การศึกษาพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีต เนื่องจากอิทธิพลของมวลรวมหยาบ

Study of shrinkage behavior of concrete due to the influence of coarse aggregate

นาย พรพงษ์ สว่างสินธุ์ รหัสนิสิต 54360728

นาย ศาสตร์ศิลป์ อินจินดา รหัสนิสิต 54364931

นาย บพิตร นุ่มเมือง รหัสนิสิต 54365150

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2557

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ 30 ก.ย. 2558
เลขทะเบียน 16850054
เลขเรียกหนังสือ ฝร.
มหาวิทยาลัยนเรศวร พ 246 ร
2557

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงงาน	การศึกษาพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีต เนื่องจากอิทธิพลของมวลรวมหยาบ
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายพรพงษ์ สว่างสินธุ์ รหัสนิสิต 54360728
	นายศาสตร์ศิลป์ อินจินดา รหัสนิสิต 54364931
	นายบพิตร นุ่มเมือง รหัสนิสิต 54365150
ที่ปรึกษาโครงงาน	ผศ.ดร. สรัณกร เหมะวิบูลย์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา	2557

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

.....ที่ปรึกษาโครงงาน
(ผศ.ดร. สรัณกร เหมะวิบูลย์)

.....กรรมการ
(ผศ.ดร.สสิกรณ์ เหลืองวิชชเจริญ)

.....กรรมการ
(อาจารย์ บุญพล มีไชโย)

ชื่อหัวข้อโครงงาน	การศึกษาพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีต เนื่องจากอิทธิพลของของมวลรวมหยาบ			
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายพรพงษ์	สว่างสินธุ์	รหัสนิสิต	54360728
	นายศาสตร์ศิลป์	อินจินดา	รหัสนิสิต	54364931
	นายบพิตร	นุ่มเมือง	รหัสนิสิต	54365150
ที่ปรึกษาโครงงาน	ผศ.ดร. สรัณกร เหมะวิบูลย์			
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา			
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา			
ปีการศึกษา	2557			

.....

บทคัดย่อ

โครงงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของมวลรวมหยาบที่มีต่อพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีตทั้งแบบออโตจีนัสและแบบโดยรวม ปัจจัยที่พิจารณาในการศึกษาประกอบด้วย ชนิดของมวลรวมหยาบ (หินปูน หินกรวดแม่น้ำ หินแกรนิต และหินบะซอลต์) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (0.35 และ 0.55) และขนาดของมวลรวมหยาบ(เฉพาะกรณีส่วนผสมที่ใช้หินปูน และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55) ทุกส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษานี้ใช้ค่าอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมดเท่ากันคือ 0.42

จากผลการทดลองพบว่า ชนิดของมวลรวมหยาบมีผลต่อพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีตทั้งแบบออโตจีนัสและแบบโดยรวม เมื่อเปรียบเทียบค่าการหดตัวของคอนกรีตพบว่าคอนกรีตที่ผสมหินบะซอลต์มีค่าการหดตัวสูงที่สุด ตามด้วยคอนกรีตที่ผสมด้วยหินกรวด หินแกรนิต และหินปูน ตามลำดับ ค่าการหดตัวสำหรับส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้หินปูนมีค่าลดลงตามขนาดของหินที่เพิ่มขึ้น

Project title	**Study of shrinkage behavior of concrete due to the influence of coarse aggregate**		
Name	Mr. Pornpong	Swansin	ID. 54360728
	Mr. Sartsin	Injinda	ID. 54364931
	Mr. Bopit	Noummoung	ID. 54365150
Project advisor	Assist.professor Dr. Sarangon		Hemavibool
Major	Civil Engineering		
Department	Civil Engineering		
Academic year	2014		

.....

Abstract

The objective of this project is to study the effect of coarse aggregate on the autogenous and total shrinkage behavior of concrete. Factors considered in this study include types of coarse aggregate (limestone, gravel, granite and basalt), water-cement ratio (0.35 and 0.55) and size of coarse aggregate (only for the case concrete made of limestone with the water-cement ratio of 0.55). The sand-aggregate ratio(s/a) for all concrete mix proportions used in this study is 0.42.

The results showed that the type of coarse aggregate influences the autogenuos and total shrinkage behavior of concrete. Concrete containing basalt coarse aggregate shows the highest shrinkage followed by concrete made with gravel , granite and limestone respectively. Shrinkage of concrete with limestone aggregates is reduced by increase the size of the aggregate.

Key word : Cracking, Autogenous shrinkage, Drying shrinkage,

กิตติกรรมประกาศ

การทำโครงงานเรื่อง "การศึกษาพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีต เนื่องจากอิทธิพลของมวลรวมหยาบ" นี้สำเร็จลุล่วงไป ด้วยความเรียบร้อย ขอขอบคุณคณะผู้จัดทำโครงงานที่ให้ข้อมูลและหาข้อมูลในการทำโครงงานนี้ เพื่อใช้ประกอบโครงงานในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. สรัณกร เหมะวิบูลย์ ผศ.ดร.สสิกรณ์ เหลืองวิชชเจริญ และอาจารย์ บุญพล มีไชโย อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร ผู้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา ทำให้ผลงการทำโครงงานสำเร็จด้วยดี โครงงานฉบับนี้อาจมีข้อบกพร่องอยู่บ้าง ผู้จัดทำโครงงานขอน้อมรับข้อเสนอแนะต่างๆด้วยความยินดี สุดท้ายนี้ หวังว่าผลของการทำโครงงานครั้งนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้ปรับโครงสร้างคอนกรีตในการสร้างบ้าน ทำถนน ให้มีมาตรฐานมากขึ้น เพื่อสามารถ ต้อนรับกับการเปลี่ยนแปลงของยุคสมัยได้ดีขึ้น

คณะผู้ดำเนินโครงงานวิศวกรรมโยธา
นายพรพงษ์ สว่างสินธุ์
นายศาสตร์ศิลป์ อินจินดา
นายบพิตร นุ่มเมือง
พฤษภาคม 2558

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ.	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตการทำโครงงาน	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	4
1.6 แผนการดำเนินงาน	4
1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงงาน	4
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	5
2.1 การหดตัวของคอนกรีต	5
2.1.1 การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	6
2.1.2 การหดตัวแบบพลาสติก	6
2.1.3 การหดตัวแบบออโตจีนัส	6
2.1.4 การหดตัวโดยรวม	7
2.1.5 การหดตัวแบบคาร์บอเนชั่น	7
2.2 การแตกร้าวของคอนกรีต	8
2.2.1 ขั้นตอนการเกิดการแตกร้าว	8
2.2.2 หน่วยแรงกับการแตกร้าว	9
2.2.3 สาเหตุของการแตกร้าว	10
2.2.4 ปัจจัยที่ทำให้เกิดแตกร้าว	12
2.3 มวลรวม	14
2.3.1 มวลรวมละเอียด	14
2.3.2 มวลรวมหยาบ	16

2.4 การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต(Mix Design) 19
2.4.1 หลักการในการออกแบบส่วนผสม 19
2.4.2 ปัจจัยที่ควรพิจารณาในการออกแบบ 19
2.4.3 ความสัมพันธ์ที่มีประโยชน์ในการออกแบบ 21
2.4.4 ประเภทของสัดส่วนผสมคอนกรีต 22
2.4.5 การออกแบบส่วนผสมโดยปริมาตร 22

บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงงาน 24
3.1 วัสดุที่ใช้ในโครงงาน 25
3.1.1 วัสดุที่ใช้ในโครงงาน 25
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย 26
3.3 ปัจจัยที่ทำการศึกษา 26
3.3.1 สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย 27
3.3.2 การศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของคอนกรีต 27
3.3.3 การศึกษาแนวทางในการลดการหดตัวของคอนกรีต 28
3.4 วิธีการศึกษาโครงงาน 28
3.4.1. วิธีการเตรียมวัสดุก่อนการผสมคอนกรีต 28
3.4.2 ขั้นตอนการผสมคอนกรีต 30
3.4.3 การทดสอบคุณสมบัติจำเพาะของวัสดุประสาน 39
3.4.4 วิธีการทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต 42
3.4.5 วิธีการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต 43
3.4.6 วิธีการทดสอบการหดตัวของคอนกรีต 44

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ 51
4.1 คุณสมบัติของวัสดุประสาน 51
4.1.1 วัสดุประสานที่ใช้ในโครงงาน 51
4.2 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุผสม 52
4.2.1 ปูนซีเมนต์ 52
4.2.2 ทราย 52
4.2.3 หิน 52
4.3 ผลการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต 52
4.3.1 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างกัน 52
4.3.2 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากัน ขนาดคละที่ต่างกัน 59
4.4 การวิเคราะห์ผลของปัจจัยและแนวทางในการหดตัวของคอนกรีต 60
4.4.1 การศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อการหดตัวของคอนกรีต 60

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 62
5.1 ผลของการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อการหดตัวของคอนกรีต 62
5.2 ผลของการศึกษาแนวทางในการลดการหดตัวของคอนกรีต 62

บรรณานุกรม 63
ภาคผนวก 65
ประวัติผู้วิจัย 74

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณสูงสุดของวัสดุไม่พึงประสงค์ในมวลรวมหยาบ	17
2.2 ค่ายุบตัวที่เหมาะสมกับงานก่อสร้างประเภทต่างๆ	19
3.1 สัดส่วนผสมคอนกรีตของหินปูน	32
3.2 สัดส่วนผสมคอนกรีตของหินบะซอลต์	33
3.3 สัดส่วนผสมคอนกรีตของหินกรวด	34
3.4 สัดส่วนผสมคอนกรีตของแกรนิต	35

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงแผนผังขอบเขตการศึกษาของมวลรวมหยาบ	3
1.2 แสดงแผนพังการดำเนินงาน	4
2.1 ภาพจำลองแสดงการแตกร้าวของคอนกรีต	9
2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของหน่วยแรงดึงสุทธิที่เกิดขึ้นและกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต	10
2.3 ชนิดของการแตกร้าวของคอนกรีต ก่อนคอนกรีตแข็งตัวและหลังคอนกรีตแข็งตัว	11
2.4 ตัวอย่างการแตกร้าวด้วยสาเหตุต่างๆ	12
2.5 ทรายบกและทรายแม่น้ำ	15
2.6 การเก็บรักษาทราย	16
2.7 ขนาดคละของมวลรวมละเอียดที่ใช้ในการผสมคอนกรีต	16
2.8 ขนาดคละของมวลรวมหยาบที่ใช้ในการผสมคอนกรีต	18
3.1 สภาวะความชื้นของมวลรวม	30
3.2 ชั่งน้ำหนักและเตรียมวัสดุก่อนการผสมคอนกรีต	36
3.3 การเคลือบเครื่องผสมด้วยซีเมนต์มอร์ต้าเพื่อป้องกันการดูดซึมน้ำของเครื่องผสมคอนกรีต	36
3.4 การผสมทรายกับหินก่อนการผสมคอนกรีต	37
3.5 การผสมคอนกรีตแบบแห้ง	37
3.6 การผสมคอนกรีตแบบเปียก	38
3.7 การทดสอบหาการยุบตัวของคอนกรีต	38
3.8 การเทคอนกรีตลงในแบบหล่อและใช้เครื่องเขย่าไล่ฟองอากาศออกจากคอนกรีตปิดบริเวณผิวหน้าของคอนกรีตด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น	39
3.9 การทดสอบหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต	43
3.10 กระบวนการตัวอย่างของการวัดค่าการหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต	45
3.11 การห่อหุ้มก้อนตัวอย่างคอนกรีตแบบออโตจีนัส	46
3.12 การวัดก้อนตัวอย่างคอนกรีตแบบออโตจีนัส	47
3.13 ชั่งน้ำหนักหาค่าการสูญเสียความชื้นของก้อนตัวอย่าง	47
3.14 การเก็บก้อนตัวอย่างคอนกรีต เพื่อวัดการหดตัวแบบออโตจีนัส	48
3.15 การบ่มก้อนตัวอย่างคอนกรีต เพื่อวัดการหดตัว	49
3.16 การวัดค่าการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต	49
3.17 การหาค่าการสูญเสียความชื้นของก้อนตัวอย่าง.	50
3.18 การเก็บก้อนตัวอย่างคอนกรีต เพื่อวัดการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต	50
4.1 กราฟแสดงการหดตัวแบบออโตจีนัสของอัตราส่วน W/C 0.35	52
4.2 กราฟแสดงการหดตัวแบบออโตจีนัสของอัตราส่วน (W/C 0.55)	53
4.3 กราฟแสดงการหดตัวของหินปูน	54
4.4 กราฟแสดงการหดตัวของหิน กรวดแม่น้ำ	54
4.5 กราฟแสดงการหดตัวของหินแกรนิต	55

4.6 กราฟแสดงการหดตัวของหินบะซอลต์ 55
4.7 กราฟแสดงการหดตัวโดยรวมของอัตราส่วน (W/C 0.35) 56
4.8 กราฟแสดงการหดตัวโดยรวมของอัตราส่วน (W/C 0.55) 56
4.9 กราฟแสดงการหดตัวโดยรวมของหินปูน 57
4.10 กราฟแสดงการหดตัวโดยรวมของหินกรวด 57
4.11 กราฟแสดงการหดตัวโดยรวมของหินแกรนิต 58
4.12 กราฟแสดงการหดตัวโดยรวมของหินบะซอลต์ 58
4.13 กราฟแสดงการหดตัวโดยรวมของหินปูน 59
4.14 กราฟแสดงการหดตัวแบบออโตจีนัสของหินปูน 60

บทที่ 1

บทนำ

ปัญหาการแตกร้าวในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ณ ปัจจุบันนี้ เป็นปัญหาใหญ่และมีความสำคัญมากต่อพฤติกรรมการพังทลายของคอนกรีตหลังเกิดการแตกร้าวขึ้น สำหรับการแตกร้าวที่เกิดขึ้นนี้ นอกจากจะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างแล้ว ยังส่งผลกระทบต่อปัญหาด้านความคงทน (Durability Problems) ของโครงสร้างอีกด้วย การแตกร้าวที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ไม่ว่าจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาการก่อสร้างหรือหลังจากการก่อสร้างเสร็จแล้ว จะเป็นตัวการสำคัญที่เร่งให้เกิดปัญหาด้านความคงทนของคอนกรีตให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อคอนกรีตเกิดการแตกร้าว น้ำ อากาศ หรือสสารต่างๆ ที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตและเหล็กเสริม สามารถแทรกผ่านรอยแตกเหล่านั้นเข้าไปทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมได้อย่างเร็ว ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเกิดความเสียหายและมีอายุการใช้งานสั้นลง ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเพิ่มมากขึ้น การแตกร้าวเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ เช่น การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัว การแตกร้าวเนื่องจากการทรุดตัว การแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการแตกร้าวเนื่องจากการรับน้ำหนักของคอนกรีต เป็นต้น

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน

ปัญหาการแตกร้าวในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ณ ปัจจุบันนี้ เป็นปัญหาใหญ่และมีความสำคัญมากต่อพฤติกรรมการพังทลายของคอนกรีตหลังเกิดการแตกร้าวขึ้น สำหรับการแตกร้าวที่เกิดขึ้นนี้ นอกจากจะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างแล้ว ยังส่งผลกระทบต่อปัญหาด้านความคงทน (Durability Problems) ของโครงสร้างอีกด้วย การแตกร้าวที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ไม่ว่าจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาการก่อสร้างหรือหลังจากการก่อสร้างเสร็จแล้ว จะเป็นตัวการสำคัญที่เร่งให้เกิดปัญหาด้านความคงทนของคอนกรีตให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อคอนกรีตเกิดการแตกร้าว น้ำ อากาศ หรือสสารต่างๆ ที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตและเหล็กเสริม สามารถแทรกผ่านรอยแตกเหล่านั้นเข้าไปทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมได้อย่างเร็ว ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเกิดความเสียหายและมีอายุการใช้งานสั้นลง ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเพิ่มมากขึ้น การแตกร้าวเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ เช่น การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัว การแตกร้าวเนื่องจากการทรุดตัว การแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการแตกร้าวเนื่องจากการรับน้ำหนักของคอนกรีต เป็นต้น ปัญหาที่พบมากในโครงการก่อสร้างต่างๆ ในปัจจุบัน คือ การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัว ซึ่งได้แก่ การหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) และการหดตัวโดยรวม (Drying Shrinkage) การหดตัวสองประเภทข้างต้นนี้ เป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดการแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ในปัจจุบันพบว่ามีการใช้คอนกรีตกำลังสูงในโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่และนำไปสู่ปัญหาการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบออโตจีนัสเพิ่มมากขึ้น และจากสภาพภูมิอากาศของโลกที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นทุกปี ซึ่งเป็นผลมาจากภาวะโลกร้อน ทำให้พบปัญหาการแตกร้าวจากการหดตัวโดยรวมเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ด้วยเหตุนี้วิศวกรผู้ออกแบบจึงจำเป็นต้องทราบค่าการหดตัวแบบออโตจีนัสและค่าการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตและการหดตัวแบบอื่นๆ เพื่อนำข้อมูลการหดตัวนี้ไปใช้

ออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตให้มีโอกาสเกิดการแตกร้าวลดลง ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวสองประเภทข้างต้น เกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ อาทิเช่น การใช้ปริมาณน้ำที่ไม่เหมาะสม การใช้สารเคมีผสมเพิ่ม เพื่อลดปริมาณน้ำในงานโครงสร้างกำลังอัดสูง การใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่สูงเกินไป การบ่มคอนกรีตไม่ถูกวิธี การใช้ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบที่ไม่เหมาะสมกับประเภทของงาน อุณหภูมิและความชื้นที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้ล้วนก่อให้เกิดปัญหาการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีตทั้งสิ้น หากไม่รู้จักคุณสมบัติและวิธีการใช้ที่เหมาะสม ปัจจุบันจึงมีการศึกษาจานวนมากที่ศึกษาปัจจัยที่มีผลและแนวทางในการลดการหดตัวของคอนกรีต

ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวและแนวทางในการลดการหดตัวของคอนกรีต เพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของปัจจัยที่เกี่ยวข้อง และปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น รวมถึงใช้เป็นแนวทางในการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต เพื่อช่วยลดปัญหาการแตกร้าว และใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการประยุกต์ใช้กับงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายในประเทศต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยและคุณสมบัติของมวลรวม วัสดุ ที่ส่งผลต่อการหดตัวของคอนกรีต

1.2.2 เพื่อทดสอบและเก็บรวบรวมข้อมูลการหดตัวของคอนกรีต สาหรับใช้เป็นแบบจาลองการหดตัวของคอนกรีตในอนาคต

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

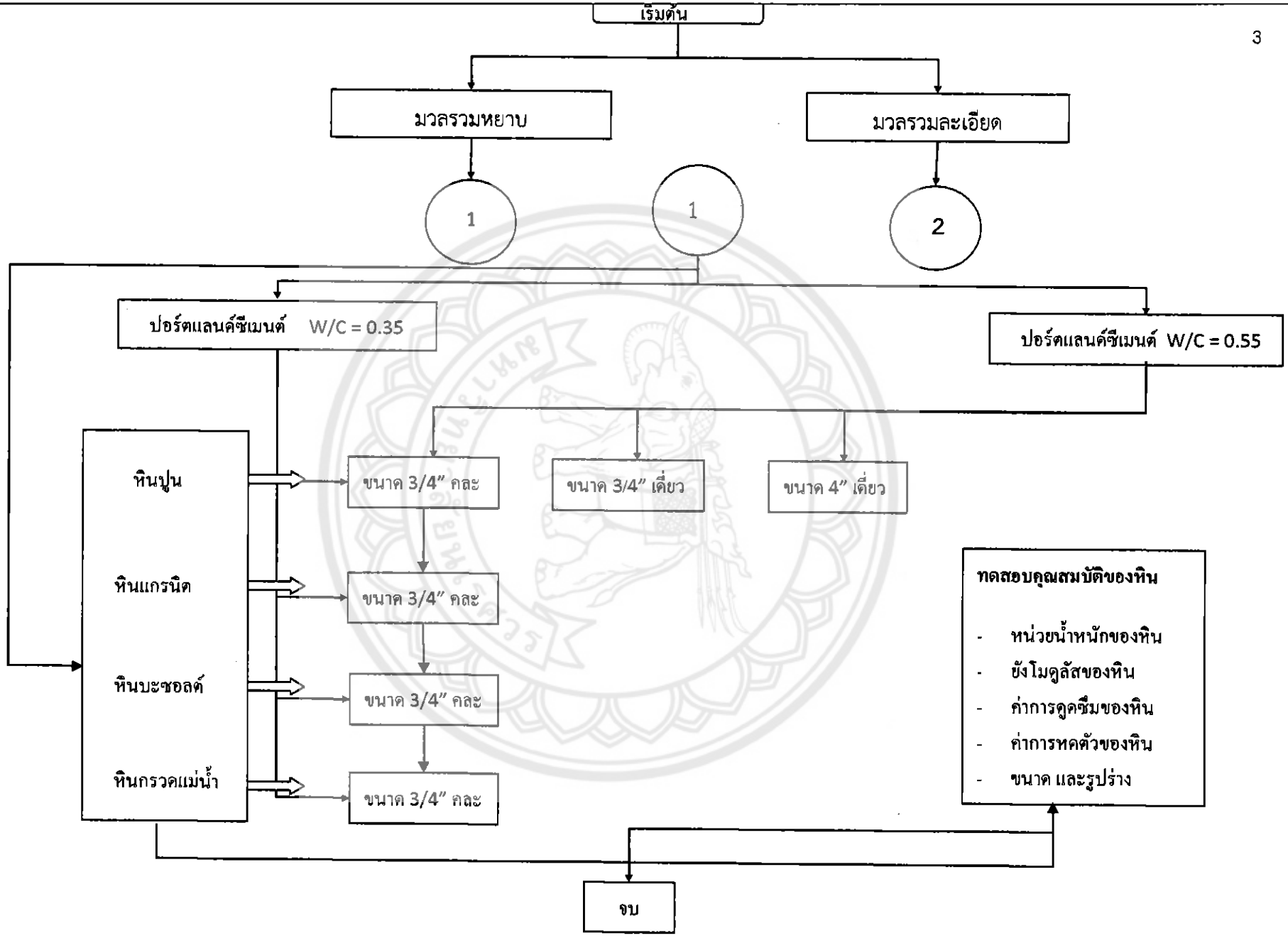
1.3.1 เพื่อทราบปัจจัยและคุณสมบัติของมวลรวมหยาบที่ส่งผลต่อการหดตัวของคอนกรีต

1.3.2 เพื่อทราบถึงแนวทางการลดการหดตัวของคอนกรีต โดยการควบคุมวัสดุมวลรวมและขนาดคละ

1.3.3 เพื่อทราบถึงการทดสอบและเก็บรวบรวมข้อมูลการหดตัวของคอนกรีต สำหรับใช้เป็นแบบจำลองการหดตัวของคอนกรีตในอนาคต

1.4 ขอบเขตการทำโครงงาน

งานนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวและแนวทางในการลดการหดตัวของคอนกรีต ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อคอนกรีตและมวลรวมหยาบซึ่งแบ่งเป็น 4 ชนิด ได้แก่ หินปูน หินแกรนิต หินกรวดแม่น้ำ หินบะซอลต์ ซึ่งปัจจัยที่จะนำมาใช้ในการศึกษาการหดตัวของคอนกรีต ได้แก่ อัตราส่วนของมวลรวมละเอียดกับมวลรวมหยาบและอัตราส่วนของน้ำต่อคอนกรีต



รูป 1.1 แสดงแผนผังขอบเขตการศึกษาของมวลรวมหยาบ

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.5.1 การนำเสนอโครงงาน

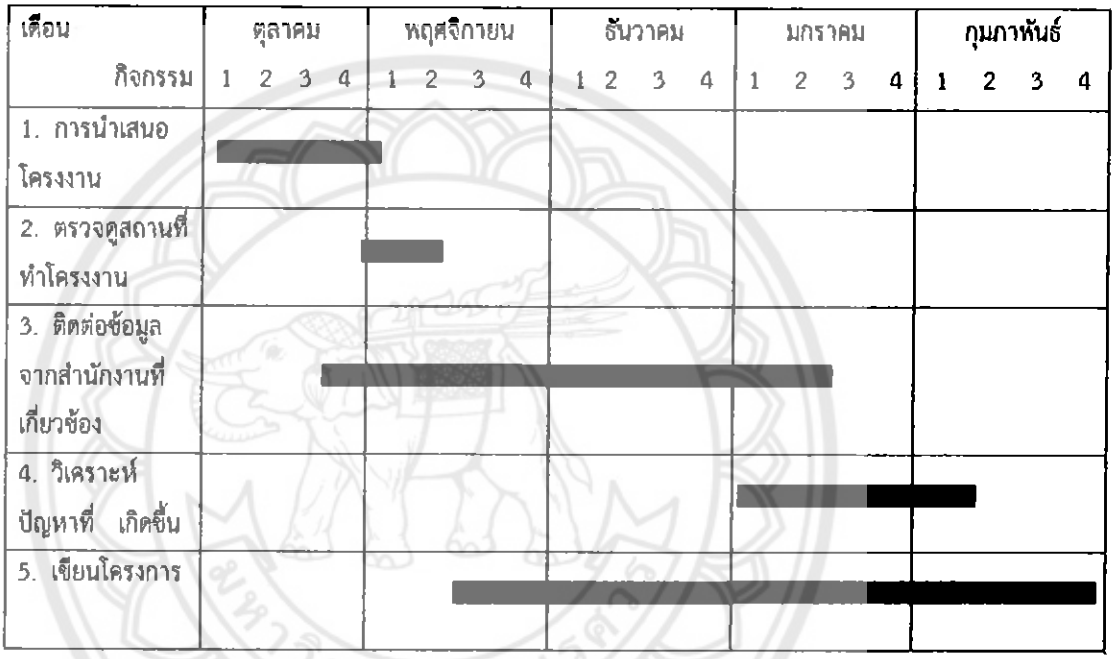
1.5.2 ตรวจดูสถานที่ทำโครงงาน

1.5.3 ติดต่อข้อมูลจากสำนักงานที่เกี่ยวข้อง

1.5.4 วิเคราะห์ ปัญหาที่เกิดขึ้น

1.5.5 เขียนโครงการ

1.6 แผนการดำเนินงาน



รูป 1.2 แสดงแผนพังการดำเนินงาน

1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงงาน

1.7.1 ค่าถ่ายเอกสาร จำนวนเงิน 1500 บาท

1.7.2 ค่าเข้าเล่ม จำนวนเงิน 1500 บาท

รวมเป็นเงิน ทั้งสิ้น 3000 บาท (สามพันบาทถ้วน)

หมายเหตุ ถัวเฉลี่ยทุกรายการ 1.7.1 ค่าถ่ายเอกสาร จำนวนเงิน 1500 บาท

บทที่ 2
หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

ปัจจุบันปัญหาการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีตกลายเป็นปัญหาที่สำคัญมาก เมื่อเกิดการแตกร้าวจะทำให้โครงสร้างคอนกรีตเกิดความเสียหายและขาดความคงทน ส่งผลต่ออายุการใช้งาน วิธีแก้ไขปัญหาการแตกร้าว มีอยู่หลายวิธี อาทิเช่น การใช้งานโครงสร้างคอนกรีตถูกต้องตามข้อบังคับ การออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีตให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน เป็นต้น โดยทั่วไปส่วนผสมคอนกรีตมักจะประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ หิน ทราย และน้ำ หรืออาจจะเป็นสารเคมีผสมเพิ่มเพื่อให้เกิดประโยชน์ทั้งด้านคุณสมบัติ ประสิทธิภาพ และประหยัดค่าใช้จ่าย หรือแม้แต่เพื่อช่วยอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทราบหลักการและทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการแตกร้าวของคอนกรีต รวมทั้งวัสดุผสมคอนกรีต เนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ย่อมส่งผลให้คอนกรีตมีคุณสมบัติแตกต่างกัน คุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้จะเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่จะนำมาพิจารณาออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวและศึกษาแนวทางในการลดการหดตัวของคอนกรีตโดยใช้มวลรวมหยาบ 4 ชนิด ในการศึกษาการหดตัวของคอนกรีต ได้แก่ หินปูน หินบะซอลต์ หินแกรนิต หินกรวดแม่น้ำ มวลรวมหยาบที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้มีคุณสมบัติแตกต่างกันตามแหล่งที่มาของหิน เพื่อใช้เป็นข้อมูลและแนวทางในการลดปัญหาการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต ซึ่งเนื้อหาบทนี้จะเป็นการอธิบายถึง สาเหตุและปัญหาที่ทำให้เกิดการแตกร้าวของคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 การหดตัวของคอนกรีต

การหดตัวของคอนกรีต คือ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคอนกรีต เนื่องจากการสูญเสียน้ำระเหยออกสู่สิ่งแวดล้อม หรือเกิดจากปฏิกิริยาเคมี เช่น การสูญเสียน้ำเนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และการทำปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคอนกรีตจะเกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มผสมคอนกรีตเสร็จใหม่ๆ ซึ่งอยู่ในสภาพข้นเหลวจนกระทั่งเสร็จสิ้นอายุการใช้งานของคอนกรีต โดยจะมีการใช้น้ำในการทำปฏิกิริยาเคมีและการเคลื่อนที่เข้าหรือออกอย่างอิสระ การหดตัวของคอนกรีตจะเกิดขึ้นในส่วนของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งการหดตัวของคอนกรีตเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุและเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่แตกต่างกันออกไป โดยทั่วไปการหดตัวของคอนกรีตมีอยู่ 5 ประเภท แต่การหดตัวของคอนกรีตที่พบส่วนใหญ่และมีความสำคัญต่อความคงทนของคอนกรีตมาก ณ ปัจจุบัน มี 2 ประเภท คือ การหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต และมีการหดตัวของคอนกรีตทั่วไป 5 ประเภท ได้แก่

- การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration Shrinkage)
- การหดตัวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage)
- การหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage)
- การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage)
- การหดตัวแบบคาร์บอเนชั่น (Carbonation Shrinkage)

โดยมีรายละเอียด ดังนี้

2.1.1 การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration Shrinkage หรือ Chemical Shrinkage) คือ การหดตัวที่เกิดจากการสูญเสียน้ำในการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ หรือเรียกว่า "ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น" ส่งผลให้คอนกรีตเกิดการหดตัว โดยการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาก่อนการก่อตัวเริ่มต้นของคอนกรีต (Initial Setting Time) หรือช่วงพลาสติก (Plastic State) ซึ่งการหดตัวแบบนี้ จะไม่มีผลเสียหายต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว จึงไม่เป็นอันตรายต่อโครงสร้าง เนื่องจากจะเกิดมากในช่วงเวลาเริ่มแรกก่อนระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีต (Final Setting Time) ซึ่งคอนกรีตจะสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้โดยไม่เกิดหน่วยแรงจึงไม่ค่อยมีผลต่อเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคอนกรีต ดังนั้นการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจึงไม่ค่อยได้รับความสนใจมากนัก ในการนำมาพิจารณาหาวิธีการลดการแตกร้าว เนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต

2.1.2 การหดตัวแบบพลาสติก

การหดตัวแบบพลาสติก คือ การหดตัวที่เกิดจากการสูญเสียน้ำในขณะที่คอนกรีตยังไม่แข็งตัวหรืออยู่ในสภาพพลาสติก ส่งผลให้คอนกรีตมีปริมาตรลดลงและเกิดการหดตัว โดยการสูญเสียน้ำของคอนกรีตเกิดจากภาวะที่น้ำระเหยออกจากผิวหน้าของคอนกรีต หรือเกิดจากการดูดซับน้ำของวัสดุบริเวณผิวล่างออกจากคอนกรีต เช่น ไม้แบบ และพื้นดินที่แห้งใต้คอนกรีต เป็นต้นนอกจากนี้ การทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำก็ทำให้คอนกรีตมีปริมาตรลดลงและคอนกรีตเกิดการหดตัว การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติกสามารถป้องกันได้ โดยการลดการระเหยของน้ำออกจากผิวหน้าคอนกรีตไม่ให้เกิน 0.05 กิโลกรัม/ตารางเมตร/ชั่วโมง ซึ่งต่ำกว่าอัตราการเยิ้มของน้ำขึ้นสู่ผิวหน้าของคอนกรีต และอัตราการระเหยของน้ำไม่ควรมากกว่า 1 กิโลกรัม/ตารางเมตร/ชั่วโมง ซึ่งจากการสังเกตจะเห็นได้ว่า การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติกจะรุนแรงในสภาวะอุณหภูมิสภาพแวดล้อมสูง ความชื้นสภาพแวดล้อมต่ำลมแรง และการเยิ้มน้ำต่ำ เป็นต้น ซึ่งสภาพแวดล้อมเหล่านี้ จะทำให้การสูญเสียน้ำบริเวณผิวหน้ามาก จึงเกิดการหดตัวขึ้น ส่งผลให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติก

2.1.3 การหดตัวแบบออโตจีนัส

การหดตัวแบบออโตจีนัส คือ การหดตัวที่เกิดจากการสูญเสียน้ำภายในคอนกรีต เนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยไม่รวมถึงการสูญเสียความชื้นสู่สภาพแวดล้อม การหดตัวแบบออโตจีนัสเป็นการหดตัวเนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นหลังจากการก่อตัวเริ่มต้นของคอนกรีตรวมกับการสูญเสียความชื้นในช่องว่างคาปิลารี่ ส่งผลให้คอนกรีตเกิดการหดตัวขึ้น การหดตัวแบบออโตจีนัสจะไม่มีการสูญเสียความชื้นระเหยออกสู่ภายนอกหรือจากภายนอกเข้าสู่ภายในตัวคอนกรีต แต่จะเป็นการสูญเสียความชื้นภายในตัวคอนกรีตโดยกระบวนการการหดตัวแบบออโตจีนัสเริ่มจาก การดึงน้ำที่มีอยู่ภายในคอนกรีตไปใช้ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับวัสดุประสาน ซึ่งน้ำที่ใช้นี้จะถูกดึงมาจากช่องว่างคาปิลลารี่ (Capillary Pores) และโพรงเจล (Gel Pores) เมื่อน้ำถูกดึงไปใช้ในการทำปฏิกิริยาแล้วทำให้โพรงมีสภาพว่างเปล่าทำให้เกิดแรงดันคาปิลารี่ขึ้นรอบๆ ช่องว่างคาปิลารี่ เพื่อการรักษาสมดุลของแรง โดยเรียกแรงนี้ว่า "Capillary Suction" อันเป็นสาเหตุให้คอนกรีตเกิดหดตัว เนื่องจากแรง Capillary Suction นี้ซึ่งปรากฏการณ์นี้ เรียกว่า "Self-desiccation" การหดตัวแบบออโตจีนัสโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นทันทีหลังจากที่ผสมคอนกรีตเสร็จ แต่ในทางปฏิบัติการเปลี่ยนแปลงปริมาตรก่อนการก่อตัวจะไม่ทำให้เกิดหน่วยแรงในคอนกรีต ดังนั้นจึงนิยมวัดค่าการหดตัวแบบออโต

จีนัสโดยเริ่มจากระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น แต่ในงานวิจัยนี้ จะทำการเริ่มวัดการหดตัวแบบออโตจีนัสเมื่อคอนกรีตอายุครบระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีตและเพิ่มอีก 2 ชั่วโมง เพื่อง่ายต่อการแกะแบบและไม่ก่อให้ผลเสียต่อก้อนตัวอย่างคอนกรีต ปัจจุบันการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบออโตจีนัสมีผลสำคัญเป็นอย่างมากต่องานโครงสร้างคอนกรีตกำลังสูง (High Strength Concrete) สาเหตุของการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบออโตจีนัสในงานโครงสร้างคอนกรีตกำลังสูง เช่น ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์มาก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ และการใช้สารผสมเพิ่มชนิดต่างๆ เพื่อเร่งกำลังอัดของคอนกรีต เป็นต้น ซึ่งคอนกรีตเหล่านี้ จะมีค่าความซึมน้ำต่ำ ช่องว่างคาปิลลารี่มีปริมาณน้อย มีขนาดที่เล็กและไม่ต่อเนื่องกัน เมื่อความชื้นในช่องว่างคาปิลลารี่ถูกน้ำไปใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะทำให้โพรงมีสภาพว่างเปล่าทำให้เกิดแรงดันคาปิลารี่ขึ้นรอบๆ ช่องว่างคาปิลารี่ เพื่อการรักษาสมดุลของแรง ส่งผลให้คอนกรีตมีความเสี่ยงต่อการแตกร้าว เนื่องจากการหดตัวแบบออโตจีนัสที่สูง ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ไม่สามารถละเลยได้ สำหรับการออกแบบส่วนผสมในงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ณ ปัจจุบันนี้ การใช้คอนกรีตกำลังอัดสูงมีอยู่มากในงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วโลก ณ ปัจจุบัน ซึ่งแต่ละประเทศต่างก็ใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน เป็นส่วนผสมคอนกรีตตามแต่ละภูมิประเทศนั้นๆ นอกจากนี้ สภาพภูมิอากาศที่แตกต่างกัน ย่อมส่งผลต่อการหดตัวของคอนกรีตแทบทั้งสิ้น ทำให้คอนกรีตในแต่ละประเทศมีค่าการหดตัวที่สูงหรือต่ำแตกต่างกันออกไป ซึ่งจากผลการหดตัวของคอนกรีตนี้ จะส่งผลโดยตรงต่อปัญหาด้านความคงทนของคอนกรีต

2.1.4 การหดตัวโดยรวม

การหดตัวโดยรวม คือ การหดตัวเนื่องจากการสูญเสียน้ำออกจากคอนกรีตสู่สภาพแวดล้อมอย่างอิสระ โดยการระเหยของน้ำเกิดจากการที่คอนกรีตอยู่ในสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิที่สูง หรือความชื้นที่ต่ำ ทำให้คอนกรีตบริเวณที่ผิวสัมผัสกับอากาศเกิดการสูญเสียน้ำ ส่งผลให้คอนกรีตเกิดการหดตัว และเกิดการแตกร้าวขึ้นได้ โดยกลไกลการหดตัวโดยรวมเกิดการที่น้ำภายในช่องว่างคาปิลลารี่และโพรงเจลระเหยออกสู่สภาพแวดล้อมอย่างอิสระ ทำให้ช่องว่างเกิดการบีบตัว จึงส่งผลให้เกิดแรงตึงผิวคาปิลลารี่ขึ้น เพื่อการรักษาสมดุลของแรง เป็นสาเหตุให้คอนกรีตมีปริมาตรลดลงและนำไปสู่การแตกร้าว หรือการบิดงอของโครงสร้าง เนื่องจากการยึดรั้งในขณะที่คอนกรีตเกิดการหดตัว ในปัจจุบันปัญหาการแตกร้าว เนื่องจากการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต เป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตเกิดความเสียหายอย่างมากอีกปัญหาหนึ่ง เนื่องจากสภาพภูมิอากาศปัจจุบันเพิ่มสูงขึ้นทุกปี ทำให้พบปัญหาการแตกร้าว เนื่องจากการหดตัวโดยรวมนี้ เพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งปัญหาการแตกร้าวนี้ มักพบในโครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศมากๆ เช่น พื้น หรือ กำแพง เป็นต้น จึงทำให้ปัญหาการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต เป็นปัญหาสำคัญอีกปัญหาหนึ่ง ที่ไม่สามารถละเลยได้ สำหรับใช้ในการออกแบบส่วนผสมในงานโครงสร้างคอนกรีต ณ ปัจจุบันนี้

2.1.5 การหดตัวแบบคาร์บอเนชั่น

การหดตัวแบบคาร์บอเนชั่น คือ การหดตัวที่เกิดจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ในเนื้อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ (CO_2) เกิดเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ทำให้คอนกรีตหรือซีเมนต์เพสต์เกิดการหดตัว ปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า “ปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น” และเรียกการหดตัวที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานี้ ว่า “การหดตัวเนื่องจากคาร์บอเนชั่น ” แสดงดังสมการ

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \longrightarrow CaCO_3 + H_2O$$

การหดตัวแบบคาร์บอเนชั่นเกิดขึ้นมากในบริเวณที่มีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูง เช่น คอนกรีตที่มีการจราจรหนาแน่น เป็นต้น โดยการหดตัวขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ค่าความซึมน้ำได้ของคอนกรีต (Permeability) ปริมาณน้ำภายใน ปริมาณของ CO_2 และค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ เป็นต้น ดังนั้นคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำๆ เช่น คอนกรีตกำลังสูง เป็นต้น การหดตัวแบบคาร์บอเนชั่นจะเกิดขึ้นน้อยกว่าคอนกรีตปกติ เนื่องจากคอนกรีตกำลังสูงจะมีค่าความพรุนต่ำ CO_2 จึงแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ช้า

2.2 การแตกร้าวของคอนกรีต

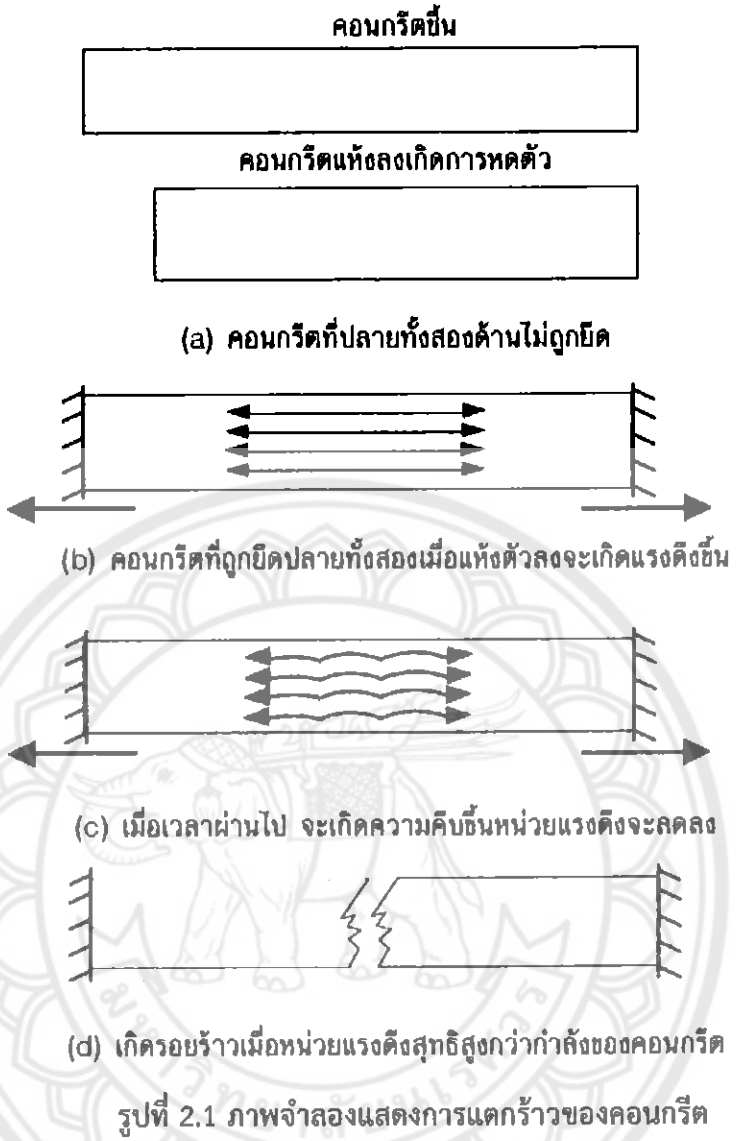
2.2.1 ขั้นตอนการเกิดการแตกร้าว

การแตกร้าวของคอนกรีตเกิดจากหลายสาเหตุเราควรทราบถึงขั้นตอนของการเกิดเพื่อที่จะได้หาวิธีป้องกันและแก้ไขได้อย่างถูกต้องตามหลัก และเพื่อแสดงถึงขั้นตอนของการแตกร้าวอย่างชัดเจน เราจึงใช้แบบจำลองของแท่งคอนกรีตมาเป็นตัวอย่างในการพิจารณา

เริ่มแรกเรามาพิจารณาแท่งคอนกรีตที่ยังไม่แข็งตัวดี ซึ่งยังมีความชื้นอยู่และปลายทั้งสองด้านของแท่งคอนกรีตถูกปล่อยไว้อย่างอิสระ ไม่ยึดกับวัตถุอื่นใด ดังรูปที่ 2.1(a) ต่อมาเมื่อแท่งคอนกรีตแข็งตัวแล้วและแห้งลงก็จะเกิดการหดตัวอย่างอิสระ โดยไม่ถูกรั้งที่ปลายทั้งสองด้านจึงไม่เกิดหน่วยแรง (Stress) ใดๆ ในเนื้อคอนกรีต ในสภาวะเช่นนี้ จะไม่เกิดการแตกร้าว

การแตกร้าวนั้นจะเกิดขึ้นในกรณีที่แท่งคอนกรีตถูกยึดปลายทั้งสองไว้ ดังรูป 2.1(b) เมื่อคอนกรีตแห้งตัวจะทำให้เกิดหน่วยแรงดึง (Tensile Stress) ขึ้นในเนื้อคอนกรีต ลักษณะเช่นนี้เหมือนกับว่าเราปล่อยให้คอนกรีตแข็งตัวและเกิดการหดตัวโดยอิสระ ในขณะเดียวกันเราก็จะดึงแท่งคอนกรีตนี้ ให้ยาวออกไปเท่าเดิม แต่เมื่อเวลาผ่านไป คอนกรีตจะเกิดความคืบ (Creep) ขึ้น ซึ่งทำให้หน่วยแรงดึงในคอนกรีตลดลง รูปที่ 2.1(c) และเมื่อไรก็ตามไม่ว่าจะเป็นคอนกรีตสดหรือคอนกรีตแข็งตัวแล้วถ้าหน่วยแรงดึง(Tensile Stress) ที่เกิดขึ้นสูงกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต (Tensile Strength) คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าว และหน่วยแรงดึงในคอนกรีตจะหมดไป รูปที่ 2.1(d)

ทั้งสี่ขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้น เป็นขั้นตอนโดยคร่าวๆของขบวนการการเกิดรอยแตกร้าวทุกชนิดในคอนกรีตไม่ว่าจะเป็นการแตกร้าวขนาดใหญ่หรือเล็กๆก็ตาม



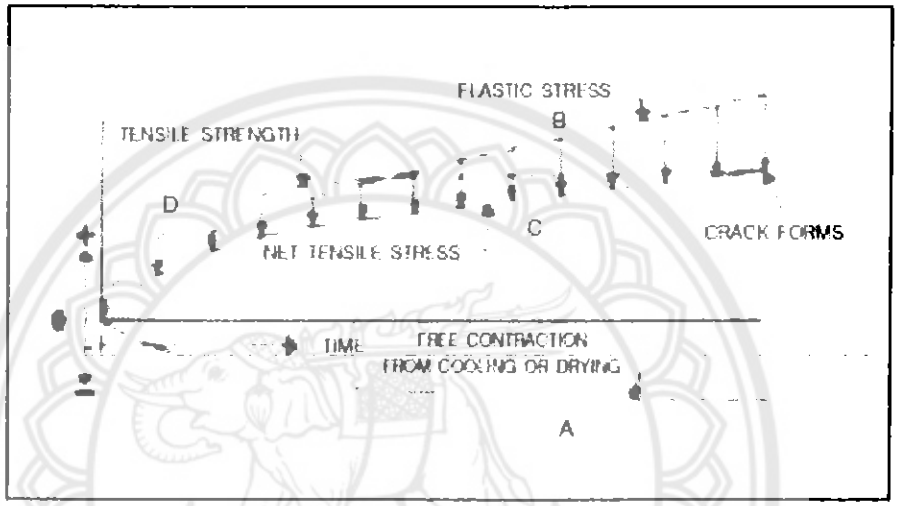
รูปที่ 2.1 ภาพจำลองแสดงการแตกร้าวของคอนกรีต

2.2.2 หน่วยแรงกับการแตกร้าว

การแตกร้าวเป็นผลเกิดจากการกระทำของหน่วยแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ซึ่งสามารถแสดงด้วยกราฟในรูปที่ 2.2 ที่ชี้ ให้เห็นถึงการกระทำของหน่วยแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นในคอนกรีตดังนี้ ให้แกนนอนเป็นแกนของเวลาส่วนแกนตั้งจะเป็นแกนของการเปลี่ยนแปลงปริมาตร หน่วยแรง (Stress) กำลัง (Strength) และความคืบ (Creep) เมื่อเวลาผ่านไปคอนกรีตแห้งและเย็นตัวลงก็จะเกิดการหดตัว ดังเส้นโค้ง A แต่ถ้าปลายทั้งสองคอนกรีตถูกยึดไว้ ก็จะเกิดหน่วยแรงขึ้นในแท่งคอนกรีตดังเส้นโค้ง B ขณะเดียวกันความคืบ (Creep) ในคอนกรีตก็จะเกิดขึ้นพร้อมๆกัน ซึ่งทำให้หน่วยแรงดึงในคอนกรีตลดลง ดังเส้นโค้ง C เป็นผลทำให้หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นน้อยกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตซึ่งแทนด้วยเส้นโค้ง D เมื่อไรก็ตามที่หน่วยแรงดึง C มีค่าเท่ากับกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต คอนกรีตก็จะแตก แต่ถ้าหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต การแตกร้าวของคอนกรีตก็จะไม่เกิดขึ้น

จากที่กล่าวมาพอจะสรุปได้ว่า การแตกร้าวของคอนกรีตจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เหล่านี้

- การหดตัวของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตแห้งและเย็นตัวลง
- คอนกรีตถูกยึดรั้งไว้ไม่สามารถเคลื่อนตัวได้อิสระ
- ความยืดหยุ่นของคอนกรีต (Elasticity)
- ความคืบของคอนกรีต (Creep)
- กำลังรับแรงดึงของคอนกรีต (Tensile Strength)



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของหน่วยแรงดึงสุทธิที่เกิดขึ้นและกำลังรับแรง**ดึงของคอนกรีต**

2.2.3 สาเหตุของการแตกร้าว

2.2.3.1 Structural Crack อาจมาจากสาเหตุหลัก 3 ประการ คือ

ก. การแตกร้าวเนื่องจากการออกแบบไม่ถูกต้อง เช่น การคำนวณออกแบบหรือการให้รายละเอียดการเสริมเหล็กไม่ถูกต้อง

ข. การแตกร้าว เนื่องจากการใช้วัสดุก่อสร้างไม่มีคุณภาพ เช่น ใช้หินผุ หินมีดินปน ทรายสกปรก น้ำสกปรก หรือ ทำการผสมคอนกรีตไม่ได้สัดส่วนที่ถูกต้อง รวมทั้งการใช้เหล็กเสริมที่เป็นสนิมมาก

ค. การแตกร้าว เนื่องจากการก่อสร้างไม่ได้มาตรฐาน เช่น การผสม การขนส่ง การเทลงแบบ การหล่อคอนกรีตไม่ดีพอ การถอดค้ำยันก่อนกำหนด ขาดการบ่มที่ดีพอ หรือ แบบหล่อคอนกรีตโก่งงอ

2.2.3.2 Non Structural Crack อาจมาจากสาเหตุต่างๆ ดังนี้

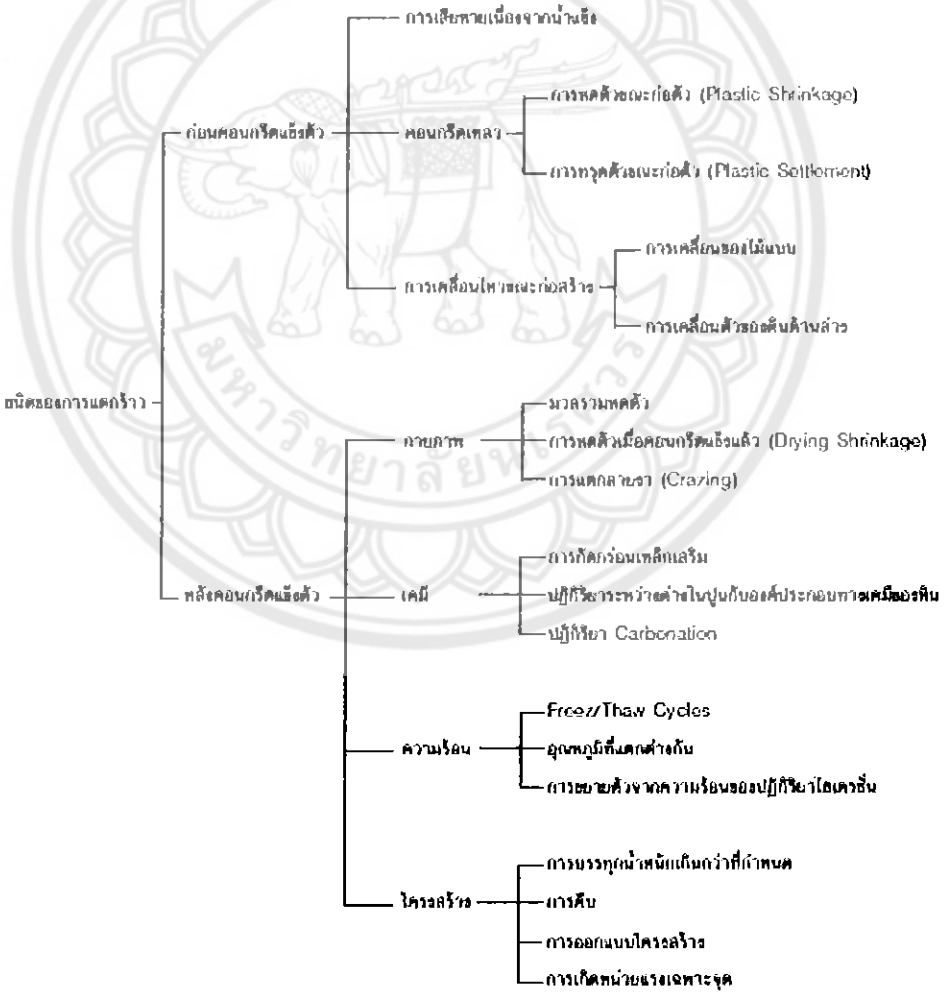
ก. การหดตัวของคอนกรีต

ข. การทรุดตัวของคอนกรีต

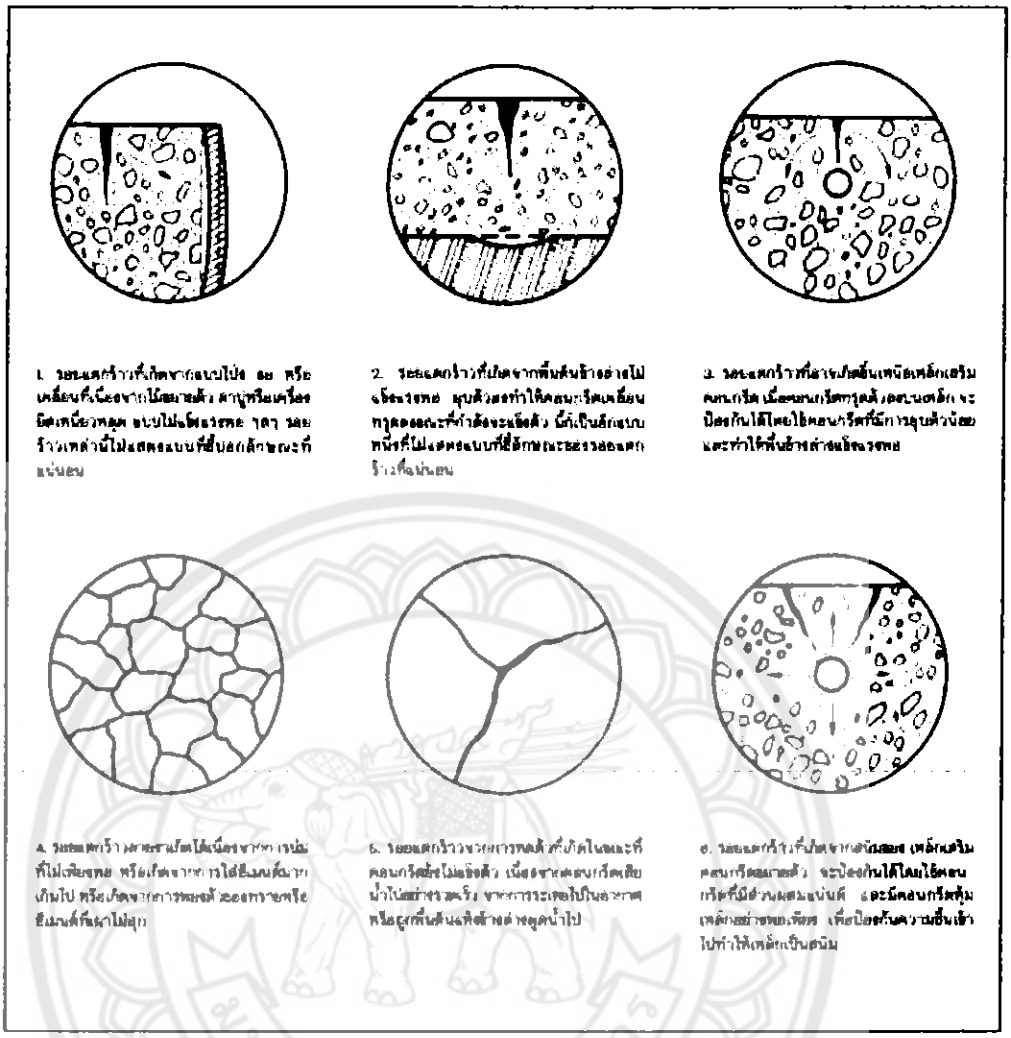
ค. ความร้อน

ง. อื่นๆ

ซึ่งการแตกร้าวพวกนี้สามารถจำแนกตามเวลาที่เกิดขึ้นได้ เป็นการแตกร้าวของคอนกรีตก่อน คอน**กรีตแข็งตัวและการแตกร้าวของคอนกรีตหลังจากคอนกรีตแข็งตัว โดยสรุปได้ดัง รูปที่ 2.3 และ** ตัว**อย่างการแตกร้าวด้วยสาเหตุต่างๆ แสดงไว้ดังรูปที่ 2.4**



รูปที่ 2.3 ชนิดของการแตกร้าวของคอนกรีต ก่อนคอนกรีตแข็งตัวและหลังคอนกรีตแข็งตัว



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการแตกร้าวด้วยสาเหตุต่างๆ

2.2.4 ปัจจัยที่ทำให้เกิดแตกร้าว

2.2.4.1 วัตถุดิบและสัดส่วนการผสมคอนกรีต ได้แก่

ก. วัสดุมวลรวม ได้แก่ หิน ทราย แร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบ รูปร่างลักษณะของผิวและส่วนคละของวัสดุมวลรวม มีผลต่อการออกแบบส่วนผสม สัมประสิทธิ์การนำความร้อน Drying Shrinkage Stiffness Creep และความแข็งแรงของคอนกรีต เช่น หินและทรายมีดินเหนียวปนอยู่ดินเหนียวจะหดตัวมากกว่าปูนซีเมนต์จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว

ข. น้ำ เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการผสมคอนกรีตเพราะถ้าใช้ปริมาณที่มากเกินความจำเป็น ก็มีแนวโน้มที่จะเกิดการแตกตัวได้มาก และยังทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำลงด้วย

ค. ปูนซีเมนต์ โดยทั่วไปคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์มากหรือเป็นปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณซิลิกาสูงหรือมีความละเอียดสูง เช่น ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ประเภท 3 มีโอกาสที่จะเกิดการแตกร้าวได้มาก

ง. น้ำยาผสมคอนกรีต น้ำยาบางชนิดอาจส่งผลต่อการแตกร้าวของคอนกรีตได้ เช่น น้ำยาเร่งการแข็งตัว แต่น้ำยาบางชนิดก็ช่วยลดการแตกร้าวได้เช่น น้ำยาหน่วงการก่อตัว

2.2.4.2 การเทคอนกรีต

อัตราการเทและสภาพการทำงานมีผลต่อการแตกร้าวอย่างแน่นอน ซึ่งมักเป็นผลมาจากการเยิ้มของคอนกรีตจะทำให้เกิดช่องว่างใต้หิน โดยเฉพาะส่วนที่อยู่ลึกๆ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการแตกร้าวภายในได้ รวมทั้งการแยกตัวของคอนกรีต อุณหภูมิภายนอก การทรุดตัวไม่เท่ากันของพื้นล่างหรือส่วนที่เป็นแบบรองรับคอนกรีต ก็สามารถทำให้เกิดการแตกร้าวเช่นกัน

2.2.4.3 สภาพการทำงาน

มีเป็นปัจจัยภายนอกที่เข้ามาเกี่ยวข้องในขณะทำงาน ดังนี้

ก. อุณหภูมิ (Temperature) ปกติอัตราการรับกำลังได้ของคอนกรีตจะแปรตามอุณหภูมิ อย่างไรก็ตามอิทธิพลที่สำคัญของอุณหภูมิที่มีต่อคอนกรีตคือ เมื่อคอนกรีตเย็นตัวลง จะหดตัว โดยเฉพาะงานคอนกรีตในอากาศร้อน และงานคอนกรีตปริมาณมากๆ (Mass Concrete) พื้นคอนกรีตที่หล่อขณะอากาศเย็นจะเกิดการแตกร้าวน้อยกว่าหล่อขณะอากาศร้อนลักษณะเช่นนี้ จะเกิดกับงานคอนกรีตสำหรับโครงสร้างอื่นๆด้วย เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้ การเทคอนกรีตปริมาณมากๆ จึงมักเทในเวลากลางคืน

ข. การสัมผัสกับอากาศรอบข้าง (Exposure) ลักษณะที่คอนกรีตสัมผัสอากาศมีอิทธิพลอย่างมากต่อการแตกร้าวของคอนกรีต อุณหภูมิและความชื้นที่ต่างกันมากในช่วงวัน เป็นผลทำให้เกิดการรั้งภายในคอนกรีตอย่างมาก (Internal Restraint) เพราะการยืดหดตัวของผิว และส่วนที่อยู่ภายในจะไม่เท่ากันทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้

2.2.4.4 การบ่มคอนกรีต (Curing)

ความชื้นในคอนกรีตเป็นสิ่งที่สำคัญมากไม่ว่าก่อนหรือหลังบ่ม สำหรับงานพื้นถ้าคอนกรีตแห้งเร็วเกินไป อัตราการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าคอนกรีต อาจจะเร็วกว่าอัตราการเยิ้ม (Bleeding) เมื่อเหตุการณ์เช่นนี้ เกิดขึ้น ผิวหน้าของคอนกรีตจะเกิดการหดตัว ทำให้เกิดการแตกร้าวขึ้น การป้องกันสามารถทำได้โดยทำให้แบบหล่อชุ่มน้ำหลีกเลี่ยงการเทคอนกรีตในช่วงที่มีอุณหภูมิสูง บ่มคอนกรีตทันทีที่ทำได้ พยายามป้องกันลมและแสงแดดขณะเทคอนกรีตเพื่อไม่ให้น้ำในคอนกรีตระเหยเร็วเกินไป

2.2.4.5 การยึดรั้งตัว (Restraint)

คอนกรีตที่ถูกยึดรั้งไว้ไม่สามารถเคลื่อนตัวได้ไม่ว่าจะเป็นการยึดรั้งจากฐานรากหรือโครงสร้างใกล้เคียงก็จะทำให้เกิดการแตกร้าวขึ้นได้ การเกิดรอยแตกในแนวดิ่งที่ฐานกำแพงของอาคารถือเป็นเรื่องปกติ ถ้ารอยแตกนั้นไม่ขยายต่อถึงด้านบน ดังนั้นจึงมักพบว่า กำแพงหรือพื้นยาวที่ไม่มีการตัด Joint มักจะเกิดรอยแตกขึ้นเป็นช่วงๆได้ ส่วนกำแพงที่หล่อติดเป็นชิ้นเดียวกันกับโครงสร้าง มีโอกาสที่จะแตกร้าวทั้งในแนวดิ่งและแนวราบ การยึดรั้งก็มักจะเกิดขึ้นเมื่อมีการทรุดที่ไม่เท่ากันของโครงสร้างและคอนกรีตที่เกิดการยึดรั้งภายในอาจเกิดขึ้นได้ถ้าเป็นโครงสร้างเดียวกัน แต่ใช้คอนกรีตที่มีส่วนผสมต่างกัน เช่น ใช้ปูนซีเมนต์ไม่เท่ากันหรือสัดส่วนของหิน-ทราย ที่ต่างกัน

2.3 มวลรวม

2.3.1 มวลรวมละเอียด

ทราย เป็นสสารแบบเม็ด ซึ่งเกิดจากหินชั้นที่แตกย่อยเป็นเม็ดละเอียด อาจเป็นการแตกของเปลือกหอยในทะเลและถูกน้ำซัดไปมาจนแตกละเอียด เรียกว่าทรายที่มีอยู่ตามชายทะเล บางแห่งขุดทรายได้จากในแม่น้ำ หรือจากบ่อทรายซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีทรายเป็นจำนวนมาก มนุษย์นำทรายไปใช้ในการก่อสร้าง เช่น ใช้ในการผสมคอนกรีต ใช้ผสมปูนขาวและปูนซีเมนต์ ทำปูนก่อ ปูนฉาบ เป็นต้น

2.3.1.1 ชนิดของทราย

ทรายเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โดยการแปรรูปหรือการกะเทาะแบ่งส่วนมาจากหินและกรวดทรายที่ขุดได้บนพื้นดินเรียกว่า ทรายบก ที่เกิดจากลำธารแม่น้ำ เรียกว่า ทรายแม่น้ำ ที่เกิดจากทะเลเรียกว่า ทรายน้ำเค็ม ทรายที่นิยมนำมาใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีตในงานก่อสร้างมี 2 ชนิดคือ ทรายบก และทรายแม่น้ำ

ก. ทรายบก เกิดจากหินทรายที่แตกแยกชำรุดออกมา เป็นเม็ดทรายละเอียดตามสภาพภูมิอากาศสิ่งแวดล้อม และจะฝังจมอยู่ในพื้นดินเป็นแห่งๆ ทรายชนิดนี้จะมีดินซากพืช และซากสัตว์ปะปนอยู่ด้วย ในการใช้งานจึงต้องนำทรายมาล้างแยกดินซากพืชและซากสัตว์ออกให้สะอาด การผลิตทรายบกแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ

ก.1 ผลิตโดยการเปิดหน้าดินด้วยรถตักดินจนถึงระดับน้ำใต้ดินจนมีสภาพเป็นแอ่งน้ำขนาดใหญ่แล้วจึงนำเรือมาดูด หรือใช้รถตักทรายขึ้นมาผ่านตะแกรงเพื่อแยกกรวดออก

ก.2 ผลิตโดยการใช้เครื่องจักรในการผลิตทราย โดยอาศัยการเปิดหน้าดินเหมือนวิธีแรก หลังจากนั้นจะผ่านขั้นตอนและเครื่องจักรต่างๆ

ข. ทรายแม่น้ำ ทรายชนิดนี้มีอยู่ทั่วไปในที่ราบลุ่มของแม่น้ำเกิดจากกระแสน้ำได้พัดพาทรายจากที่ต่างๆ มาตกตะกอนรวมกันในแหล่งที่ราบลุ่ม เป็นทรายที่นิยมนำไปใช้ในการก่อสร้าง เพราะเป็นทรายที่สะอาด เม็ดมีเหลี่ยมมีมุมขนาดต่างๆกันเมื่อผ่านตะแกรงร่อนแล้วนำไปใช้ในการก่อสร้าง เช่น งานโครงสร้าง งานปูนฉาบ ปูนก่อ ส่วนทรายแม่น้ำที่มีส่วนผสมของสารอินทรีย์มาก มีสีดำปนสีน้ำตาลเข้ม ใช้ในการก่อสร้างไม่ได้ แต่นิยมนำมาใช้โรยบนหน้าดินก่อนทำสนามหญ้าและใช้ถมที่ดินเพราะมีราคาถูก เรียกว่า ทรายขี้เป็ด

รูปที่ 2.5 ทรายบกและทรายแม่น้ำ (ที่มา : www.homearound.blogspot.com)

2.3.1.2 ขนาดของทราย

ทรายในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง คือวัตถุผสมละเอียดที่มีขนาดผ่านตะแกรงร่อน 4.75 มิลลิเมตร เม็ดทรายมีลักษณะแข็งแกร่ง ทนทาน มีเหลี่ยมคม ไม่ขยายตัวมาก มีสารประกอบอื่นเจือปนอยู่น้อยโดยทรายที่ใช้ผสมปูนซีเมนต์จะเรียกว่าวัสดุผสมละเอียดมีขนาด 0.5 - 4.75 มิลลิเมตร

ก. ทรายละเอียด มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 - 1.5 มิลลิเมตร ใช้งานในปูนก่อ ปูนฉาบ ปูนถือ

ข. ทรายกลาง มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.0 - 3.0 มิลลิเมตร ใช้ในงานคอนกรีต ปูนก่อที่ต้องรับแรงอัด ปูนฉาบผนังใต้ดิน พื้น คาน ไม่นิยมใช้ในการผสมคอนกรีตที่รับน้ำหนักมากมีสีอ่อนกว่าทรายหยาบ

ค. ทรายหยาบ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2-4.75 มิลลิเมตร ใช้ในการผสมคอนกรีตทั่วไปที่ต้องการรับน้ำหนักมาก งานคอนกรีตเทพื้น ฐานราก และงานที่ต้องการแรงอัดมาก

2.3.1.3 คุณสมบัติของทราย

ก. ทรายแทรกเข้าไปในช่องว่างของหินในการผสมคอนกรีตทำให้เนื้อคอนกรีต

ข. ทรายช่วยลดการแตกร้าวของปูนฉาบ

ค. ทรายช่วยเพิ่มปริมาณส่วนผสมในคอนกรีต ทำให้ราคา ปูนก่อปูนฉาบ และคอนกรีตถูกลง

2.3.1.4 การเก็บรักษาทราย

ทรายเมื่อถูกดูดขึ้นมาจากแม่น้ำ หรือบ่อทราย นำขึ้นผ่านสายพานลำเลียงใส่รถบรรทุกที่รอรับเพื่อนำไปจำหน่าย ส่วนที่ยังไม่ได้จำหน่ายต้องกองไว้ในบริเวณที่แห้ง

รูปที่ 2.6 การเก็บรักษาทราย (ที่มา : www.stock-clip.com)

2.3.1.5 ขนาดคละของรวมละเอียดที่ใช้ในการผสมคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 2.7

Table 3.22 BS and ASTM Grading Requirements for Fine Aggregate

		Percentage by mass passing sieves				
Sieve size		*BS 882 : 1992*				*ASTM C 33 93*
BS	*ASTM No.*	*Overall grading*	*Coarse grading*	*Medium grading*	*Fine grading*	
10.0 mm	$\frac{3}{8}$ in	100				100
5.0 mm	$\frac{3}{16}$ in	89 100				95 100
2.36 mm	8	60-100	60-100	65 100	80 100	80 100
1.18 mm	16	30 100	30 90	45 100	70 100	50 85
600 μm	30	15 100	15 54	25 80	55 100	25 60
300 μm	50	5 70	5 40	5-48	5-70	10-30
150 μm	100	0-15*				2 10

*For crushed stone fine aggregate, the permissible limit is increased to 20 per cent except for heavy duty floors.

รูปที่ 2.7 ขนาดคละของมวลรวมละเอียดที่ใช้ในการผสมคอนกรีต

2.3.2 มวลรวมหยาบ

ข้อกำหนดนี้ประกอบด้วยการควบคุมคุณภาพและขนาดคละของมวลรวมหยาบ สำหรับผสมคอนกรีตในงานก่อสร้างทั่วไป เช่น ถนนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต , สะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นต้น ทั้งนี้ ไม่รวมถึงงานคอนกรีตพิเศษซึ่งมีข้อกำหนดเฉพาะงาน

2.3.2.1 วัสดุ มวลรวมหยาบที่ใช้กันทั่วไปในงานคอนกรีต คือ หินย่อย , กรวดและกรวดย่อย หรือวัสดุอื่นใดที่นายช่างผู้ควบคุมงานพิจารณาแล้วให้ใช้ต้องเป็นวัสดุที่มีเม็ดแข็ง ทนทาน ไม่ผุ ไม่มีลักษณะแบนหรือยาวมากเกินไป สะอาดไม่มีฝุ่นผง หรือสิ่งอื่นใดเคลือบผิว ปราศจากสิ่งไม่พึงประสงค์ต่าง ๆ จากแหล่งที่ได้รับความเห็นชอบจากนายช่างผู้ควบคุมงานแล้ว ในกรณีที่ไม่ได้ระบุคุณสมบัติไว้ในแบบเป็นอย่างอื่น วัสดุที่ใช้ทำมวลรวมหยาบสำหรับผสมคอนกรีตจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

ก. เป็นวัสดุที่มีเนื้อแข็ง เหนียว ไม่ผุ สะอาด และปราศจากวัสดุอื่นเจือปน

ข. ไม่เป็นวัสดุเนื้อหยาบและเนื้อพรุน

ค. ต้องไม่มีวัสดุไม่พึงประสงค์อื่นใดเจือปนอยู่เกินกว่าปริมาณที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2.1

วัสดุไม่พึงประสงค์	ร้อยละโดยมวล	วิธีการทดลอง
ส่วนที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มม. (เบอร์ 200)	1.0	AASHTO T 11 หรือเทียบเท่าตามที่กรมทางหลวงกำหนดขึ้น
ก้อนดินเหนียวและวัสดุที่แตกร่วนง่าย	3.0	AASHTO T 112 หรือเทียบเท่าตามที่กรมทางหลวงกำหนดขึ้น
ถ่านหินและลิกไนต์	0.5	AASHTO T 113 หรือเทียบเท่าตามที่กรมทางหลวงกำหนดขึ้น

ตารางที่ 2.1 ปริมาณสูงสุดของวัสดุไม่พึงประสงค์ในมวลรวมหยาบ

ฉ. มีขนาดคละเมื่อทดลองตามวิธีการทดลอง วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง" ให้เป็นไปตามตารางที่ 2.1 ส่วนขนาดใหญ่สุดของมวลรวมที่ใช้ ถ้าไม่ได้ระบุไว้ในแบบ ควรมีขนาดไม่เกิน 1 ใน 5 ของส่วนที่บางสุดของโครงสร้างและต้องไม่เกิน 3 ใน 4 ของช่องว่างระหว่างเหล็กเสริม ทั้งนี้ โดยต้องได้รับความเห็นชอบจากนายช่างผู้ควบคุมงานก่อน

2.3.2.2 ขนาดคละของมวลรวมหยาบที่ใช้ในการผสมคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 2.8

Table 3.25 Grading Requirements for Coarse Aggregate According to ASTM C 33-93

Sieve size		*Percentage by mass passing sieves*				
		Nominal size of graded aggregate			*Nominal size of single sized aggregate*	
mm	*in.*	*37.5 to 4.75 mm 1½ in. to #4*	*19.0 to 4.75 mm ¾ in. to #4*	*12.5 to 4.75 mm ½ in. to #4*	*63 mm 2½ in.*	*37.5 mm 1½ in.*
75	3				100	—
63.0	2½				90 100	
50.0	2	100			35 70	100
38.1	1½	95-100			0 15	90 100
25.0	1	—	100			20 55
19.0	¾	35 70	90-100	100	0-5	0 15
12.5	½			90 100	—	
9.5	⅜	10 30	20 55	40 70		0-5
4.75	#4	0 5	0 10	0 15		
2.36	No. 8	—	0 5	0-5		—

รูปที่ 2.8 ขนาดคละของมวลรวมหยาบที่ใช้ในการผสมคอนกรีต

2.3.2.3 การกองวัสดุ

การกองวัสดุมวลรวมหยาบจากแหล่งเมื่อผ่านการทดสอบคุณภาพว่าใช้ได้แล้ว และเตรียมที่จะนำมาใช้งานผสมคอนกรีต จะต้องป้องกันมิให้วัสดุอื่นมาปะปน ห้ามกองไว้บนหลังทาง วัสดุต่างชนิดต่างแหล่งและขนาด ห้ามนำมาผสมกันกองเดียว หรือใช้ร่วมกันในงานก่อสร้างที่ดำเนินการอย่างต่อเนื่องโดยไม่ได้รับอนุญาตจากนายช่างผู้ควบคุมงานก่อน ถ้าวัสดุนั้นเกิดการแยกตัวก็ให้คลุกเคล้าให้เข้ากันใหม่ และถ้าไม่สะอาดให้ล้างก่อนนำไปใช้งานบริเวณที่เตรียมไวกองวัสดุ จะต้องได้รับความเห็นชอบจากนายช่างผู้ควบคุมงานก่อน ต้นไม้พุ่มไม้ตอไม้ ไม้ ผุ ขยะ วัชพืช และสิ่งไม่พึงประสงค์ต่างๆ จะต้องกำจัดออกไปให้พ้นบริเวณถ้าผลการทดสอบคุณภาพของตัวอย่างมวลรวมหยาบจากกองวัสดุ ไม่ได้ตามข้อกำหนดไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ผู้รับจ้างจะต้องเปลี่ยนหรือปรับปรุงแก้ไขจนได้คุณภาพถูกต้อง ทั้งนี้ เป็นไปตามดุลยพินิจของนายช่างผู้ควบคุมงาน โดยที่ค่าใช้จ่ายต่างๆ เป็นภาระของผู้รับจ้างทั้งสิ้น

2.3.2.4 หนังสืออ้างอิง

The American Association of State Highway Officials. Standard Specification for Highway Materials and Methods of Sampling and Testing, Part 1, AASHTO Designation: M80-87 (1995).

The American Society for Testing and Materials. ASTM Designation: C33-99.

2.4 การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต (Mix Design)

2.4.1 หลักการในการออกแบบส่วนผสม

เป้าหมายหลักของการหาสัดส่วนผสมของคอนกรีตหรือการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต มีด้วยกัน 2 ประการคือ

2.4.1.1 เพื่อเลือกวัสดุผสมคอนกรีตที่เหมาะสมอันได้แก่ ปูนซีเมนต์ หิน ทราย น้ำ น้ำยาผสมคอนกรีต ให้เป็นไปตามข้อกำหนดและวัตถุประสงค์ของการใช้งาน

2.4.1.2 คำนวณหาสัดส่วนผสมของวัสดุผสม เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติเหมาะสมตามข้อกำหนดและการใช้งานทั้งในสภาพคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ในราคาที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้บรรลุเป้าหมายข้างต้นผู้ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆ ต่อไปนี้

ก. การหาได้ของวัสดุผสมคอนกรีต

ข. การผันแปรในคุณสมบัติของวัสดุผสม

ค. ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนผสมกับธรรมชาติของวัสดุผสม

ง. การผันแปรของคุณสมบัติที่ต้องการในสภาพการใช้งาน

2.4.2 ปัจจัยที่ควรพิจารณาในการออกแบบ

การออกแบบและเลือกใช้คอนกรีตให้เหมาะสมกับงานก่อสร้างนั้นที่จะต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆซึ่งอาจจะกระทบต่อการเลือกใช้คอนกรีตประเภทนั้นๆ โดยสามารถแยกพิจารณาได้เป็น 2 ประเภทคือ

2.4.2.1 ปัจจัยด้านเทคนิค

วิศวกรผู้ออกแบบต้องพิจารณาปัจจัยด้านเทคนิคซึ่งแบ่งตามสภาพของคอนกรีตได้เป็น 2 ประเภทคือ

ก. สภาพที่คอนกรีตยังเหลวอยู่ ปัจจัยที่ต้องพิจารณา 2 ประการคือ

ก.1 ความสามารถเทได้ โดยผู้ออกแบบควรเลือกคอนกรีตสดที่มีคุณสมบัติดังนี้

ก.1.1 มีความเหลวเพียงพอต่อการใช้งาน คือ คอนกรีตสามารถไหลลื่นเข้าไปเต็มทุกๆส่วนของแบบหล่อ

ก.1.2 ต้องไม่แยกตัวระหว่างการขนย้ายหรือการเท

ก.1.3 ต้องสามารถอัดตัวแน่นในแบบหล่อได้อย่างดี วิธีการใช้วัดความสามารถเทได้ของคอนกรีตที่ใช้กันแพร่หลาย คือ การวัดค่ายุบตัว ตัวอย่างค่ายุบตัวที่เหมาะสมกับงานก่อสร้างทั่วๆไปในประเทศไทย ดังตารางที่ 2.2

งานก่อสร้าง	ค่ายุบตัว
โครงสร้างทั่วไป	7.5±2.5
เสาหรือผนังบาง	10.0 ± 2.5
งานที่เทด้วยคอนกรีตปั๊ม	10.0 ± 2.5
เสาเข็มเจาะขนาดใหญ่	มากกว่า 15.0
โครงสร้างที่มีเหล็กเสริมหนาแน่น	มากกว่า 15.0

ตารางที่ 2.2 ค่ายุบตัวที่เหมาะสมกับงานก่อสร้างประเภทต่างๆ

ก.2 การอยู่ตัว หมายถึง คอนกรีตจะคงความสม่ำเสมอของเนื้อคอนกรีตตลอดการใช้งาน โดยไม่เกิดการแยกตัวและไม่เกิดการเยิ้มในปัจจุบันยังไม่มีเครื่องมือหรืออุปกรณ์ในการวัดการอยู่ตัว โดยทั่วไปจะใช้การสังเกตเป็นหลัก

ข. สภาพที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว ปัจจัยที่ผู้ออกแบบต้องพิจารณาที่สำคัญ 2 ประการคือ

ข.1 กำลัง

ข.2 ความทนทาน

นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยที่สำคัญรองลงมาอีก 2 ประการคือ

ข.3 การเปลี่ยนแปลงที่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักบรรทุก

ข.4 การเปลี่ยนแปลงที่ไม่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักบรรทุก

โดยทั่วไป กำลังเป็นคุณสมบัติที่สำคัญและคุณภาพของคอนกรีตก็จะพิจารณาจากกำลังอัด ในหลายๆกรณี คุณสมบัติอื่นๆอาจมีความสำคัญมากกว่า เช่น คอนกรีตสำหรับโครงสร้างที่ต้องป้องกันน้ำ หรือถังเก็บน้ำ จำเป็นต้องมีคุณสมบัติสำคัญ คือ มีการซึมผ่านของน้ำและอากาศต่ำและมีการหดตัวต่ำ การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์เพื่อเพิ่มกำลังอัดจะส่งผลให้เกิดการหดตัวมาก ซึ่งมีผลเสียอย่างมากต่อคุณสมบัติด้านความทนทาน และการซึมผ่านของน้ำ

2.4.2.2 ปัจจัยด้านราคา

นอกจากปัจจัยด้านเทคนิคแล้วผู้ออกแบบจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาปัจจัยด้านราคาด้วยซึ่งไม่ใช่ค่าเฉพาะวัสดุแต่รวมไปถึงค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวกับกองเก็บวัตถุดิบ การชั่งตวง การผสม การลำเลียง ค่าใช้จ่ายในการเท และการทำให้คอนกรีตแน่น รวมไปถึงค่าควบคุมงานคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังนี้

ก.1 วัสดุ

ก.1.1 วัสดุองค์ประกอบ คอนกรีตประกอบด้วย หิน ทราย ซีเมนต์ น้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีต หรืออาจมีวัสดุเพิ่มมาช่วยปรับปรุงให้คอนกรีตมีคุณสมบัติดีขึ้น ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับราคาที่ผู้ออกแบบต้องคำนึงถึงได้แก่

ก.1.1.1 การหาได้ของวัสดุพื้นฐาน ผู้ออกแบบจ้าเป็นต้องศึกษาหาข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุพื้นฐานในภูมิภาคนั้นๆว่าหาได้หรือไม่ เพราะถ้าจำเป็นต้องหาแหล่งอื่นค่าใช้จ่ายโดยรวมอาจจะสูงมาก

ก.1.1.2 การผันแปรของคุณภาพวัสดุ วัตถุดิบที่มีความผันแปรของคุณภาพมาก เมื่อนำมาใช้ผสมเป็นคอนกรีต จะก่อให้เกิดต้นทุนการควบคุมที่สูง เพื่อที่จะให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพตามข้อกำหนด

ก.1.2 สัดส่วนผสม วัสดุพื้นฐานต่างๆที่กล่าวมาข้างต้น จะส่งผลต่อราคาของคอนกรีต ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ

ก.1.2.1 ลักษณะทั่วไปของวัสดุผสม วัสดุผสมที่มีลักษณะแตกต่างกันจะส่งผลต่อสัดส่วนเพื่อให้ได้คุณสมบัติของคอนกรีตตามต้องการ เช่น หินที่มีรูปร่างกลมมนจะใช้ปริมาณน้ำน้อยกว่าหินที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมหรือที่มีลักษณะแบน หรือทรายที่มีความละเอียดจะใช้ปริมาณน้ำที่มากกว่าทรายหยาบ เมื่อต้องการคอนกรีตที่มีความสามารถเทได้เท่าๆกัน

ก.1.2.2 ชนิดของโครงสร้าง โครงสร้างคอนกรีตที่มีความสำคัญมากๆ เช่น เขื่อนหรือผนังห้องปฏิกรณ์ปรมาณู การออกแบบจำเป็นต้องใช้คอนกรีตที่มีส่วนเผื่อมากกว่าคอนกรีตโครงสร้างทั่วไปๆ ไปหรือโครงสร้างคอนกรีตสำหรับบ่อบำบัดน้ำเสีย ผู้ออกแบบจำเป็นต้องเลือกใช้ส่วนผสมคอนกรีตที่มีปริมาณและชนิดของซีเมนต์ที่แตกต่างจากโครงสร้างทั่วๆไป เพื่อให้ได้ความทนทานