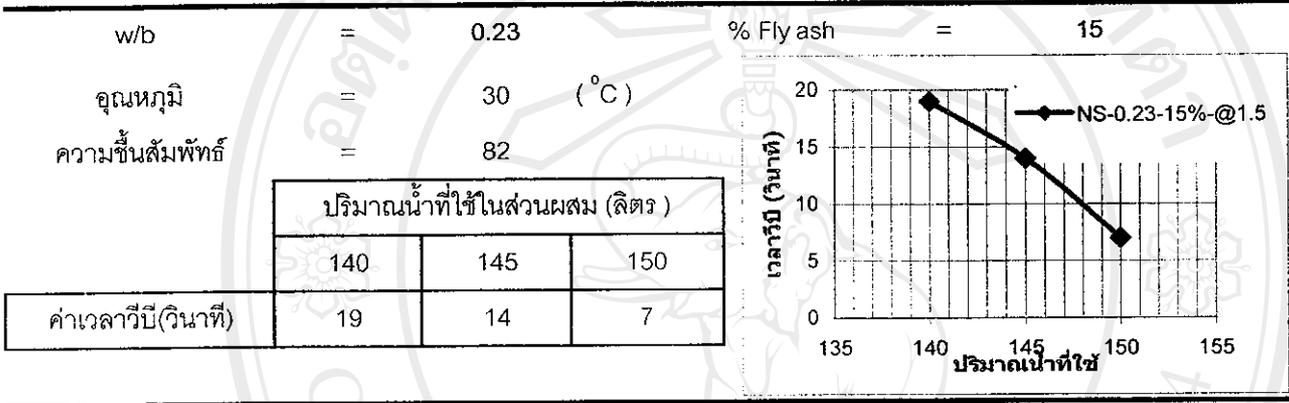
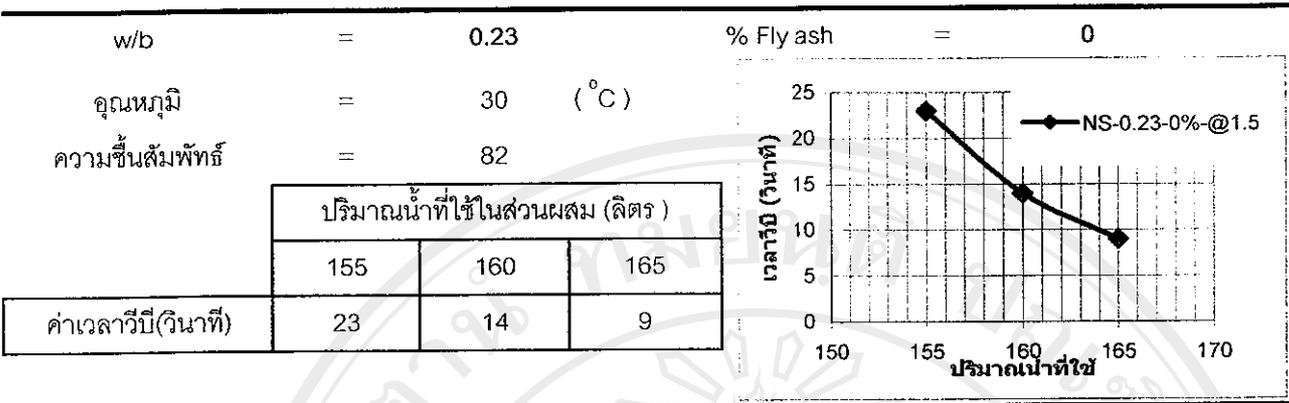
ผลการทดสอบ การหาค่าความชื้นเหลือของคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ ที่ $w/b = 0.38$

ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงน้อยกว่าร้อยละปริมาณที่เข้ากันได้ดี 50%(0.5%)



ผลการทดสอบ การหาค่าความชื้นเหลือของคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ ที่ $w/b = 0.23$

ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงมากกว่าร้อยละปริมาณที่เข้ากันได้ดี 50%(1.5%)



ผลการทดสอบ การหาค่าความชื้นเหลือของคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ ที่ $w/b = 0.28$

ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงมากกว่าร้อยละปริมาณที่เข้ากันได้ดี 50%(1.5%)

w/b	=	0.28	$\% \text{ Fly ash}$	=	0
อุณหภูมิ	=	31 ($^{\circ}\text{C}$)			
ความชื้นสัมพัทธ์	=	83			

ปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสม (ลิตร)			
	130	135	140
ค่าเวลาวิปี้(วินาที)	25	16	10

ปริมาณน้ำที่ใช้ (ลิตร)	เวลาวิปี้ (วินาที)
130	25
135	16
140	10

w/b	=	0.28	$\% \text{ Fly ash}$	=	15
อุณหภูมิ	=	30 ($^{\circ}\text{C}$)			
ความชื้นสัมพัทธ์	=	83			

ปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสม (ลิตร)			
	125	130	135
ค่าเวลาวิปี้(วินาที)	26	17	12

ปริมาณน้ำที่ใช้ (ลิตร)	เวลาวิปี้ (วินาที)
125	26
130	17
135	12

w/b	=	0.28	$\% \text{ Fly ash}$	=	25
อุณหภูมิ	=	30 ($^{\circ}\text{C}$)			
ความชื้นสัมพัทธ์	=	91			

ปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสม (ลิตร)			
	120	125	130
ค่าเวลาวิปี้(วินาที)	27	19	13

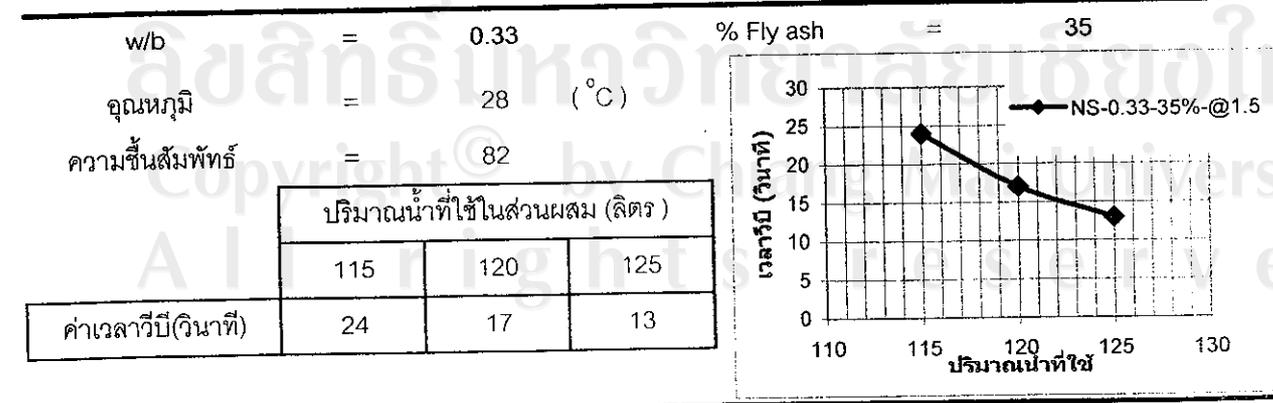
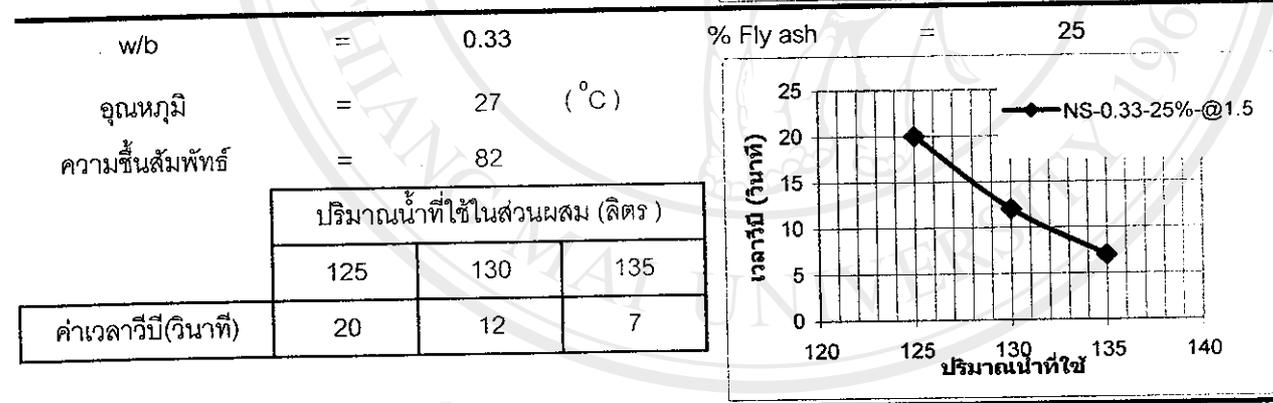
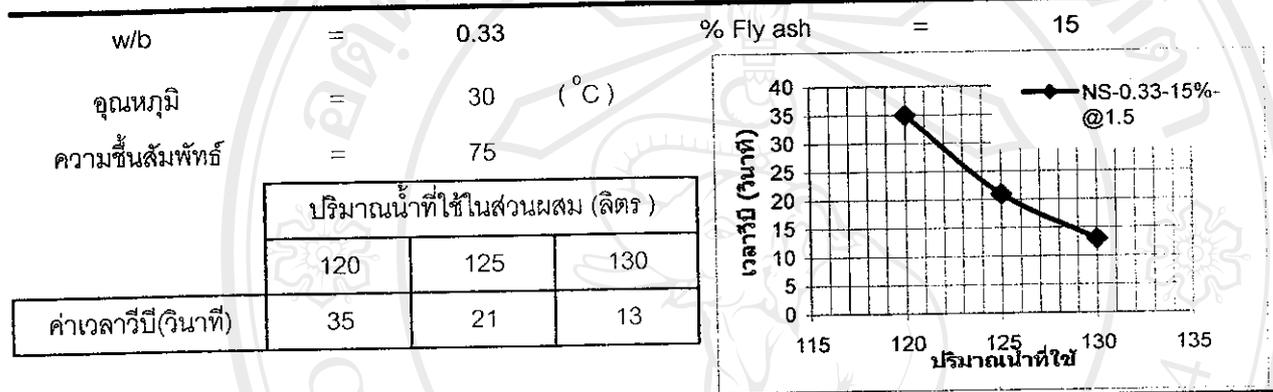
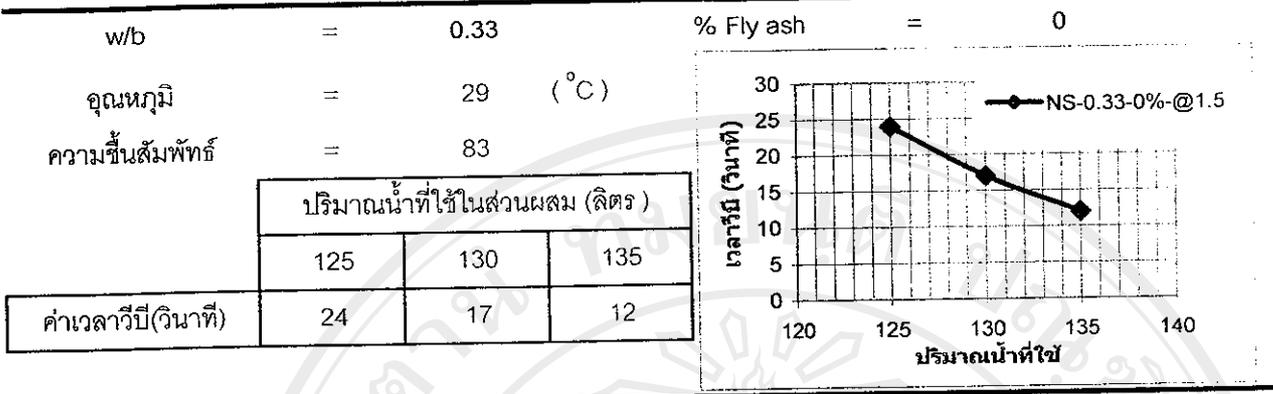
ปริมาณน้ำที่ใช้ (ลิตร)	เวลาวิปี้ (วินาที)
120	27
125	19
130	13

w/b	=	0.28	$\% \text{ Fly ash}$	=	35
อุณหภูมิ	=	31 ($^{\circ}\text{C}$)			
ความชื้นสัมพัทธ์	=	83			

ปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสม (ลิตร)			
	120	125	130
ค่าเวลาวิปี้(วินาที)	24	15	10

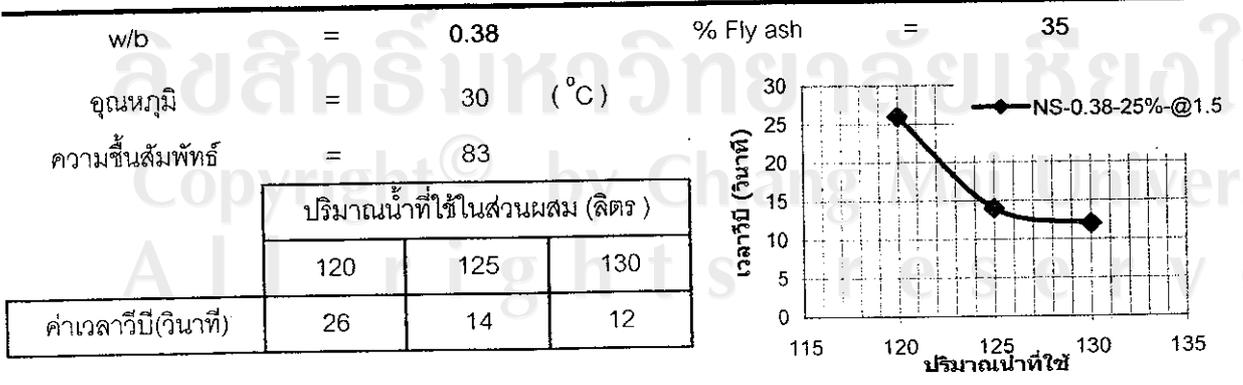
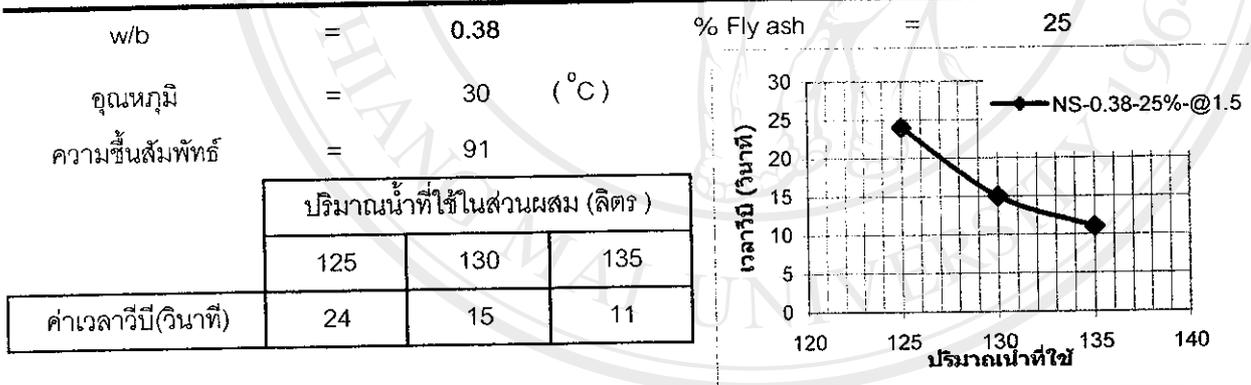
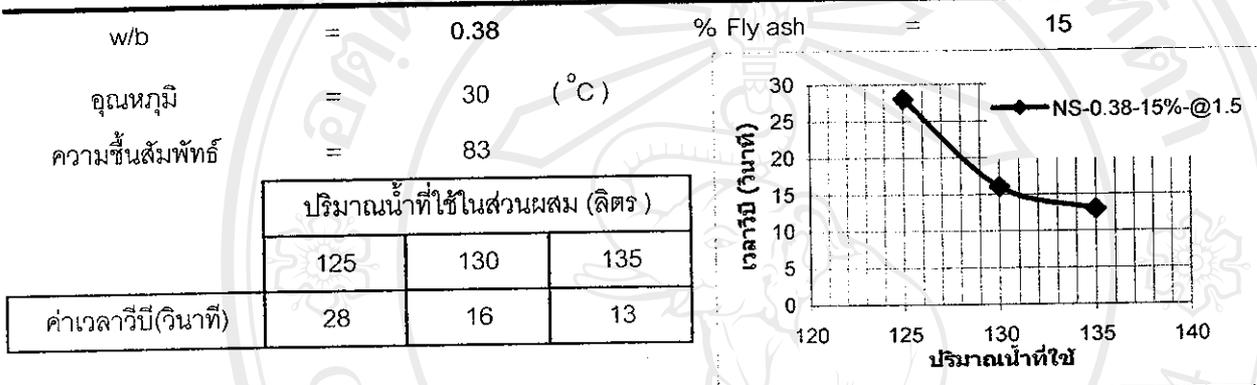
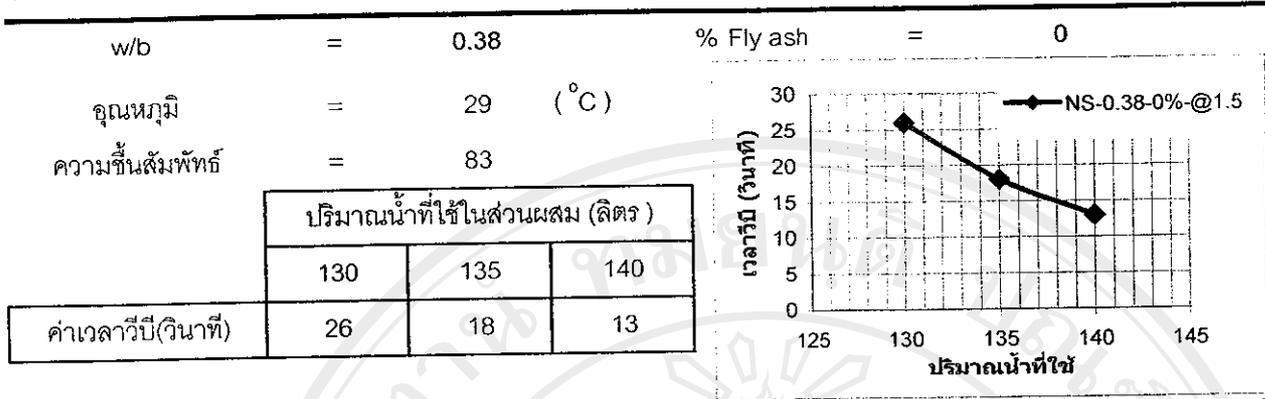
ปริมาณน้ำที่ใช้ (ลิตร)	เวลาวิปี้ (วินาที)
120	24
125	15
130	10

ผลการทดสอบ การหาค่าความชื้นเหลือของคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ ที่ $w/b = 0.33$ ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงมากกว่าร้อยละปริมาณที่เข้ากันได้ 50%(1.5%)



ผลการทดสอบ การหาค่าความชื้นเหลือของคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ ที่ $w/b = 0.38$

ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงมากกว่าร้อยละปริมาณที่เข้ากันได้ดี 50%(1.5%)





ภาคผนวก ง.

รายการคำนวณส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย อัตราส่วน W/B เท่ากับ 0.23 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 0

W/B = 0.23 ที่ความชื้นเหลว Vebe test 10-20 วินาที และใช้หินขนาดใหญ่สุด = 3/8"

ตาราง ก.		ตาราง ข.				
ตาราง ก.	Gc			%		
ปูนซีเมนต์	3.15	มวลรวม	G _{SSD}	W abs	W tot	W h
เถ้าลอย	2.2	มวลรวมหยาบ	2.72	0.76	0.02	-0.74
		มวลรวมละเอียด	2.56	1.14	0.05	-1.09

$$W h = W \text{ tot} - W \text{ abs}$$

$$M = M_{ssd} (1 + W h)$$

ตาราง ค.

สารลดน้ำอย่างแรง		M sol = C x $\frac{d}{100}$	V liq = $\frac{M \text{ sol} \times 100}{S \times G \text{ sup}}$	V _w = V liq x G sup $\frac{(100-s)}{100}$	V sol = V liq - V w
ค่า ถพ. (G sup)	ร้อยละของแข็ง S (%)				
1.20	35.3	7	17.0	13.2	3.8

ตาราง ง.	หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.(ลบ.ม.)	นน.อบแห้งต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.
หิน	1513	0.45	681

ร้อยละของปริมาตรวัสดุหยาบต่อหนึ่งหน่วยคอนกรีต	=	160	
ออกแบบก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x200 มม. จำนวน	=	15	ก้อน
คิดเป็นปริมาณคอนกรีตที่ต้องใช้	=	0.0236	ลบ.ม.
เพื่อความสูญเสียระหว่างผสม	=	5	%
เพราะฉะนั้นต้องการปริมาณคอนกรีต	=	0.0247	ลบ.ม.

วัสดุ	ปริมาณ กก. / ลบ.ม.	ปริมาตร ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่สภาวะ อิ่มตัวผิวแห้ง กก. / ลบ.ม.	ปรับแก้ ปริมาณน้ำ ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่ปรับแก้แล้ว (กก.)	
					1 m ³	Trial batch
น้ำ	166	166	166		166	4.10
					W/B 0.23	
ปูนซีเมนต์	722	229.1	722		722	17.86
					เถ้าลอย	0
มวลรวมหยาบ	1089	401	1089	8	1081	26.75
มวลรวมละเอียด		171	437	5	432	10.69
อากาศ	เปอร์เซ็นต์ 3.0 %	30	0			
สารลดน้ำอย่างแรง	1.0 %	3.8	7	-13.2	17.0	0.422
ผลรวม		1000.0	2421	0		60

ตารางออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย อัตราส่วน W/B เท่ากับ 0.23 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15

W/B = 0.23 ที่ความชื้นเหลือ Vcbe test 10-20 วินาที และใช้หินขนาดใหญ่สุด = 3/8"

ตาราง ก.		ตาราง ข.		
ตาราง ก.	Gc	%	%	
ปูนซีเมนต์	3.15	85	มวลรวม	G _{SSD}
เถ้าลอย	2.2	15	มวลรวมหยาบ	W _{abs}
			มวลรวมละเอียด	W _{tot}
				W _h

$$W_h = W_{tot} - W_{abs}$$

$$M = M_{ssd} (1 + W_h)$$

ตาราง ค.

สารลดน้ำอย่างแรง		M sol = C x $\frac{d}{100}$	V liq = $\frac{M_{sol} \times 100}{S \times G_{sup}}$	V _w = V _{liq} x G _{sup} $\frac{(100-s)}{100}$	V _{sol} = V _{liq} - V _w
ค่า ถพ. (G sup)	ร้อยละของแข็ง S (%)				
1.20	35.3	7	15.9	12.4	3.6

ตาราง ง.	หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.(ลบ.ม.)	นน.อบแห้งต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.
หิน	1513	0.45	681

ร้อยละของปริมาตรวัสดุหยาบต่อหนึ่งหน่วยคอนกรีต = $\frac{160}{1000} = 16\%$

ออกแบบก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x200 มม. จำนวน = 15 ก้อน

คิดเป็นปริมาณคอนกรีตที่ต้องใช้ = $15 \times 0.0236 = 0.354$ ลบ.ม.

เพื่อความสูญเสียระหว่างผสม = 5 %

เพราะฉะนั้นต้องการปริมาณคอนกรีต = $0.354 \times 1.05 = 0.3717$ ลบ.ม.

วัสดุ	ปริมาณ กก. / ลบ.ม.	ปริมาตร ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่สถานะ อิ่มตัวผิวแห้ง กก. / ลบ.ม.	ปรับแก้ ปริมาณน้ำ ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่ปรับแก้แล้ว (กก.)	
					1 m ³	Trial batch
น้ำ	155	155	155		156	3.85
ปูนซีเมนต์	674	573	573		573	14.17
เถ้าลอย	101	45.95	101		101	2.50
มวลรวมหยาบ	1089	401	1089	8	1081	26.75
มวลรวมละเอียด		183	469	5	464	11.47
อากาศ	เปอร์เซ็นต์ 3.0 %	30	0			
สารลดน้ำอย่างแรง	1.0 %	3.6	7	-12.4	15.9	0.394
ผลรวม		1000.0	2394	1		59

ตารางออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย อัตราส่วน W/B เท่ากับ 0.23 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 25

W/B = 0.23 ที่ความชันเหลว Vebe test 10-20 วินาที และใช้หินขนาดใหญ่สุด = 3/8"

ตาราง ก.	Gc	%
ปูนซีเมนต์	3.15	75
เถ้าลอย	2.2	25

ตาราง ข.		%		
มวลรวม	G _{SSD}	W abs	W tot	W h
มวลรวมหยาบ	2.72	0.76	0.02	-0.74
มวลรวมละเอียด	2.56	1.14	0.05	-1.09

$$W h = W \text{ tot} - W \text{ abs}$$

$$M = M_{\text{ssd}} (1 + W h)$$

ตาราง ค.

สารลดน้ำอย่างแรง		M sol = C x $\frac{d}{100}$	V liq = $\frac{M \text{ sol} \times 100}{S \times G \text{ sup}}$	V _w = V liq x G sup $\frac{(100-s)}{100}$	V sol = V liq - V w
ค่า ถพ. (G sup)	ร้อยละของแข็ง S (%)				
1.20	35.3	6	14.8	11.5	3.3

ตาราง ง.	หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.(ลบ.ม.)	นน.อบแห้งต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.
หิน	1513	0.45	681

ร้อยละของปริมาตรวัสดุหยาบต่อหนึ่งหน่วยคอนกรีต = 160

ออกแบบก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x200 มม. จำนวน = 15 ก้อน

คิดเป็นปริมาณคอนกรีตที่ต้องใช้ = 0.0236 ลบ.ม.

เพื่อความสูญเสียระหว่างผสม = 5 %

เพราะฉะนั้นต้องการปริมาณคอนกรีต = 0.0247 ลบ.ม.

วัสดุ	ปริมาณ กก. / ลบ.ม.	ปริมาตร ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่สถานะ อิมพัลวแห้ง กก. / ลบ.ม.	ปรับแก้ ปริมาณน้ำ ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่ปรับแก้แล้ว (กก.)	
					1 m ³	Trial batch
น้ำ	144	144	144		146	3.62
ปูนซีเมนต์	470	149.1	470		470	11.62
เถ้าลอย	157	71.15	157		157	3.87
มวลรวมหยาบ	1089	401	1089	8	1081	26.75
มวลรวมละเอียด		202	517	6	511	12.65
อากาศ	เปอร์เซ็นต์ 3.0 %	30	0			
สารลดน้ำอย่างแรง	1.0 %	3.3	6	-11.5	14.8	0.366
ผลรวม		1000.0	2383	2		59

ตารางออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย อัตราส่วน W/B เท่ากับ 0.23 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 35

W/B = 0.23 ที่ความชื้นเหลว Vebe test 10-20 วินาที และใช้หินขนาดใหญ่สุด = 3/8"

ตาราง ก.			ตาราง ข.				
ตาราง ก.	Gc	%	%				
ปูนซีเมนต์	3.15	65	มวลรวม	G _{SSD}	W abs	W tot	W h
เถ้าลอย	2.2	35	มวลรวมหยาบ	2.72	0.76	0.02	-0.74
			มวลรวมละเอียด	2.56	1.14	0.05	-1.09

$$W h = W \text{ tot} - W \text{ abs}$$

$$M = M \text{ ssd} (1 + W h)$$

ตาราง ค.

สารลดน้ำอย่างแรง		M sol = C x $\frac{d}{100}$	V liq = $\frac{M \text{ sol} \times 100}{S \times G \text{ sup}}$	V _w = V liq x G _{sup} $\frac{(100-s)}{100}$	V sol = V liq - V w
ค่า ถพ. (G sup)	ร้อยละของแข็ง S (%)				
1.20	35.3	6	13.4	10.4	3.0

ตาราง ง.	หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.(ลบ.ม.)	นน.อบแห้งต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.
หิน	1513	0.45	681

ร้อยละของปริมาตรวัสดุหยาบต่อหนึ่งหน่วยคอนกรีต	=	160	
ออกแบบก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x200 มม. จำนวน	=	15	ก้อน
คิดเป็นปริมาณคอนกรีตที่ต้องใช้	=	0.0236	ลบ.ม.
เพื่อความสูญเสียระหว่างผสม	=	5	%
เพราะฉะนั้นต้องการปริมาณคอนกรีต	=	0.0247	ลบ.ม.

วัสดุ	ปริมาณ กก./ลบ.ม.	ปริมาตร ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่สถานะ อิมตัวผิวแห้ง กก./ลบ.ม.	ปรับแก้ ปริมาณน้ำ ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่ปรับแก้แล้ว (กก.)	
					1 m ³	Trial batch
น้ำ	131	131	131		135	3.34
					370	9.16
ปูนซีเมนต์	570	370	117.5	370	199	4.93
					199	4.93
มวลรวมหยาบ	1089	401	1089	8	1081	26.75
มวลรวมละเอียด		227	582	6	576	14.24
อากาศ	เปอร์เซ็นต์ 3.0 %	30	0			
สารลดน้ำอย่างแรง	1.0 %	3.0	6	-10.4	13.4	0.333
ผลรวม		1000.0	2378	4		59

ตารางออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย อัตราส่วน W/B เท่ากับ 0.28 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 0

W/B = 0.28 ที่ความชื้นเหลว Vebe test 10-20 วินาที และใช้หินขนาดใหญ่สุด = 3/8"

ตาราง ก.	Gc	%	ตาราง ข.		%		
			มวลรวม	G _{SSD}	W abs	W tot	W h
ปูนซีเมนต์	3.15	100	มวลรวมหยาบ	2.72	0.76	0.02	-0.74
เถ้าลอย	2.2	0	มวลรวมละเอียด	2.56	1.14	0.05	-1.09

$$W h = W \text{ tot} - W \text{ abs}$$

$$M = M_{\text{ssd}} (1 + W h)$$

ตาราง ค.

สารลดน้ำอย่างแรง		M sol = C x $\frac{d}{100}$	V liq = $\frac{M \text{ sol} \times 100}{S \times G \text{ sup}}$	V _w = V liq x G sup $\frac{(100-s)}{100}$	V sol = V liq - V w
ค่า ถพ. (G sup)	ร้อยละของแข็ง S (%)				
1.20	35.3	5	11.6	9.0	2.6

ตาราง ง.	หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.(ลบ.ม.)	นน.อบแห้งต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.
หิน	1513	0.45	681

ร้อยละของปริมาตรวัสดุหยาบต่อหนึ่งหน่วยคอนกรีต = $\frac{160}{1000} = 16\%$

ออกแบบก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x200 มม. จำนวน = 15 ก้อน

คิดเป็นปริมาณคอนกรีตที่ต้องใช้ = $15 \times 20 = 300$ ลบ.ม.

เพื่อความสูญเสียระหว่างผสม = 5 %

เพราะฉะนั้นต้องการปริมาณคอนกรีต = $300 \times 1.05 = 315$ ลบ.ม.

วัสดุ	ปริมาณ กก. / ลบ.ม.	ปริมาตร ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่สถานะ อิมตัวผิวแห้ง กก. / ลบ.ม.	ปรับแก้ ปริมาณน้ำ ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่ปรับแก้แล้ว (กก.)	
					1 m ³	Trial batch
น้ำ W/B 0.28 ปูนซีเมนต์	138	138	138		145	3.58
	493	493	156.5	493	493	12.19
		0	0	0	0	0.00
มวลรวมหยาบ	1089	401	1089	8	1081	26.75
มวลรวมละเอียด		272	697	8	690	17.07
อากาศ	เปอร์เซ็นต์ 3.0 %	30	0			
สารลดน้ำอย่างแรง	1.0 %	2.6	5	-9.0	11.6	0.288
ผลรวม		1000.0	2423	7		60

ตารางออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย อัตราส่วน W/B เท่ากับ 0.28 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15

W/B = 0.28 ที่ความชื้นเหลว Vebe test 10-20 วินาที และใช้หินขนาดใหญ่สุด = 3/8"

ตาราง ก.	Gc	%
ปูนซีเมนต์	3.15	85
เถ้าลอย	2.2	15

ตาราง ข.		%		
มวลรวม	G _{SSD}	W abs	W tot	W h
มวลรวมหยาบ	2.72	0.76	0.02	-0.74
มวลรวมละเอียด	2.56	1.14	0.05	-1.09

$$W h = W \text{ tot} - W \text{ abs}$$

$$M = M_{\text{ssd}} (1 + W h)$$

ตาราง ค.

สารลดน้ำอย่างแรง		M sol = C x $\frac{d}{100}$	V liq = $\frac{M \text{ sol} \times 100}{S \times G \text{ sup}}$	V _w = V liq x G _{sup} $\frac{(100-s)}{100}$	V sol = V liq - V w
ค่า ถพ. (G sup)	ร้อยละของแข็ง S (%)				
1.20	35.3	5	11.3	8.8	2.5

ตาราง ง.	หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.(ลบ.ม.)	น.อบแห้งต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.
หิน	1513	0.45	681

ร้อยละของปริมาตรวัสดุหยาบต่อหนึ่งหน่วยคอนกรีต = $\frac{160}{1000} = 16\%$

ออกแบบก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x200 มม. จำนวน = $\frac{15}{1000} = 0.015$ ก้อน

คิดเป็นปริมาณคอนกรีตที่ต้องใช้ = $0.015 \times 1000 = 15$ ลบ.ม.

เพื่อความสูญเสียระหว่างผสม = 5%

เพราะฉะนั้นต้องการปริมาณคอนกรีต = $15 \times 1.05 = 15.75$ ลบ.ม.

วัสดุ	ปริมาณ กก. / ลบ.ม.	ปริมาตร ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่สถานะ อิมพัลวี่แห้ง กก. / ลบ.ม.	ปรับแก้ ปริมาณน้ำ ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่ปรับแก้แล้ว (กก.)	
					1 m ³	Trial batch
น้ำ	134	134	134		141	3.48
					407	10.06
ปูนซีเมนต์	479	407	407		72	1.78
เถ้าลอย		72	32.63	72		
มวลรวมหยาบ	1089	401	1089	8	1081	26.75
มวลรวมละเอียด		271	694	8	687	16.99
อากาศ	เปอร์เซ็นต์ 3.0 %	30	0			
สารลดน้ำอย่างแรง	1.0 %	2.5	5	-8.8	11.3	0.280
ผลรวม		1000.0	2401	7		59

ตารางออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย อัตราส่วน W/B เท่ากับ 0.28 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 25

W/B = 0.28 ที่ความชื้นเหลือ Vebe test 10-20 วินาที และใช้หินขนาดใหญ่สุด = 3/8"

ตาราง ก.			ตาราง ข.				
ตาราง ก.	Gc	%			%		
ปูนซีเมนต์	3.15	75	มวลรวม	G _{SSD}	W abs	W tot	W h
เถ้าลอย	2.2	25	มวลรวมหยาบ	2.72	0.76	0.02	-0.74
			มวลรวมละเอียด	2.56	1.14	0.05	-1.09

$$W h = W \text{ tot} - W \text{ abs}$$

$$M = M_{ssd} (1 + W h)$$

ตาราง ค.

สารลดน้ำอย่างแรง		M sol = C x $\frac{d}{100}$	V liq = $\frac{M \text{ sol} \times 100}{S \times G \text{ sup}}$	V _w = V liq x G _{sup} $\frac{(100-s)}{100}$	V sol = V liq - V _w
ค่า ถ. (G sup)	ร้อยละของแข็ง S (%)				
1.20	35.3	5	11.0	8.5	2.5

ตาราง ง.	หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.(ลบ.ม.)	นน.อบแห้งต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.
หิน	1513	0.45	681

ร้อยละของปริมาตรวัสดุหยาบต่อหนึ่งหน่วยคอนกรีต = $\frac{160}{1000} = 16\%$

ออกแบบก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x200 มม. จำนวน = 15 ก้อน

คิดเป็นปริมาณคอนกรีตที่ต้องใช้ = $\frac{15 \times 2000}{1000} = 30$ ลบ.ม.

เพื่อความสูญเสียระหว่างผสม = 5 %

เพราะฉะนั้นต้องการปริมาณคอนกรีต = $\frac{30}{0.95} = 31.58$ ลบ.ม.

วัสดุ	ปริมาณ กก. / ลบ.ม.	ปริมาตร ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่สภาวะ อิ่มตัวผิวแห้ง กก. / ลบ.ม.	ปรับแก้ ปริมาณน้ำ ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่ปรับแก้แล้ว (กก.)	
					1 m ³	Trial batch
น้ำ	130	130	130		137	3.39
					348	8.61
ปูนซีเมนต์	464	348	110.5	348	116	2.87
					116	2.87
มวลรวมหยาบ	1089	401	1089	8	1081	26.75
มวลรวมละเอียด		274	701	8	693	17.15
อากาศ	เปอร์เซ็นต์ 3.0 %	30	0			
สารลดน้ำอย่างแรง	1.0 %	2.5	5	-8.5	11.0	0.271
ผลรวม		1000.0	2389	7		59

ตารางออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย อัตราส่วน W/B เท่ากับ 0.28 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 35

W/B = 0.28 ที่ความชื้นเหลว Vebe test 10-20 วินาที และใช้หินขนาดใหญ่สุด = 3/8"

ตาราง ก.			ตาราง ข.				
ตาราง ก.	Gc	%			%		
ปูนซีเมนต์	3.15	65	มวลรวม	G _{SSD}	W abs	W tot	W h
เถ้าลอย	2.2	35	มวลรวมหยาบ	2.72	0.76	0.02	-0.74
			มวลรวมละเอียด	2.56	1.14	0.05	-1.09

$$W h = W \text{ tot} - W \text{ abs}$$

$$M = M \text{ ssd} (1 + W h)$$

ตาราง ค.

สารลดน้ำอย่างแรง		M sol = C x $\frac{d}{100}$	V liq = $\frac{M \text{ sol} \times 100}{S \times G \text{ sup}}$	V _w = V liq x G sup $\frac{(100-s)}{100}$	V sol = V liq - V w
ค่าถพ. (G sup)	ร้อยละของแข็ง S (%)				
1.20	35.3	4	10.5	8.2	2.4

ตาราง ง.	หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.(ลบ.ม.)	นน.อบแห้งต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.
หิน	1513	0.45	681

ร้อยละของปริมาตรวัสดุหยาบต่อหนึ่งหน่วยคอนกรีต	=	160	
ออกแบบก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x200 มม. จำนวน	=	15	ก้อน
คิดเป็นปริมาณคอนกรีตที่ต้องใช้	=	0.0236	ลบ.ม.
เพื่อความสูญเสียระหว่างผสม	=	5	%
เพราะฉะนั้นต้องการปริมาณคอนกรีต	=	0.0247	ลบ.ม.

วัสดุ	ปริมาณ		ปริมาตร	ปริมาณที่สภาวะ	ปรับแก้	ปริมาณที่ปรับแก้แล้ว (กก.)	
	กก. / ลบ.ม.	ลิตร / ลบ.ม.				ลิตร / ลบ.ม.	1 m ³
น้ำ	125		125	125		133	3.28
	W/B 0.28						
ปูนซีเมนต์	290		92.12	290		290	7.18
เถ้าลอย	446	156	71.02	156		156	3.87
มวลรวมหยาบ	1089		401	1089	8	1081	26.75
มวลรวมละเอียด			279	714	8	706	17.48
อากาศ	เปอร์เซ็นต์ 3.0 %		30	0			
สารลดน้ำอย่างแรง	1.0	%	2.4	4	-8.2	10.5	0.261
ผลรวม			1000.0	2379	8		59

ตารางออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย อัตราส่วน W/B เท่ากับ 0.33 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 0

W/B = 0.33 ที่ความชื้นเหลว Vebe test 10-20 วินาที และใช้หินขนาดใหญ่สุด = 3/8"

ตาราง ก.	Gc	%
ปูนซีเมนต์	3.15	100
เถ้าลอย	2.2	0

ตาราง ข.		%		
มวลรวม	G _{SSD}	W abs	W tot	W h
มวลรวมหยาบ	2.72	0.76	0.02	-0.74
มวลรวมละเอียด	2.56	1.14	0.05	-1.09

$$W h = W \text{ tot} - W \text{ abs}$$

$$M = M \text{ ssd} (1 + W h)$$

ตาราง ค.

สารลดน้ำอย่างแรง		M sol = C x $\frac{d}{100}$	V liq = $\frac{M \text{ sol} \times 100}{S \times G \text{ sup}}$	V _w = V liq x G _{sup} $\frac{(100-s)}{100}$	V sol = V liq - V w
ค่า ถพ. (G sup)	ร้อยละของแข็ง S (%)				
1.20	35.3	4	9.7	7.5	2.2

ตาราง ง.	หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.(ลบ.ม.)	นน.อบแห้งต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.
หิน	1513	0.45	681

ร้อยละของปริมาตรวัสดุหยาบต่อหนึ่งหน่วยคอนกรีต = $\frac{160}{1000} = 16\%$

ออกแบบก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x200 มม. จำนวน = 15 ก้อน

คิดเป็นปริมาณคอนกรีตที่ต้องใช้ = $15 \times 0.0015 = 0.0225$ ลบ.ม.

เพื่อความสูญเสียระหว่างผสม = 5 %

เพราะฉะนั้นต้องการปริมาณคอนกรีต = $0.0225 \times 1.05 = 0.0236$ ลบ.ม.

วัสดุ	ปริมาณ กก. / ลบ.ม.	ปริมาตร ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่สถานะ อิมตัวผิวแห้ง กก. / ลบ.ม.	ปรับแก้ ปริมาณน้ำ ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่ปรับแก้แล้ว (กก.)	
					1 m ³	Trial batch
น้ำ	135	135	135		144	3.56
ปูนซีเมนต์	409	409	409		409	10.12
เถ้าลอย	0	0	0		0	0.00
มวลรวมหยาบ	1089	401	1089	8	1081	26.75
มวลรวมละเอียด		302	774	8	766	18.95
อากาศ	เปอร์เซ็นต์ 3.0 %	30	0			
สารลดน้ำอย่างแรง	1.0 %	2.2	4	-7.5	9.7	0.239
ผลรวม		1000.0	2412	9		60

ตารางออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสมคอนกรีตผสมเด็กลอย อัตราส่วน W/B เท่ากับ 0.33 แทนที่ด้วยเด็กลอยร้อยละ 15

W/B = 0.33 ที่ความชื้นเหลว Vebe test 10-20 วินาที และใช้หินขนาดใหญ่สุด = 3/8"

ตาราง ก.	Gc	%
ปูนซีเมนต์	3.15	85
เด็กลอย	2.2	15

ตาราง ข.		%		
มวลรวม	G _{SSD}	W abs	W tot	W h
มวลรวมหยาบ	2.72	0.76	0.02	-0.74
มวลรวมละเอียด	2.56	1.14	0.05	-1.09

$$W h = W_{tot} - W_{abs}$$

$$M = M_{ssd} (1 + W h)$$

ตาราง ก.

สารลดน้ำอย่างแรง		M sol = C x $\frac{d}{100}$	V liq = $\frac{M sol \times 100}{S \times G sup}$	V _w = V liq x G sup $\frac{(100-s)}{100}$	V sol = V liq - V _w
ค่า ถพ. (G sup)	ร้อยละของแข็ง S (%)				
1.20	35.3	4	9.4	7.3	2.1

ตาราง ง.	หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.(ลบ.ม.)	นน.อบแห้งต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.
หิน	1513	0.45	681

ร้อยละของปริมาตรวัสดุหยาบต่อหนึ่งหน่วยคอนกรีต	=	<u>160</u>		
ออกแบบก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x200 มม. จำนวน	=	<u>15</u>	ก้อน	
คิดเป็นปริมาณคอนกรีตที่ต้องใช้	=	<u>0.0236</u>	ลบ.ม.	
เพื่อความสูญเสียระหว่างผสม	=	<u>5</u>	%	
เพราะฉะนั้นต้องการปริมาณคอนกรีต	=	<u>0.0247</u>	ลบ.ม.	

วัสดุ	ปริมาณ กก. / ลบ.ม.	ปริมาตร ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่สภาวะ อิ่มตัวผิวแห้ง กก. / ลบ.ม.	ปรับแก้ ปริมาณน้ำ ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่ปรับแก้แล้ว (กก.)	
					1 m ³	Trial batch
น้ำ	132	132	132		141	3.49
ปูนซีเมนต์	400	340	107.9	340	340	8.41
เด็กลอย	60	27.27	60		60	1.48
มวลรวมหยาบ	1089	401	1089	8	1081	26.75
มวลรวมละเอียด		300	768	8	760	18.80
อากาศ	เปอร์เซ็นต์ 3.0 %	30	0			
สารลดน้ำอย่างแรง	1.0 %	2.1	4	-7.3	9.4	0.234
ผลรวม		1000.0	2394	9		59

ตารางออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย อัตราส่วน W/B เท่ากับ 0.33 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 25

W/B = 0.33 ที่ความชื้นเหลือ Vebe test 10-20 วินาที และใช้หินขนาดใหญ่สุด = 3/8"

ตาราง ก.		ตาราง ข.					
ตาราง ก.	Gc	%	%				
ปูนซีเมนต์	3.15	75	มวลรวม	G _{SSD}	W abs	W tot	W h
เถ้าลอย	2.2	25	มวลรวมหยาบ	2.72	0.76	0.02	-0.74
			มวลรวมละเอียด	2.56	1.14	0.05	-1.09

$$W h = W \text{ tot} - W \text{ abs}$$

$$M = M_{\text{ssd}} (1 + W h)$$

ตาราง ค.

สารลดน้ำอย่างแรง		M sol = C x $\frac{d}{100}$	V liq = $\frac{M \text{ sol} \times 100}{S \times G \text{ sup}}$	V _w = V liq x G _{sup} $\frac{(100-s)}{100}$	V sol = V liq - V w
ค่า ถพ. (G sup)	ร้อยละของแข็ง S (%)				
1.20	35.3	4	9.2	7.1	2.0

ตาราง ง.	หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.(ลบ.ม.)	นน.อบแห้งต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.
หิน	1513	0.45	681

ร้อยละของปริมาตรวัสดุหยาบต่อหนึ่งหน่วยคอนกรีต	=	160	
ออกแบบก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x200 มม. จำนวน	=	15	ก้อน
คิดเป็นปริมาณคอนกรีตที่ต้องใช้	=	0.0236	ลบ.ม.
เพื่อความสูญเสียระหว่างผสม	=	5	%
เพราะฉะนั้นต้องการปริมาณคอนกรีต	=	0.0247	ลบ.ม.

วัสดุ	ปริมาณ กก. / ลบ.ม.	ปริมาตร ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่สภาวะ อิ่มตัวผิวแห้ง กก. / ลบ.ม.	ปรับแก้ ปริมาณน้ำ ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่ปรับแก้แล้ว (กก.)	
					1 m ³	Trial batch
น้ำ	128	128	128		137	3.40
	ปูนซีเมนต์	291	92.35	291		291
เถ้าลอย		97	44.08	97		97
มวลรวมหยาบ	1089	401	1089	8	1081	26.75
มวลรวมละเอียด		303	776	8	767	18.98
อากาศ	เปอร์เซ็นต์ 3.0 %	30	0			
สารลดน้ำอย่างแรง	1.0 %	2.0	4	-7.1	9.2	0.227
ผลรวม		1000.0	2385	9		59

ตารางออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสมคอนกรีตผสมถ้ำลอย อัตราส่วน W/B เท่ากับ 0.33 แทนที่ด้วยถ้ำลอยร้อยละ 35

W/B = 0.33 ที่ความชื้นเหลว Vebe test 10-20 วินาที และใช้หินขนาดใหญ่สุด = 3/8"

ตาราง ก.	Gc	%
ปูนซีเมนต์	3.15	65
ถ้ำลอย	2.2	35

ตาราง ข.		%		
มวลรวม	G _{SSD}	W abs	W tot	W h
มวลรวมหายาบ	2.72	0.76	0.02	-0.74
มวลรวมละเอียด	2.56	1.14	0.05	-1.09

$$W h = W \text{ tot} - W \text{ abs}$$

$$M = M_{\text{ssd}} (1 + W h)$$

ตาราง ค.

สารลดน้ำอย่างแรง		$M_{\text{sol}} = C \times \frac{d}{100}$	$V_{\text{liq}} = \frac{M_{\text{sol}} \times 100}{S \times G_{\text{sup}}}$	$V_w = V_{\text{liq}} \times G_{\text{sup}} \times \frac{(100-s)}{100}$	$V_{\text{sol}} = V_{\text{liq}} - V_w$
ค่า ถพ. (G sup)	ร้อยละของแข็ง S (%)				
1.20	35.3	4	9.0	7.0	2.0

ตาราง ง.	หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.(ลบ.ม.)	นน.อบแห้งต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.
หิน	1513	0.45	681

ร้อยละของปริมาตรวัสดุหายาบต่อหนึ่งหน่วยคอนกรีต = 160

ออกแบบก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x200 มม. จำนวน = 15 ก้อน

คิดเป็นปริมาณคอนกรีตที่ต้องใช้ = 0.0236 ลบ.ม.

เพื่อความสูญเสียระหว่างผสม = 5 %

เพราะฉะนั้นต้องการปริมาณคอนกรีต = 0.0247 ลบ.ม.

วัสดุ	ปริมาณ กก. / ลบ.ม.	ปริมาตร ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่สภาวะ อิ่มตัวผิวแห้ง กก. / ลบ.ม.	ปรับแก้ ปริมาณน้ำ ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่ปรับแก้แล้ว (กก.)	
					1 m ³	Trial batch
น้ำ	126	126	126		135	3.35
ปูนซีเมนต์	382	78.79	248		248	6.14
ถ้ำลอย	134	60.74	134		134	3.31
มวลรวมหายาบ	1089	401	1089	8	1081	26.75
มวลรวมละเอียด		302	773	8	765	18.92
อากาศ	เปอร์เซ็นต์ 3.0 %	30	0			
สารลดน้ำอย่างแรง	1.0 %	2.0	4	-7.0	9.0	0.223
ผลรวม		1000.0	2374	9		59

ตารางออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย อัตราส่วน W/B เท่ากับ 0.38 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 0 VB time = 18 Sec

W/B = 0.38 ที่ความชื้นเหลว Vebe test 10-20 วินาที และใช้หินขนาดใหญ่สุด = 3/8"

ตาราง ก.			ตาราง ข.				
ตาราง ก.	Gc	%			%		
ปูนซีเมนต์	3.15	100	มวลรวม	G _{SSD}	W abs	W tot	W h
เถ้าลอย	2.2	0	มวลรวมหยาบ	2.72	0.76	0.02	-0.74
			มวลรวมละเอียด	2.56	1.14	0.05	-1.09

$$W h = W \text{ tot} - W \text{ abs}$$

$$M = M \text{ ssd} (1 + W h)$$

ตาราง ค.

สารลดน้ำอย่างแรง		M sol = C x $\frac{d}{100}$	V liq = $\frac{M \text{ sol} \times 100}{S \times G \text{ sup}}$	V _w = V liq x G _{sup} $\frac{(100-s)}{100}$	V sol = V liq - V _w
ค่า ถพ. (G sup)	ร้อยละของแข็ง S (%)				
1.20	35.3	4	8.6	6.7	1.9

ตาราง ง.	หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.(ลบ.ม.)	นน.อบแห้งต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.
หิน	1513	0.45	681

ร้อยละของปริมาตรวัสดุหยาบต่อหนึ่งหน่วยคอนกรีต = $\frac{160}{1000} = 16\%$

ออกแบบก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x200 มม. จำนวน = 15 ก้อน

คิดเป็นปริมาณคอนกรีตที่ต้องใช้ = $15 \times 0.0015 = 0.0225$ ลบ.ม.

เพื่อความสูญเสียระหว่างผสม = 5 %

เพราะฉะนั้นต้องการปริมาณคอนกรีต = $0.0225 \times 1.05 = 0.0236$ ลบ.ม.

วัสดุ	ปริมาณ กก. / ลบ.ม.	ปริมาตร ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่สถานะ อิมพัลวี่แห้ง กก. / ลบ.ม.	ปรับแก้ ปริมาณน้ำ ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่ปรับแก้แล้ว (กก.)	
					1 m ³	Trial batch
น้ำ	138	138	138	8	148	3.67
					363	8.98
ปูนซีเมนต์	363	363	363	0	0	0.00
เถ้าลอย	0	0	0	0	0	0.00
มวลรวมหยาบ	1089	401	1089	8	1081	26.75
มวลรวมละเอียด		314	805	9	796	19.69
อากาศ	เปอร์เซ็นต์ 3.0 %	30	0			
สารลดน้ำอย่างแรง	1.0 %	1.9	4	-6.7	8.6	0.212
ผลรวม		1000.0	2399	10		59

ตารางออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย อัตราส่วน W/B เท่ากับ 0.38 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15

W/B = 0.38 ที่ความชื้นเหลว Vebe test 10-20 วินาที และใช้หินขนาดใหญ่สุด = 3/8"

ตาราง ก.		ตาราง ข.					
ตาราง ก.	Gc	%	%				
ปูนซีเมนต์	3.15	85	มวลรวม	G _{SSD}	W abs	W tot	W h
เถ้าลอย	2.2	15	มวลรวมหยาบ	2.72	0.76	0.02	-0.74
			มวลรวมละเอียด	2.56	1.14	0.05	-1.09

$$W h = W \text{ tot} - W \text{ abs}$$

$$M = M \text{ ssd} (1 + W h)$$

ตาราง ค.

สารลดน้ำอย่างแรง		M sol = C x $\frac{d}{100}$	V liq = $\frac{M \text{ sol} \times 100}{S \times G \text{ sup}}$	V _w = V liq x G _{sup} $\frac{(100-s)}{100}$	V sol = V liq - V w
ค่า ถพ. (G sup)	ร้อยละของแข็ง S (%)				
1.20	35.3	4	8.3	6.4	1.8

ตาราง ง.	หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.(ลบ.ม.)	นน.อบแห้งต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.
หิน	1513	0.45	681

ร้อยละของปริมาตรวัสดุหยาบต่อหนึ่งหน่วยคอนกรีต = $\frac{160}{1000} = 16\%$

ออกแบบก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x200 มม. จำนวน = 15 ก้อน

คิดเป็นปริมาณคอนกรีตที่ต้องใช้ = 0.0236 ลบ.ม.

เพื่อความสูญเสียระหว่างผสม = 5 %

เพราะฉะนั้นต้องการปริมาณคอนกรีต = 0.0247 ลบ.ม.

วัสดุ	ปริมาณ กก. / ลบ.ม.	ปริมาตร ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่สถานะ อิมตัวผิวแห้ง กก. / ลบ.ม.	ปรับแก้ ปริมาณน้ำ ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่ปรับแก้แล้ว (กก.)	
					1 m ³	Trial batch
น้ำ	133	133	133		143	3.55
					298	7.36
ปูนซีเมนต์	350	298	298		53	1.30
					53	1.30
มวลรวมหยาบ	1089	401	1089	8	1081	26.75
มวลรวมละเอียด		316	810	9	801	19.82
อากาศ	เปอร์เซ็นต์ 3.0 %	30	0			
สารลดน้ำอย่างแรง	1.0 %	1.8	4	-6.4	8.3	0.204
ผลรวม		1000.0	2386	10		59

ตารางออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสมคอนกรีตผสมถ้ำลอย อัตราส่วน W/B เท่ากับ 0.38 แทนที่ด้วยถ้ำลอยร้อยละ 25

W/B = 0.38 ที่ความชื้นเหลว Vebe test 10-20 วินาที และใช้หินขนาดใหญ่สุด = 3/8"

ตาราง ก.	Gc	%
ปูนซีเมนต์	3.15	75
ถ้ำลอย	2.2	25

ตาราง ข.		%		
มวลรวม	G _{SSD}	W abs	W tot	W h
มวลรวมหยาบ	2.72	0.76	0.02	-0.74
มวลรวมละเอียด	2.56	1.14	0.05	-1.09

$$W h = W \text{ tot} - W \text{ abs}$$

$$M = M \text{ ssd} (1 + W h)$$

ตาราง ค.

สารลดน้ำอย่างแรง		$M \text{ sol} = C \times \frac{d}{100}$	$V \text{ liq} = \frac{M \text{ sol} \times 100}{S \times G \text{ sup}}$	$V_w = V \text{ liq} \times G \text{ sup} \times \frac{(100-s)}{100}$	$V \text{ sol} = V \text{ liq} - V_w$
ค่า ถพ. (G sup)	ร้อยละของแข็ง S (%)				
1.20	35.3	3	8.1	6.3	1.8

ตาราง ง.	หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.(ลบ.ม.)	นน.อบแห้งต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.
หิน	1513	0.45	681

ร้อยละของปริมาตรวัสดุหยาบต่อหนึ่งหน่วยคอนกรีต = $\frac{160}{1000} = 16\%$

ออกแบบก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x200 มม. จำนวน = 15 ก้อน

คิดเป็นปริมาณคอนกรีตที่ต้องใช้ = $15 \times 0.0236 = 0.354$ ลบ.ม.

เพื่อความสูญเสียระหว่างผสม = 5 %

เพราะฉะนั้นต้องการปริมาณคอนกรีต = $0.354 \times 1.05 = 0.3717$ ลบ.ม.

วัสดุ	ปริมาณ กก. / ลบ.ม.		ปริมาตร ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่สภาวะ อิมควิวแห้ง กก. / ลบ.ม.	ปรับแก้ ปริมาณน้ำ ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่ปรับแก้แล้ว (กก.)	
	W	B				1 m ³	Trial batch
น้ำ	0.38	131	131	131		142	3.50
		259	82.08	259		259	6.40
ปูนซีเมนต์		345					
ถ้ำลอย		86	39.17	86		86	2.13
มวลรวมหยาบ		1089	401	1089	8	1081	26.75
มวลรวมละเอียด			315	807	9	799	19.76
อากาศ		เปอร์เซ็นต์ 3.0 %	30	0			
สารลดน้ำอย่างแรง		1.0 %	1.8	3	-6.3	8.1	0.201
ผลรวม			1000.0	2376	11		59

ตารางออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย อัตราส่วน W/B เท่ากับ 0.38 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 35

W/B = 0.38 ที่ความชื้นเหลว Vebe test 10-20 วินาที และใช้หินขนาดใหญ่สุด = 3/8"

ตาราง ก.	Gc	%
ปูนซีเมนต์	3.15	65
เถ้าลอย	2.2	35

ตาราง ข.		%		
มวลรวม	G _{SSD}	W abs	W tot	W h
มวลรวมหยาบ	2.72	0.76	0.02	-0.74
มวลรวมละเอียด	2.56	1.14	0.05	-1.09

$$W h = W \text{ tot} - W \text{ abs}$$

$$M = M_{\text{ssd}} (1 + W h)$$

ตาราง ค.

สารลดน้ำอย่างแรง		$M_{\text{sol}} = C \times \frac{d}{100}$	$V_{\text{liq}} = \frac{M_{\text{sol}} \times 100}{S \times G_{\text{sup}}}$	$V_w = V_{\text{liq}} \times G_{\text{sup}} \times \frac{(100-s)}{100}$	$V_{\text{sol}} = V_{\text{liq}} - V_w$
ค่าถพ. (G sup)	ร้อยละของแข็ง S (%)				
1.20	35.3	3	7.9	6.1	1.8

ตาราง ง.	หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.(ลบ.ม.)	นน.อบแห้งต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.
หิน	1513	0.45	681

ร้อยละของปริมาตรวัสดุหยาบต่อหนึ่งหน่วยคอนกรีต = $\frac{160}{1000} = 16\%$

ออกแบบก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x200 มม. จำนวน = 15 ก้อน

คิดเป็นปริมาณคอนกรีตที่ต้องใช้ = 0.0236 ลบ.ม.

เพื่อความสูญเสียระหว่างผสม = 5 %

เพราะฉะนั้นต้องการปริมาณคอนกรีต = 0.0247 ลบ.ม.

วัสดุ	ปริมาณ กก. / ลบ.ม.	ปริมาตร ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่สถานะ อิมตัวผิวแห้ง กก. / ลบ.ม.	ปรับแก้ ปริมาณน้ำ ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่ปรับแก้แล้ว (กก.)	
					1 m ³	Trial batch
น้ำ	127	127	127		138	3.41
ปูนซีเมนต์	334	217	217		217	5.37
เถ้าลอย	117	53.17	117		117	2.89
มวลรวมหยาบ	1089	401	1089	8	1081	26.75
มวลรวมละเอียด		319	816	9	807	19.96
อากาศ	เปอร์เซ็นต์ 3.0 %	30	0			
สารลดน้ำอย่างแรง	1.0 %	1.8	3	-6.1	7.9	0.195
ผลรวม		1000.0	2370	11		59



ข้อมูลการทดสอบก่อนตัวอย่าง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง จ.1 ผลการทดสอบกำลังอัดประลัย

ก้อนตัวอย่าง	กำลังอัดประลัย (กก./ตร.ซม.) ก้อนที่					กำลังอัดประลัยเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (กก./ตร.ซม.)
	1	2	3	4	5		
NS-0.23-00%-@1.0-1	654	668	582	639	538	616	54.57
NS-0.23-00%-@1.0-7	778	775	798	757	805	783	19.28
NS-0.23-00%-@1.0-14	833	865	792	805	825	824	28.12
NS-0.23-00%-@1.0-28	869	863	876	798	866	855	31.79
NS-0.23-00%-@1.0-56	830	879	943	887	897	887	40.51
NS-0.23-15%-@1.0-1	517	523	502	590	575	541	38.60
NS-0.23-15%-@1.0-7	757	784	778	728	791	768	25.52
NS-0.23-15%-@1.0-14	802	832	803	805	814	811	12.51
NS-0.23-15%-@1.0-28	839	802	845	819	832	827	17.38
NS-0.23-15%-@1.0-56	868	836	877	869	870	864	16.05
NS-0.23-25%-@1.0-1	429	411	428	447	435	430	13.12
NS-0.23-25%-@1.0-7	681	770	796	702	652	720	60.51
NS-0.23-25%-@1.0-14	687	684	771	724	761	726	40.66
NS-0.23-25%-@1.0-28	817	841	813	797	732	800	41.23
NS-0.23-25%-@1.0-56	842	839	907	838	868	859	29.49
NS-0.23-35%-@1.0-1	363	320	341	347	353	345	15.83
NS-0.23-35%-@1.0-7	579	564	548	525	592	562	26.19
NS-0.23-35%-@1.0-14	667	641	587	656	633	637	30.90
NS-0.23-35%-@1.0-28	677	614	660	713	651	663	36.25
NS-0.23-35%-@1.0-56	797	793	812	723	811	787	36.70
NS-0.28-00%-@1.0-1	456	483	465	415	475	459	26.36
NS-0.28-00%-@1.0-7	542	559	514	575	602	559	33.33
NS-0.28-00%-@1.0-14	614	638	616	595	644	622	19.91
NS-0.28-00%-@1.0-28	713	719	698	725	692	709	14.07
NS-0.28-00%-@1.0-56	746	736	774	733	763	750	17.74
NS-0.28-15%-@1.0-1	336	355	328	346	312	335	16.54
NS-0.28-15%-@1.0-7	487	476	453	468	446	466	16.87
NS-0.28-15%-@1.0-14	525	509	571	558	533	539	25.05
NS-0.28-15%-@1.0-28	565	597	616	569	591	588	21.06
NS-0.28-15%-@1.0-56	646	683	692	678	643	668	22.68

ตาราง จ.1 (ต่อ)

ก้อนตัวอย่าง	กำลังอัดประลัย (กก./ตร.ซม.) ก้อนที่					กำลังอัดประลัยเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (กก./ตร.ซม.)
	1	2	3	4	5		
NS-0.28-25%-@1.0-1	252	252	265	236	244	250	10.44
NS-0.28-25%-@1.0-7	457	477	454	444	418	450	21.57
NS-0.28-25%-@1.0-14	440	483	476	455	464	464	16.93
NS-0.28-25%-@1.0-28	552	562	529	564	574	556	17.11
NS-0.28-25%-@1.0-56	600	628	587	637	653	621	27.17
NS-0.28-35%-@1.0-1	192	180	196	186	193	189	6.19
NS-0.28-35%-@1.0-7	364	365	384	349	348	362	14.54
NS-0.28-35%-@1.0-14	432	453	441	424	437	437	10.79
NS-0.28-35%-@1.0-28	496	492	499	509	497	498	6.38
NS-0.28-35%-@1.0-56	547	531	552	570	567	553	16.24
NS-0.33-00%-@1.0-1	274	277	256	243	270	264	14.16
NS-0.33-00%-@1.0-7	406	404	423	397	404	407	9.88
NS-0.33-00%-@1.0-14	490	438	452	453	477	462	21.09
NS-0.33-00%-@1.0-28	489	466	506	473	507	488	18.57
NS-0.33-00%-@1.0-56	517	518	507	479	498	504	16.35
NS-0.33-15%-@1.0-1	204	212	197	217	193	204	9.70
NS-0.33-15%-@1.0-7	329	307	361	342	352	338	21.22
NS-0.33-15%-@1.0-14	370	421	421	389	379	396	23.80
NS-0.33-15%-@1.0-28	444	485	466	434	432	452	22.97
NS-0.33-15%-@1.0-56	486	482	472	518	510	494	19.52
NS-0.33-25%-@1.0-1	161	141	151	167	159	156	10.25
NS-0.33-25%-@1.0-7	305	299	326	310	328	314	12.77
NS-0.33-25%-@1.0-14	380	364	374	369	350	367	11.36
NS-0.33-25%-@1.0-28	391	426	395	432	432	415	20.29
NS-0.33-25%-@1.0-56	460	455	445	434	445	448	10.01
NS-0.33-35%-@1.0-1	109	125	121	114	127	119	7.56
NS-0.33-35%-@1.0-7	296	321	282	287	282	294	16.38
NS-0.33-35%-@1.0-14	388	351	365	339	325	354	24.00
NS-0.33-35%-@1.0-28	387	427	394	425	427	412	19.65
NS-0.33-35%-@1.0-56	414	424	452	451	408	430	20.64

ตาราง จ.1 (ต่อ)

ก้อนตัวอย่าง	กำลังอัดประลัย (กก./ตร.ซม.) ก้อนที่					กำลังอัดประลัยเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (กก./ตร.ซม.)
	1	2	3	4	5		
NS-0.38-00%-@1.0-1	172	185	188	167	172	177	9.08
NS-0.38-00%-@1.0-7	307	285	290	302	306	298	10.22
NS-0.38-00%-@1.0-14	342	343	381	347	338	350	17.71
NS-0.38-00%-@1.0-28	379	416	412	404	380	398	17.62
NS-0.38-00%-@1.0-56	433	407	374	442	399	411	27.13
NS-0.38-15%-@1.0-1	153	160	153	141	146	150	7.33
NS-0.38-15%-@1.0-7	290	257	267	263	284	272	14.12
NS-0.38-15%-@1.0-14	314	326	282	295	338	311	22.77
NS-0.38-15%-@1.0-28	382	353	349	371	383	368	15.95
NS-0.38-15%-@1.0-56	373	447	411	390	426	409	29.06
NS-0.38-25%-@1.0-1	119	114	141	128	127	126	9.98
NS-0.38-25%-@1.0-7	251	241	279	231	221	245	22.26
NS-0.38-25%-@1.0-14	278	291	301	319	290	296	15.17
NS-0.38-25%-@1.0-28	343	369	335	318	361	345	20.61
NS-0.38-25%-@1.0-56	365	412	378	393	403	390	18.96
NS-0.38-35%-@1.0-1	102	102	114	108	108	107	5.09
NS-0.38-35%-@1.0-7	226	222	235	215	217	223	7.67
NS-0.38-35%-@1.0-14	252	234	227	248	238	240	10.17
NS-0.38-35%-@1.0-28	346	366	313	328	326	336	20.61
NS-0.38-35%-@1.0-56	414	383	419	404	394	403	14.49

ตาราง จ.-2 ผลการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของคอนกรีต

ก้อนตัวอย่าง	ก้อนที่	น้ำหนัก (กก.)	เส้นผ่าศก. (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กก./ลบ.ม.)	ก้อนตัวอย่าง	ก้อนที่	น้ำหนัก (กก.)	เส้นผ่าศก. (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กก./ลบ.ม.)
NS-0.23-00%-@1.0-1	1	3.89	9.92	20.17	2495	2483	NS-0.23-00%-@1.0-7	1	3.96	10.01	20.15	2496	2498
	2	3.95	10.06	20.11	2472			2489					
	3	4.01	10.14	20.18	2462			2509					
	4	4.02	10.09	20.13	2499			2499					
	5	3.98	10.07	20.10	2485			2499					
NS-0.23-00%-@1.0-14	1	3.92	9.99	20.17	2477	2476	NS-0.23-00%-@1.0-28	1	3.95	10.16	19.83	2457	2486
	2	3.95	10.03	20.06	2490			2501					
	3	3.93	10.09	20.11	2446			2510					
	4	3.96	10.01	20.21	2491			2442					
	5	4.02	10.12	20.20	2474			2523					
NS-0.23-00%-@1.0-56	1	3.99	10.13	20.19	2452	2487	NS-0.23-15%-@1.0-1	1	3.87	10.02	19.84	2472	2459
	2	4.07	10.14	20.29	2484			2413					
	3	3.94	10.03	19.81	2516			2466					
	4	3.98	10.02	20.15	2505			2470					
	5	4.01	10.07	20.33	2477			2472					
NS-0.23-15%-@1.0-7	1	3.91	10.06	19.89	2472	2464	NS-0.23-15%-@1.0-14	1	3.90	10.02	19.42	2545	2504
	2	3.97	10.02	20.44	2465			2586					
	3	3.90	10.14	19.87	2432			2487					
	4	3.96	10.04	20.11	2485			2533					
	5	3.88	10.01	20.00	2466			2370					

ตาราง 9-2 (ต่อ)

ก้อนตัวอย่าง	ก้อนที่	น้ำหนัก (กก.)	เส้นผ่า ศก. (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	ก้อนตัวอย่าง	น้ำหนัก (กก.)	เส้นผ่า ศก. (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กก./ลบ.ม.)	ก้อนตัวอย่าง	น้ำหนัก (กก.)	เส้นผ่า ศก. (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กก./ลบ.ม.)	
NS-0.23-15%@1.0-28	1	3.84	10.00	19.77	2475	NS-0.23-15%@1.0-56	1	3.98	10.05	20.19	2484	2488	1	3.98	10.05	20.19	2484	2477
	2	3.95	10.07	20.07	2473		2	3.96	10.09	20.03	2473							
	3	3.96	10.04	20.00	2503		3	3.90	10.00	20.32	2444							
	4	3.91	10.01	20.00	2486		4	4.02	10.05	19.96	2539							
	5	3.81	9.86	19.93	2503		5	3.91	10.08	20.04	2447							
NS-0.23-25%@1.0-1	1	3.89	9.92	20.27	2483	NS-0.23-25%@1.0-7	1	3.94	10.01	20.15	2486	2473	1	3.94	10.01	20.15	2486	2480
	2	3.88	9.98	20.18	2460		2	3.97	10.06	20.10	2483							
	3	3.94	10.01	20.23	2474		3	3.98	10.06	20.17	2480							
	4	3.94	10.01	20.28	2469		4	3.91	10.00	20.02	2488							
	5	4.01	10.08	20.29	2478		5	3.93	10.08	19.99	2464							
NS-0.23-25%@1.0-14	1	3.96	10.01	20.13	2498	NS-0.23-25%@1.0-28	1	3.97	10.05	20.30	2464	2479	1	3.97	10.05	20.30	2464	2480
	2	3.95	9.94	20.17	2524		2	3.96	10.02	20.17	2490							
	3	3.99	10.18	20.09	2441		3	3.93	10.04	20.07	2475							
	4	3.94	10.02	20.13	2480		4	3.96	10.05	20.07	2486							
	5	3.96	10.12	20.07	2453		5	4.04	10.06	20.47	2483							
NS-0.23-25%@1.0-56	1	3.91	10.05	20.10	2451	NS-0.23-35%@1.0-1	1	3.86	10.01	19.87	2471	2472	1	3.86	10.01	19.87	2471	2466
	2	4.03	10.11	20.20	2483		2	3.91	10.16	19.90	2424							
	3	4.00	10.09	20.38	2455		3	3.94	10.04	20.13	2472							
	4	3.95	10.04	20.05	2486		4	3.96	10.04	20.11	2486							
	5	3.95	10.06	20.01	2485		5	3.97	10.06	20.18	2477							

ตาราง จ.-2 (ต่อ)

ลักษณะตัวอย่าง	ก้อนที่	น้ำหนัก (กก.)	เส้นผ่า ศก. (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กก./ลบ.ม.)	ก้อนตัวอย่าง	ก้อนที่	น้ำหนัก (กก.)	เส้นผ่า ศก. (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กก./ลบ.ม.)
NS-0.23-35%@1.0-7	1	3.90	9.99	20.03	2483	2479	NS-0.23-35%@1.0-14	1	3.87	10.02	19.96	2460	2447
	2	3.92	10.06	19.89	2478			2	3.98	10.31	20.07	2374	
	3	3.90	10.04	19.93	2472			3	4.01	10.09	20.13	2489	
	4	3.92	10.01	20.07	2484			4	3.90	10.05	19.96	2461	
	5	3.95	10.05	20.10	2479			5	3.94	10.08	20.13	2452	
NS-0.23-35%@1.0-28	1	3.89	9.99	20.11	2469	2466	NS-0.23-35%@1.0-56	1	3.95	10.05	20.11	2475	2480
	2	3.97	10.08	20.15	2469			2	3.94	10.00	20.17	2487	
	3	3.87	9.97	20.18	2454			3	3.93	10.04	20.09	2471	
	4	3.91	10.06	19.89	2473			4	4.00	10.03	20.30	2493	
	5	3.97	10.09	20.15	2464			5	3.92	10.05	19.96	2475	
NS-0.28-00%@1.0-1	1	3.97	10.12	19.91	2479	2476	NS-0.28-00%@1.0-7	1	3.98	10.04	20.09	2504	2497
	2	3.94	10.04	20.14	2471			2	4.01	10.05	20.17	2505	
	3	3.98	10.10	20.03	2481			3	3.99	10.05	20.11	2501	
	4	4.04	10.16	20.07	2485			4	3.94	10.03	19.98	2498	
	5	4.03	10.13	20.32	2463			5	3.96	10.01	20.28	2480	
NS-0.28-00%@1.0-14	1	3.94	9.97	20.26	2491	2497	NS-0.28-00%@1.0-28	1	3.91	9.92	20.07	2519	2518
	2	3.94	9.99	20.17	2493			2	4.01	10.01	20.13	2529	
	3	3.95	10.01	20.08	2499			3	4.01	10.03	20.33	2496	
	4	3.92	10.02	19.95	2492			4	4.01	10.02	20.10	2530	
	5	3.97	10.04	19.98	2509			5	3.97	10.02	20.00	2516	

ตาราง จ.-2 (ต่อ)

ก้อนตัวอย่าง	ก้อนที่	น้ำหนัก (กก.)	เส้นผ่า ศก. (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กก./ลบ.ม.)	ก้อนตัวอย่าง	ก้อนที่	น้ำหนัก (กก.)	เส้นผ่า ศก. (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กก./ลบ.ม.)
NS-0.28-00%@1.0-56	1	3.93	10.01	20.06	2492	2501	NS-0.28-15%@1.0-1	1	3.93	10.02	20.23	2464	2464
	2	3.96	10.03	20.06	2497			2	3.93	10.03	20.23	2481	
	3	3.97	9.99	20.19	2507			3	3.93	10.04	20.11	2466	
	4	4.00	10.05	20.04	2515			4	3.87	10.06	19.95	2440	
	5	3.95	10.03	20.06	2494			5	3.92	10.09	19.72	2486	
NS-0.28-15%@1.0-7	1	4.00	10.13	20.13	2466	2463	NS-0.28-15%@1.0-14	1	3.99	10.13	20.39	2428	2458
	2	4.00	10.11	20.19	2466			2	4.02	10.10	20.27	2474	
	3	3.90	10.02	20.09	2462			3	3.94	10.01	20.38	2458	
	4	3.93	10.06	20.08	2461			4	3.89	10.00	20.24	2445	
	5	4.00	10.17	20.02	2462			5	3.89	9.94	20.17	2487	
NS-0.28-15%@1.0-28	1	3.86	10.00	19.87	2475	2477	NS-0.28-15%@1.0-56	1	3.96	10.08	20.02	2479	2477
	2	3.94	10.01	20.07	2497			2	3.98	10.09	20.18	2468	
	3	3.98	10.01	20.23	2501			3	4.00	10.07	20.11	2499	
	4	3.91	10.03	20.20	2451			4	4.01	10.13	19.97	2493	
	5	3.96	10.11	20.07	2458			5	3.93	10.05	20.22	2448	
NS-0.28-25%@1.0-1	1	3.96	10.13	20.13	2439	2444	NS-0.28-25%@1.0-7	1	3.89	10.05	20.19	2431	2439
	2	3.89	10.02	20.11	2454			2	3.94	10.11	20.31	2418	
	3	3.82	10.02	20.05	2414			3	3.86	10.00	20.01	2456	
	4	3.94	10.07	20.02	2471			4	3.85	10.05	19.78	2454	
	5	3.87	10.04	20.01	2445			5	3.93	10.13	20.01	2438	

ตาราง จ.-2 (ต่อ)

ก้อนตัวอย่าง	ก้อนที่	น้ำหนัก (กก.)	เส้นผ่า ศก. (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กก./ลบ.ม.)	ก้อนตัวอย่าง	ก้อนที่	น้ำหนัก (กก.)	เส้นผ่า ศก. (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กก./ลบ.ม.)
NS-0.28-25%@1.0-14	1	3.92	10.16	20.17	2395	2473	NS-0.28-25%@1.0-28	1	3.88	10.06	20.03	2438	2453
	2	3.93	10.11	19.95	2453			2	3.87	10.03	20.07	2442	
	3	3.89	10.12	19.80	2445			3	3.95	10.03	20.23	2469	
	4	3.91	10.20	18.35	2606			4	3.84	9.95	20.10	2455	
	5	4.00	10.11	20.23	2463			5	3.99	10.09	20.30	2458	
NS-0.28-25%@1.0-56	1	3.86	10.09	20.03	2410	2439	NS-0.28-35%@1.0-1	1	3.95	10.07	20.39	2432	2410
	2	3.95	10.12	20.09	2444			2	3.88	10.03	20.26	2424	
	3	3.96	10.14	20.15	2432			3	3.96	10.13	20.29	2422	
	4	3.94	10.15	20.09	2423			4	3.91	10.22	20.14	2369	
	5	3.93	10.07	19.85	2485			5	4.00	10.20	20.37	2405	
NS-0.28-35%@1.0-7	1	3.80	9.90	20.25	2438	2425	NS-0.28-35%@1.0-14	1	3.88	10.10	20.05	2413	2451
	2	3.99	10.07	20.30	2466			2	3.89	9.80	20.24	2548	
	3	3.88	9.99	20.36	2432			3	3.94	10.15	20.22	2407	
	4	3.92	10.11	20.20	2415			4	3.88	9.98	20.25	2449	
	5	3.81	10.03	20.29	2375			5	3.86	9.98	20.24	2439	
NS-0.28-35%@1.0-28	1	3.88	10.11	20.17	2397	2648	NS-0.28-35%@1.0-56	1	3.86	9.99	20.14	2447	2422
	2	3.83	10.02	19.97	2433			2	3.93	10.08	20.32	2423	
	3	3.94	10.14	20.50	2380			3	3.89	10.06	20.21	2420	
	4	3.88	10.11	20.10	2406			4	3.87	10.07	20.44	2379	
	5	3.84	10.03	13.40	3624			5	3.92	10.04	20.30	2440	

ตาราง ๑-2 (ต่อ)

ก่อนตัดอย่าง	ก่อนที่	น้ำหนัก (กก.)	เส้นผ่า ศก. (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กก./ลบ.ม.)	ก่อนตัดอย่าง	ก่อนที่	น้ำหนัก (กก.)	เส้นผ่า ศก. (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กก./ลบ.ม.)
NS-0.33-00%-@1.0-1	1	3.92	10.09	20.09	2442	2432	NS-0.33-00%-@1.0-7	1	3.91	10.04	20.17	2450	2438
	2	3.95	10.03	20.27	2468			2	3.92	10.07	20.16	2443	
	3	3.87	10.06	20.23	2408			3	3.92	10.06	20.23	2438	
	4	3.84	10.06	19.88	2430			4	3.90	10.07	20.06	2442	
	5	3.86	10.04	20.22	2413			5	3.89	10.06	20.25	2418	
NS-0.33-00%-@1.0-14	1	3.89	10.03	20.10	2448	2447	NS-0.33-00%-@1.0-28	1	3.99	10.18	20.28	2417	2429
	2	3.98	10.12	20.18	2453			2	3.96	10.08	20.44	2426	
	3	3.99	10.09	20.19	2470			3	3.94	10.07	20.27	2442	
	4	3.98	10.15	20.24	2429			4	3.95	10.15	19.99	2444	
	5	3.92	10.10	20.09	2434			5	3.94	10.06	20.49	2418	
NS-0.33-00%-@1.0-56	1	3.85	10.08	20.04	2406	2415	NS-0.33-15%-@1.0-1	1	3.92	10.09	20.35	2409	2419
	2	3.88	10.01	20.26	2434			2	3.90	10.05	20.26	2427	
	3	3.89	10.06	20.07	2439			3	3.90	10.09	20.37	2392	
	4	3.87	10.09	20.01	2420			4	3.93	10.08	20.25	2430	
	5	3.86	10.08	20.35	2377			5	3.86	10.02	20.11	2434	
NS-0.33-15%-@1.0-7	1	3.86	10.03	20.15	2423	2424	NS-0.33-15%-@1.0-14	1	3.92	10.09	20.22	2426	2442
	2	3.93	10.17	20.12	2404			2	3.89	10.02	19.93	2477	
	3	3.91	10.03	20.36	2432			3	3.84	10.01	20.08	2431	
	4	3.86	10.02	20.02	2445			4	3.92	10.08	19.98	2457	
	5	3.87	10.07	20.12	2417			5	3.94	10.14	20.17	2419	

ตาราง จ.-2 (ต่อ)

ก้อนตัวอย่าง	ก้อนที่	น้ำหนัก (กก.)	เส้นผ่า ศก. (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กก./ลบ.ม.)	ก้อนตัวอย่าง	ก้อนที่	น้ำหนัก (กก.)	เส้นผ่า ศก. (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กก./ลบ.ม.)
NS-0.33-15%@1.0-28	1	3.88	10.05	19.97	2451	2441	NS-0.33-15%@1.0-56	1	3.88	10.08	19.87	2449	2440
	2	3.94	10.09	19.97	2469			2	3.91	10.05	20.03	2462	
	3	3.93	10.15	19.97	2430			3	3.91	10.09	19.97	2447	
	4	3.96	10.16	20.10	2429			4	3.88	10.08	20.12	2417	
	5	3.93	10.11	20.17	2426			5	3.92	10.09	20.20	2427	
NS-0.33-25%@1.0-1	1	3.81	10.02	19.89	2430	2426	NS-0.33-25%@1.0-7	1	3.89	10.10	20.35	2388	2416
	2	3.85	10.05	19.92	2434			2	3.81	10.10	19.98	2378	
	3	3.92	10.15	20.16	2403			3	3.86	10.07	19.96	2426	
	4	3.84	10.03	20.05	2423			4	3.85	10.02	19.97	2446	
	5	3.97	10.09	20.34	2443			5	3.88	10.05	20.01	2444	
NS-0.33-25%@1.0-14	1	3.87	9.96	20.22	2459	2433	NS-0.33-25%@1.0-28	1	3.90	10.06	20.10	2440	2443
	2	3.92	10.08	20.33	2418			2	3.91	10.11	19.91	2447	
	3	3.82	10.03	20.07	2409			3	3.85	10.09	19.87	2424	
	4	3.88	10.01	20.13	2448			4	3.92	10.11	19.99	2442	
	5	3.89	10.10	19.97	2431			5	3.90	10.04	20.01	2463	
NS-0.33-25%@1.0-56	1	3.96	10.08	20.21	2455	2445	NS-0.33-35%@1.0-1	1	3.90	10.03	20.37	2422	2408
	2	3.89	10.07	20.04	2438			2	3.94	10.15	20.30	2397	
	3	3.93	10.10	20.14	2434			3	3.84	10.06	20.07	2407	
	4	3.92	10.08	20.07	2446			4	3.83	10.09	19.94	2403	
	5	3.86	10.03	19.91	2452			5	3.89	10.10	20.13	2414	

ตาราง จ.-2 (ต่อ)

ก่อนตัวอย่าง	ก้อนที่	น้ำหนัก (กก.)	เส้นผ่า ศก. (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กก./ลบ.ม.)	ก้อนตัวอย่าง	ก้อนที่	น้ำหนัก (กก.)	เส้นผ่า ศก. (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กก./ลบ.ม.)
NS-0.33-35%@1.0-7	1	3.81	10.05	19.91	2413	2350.	NS-0.33-35%@1.0-14	1	3.86	10.02	20.01	2444	2433
	2	3.95	10.05	20.23	2461			2	3.86	10.08	19.90	2429	
	3	3.78	10.06	23.22	2048			3	3.94	10.16	19.87	2445	
	4	3.92	10.08	20.23	2430			4	3.90	10.16	19.93	2414	
	5	3.82	10.06	20.04	2399			5	3.88	10.09	19.95	2433	
NS-0.33-35%@1.0-28	1	3.92	10.11	20.04	2437	2430	NS-0.33-35%@1.0-56	1	3.91	10.09	20.00	2445	2455
	2	3.86	10.09	19.91	2423			2	3.99	10.06	20.29	2476	
	3	3.88	10.11	19.82	2440			3	3.88	10.02	19.94	2466	
	4	3.95	10.12	20.12	2442			4	3.93	10.11	20.10	2434	
	5	3.91	10.17	19.98	2409			5	3.92	10.09	19.97	2453	
NS-0.38-00%@1.0-1	1	3.82	10.09	19.86	2406	2422	NS-0.38-00%@1.0-7	1	3.85	10.06	19.91	2431	2424
	2	3.83	10.08	19.84	2421			2	3.90	10.12	20.00	2425	
	3	3.87	10.16	20.03	2383			3	3.84	10.15	19.85	2392	
	4	3.90	10.03	20.03	2466			4	3.94	10.15	20.13	2421	
	5	3.88	10.06	20.05	2433			5	3.90	10.08	19.92	2453	
NS-0.38-00%@1.0-14	1	3.87	10.02	20.05	2446	2422	NS-0.38-00%@1.0-28	1	3.88	10.13	19.84	2427	2441
	2	3.90	10.10	19.97	2436			2	4.02	10.15	20.44	2432	
	3	3.82	10.02	20.14	2406			3	3.88	10.04	19.97	2454	
	4	3.81	10.05	19.86	2418			4	3.92	10.06	20.08	2456	
	5	3.83	10.09333	19.8933	2406			5	3.92	10.13	19.97	2437	

ตาราง ๑-2 (ต่อ)

ก่อนตัดอย่าง	ก่อนที่	น้ำหนัก (กก.)	เส้นผ่า ศก. (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กก./ลบ.ม.)	ก่อนตัวอย่าง	ก่อนที่	น้ำหนัก (กก.)	เส้นผ่า ศก. (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กก./ลบ.ม.)
NS-0.38-00%@1.0-56	1	3.85	10.03	20.02	2436	2427	NS-0.38-15%@1.0-1	1	3.80	10.07	19.88	2400	2409
	2	3.88	10.10	20.00	2422			2	3.84	10.06	20.08	2408	
	3	3.92	10.12	20.09	2426			3	3.83	10.08	19.92	2410	
	4	3.88	10.07	19.94	2443			4	3.87	10.06	20.12	2421	
	5	3.87	10.12	19.97	2410			5	3.89	10.08	20.25	2407	
NS-0.38-15%@1.0-7	1	3.93	10.14	20.19	2410	2406	NS-0.38-15%@1.0-14	1	3.96	10.17	20.26	2406	2423
	2	3.80	10.04	20.06	2391			2	3.86	10.07	20.06	2416	
	3	3.86	10.09	19.92	2423			3	3.84	10.07	19.88	2427	
	4	3.93	10.17	20.11	2406			4	3.94	10.05	20.33	2441	
	5	3.85	10.13	19.91	2398			5	3.87	10.09	19.98	2423	
NS-0.38-15%@1.0-28	1	3.85	10.10	20.12	2388	2391	NS-0.38-15%@1.0-56	1	3.85	10.14	19.89	2399	2414
	2	3.89	10.24	20.05	2356			2	3.92	10.09	20.15	2434	
	3	3.88	10.11	19.98	2419			3	3.78	9.97	19.99	2420	
	4	3.89	10.07	20.18	2419			4	3.82	10.07	20.00	2396	
	5	3.85	10.16	20.01	2372			5	3.86	10.03	20.16	2422	
NS-0.38-25%@1.0-1	1	3.83	10.14	19.99	2373	2394	NS-0.38-25%@1.0-7	1	3.86	10.16	20.05	2377	2379
	2	3.82	10.08	20.02	2391			2	3.83	10.12	20.12	2368	
	3	3.80	10.06	19.92	2402			3	3.80	10.11	20.03	2364	
	4	3.76	10.06	19.64	2408			4	3.79	10.04	20.02	2389	
	5	3.82	10.07	20.01	2397			5	3.82	10.12	19.83	2395	

ตาราง ๑-2 (ต่อ)

กัณฑ์	น้ำหนัก (กก.)	เส้นผ่า ศก. (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	กัณฑ์	น้ำหนัก (กก.)	เส้นผ่า ศก. (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กก./ลบ.ม.)	
NS-0.38-25%@1.0-14	1	3.88	10.13	19.94	2414	1	3.79	10.10	19.68	2404	2415
	2	3.89	10.13	20.03	2412	2	3.88	10.10	19.87	2438	
	3	3.90	10.28	20.16	2329	3	3.84	10.04	19.81	2448	
	4	3.87	9.99	20.14	2454	4	3.90	10.10	20.18	2410	
	5	3.86	10.14	20.14	2372	5	3.82	10.12	20.02	2372	
NS-0.38-25%@1.0-56	1	3.78	10.07	19.96	2379	1	3.75	10.06	19.81	2383	2397
	2	3.84	10.04	20.01	2426	2	3.83	10.06	20.01	2410	
	3	3.85	10.06	20.03	2417	3	3.84	10.09	20.02	2400	
	4	3.88	10.04	20.11	2438	4	3.86	10.09	20.14	2397	
	5	3.82	10.00	20.01	2433	5	3.74	10.06	19.64	2394	
NS-0.38-35%@1.0-7	1	3.82	10.16	19.89	2367	1	3.88	10.14	20.08	2391	2393
	2	3.81	10.10	20.00	2376	2	3.80	10.12	19.82	2386	
	3	3.87	10.11	20.08	2401	3	3.84	10.14	20.12	2365	
	4	3.87	10.11	20.24	2381	4	3.86	10.09	20.01	2411	
	5	3.79	10.07	20.10	2368	5	3.82	10.03	20.07	2411	
NS-0.38-35%@1.0-28	1	3.82	10.06	20.03	2401	1	3.84	10.02	20.13	2421	2406
	2	3.90	10.05	20.17	2437	2	3.83	10.08	20.04	2394	
	3	3.75	9.97	19.97	2404	3	3.81	10.04	20.05	2401	
	4	3.83	10.04	20.11	2408	4	3.81	10.07	20.08	2384	
	5	3.85	10.07	20.15	2400	5	3.85	10.02	20.07	2433	



ภาคผนวก จ.

การปรับแก้คำสัมประสิทธิ์แก้ไขความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

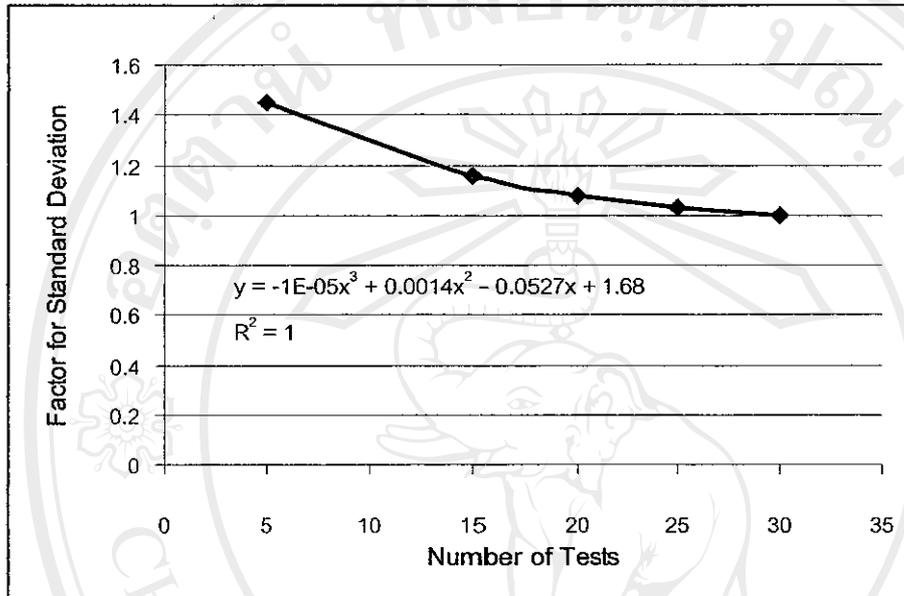
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ภาคผนวก จ.

การปรับค่าสัมประสิทธิ์แก้ไขค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จากตารางที่ 5.6 นำมาหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แก้ไขค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกับจำนวนก้อนตัวอย่างได้ดังรูปที่ จ-1



รูปที่ จ-1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แก้ไขค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกับจำนวนก้อนตัวอย่าง

ตาราง จ-1 เปรียบเทียบส.ป.ส. แก้ไขจากสมการในรูปที่ จ-1 กับส.ป.ส. แก้ไขของ ACI

จำนวนก้อนตัวอย่าง	ส.ป.ส.แก้ไข ACI	จากสมการ
15	1.16	1.16
20	1.08	1.08
25	1.03	1.03
30	1	1.00
5		1.45

เพราะฉะนั้นสมการปรับแก้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานคือ

$$y = -1E-05x^3 + 0.0014x^2 - 0.0527x + 1.68$$

ดังนั้นสำหรับการทดสอบชุดตัวอย่างชุดละ 5 ตัวอย่าง ค่าสัมประสิทธิ์แก้ไขมาตรฐานเท่ากับ 1.45



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ภาคผนวก ข.

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้

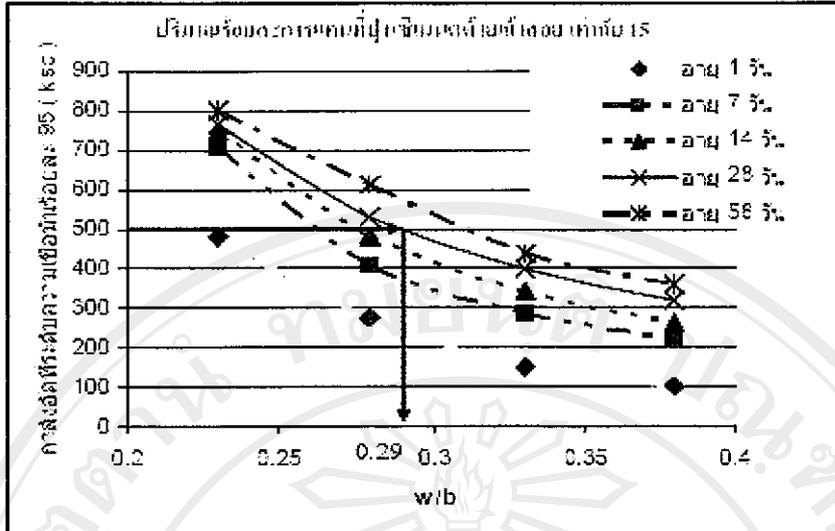
ตัวอย่างการใช้ ข้อเสนอปรับปรุงวิธีการออกแบบส่วนผสมของเอซีไอสำหรับคอนกรีตผสมถั่วลันเตาและสารลดน้ำอย่างแรงที่มีการยุบตัวเป็นศูนย์กลางแสดงในแผนภาพรูปที่ 6.1 กับตารางการคำนวณสำหรับส่วนผสมออกแบบส่วนผสมคอนกรีตผสมถั่วลันเตาและสารลดน้ำอย่างแรง

ตัวอย่าง ต้องการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์กลาง ให้มีกำลังอัดที่ต้องการที่อายุ 28 วันเท่ากับ 500 กก./ตร.ซม. และมีค่าความชื้นเหลือ(เวลาวิบี)เท่ากับ 15 วินาที โดยเลือกใช้ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถั่วลันเตาร้อยละ 15 และเลือกใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่ปริมาณจุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์ โดยวัสดุที่ใช้ในการผสมมีคุณสมบัติดังนี้

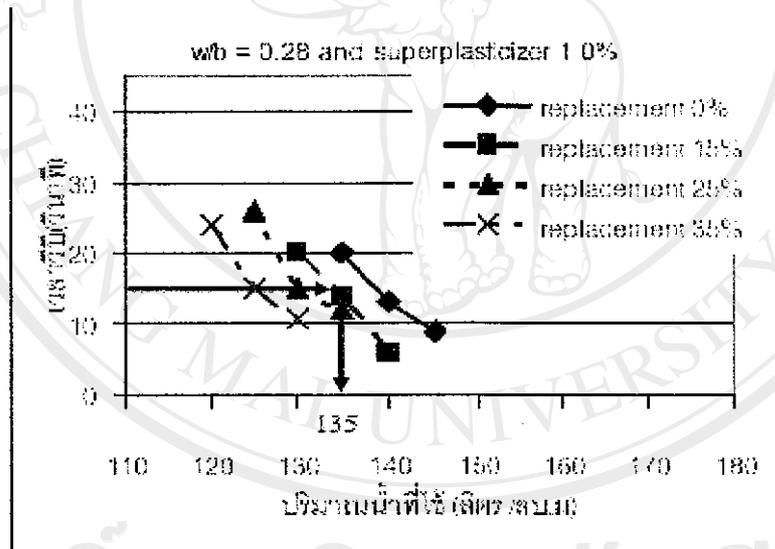
- I. ปูนซีเมนต์ตราอินทรีเพชร มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15
- II. ถั่วลันเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.20
- III. หินขนาดใหญ่สุด 3/8 นิ้ว ค่าความถ่วงจำเพาะในสภาพอะอิมตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.72 ร้อยละการดูดซึมเท่ากับ 0.76 และหน่วยน้ำหนักในสภาพอบแห้งและกระทุ้งแน่นเท่ากับ 1513 กก./ลบ.ม. โดยค่าความชื้นของหินก่อนการผสมเท่ากับ 0.32
- IV. ทรายมีโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.90 ความถ่วงจำเพาะในสภาพอะอิมตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.56 ร้อยละการดูดซึมเท่ากับ 1.14 โดยค่าความชื้นของทรายก่อนการผสมเท่ากับ 1.33
- V. สารลดน้ำอย่างแรง ยี่ห้อ Sikament FF ที่มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.20 ร้อยละของแข็งเท่ากับ 35.3

วิธีทำ

1. เลือกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน จากค่ากำลังอัดที่ต้องการเท่ากับ 500 กก./ตร.ซม. และปริมาณการเลือกใช้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถั่วลันเตาเท่ากับร้อยละ 15 จากความสัมพันธ์ของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน ที่ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถั่วลันเตาร้อยละ 15 ในรูปที่ 5.16 ทำให้ได้อัตราส่วน w/b เท่ากับ 0.29 โดยได้แสดงตัวอย่างในการเลือกอัตราส่วน w/b ในรูปที่ ข.-1



รูปที่ ข.-1 ตัวอย่างการเลือกอัตราส่วน w/b



รูปที่ ข.-2 ตัวอย่างการเลือกปริมาณน้ำที่ใช้ในสัดส่วนผสม

2. เลือกปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรง การเลือกปริมาณสารลดน้ำอย่างแรง ได้ทำการเลือกใช้ที่จุดเข้ากันได้ดีของสารลดน้ำอย่างแรงกับปูนซีเมนต์ จากปูนซีเมนต์และสารลดน้ำอย่างแรงที่เลือกใช้ จุดเข้ากันได้ดีของสารลดน้ำอย่างแรงและปูนซีเมนต์มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 1.0

ตาราง ข.-1 ตารางออกแบบส่วนผสมคอนกรีต จากตัวอย่างการประยุกต์ใช้

ส่วนผสมคอนกรีตผสมเต็มล้อย อัตราส่วน W/B เท่ากับ 0.29 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15

W/B = 0.29 ที่ความชื้นแห้ง Vebe test 15 วินาที และใช้หินขนาดใหญ่สุด = 3.8"

ตาราง A.			ตาราง B.				
ประเภท	Gc	%	มวลรวม	G _{sd}	W _{abs}	W _{tot}	W _h
ปูนซีเมนต์	3.15	65	มวลรวมทราย	2.72	0.76	0.32	-0.44
เถ้าลอย	2.20	15	มวลรวมละเอียด	2.56	1.14	1.33	0.19

W_h = W_{tot} - W_{abs} M = M_{sd}(1 - W_h)

ตาราง C.

สารลดน้ำอย่างแรง		M _{sol} = C x $\frac{d}{100}$	V _{liq} = $\frac{M_{sol} \times 100}{\rho \times G_{sup}}$	V _{air} = V _{liq} x G _{sp} $\frac{(100-s)}{100}$	V _{sol} = V _{liq} - V _{air}
ค่าพ. (G _{sup})	ร้อยละของแข็ง S (%)				
1.20	35.3	5	11.0	8.5	2.5

ตาราง D.	หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)	ปริมาณต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม (ลบ.ม.)	หน.อบแห้งต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.
หิน	1513	0.45	651

ร้อยละของปริมาตรวัสดุทรายต่อหนึ่งหน่วยคอนกรีต = 160
 ออกแบบก่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x200 มม. จำนวน = 15 ก้อน
 คิดเป็นปริมาณคอนกรีตที่ต้องใช้ = 0.0236 ลบ.ม.
 เพื่อความสูญเสียระหว่างผสม = 5 %
 เพราะฉะนั้นต้องการปริมาณคอนกรีต = 0.0247 ลบ.ม.

วัสดุ	ปริมาณ กก./ลบ.ม.	ปริมาตร ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่สภาวะอื่นตัวผิวแห้ง กก./ลบ.ม.	ปรับแก้ ปริมาณน้ำ ลิตร / ลบ.ม.	ปริมาณที่ปรับแก้แล้ว(กก.)	
					1 m ³	Trial batch
น้ำ	135	135	135		130	3.21
ปูนซีเมนต์	466	396	125.6	396	396	9.79
เถ้าลอย		70	31.74	70	70	1.73
มวลรวมทราย	1089	401	1089	5	1085	26.83
มวลรวมละเอียด		275	703	-1	705	17.43
อากาศ	เปอร์เซ็นต์ 3.0 %	30	0			
สารลดน้ำอย่างแรง	1.0 %	2.5	5	-8.5	11.0	0.272
ผลรวม		1000.0	2398	-5		59

3. ประมาณปริมาณน้ำและอากาศ จากปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงและปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เลือกใช้ในข้างต้น สามารถหาปริมาณน้ำได้จากรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 ได้ค่าปริมาณน้ำที่ต้องการโดยประมาณเท่ากับ 135 ลิตร/คอนกรีต 1 ลบ.ม. โดยตัวอย่างในการเลือกปริมาณน้ำได้แสดงในรูปที่ ซ.-2

4. จากนั้นนำค่าต่าง ๆ ไปทำการคำนวณหาสัดส่วนผสมดังแสดงในภาคผนวก ก. โดยตารางการคำนวณได้ดังแสดงในตาราง ซ.- 1 ซึ่งเป็นปริมาณส่วนผสมที่ต้องการ



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ข้อเสนอปรับปรุงวิธีการออกแบบส่วนผสม สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอย
ที่มีการยุบตัวเป็นศูนย์ กรณีใช้ร่วมกับสารลดน้ำอย่างแรง

(A Proposed Modified Mix Design Method
for No-Slump Fly Ash Concrete with Superplasticizer)

วุฒิพงศ์ จันทรศร¹ (Wutipong Jantarasol)

เจษฎา เกษมเศรษฐ์² (Chesada Kasemset)

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (mr_paeyim@hotmail.com)

²รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (chesada@eng.cmu.ac.th)

คำย่อ : ในงานก่อสร้างในปัจจุบันได้มีการนำสารผสมเพิ่มมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น เถ้าลอย, เถ้าแกลบ และ สารลดน้ำ
อย่างแรงเป็นต้น เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิต และ ปรับคุณสมบัติทางกายภาพให้ได้ตามต้องการ แต่วิธีการออกแบบส่วนผสมของ
ซีไอ(ACI211.3R-97) สำหรับคอนกรีตที่มีค่ายุบตัวเป็นศูนย์นั้นยังไม่ครอบคลุมในกรณีที่มีการใช้สารผสมเพิ่ม งานวิจัยนี้จึงได้เสนอ
ปรับปรุงวิธีการออกแบบส่วนผสมของเอซีไอสำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีค่ายุบตัวเป็นศูนย์ กรณีใช้ร่วมกับสารลดน้ำอย่างแรง
โดยเลือกใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน(w/b) เท่ากับ 0.38, 0.33, 0.28 และ 0.23 ซึ่งจากผลของการศึกษาทำให้ทราบปริมาณน้ำ
ต้องการสำหรับปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์ ที่ค่าความชื้นเหลือ(เวลาวิบี)เท่ากับ 15 วินาที อยู่
ในช่วงระหว่าง 126 ถึง 166 ลิตร/คอนกรีต 1 ลบ.ม. และเมื่อปรับปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงน้อยกว่าและมากกว่าจุดที่เข้ากัน
ได้ร้อยละ ± 50 ปริมาณน้ำที่ต้องการในสัดส่วนผสมอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 101 ถึง 117 และร้อยละ 92 ถึง 100 ของปริมาณการใช้
ที่จุดเข้ากันได้ดี ตามลำดับ และสามารถสร้างความสัมพันธ์ ระหว่าง ค่าลึงค์ของคอนกรีตที่อายุต่างๆ กับอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์
โดยเถ้าลอยต่างๆ ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงเท่ากับจุดที่เข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์ โดยค่าลึงค์เฉลี่ยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน
ในช่วงระหว่าง 336 ถึง 855 กก./ตร.ซม. และได้้นำผลจากการวิจัยมาทำการปรับปรุงขั้นตอนการออกแบบและตารางที่ใช้ในการ
ออกแบบของวิธีการออกแบบส่วนผสมของเอซีไอ

BSTRACT: At present , concrete admixture, i.e. fly ash , husk ash and superplasticizer , are widely used in concrete mix
proportion in order to reduce cost and to modify physical properties of concrete itself. However, ACI 211.3R-97, a standard of
practice for selecting proportions for no-slump concrete, does not include the provision for the above mentioned supplementary
materials. The purpose of this research is to modify the ACI mixed design method for no-slump fly ash concrete with
superplasticizer. The study was carried out by using four different w/b ratios of 0.38, 0.33, 0.28 and 0.23. According to the result , at
the dosage of saturation point, the appropriate water requirement is between 126 -166 litre/cu.m. with the measured Vebe time at 15
conds. When superplasticizer used is less and more the saturation point ± 50 % ,the water requirement in the mix are between 101 –
117 % and 92 – 100 % of the value at saturation point respectively. The 28-days compressive strength of concrete with fly ash
replacement between 15 – 35 % and superplasticizer at saturation point is in a range of 336 to 855 ksc., Finally, the test data were
tabulated and appended to the mix design method with the inclusion of superplasticizer.

KEYWORDS: No-Slump concrete , Fly Ash , Superplasticizer , Mix Design.

บทนำ

ปัจจุบันได้มีการใช้คอนกรีตสดที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์กลางมากขึ้น เช่น ใช้แผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูป ท่อคอนกรีตหล่อสำเร็จรูป เป็นต้น อันเนื่องมาจากใช้ระยะเวลาในก่อสร้างน้อย คอนกรีตปกติ และในปัจจุบันยังได้มีการนำเถ้าลอยและสารลดน้ำอย่างแรงมาใช้ในงานคอนกรีตกันอย่างแพร่หลาย เพื่อลดต้นทุนการผลิตและพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตให้เป็นไปตามที่ต้องการ ซึ่งวิธีการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์กลางที่นิยมใช้กันในปัจจุบันนั้น คือวิธีการออกแบบส่วนผสมเอสซีไอ ซึ่งวิธีการออกแบบสัดส่วนผสมของเอสซีไอ ยังไม่ครอบคลุมการออกแบบ สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์กลาง ที่มีการใช้ร่วมกับสารลดน้ำอย่างแรง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาปรับปรุงเกี่ยวกับวิธีการออกแบบคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์กลาง โดยที่มีการใช้เถ้าลอย และสารลดน้ำอย่างแรงเป็นส่วนผสม

วิธีการออกแบบส่วนผสม และ วิธีการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของการใช้สารลดน้ำอย่างแรง เถ้าลอยเป็นส่วนผสมของคอนกรีต โดยการศึกษาแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ผลของการใช้สารลดน้ำอย่างแรงและเถ้าลอย ต่อ ปริมาณน้ำที่ต้องการในสัดส่วนผสม และ ผลของการใช้สารลดน้ำอย่างแรงและเถ้าลอย ต่อ ค่าลึงอัดของคอนกรีต โดยอนการทดลองต้องทำการทดสอบวัสดุที่ใช้ในการทดลองตามมาตรฐานอเมริกัน และทำการออกแบบสัดส่วนผสมตามขั้นตอนแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งในส่วนของการทดลองในส่วนแรก ได้ทำการทดลองโดยการทดลองผสม เพื่อหาปริมาณน้ำที่ต้องการในสัดส่วนผสม สำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์กลาง ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์และที่ปริมาณการใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนต่าง

และในส่วนที่ สอง ได้ทำการทดลองโดยการเลือกปริมาณน้ำที่ต้องการในส่วนผสมจากการทดลองในส่วนแรก และนำมาออกแบบสัดส่วนผสมเช่นเดียวกับการออกแบบสัดส่วนผสมข้างต้น โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 10 x 20 ซม. ที่อายุการทดสอบเท่ากับ 1, 7, 4. 28 และ 56 วัน

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกทำการทดสอบที่ค่าอัตราส่วน W/B ในช่วง 0.23 ถึง 0.38 โดยปริมาณการใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ระหว่างร้อยละ 0 - 35 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราอินทรีเพชร
- เถ้าลอยจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
- หินที่มีขนาดใหญ่สุดเท่ากับ 3/8 นิ้ว
- ทรายที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดอยู่ระหว่าง 2.9
- สารลดน้ำอย่างแรง ประเภท เมลามีนซูเปอร์พลาสติก ไชเซอร์ ยี่ห้อ Sikament FF

2.2 วิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์กลาง กรณีใช้ร่วมกับสารลดน้ำอย่างแรง

วิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอยกับสารลดน้ำอย่างแรง ที่มีการยุบตัวเป็นศูนย์กลาง เป็นวิธีการที่ได้ทำการปรับปรุงวิธีการออกแบบส่วนผสมของ ACI 211.3R-97 (2000) โดยอาศัยหลักการของ ปริมาตรสัมบูรณ์ (Absolute Volume) ซึ่งวิธีการออกแบบส่วนผสมนี้ได้แสดงดังในภาพที่ 1 ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

2.2.1 เลือกกำลังอัดและค่าความชื้นเหลวที่ต้องการ โดยค่าความชื้นเหลววัดด้วยเวลาวิบี (Vebe time) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้กำหนดขอบเขตของการศึกษาที่ช่วงค่าเวลาวิบี เท่ากับ 10-20 วินาที

2.2.2 เลือกขนาดใหญ่สุดของหิน การเลือกขนาดหินใหญ่สุดขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้างได้แก่ ความกว้าง ระยะห่างระหว่างเหล็กเส้น

2.2.3 เลือกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน โดยในการเลือกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานนั้นขึ้นอยู่กับกำลังอัดที่ต้องการ และ ร้อยละปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ซึ่งค่าอัตราส่วน W/B ได้กำหนดเท่ากับ 0.23, 0.28, 0.33 และ 0.38

2.2.4 เลือกปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรง โดยปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงนั้นมีผลต่อปริมาณน้ำที่ต้องการในส่วนผสม และการเกิดการศูนย์กลางเสียค่าการยุบตัว

ump Loss) โดยได้เลือกใช้ปริมาณของสารลดน้ำอย่างแรงที่เข้ากันได้ดี ซึ่งจุดเข้ากันได้ดีของสารลดน้ำอย่างแรง ยี่ห้อ Cement FF กับปูนซีเมนต์ตราอินทรีเพชร มีค่าเท่ากับ ร้อยละของปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน [3]

2.2.5. **ประมาณปริมาณน้ำและฟองอากาศ** ค่าความชื้นของคอนกรีตสดนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสม การเลือกใช้ถั่วลอยและสารลดน้ำอย่างแรง ขนาดโตสุด ร้างของหินและสัดส่วนขนาดคละ คุณภาพปูนซีเมนต์ และประเภทของสารลดน้ำอย่างแรง

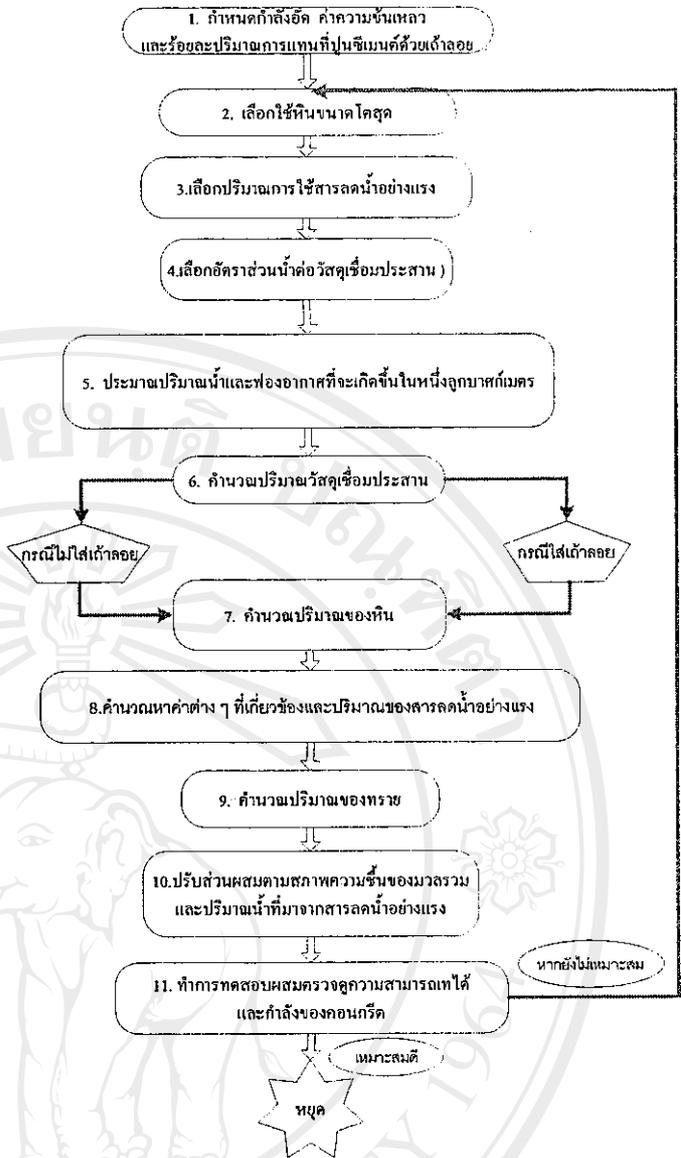
2.2.6. **คำนวณหาปริมาณปูนซีเมนต์ และ ถั่วลอย** โดยมารดคำนวณหาได้จากอัตราส่วน w/b กับปริมาณน้ำที่ต้องการ ส่วนผสม

2.2.7. **คำนวณหาปริมาณมวลรวมหยาบ** ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดใหญ่สุด ค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย ค่าความชื้นมวลที่ใช้ และค่าหน่วยน้ำหนักของหิน [4]

2.2.8. **คำนวณหาปริมาตรของแข็งและปริมาณน้ำที่มากับสารลดน้ำอย่างแรง** เนื่องจากสารลดน้ำอย่างแรงที่นำมาใช้ในส่วนผสมอยู่ในรูปสารละลายระหว่างของแข็งกับน้ำ ทำให้เมื่อสารลดน้ำอย่างแรงมาเป็นส่วนผสมต้องทำการหาปริมาณน้ำที่มาจากสารลดน้ำอย่างแรง และปริมาตรของของแข็งในสารลดน้ำอย่างแรง [5]

2.2.9. **คำนวณปริมาณมวลรวมละเอียด** เมื่อได้ปริมาณส่วนผสมทั้งหมดแล้ว (ยกเว้นทราย) ก็นำมาเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของปริมาตร ซึ่งปริมาตรของทรายหาได้จากปริมาตรของส่วนผสมทั้งหมดต้องเท่ากับ 1 ลบ.ม.

2.2.10. **ปรับส่วนผสมตามความชื้นมวลรวม และปริมาณจากสารลดน้ำอย่างแรง** ในสภาพจริงมวลรวมนั้นไม่ได้อยู่ในสภาพอิมตัวผิวแห้ง บางครั้งทรายและหินมีสภาพแห้งหรือเปียกว่าสภาพอิมตัวผิวแห้ง ทำให้เมื่อนำมวลรวมไปผสมคอนกรีตทำให้ปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมเกิดความคลาดเคลื่อน ซึ่งปริมาณน้ำที่เปลี่ยนไปจะมีผลโดยตรงกับกำลังอัดคอนกรีตนั้นก่อนจะนำส่วนผสมที่ได้คำนวณได้มาใช้จะต้องมีการปรับส่วนผสมใหม่ตามสภาพความชื้นจริงของมวลรวม และปริมาณที่มากับสารลดน้ำอย่างแรง เพื่อให้ได้ปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมตามที่ต้องการ



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีตที่มีการยู่ตัวเป็นศูนย์ผสมถั่วลอยกับสารลดน้ำอย่างแรง ที่ปรับปรุงจากวิธีการออกแบบส่วนผสมตามมาตรฐานอเมริกา

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 ผลการทดลองผสมคอนกรีตที่มีค่าการยู่ตัวเป็นศูนย์

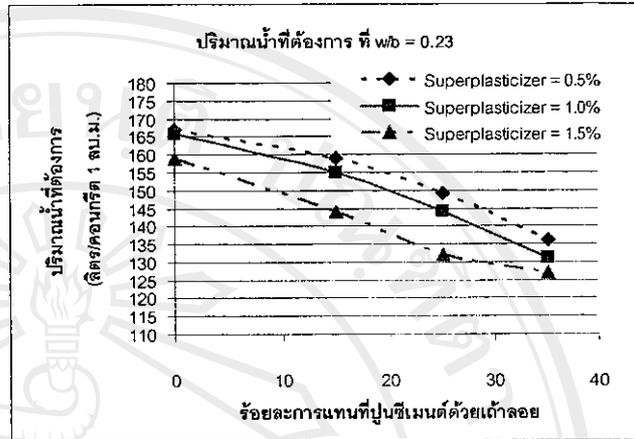
เมื่อทำการออกแบบส่วนผสมตามที่เสนอไว้ในข้างต้นที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงน้อยกว่า, มากกว่า และ เท่ากับจุดที่เข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์ จากนั้นนำสัดส่วนผสมที่ออกแบบมาทำการทดลองผสมแล้ววัดค่าความชื้นเหลว (Vebe time) โดยกำหนดปริมาณเวลาวิบีที่ต้องการเท่ากับ 15 วินาที ซึ่งปริมาณน้ำที่ต้องการในส่วนผสมได้แสดงในตารางที่ 1

รูปที่ 1 ปริมาณน้ำที่ต้องการในสัดส่วนผสมสำหรับปริมาณการใช้สารน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้กับปูนซีเมนต์ ที่เวลาวิเทากับ 15 วินาที

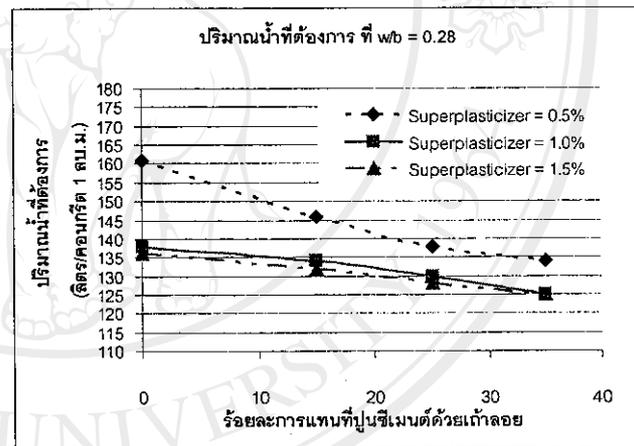
w/b	ร้อยละการแทนที่ด้วยเถ้าลอย	ปริมาณน้ำที่ต้องการ สำหรับปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรง (ลิตร)		
		ร้อยละ 0.5	ร้อยละ 1.0	ร้อยละ 1.5
0.23	0	167	166	159
	15	159	155	144
	25	149	144	132
	35	136	131	127
0.28	0	161	138	136
	15	146	134	132
	25	138	130	128
	35	134	125	125
0.33	0	157	135	132
	15	141	132	129
	25	137	128	128
	35	133	126	123
0.38	0	152	139	138
	15	147	134	131
	25	141	131	130
	35	135	127	124

เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของอนุภาคเถ้าลอยมีลักษณะกลมตัน ทำให้คอนกรีตไหลลื่นได้ดีขึ้น ที่ความชื้นเหลวเท่ากันนั้น ทำให้สามารถลดปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมลงได้ และจากการใช้สารลดน้ำอย่างแรงนั้น ทำให้อนุภาคของปูนซีเมนต์กระจายตัวได้ดียิ่งขึ้น ทำให้น้ำสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับเม็ดซีเมนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น และเม็ดเพสต์มีความหนืดลดลง เนื่องจากเม็ดซีเมนต์ไม่จับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้ปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมลดลง สำหรับความชื้นเหลวที่เท่ากัน โดยจากการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงและเถ้าลอยเพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณน้ำที่ต้องการในส่วนผสมลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงในปริมาณที่มากกว่าปริมาณที่เข้ากันได้ก็

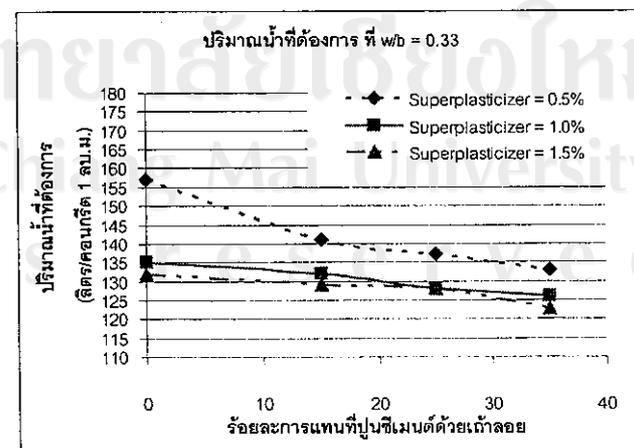
กับปูนซีเมนต์จะสามารถลดปริมาณน้ำที่ต้องการลงได้เพียงเล็กน้อย ดังนั้นสำหรับการออกแบบสัดส่วนของคอนกรีตที่มีการยุบตัวเป็นศูนย์ที่มีการใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสม และสารลดน้ำอย่างแรงต้องคำนึงถึงผลของปริมาณการใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์และปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงต้องนำมาพิจารณาด้วย



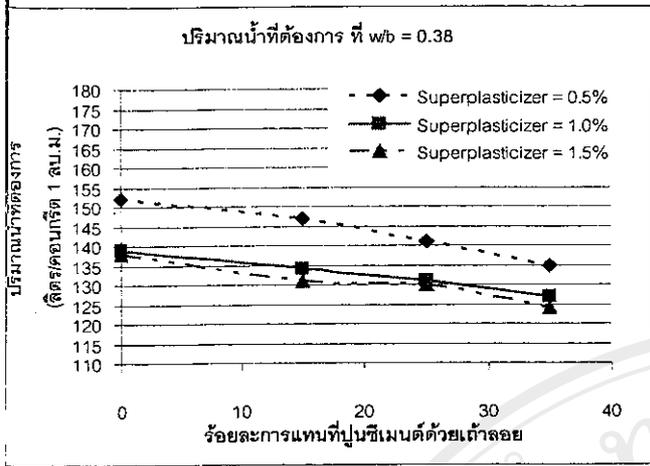
ภาพที่ 2 ปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับอัตราส่วน w/b เท่ากับ 0.23 และเวลาวิเทากับ 15 วินาที ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงต่าง ๆ



ภาพที่ 3 ปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับอัตราส่วน w/b เท่ากับ 0.28 และเวลาวิเทากับ 15 วินาที ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงต่าง ๆ



ภาพที่ 4 ปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับอัตราส่วน w/b เท่ากับ 0.33 และเวลาวิเทากับ 15 วินาที ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงต่าง ๆ



พื้ 5 ปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับอัตราส่วน w/b เท่ากับ 0.38 และ ภาวบีเท่ากับ 15 วินาที ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงต่าง ๆ

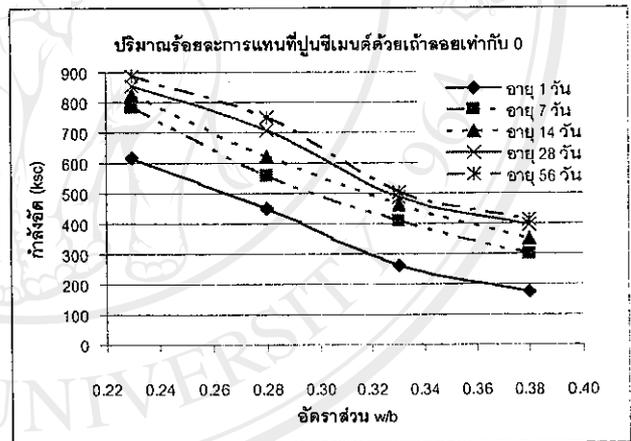
รางที่ 3 กำลังอัดเฉลี่ยที่อายุการทดสอบต่าง ๆ ที่ปริมาณการใช้สารลด อย่งแรงที่จุดเข้ากันได้กับปูนซีเมนต์

w/b	ร้อยละการ แทนที่ด้วย เถ้าลอย	กำลังอัดเฉลี่ยที่อายุการทดสอบ (ksc)				
		1 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน
0.23	0	616	783	824	855	887
	15	541	768	811	827	864
	25	430	720	726	800	859
	35	345	562	637	663	787
0.28	0	459	559	622	709	750
	15	335	466	539	588	668
	25	250	450	464	556	621
	35	189	362	437	498	553
0.33	0	264	407	462	488	504
	15	204	338	396	452	494
	25	156	314	367	415	448
	35	119	294	354	412	430
0.38	0	177	298	350	398	411
	15	150	272	311	368	409
	25	126	245	296	345	390
	35	107	223	240	336	390

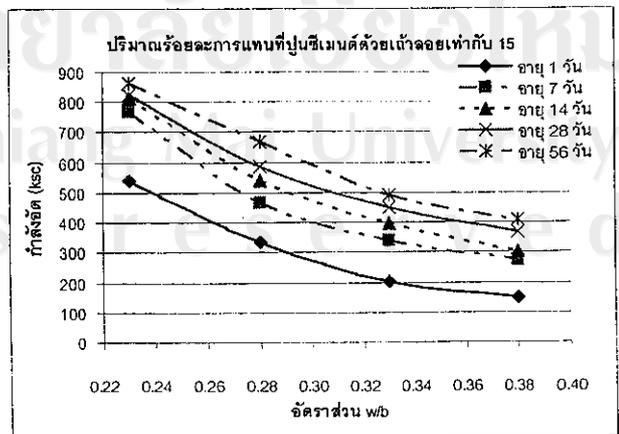
3.2 ผลการทดสอบกำลังอัด

เมื่อได้ปริมาณน้ำที่ต้องการแล้ว นำมาทำการออกแบบ ส่วนผสม โดยปริมาณสารลดน้ำอย่างแรงเลือกใช้ที่จุดเข้ากันได้ดี ักับปูนซีเมนต์ ซึ่งผลการทดสอบกำลังอัดเฉลี่ยที่อายุต่าง ๆ ได้ แสดงในตารางที่ 3

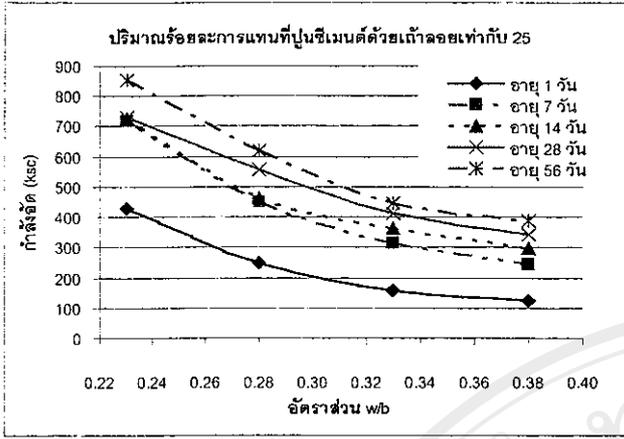
จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยเถ้าลอย เพิ่มมากขึ้นทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง ตาม สัดส่วนการแทนที่ ซึ่งทำให้เมื่อทำการออกแบบสัดส่วนผสม ต้องคำนึงถึงผลของปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ดังนั้นจึงเสนอปรับขั้นตอนการเลือกอัตราส่วน w/b โดยการ กำหนดกำลังอัดที่ต้องการและปริมาณร้อยละการแทนที่ ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยก่อน แล้วนำมาหาปริมาณ w/b จาก ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดเฉลี่ย กับ อัตราส่วน w/b สำหรับ ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยต่าง ๆ ดังแสดงในภาพ ที่ 6 ถึงภาพที่ 9



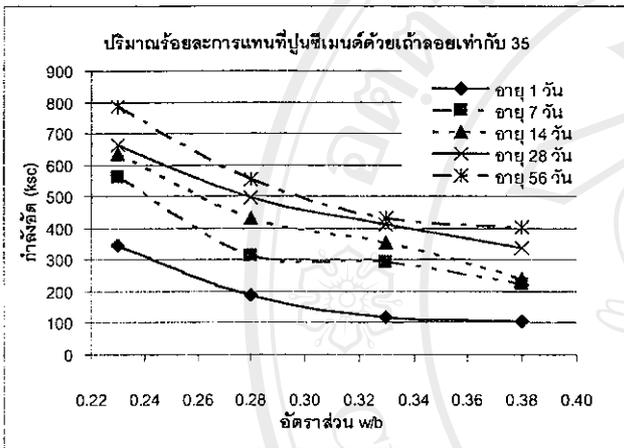
ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดเฉลี่ยกับอัตราส่วน w/b สำหรับ ปริมาณร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 0



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดเฉลี่ยกับอัตราส่วน w/b สำหรับ ปริมาณร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 15



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดเฉลี่ยกับอัตราส่วน w/b สำหรับปริมาณร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 25



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดเฉลี่ยกับอัตราส่วน w/b สำหรับปริมาณร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 35

สรุปผลการศึกษา

จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

ก.) จากผลการวิจัยพบว่า ปริมาณน้ำที่ต้องการ สำหรับปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดอิ่มตัว ที่ความชื้นเหลว (มวลว/บ) เท่ากับ 15 วินาที อยู่ในช่วงระหว่าง 126 ถึง 166 ลิตรของคอนกรีต 1 ลบ.ม.

ข.) เมื่อปริมาณการใช้เถ้าลอยทดแทนเพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณน้ำที่ต้องการในสัดส่วนผสมลดลง ปริมาณน้ำที่ต้องการ ปริมาณการใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 ถึงร้อยละ 35 อยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 97 ถึงร้อยละ 79 ของคอนกรีตที่ไม่มีการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย

ค.) และเมื่อปรับปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงเพิ่มมากขึ้น สามารถทำให้ปริมาณน้ำที่ต้องการลดลง โดยเมื่อปรับปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงให้ต่ำกว่าและมากกว่าจุดที่เข้ากันได้ร้อยละ ±50 ปริมาณน้ำที่ต้องการในสัดส่วนผสมอยู่ช่วงระหว่างร้อยละ 101 ถึงร้อยละ 117 และร้อยละ 92 ถึง

ร้อยละ 100 เมื่อเทียบกับปริมาณน้ำที่ต้องการที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดี ตามลำดับ

ง.) จากผลการวิเคราะห์กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าและสารลดน้ำอย่างแรงที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ ที่อายุต่าง ๆ พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตลดลง เมื่อปริมาณการใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น โดยของกำลังอัดเฉลี่ยที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 ถึงร้อยละ 35 อยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 97 ถึง ร้อยละ 70 ของคอนกรีตที่ไม่มีการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และสามารถสร้าง ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดเฉลี่ยที่อายุต่าง ๆ กับอัตราส่วน w/b ตามที่ได้แสดงในภาพที่ 6 ถึงภาพที่ 9

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และ บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวงจำกัด (มหาชน) ขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย,บริษัทชีก้า (ประเทศไทย)จำกัด และบริษัทพิบูลย์คอนกรีต ที่อนุเคราะห์เถ้าลอยและสารลดน้ำอย่างแรงที่ใช้ในงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ปิติวัฒน์ วัฒนชัย, 2542. “ ข้อเสนอข้อปรับปรุงวิธีการออกแบบ ส่วนผสมของเอซีไอสำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ “. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [2] วิศวะ จักรไพศาล และชัยโรจน์ จักรไพศาล ,2542. “ผลของซีเถ้าลอยในปฏิกิริยาปอซโซลานิกของคอนกรีตสมรรถนะสูง”. วารสาร กพฟ. , 1, 60-67.
- [3] เอกภพ ทองอินตะ ,2545. ” ทดสอบความเข้ากันได้ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งที่ผลิตในไทยกับสารลดน้ำอย่างแรง “. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [4] ACI Committee 211.3R-97 ,2000. “Standard Practice for Selecting Proportions for No-Slump Concrete”, American Concrete Institute.
- [5] Aitein,P.- C. ,1998. High-Performance Concrete. 1st Edition.London: E & FN Spon.
- [6] Jolicoeur , C.,Nkinamubazi ,P.- C.,Simard,M-A. and Piette,M. ,1994. Progress in Understanding the Functional Properties of Superplasticizer in Frest Concrete,ACI SP-148,63-88.



ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์และผลที่ได้รับตลอดโครงการ กิจกรรมที่
วางแผนไว้ กับกิจกรรมที่ดำเนินการจริง และผลที่ได้รับตลอดโครงการ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง ณ.-1 ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์และผลที่ได้รับตลอดโครงการ

วัตถุประสงค์	ผลที่ได้รับตลอดโครงการ
<p>1. เพื่อสร้างแผนภูมิการออกแบบส่วนผสมสำหรับคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์ ผสมเถ้าลอยที่ระดับการแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณต่าง ๆ กรณีใช้ร่วมกับสารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์ โดยปรับปรุงจากวิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐานสถาบันอเมริกา</p>	<p>1. ได้แผนภูมิการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอย และ สารลดน้ำอย่างแรง ที่มีค่าการยุบตัวเป็นศูนย์</p> <p>2. ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นเหลว กับ ปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสม ที่อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15, 25 และ 35 และใช้ร่วมกับสารลดน้ำอย่างแรงในปริมาณต่าง ๆ</p> <p>3. ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังอัดกับ ค่าอัตราส่วน w/b ที่อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15, 25 และ 35 และใช้ร่วมกับสารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีของปูนซีเมนต์กับสารลดน้ำอย่างแรง</p>

ตาราง ฅ.-2 ตารางเปรียบเทียบกิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ได้ดำเนินการ และผลที่ได้รับ
จากดำเนินการ

กิจกรรมที่วางแผนไว้	กิจกรรมที่ได้ดำเนินการ	ผลที่ได้รับจากดำเนินการ
1. จัดเตรียมและจัดเก็บวัสดุที่ใช้ในการวิจัย	1. จัดเตรียมและจัดเก็บวัสดุที่ใช้ในการวิจัย	<ul style="list-style-type: none"> ● ได้วัสดุสำหรับใช้ในงานวิจัย
2. ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	2. ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	<ul style="list-style-type: none"> ● ได้ทราบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง
3. การศึกษาและปรับปรุงวิธีการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตที่มีการยวบตัวเป็นศูนย์ตามมาตรฐานของ เอซีไอ	3. การศึกษาและปรับปรุงวิธีการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตที่มีการยวบตัวเป็นศูนย์ตามมาตรฐานของ เอซีไอ	<ul style="list-style-type: none"> ● ทราบถึงวิธีการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตที่มีการยวบตัวเป็นศูนย์ ตามมาตรฐานของ เอซีไอ ● ทราบถึงวิธีการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและสารลดน้ำอย่างแรง ที่มีการยวบตัวเป็นศูนย์ โดยปรับปรุงจากมาตรฐานของ เอซีไอ
4. ทดลองผสม	4. ทดลองผสมของสัดส่วนผสมต่าง ๆ	<ul style="list-style-type: none"> ● ทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นเหลว กับ ปริมาณน้ำที่ต้องการในสัดส่วนผสม ของ สัดส่วนผสมต่าง ๆ
5. ทดสอบกำลังอัดประลัย ที่อายุการทดสอบ 7, 14, 28 และ 56 วัน โดยใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์	5. ทดสอบกำลังอัดประลัย ที่อายุการทดสอบ 1, 7, 14, 28 และ 56 วัน โดยใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์	<ul style="list-style-type: none"> ● ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัย ที่อายุ 1, 7, 14, 28 และ 56 วัน กับ กำลังอัดประลัย ที่ปริมาณใช้สารลดน้ำอย่างแรงเท่ากับจุดเข้ากันได้ดีกับปูนซีเมนต์

ตาราง ณ.-2 (ต่อ)

กิจกรรมที่วางแผนไว้	กิจกรรมที่ได้ดำเนินการ	ผลที่ได้รับจากดำเนินการ
6. วิเคราะห์ผลการทดสอบ	6. วิเคราะห์ผลการทดสอบ	<ul style="list-style-type: none"> • ทราบแนวโน้มของปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมเมื่อปรับปริมาณการใช้เถ้าลอยและสารลดน้ำอย่างแรง • ทราบแนวโน้มของกำลังอัดที่อายุต่าง ๆ เมื่อปรับปริมาณการใช้เถ้าลอย ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดี
7. จัดทำรายงาน	7. จัดทำรายงาน	<ul style="list-style-type: none"> • ได้รายงานฉบับสมบูรณ์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright© by Chiang Mai University
 All rights reserved

ตารางที่ ฅ.-3 Grantt Chart เปรียบเทียบกิจกรรมที่เสนอในข้อเสนอโครงการแต่ละที่ทำได้จริงในงวดที่ 1

ลำดับที่	กิจกรรมในข้อเสนอโครงการ / หรือ จากกรรปรบผัน	เดือนที่					
		1	2	3	4	5	6
1	ค้นคว้า และ คึกษาหาข้อมูล	↔	↔	↔	↔	↔	↔
2	ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง		↔	↔	↔	↔	↔
2.1	- ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของหิน		↔	↔	↔	↔	↔
2.2	- ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของทราย		↔	↔	↔	↔	↔
2.3	- ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์		↔	↔	↔	↔	↔
2.4	- ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย		↔	↔	↔	↔	↔
2.5	- ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของสารลดน้ำอย่างแรง		↔	↔	↔	↔	↔
3	ทำการวิจัยและวิเคราะห์ผล						
3.1	- จัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ						
3.2	- ทดลองผสมเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสม ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้กับปูนซีเมนต์ (ร้อยละ 1)						
3.3	- ทดลองผสมเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสม ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงน้อยกว่าที่จุดเข้ากันได้กับปูนซีเมนต์ 50 % (ร้อยละ 0.5)						

หมายเหตุ

↔ แผนงาน

.....→ งานที่ทำได้จริง

↔ 25%
↔ 75%

ตารางที่ ๓.- 4 Gantt Chart เปรียบเทียบกิจกรรมที่เสนอในข้อเสนอโครงการและที่ทำได้จริงในงวดที่ 2

ลำดับที่	กิจกรรมในข้อเสนอโครงการ / หรือ จากการปรับแผน	เดือน					
		7	8	9	10	11	12
1	ทำการวิจัยและวิเคราะห์ผล						
1.1	- ทดลองผสมเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสม ในปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้กับปูนซีเมนต์ (ร้อยละ 1)						
1.2	- ทดลองผสมเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสม ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงน้อยกว่าที่จุดเข้ากันได้กับปูนซีเมนต์ 50 % (ร้อยละ 0.5)						
1.3	- ทดลองผสมเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสม ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงมากกว่าที่จุดเข้ากันได้กับปูนซีเมนต์ 50 % (ร้อยละ 1.5)						
1.4	- ทดสอบกำลังของแท่งทรงกระบอกตัวอย่าง ที่สัดส่วนผสมเลือกใช้ปริมาณสารลดน้ำอย่างแรง ที่จุดเข้ากันได้กับปูนซีเมนต์						

หมายเหตุ
 → แผนงาน
 งานที่ทำได้จริง

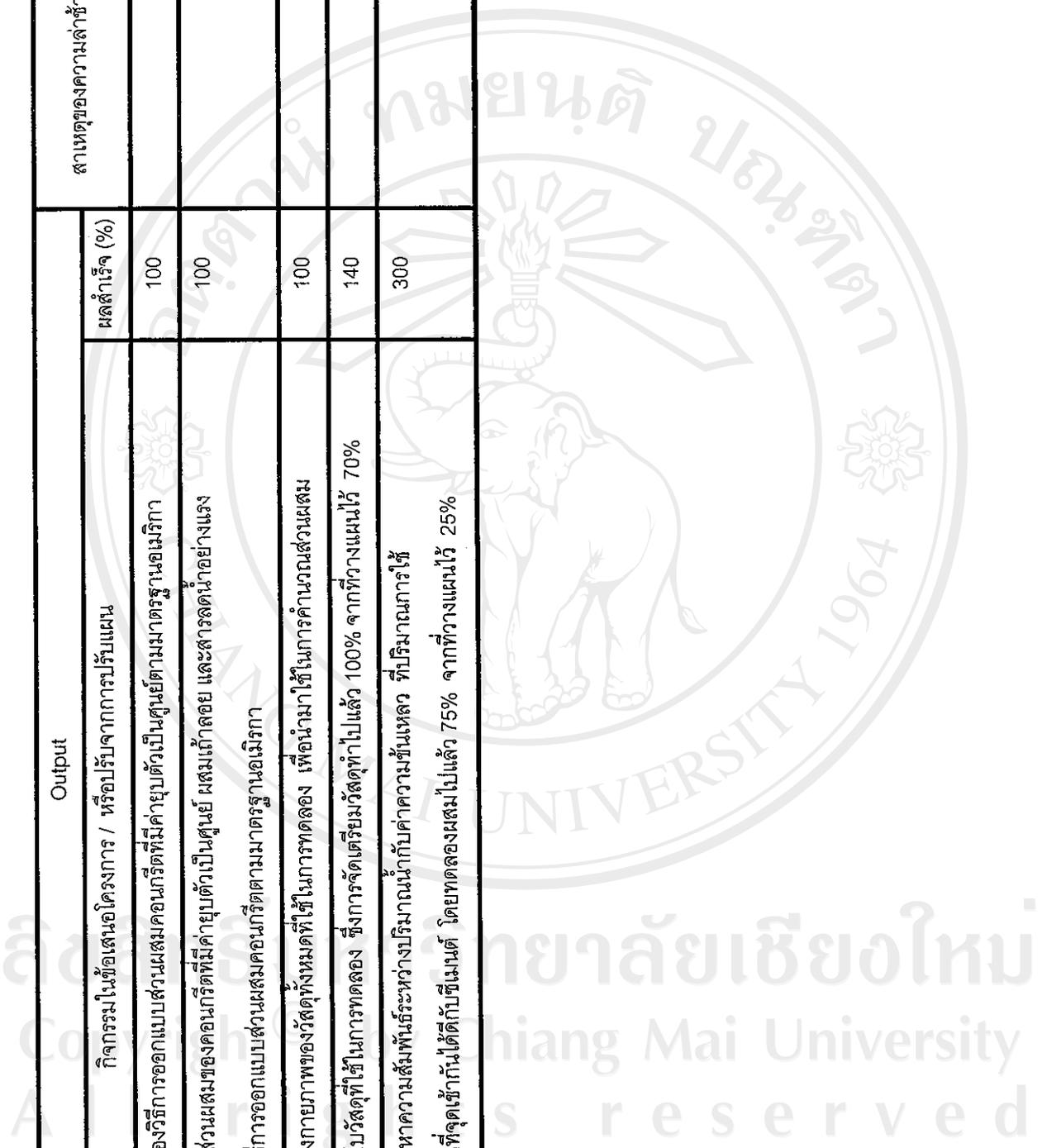
ตารางที่ ๕.5 Grantt Chart เปรียบเทียบกิจกรรมที่เสนอในข้อเสนอโครงการและที่ทำได้จริงในงวดที่ 3

ลำดับที่	กิจกรรมในข้อเสนอโครงการ / หรือ จากกากรปรับแผน	เดือน					
		13	14	15	16	17	18
1	ทำการวิจัย	↕	↕	↕	↕	↕	↕
1.1	- ทดสอบกำลังของแท่งกรงระบอบตัวอย่าง ที่สกัดส่วนผสมลือกรับบริหารสารลดน้ำอย่างแรง ที่จุดเข้ากันได้กับปูนซีเมนต์	↕	↕	↕	↕	↕	↕
2	วิเคราะห์ผลการทดสอบ	↕	↕	↕	↕	↕	↕
2.1	- สร้างความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นแฉะกับความหนาที่เปียกในส่วนผสม ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดต่าง ๆ	↕	↕	↕	↕	↕	↕
2.2	- สร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดเฉลี่ยที่อายุต่าง ๆ กับอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานต่าง ๆ	↕	↕	↕	↕	↕	↕
2.3	- ปรับปรุงขั้นตอนและตารางที่ใช้ในการออกแบบจากวิธีการออกแบบส่วนผสมของเอซีเอ (ACI211.3R - 97)	↕	↕	↕	↕	↕	↕
3	รายงานผลการทดสอบและสรุปผลงานที่ได้กระทำตั้งแต่เริ่มจนถึงสิ้นสุดโครงการ	↕	↕	↕	↕	↕	↕

หมายเหตุ
 ↕ แผนงาน
 งานที่ทำได้จริง

ตารางที่ ๘.- 6 เปรียบเทียบ Output กิจกรรมที่เสนอในข้อเสนอโครงการและที่ทำได้จริงในงวดที่ 1

Output		ผลสำเร็จ (%)	สาเหตุของความล่าช้า (ในกรณีไม่ถึง 100 %)
กิจกรรมในข้อเสนอโครงการ / หรือปรับจากกรับแผน			
1. ทราบถึงข้อจำกัดของวิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่มีค่ายุบตัวเป็นศูนย์กลางตามมาตรฐานอเมริกา		100	-
2. ได้วิธีการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตที่มีค่ายุบตัวเป็นศูนย์กลาง และสารลดน้ำอย่างแรง จากการปรับปรุงวิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐานอเมริกา		100	-
3. ทราบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณส่วนผสม		100	-
4. จัดเตรียมและจัดเก็บวัสดุที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งการจัดเตรียมวัสดุทำไปแล้ว 100% จากที่วางแผนไว้ 70%		140	-
5. ทำการทดลองผสมหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับค่าความชื้นเหลว ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับซีเมนต์ โดยทดลองผสมไปแล้ว 75% จากที่วางแผนไว้ 25%		300	-



ตารางที่ ณ.-7 เปรียบเทียบ Output กิจกรรมที่เสนอในข้อเสนอโครงการและที่ทำได้จริงในงวดที่ 2

Output		ผลสำเร็จ (%)	สาเหตุของความล่าช้า (ในกรณีไม่ถึง 100 %)
กิจกรรมในข้อเสนอโครงการ / หรือรับจากการปรับแผน			
1. ทำการทดลองผสมหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับค่าความชื้นแฉะ ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรง ที่จุดเข้ากันได้ดีกับซีเมนต์ (ร้อยละ 1) โดยทดลองผสมไปแล้ว 100% จากที่วางแผนไว้ 100%		100	-
2. ทำการทดลองผสมหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับค่าความชื้นแฉะ ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรง น้อยกว่าที่จุดเข้ากันได้ดีกับซีเมนต์ (ร้อยละ 0.5) โดยทดลองผสมไปแล้ว 100% จากที่วางแผนไว้ 100%		100	-
3. ทำการทดลองผสมหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับค่าความชื้นแฉะ ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรง มากกว่าที่จุดเข้ากันได้ดีกับซีเมนต์ (ร้อยละ 1.5) โดยทดลองผสมไปแล้ว 100% จากที่วางแผนไว้ 100%		100	-
4. ทดสอบกำลังอัดของแท่งคอนกรีตตัวอย่าง ที่ปริมาณการใช้สารลดน้ำอย่างแรงที่จุดเข้ากันได้ดีกับซีเมนต์		133	-

ตารางที่ ณ.-8 เปรียบเทียบ Output กิจกรรมที่เสนอในข้อเสนอโครงการและที่ทำได้จริงในงวดที่ 3

Output		ผลสำเร็จ (%)	สาเหตุของความล่าช้า (ในกรณีไม่ถึง 100 %)
กิจกรรมในข้อเสนอโครงการ / หรือรับจากการปรับแผน			
1. ทำการทดสอบตัวอย่าง คิดเป็นการทดสอบทั้งสิ้น 100% จากทั้งหมด (รวม 100%)		100	-
2. ทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบ และปรับปรุงวิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอย และสารลดน้ำอย่างแรง ที่มีค่ายุบตัวเป็นศูนย์ สรุปผลทดสอบทั้งหมดและวิเคราะห์วิจารณ์ผลการทดสอบ		100	-
3. รายงานผลการทดสอบที่ได้ และสรุปผลงานที่ได้ตั้งแต่เดือนที่ 1 ถึงเดือนที่ 18		100	-

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ

นาย วุฒิพงษ์ จันทรร

วัน เดือน ปี เกิด

26 พฤษภาคม 2524

ประวัติการศึกษา

สำเร็จการศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนไทยวัฒนา
ประชา จังหวัดนครราชสีมา ปีการศึกษา 2530

สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 3 โรงเรียนเบญจมราช
รังสฤษฎ์ ๓ ฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา ปีการศึกษา 2538

สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนราชสีมา
วิทยาลัย จังหวัดนครราชสีมา ปี 2538

สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปีการศึกษา 2545

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved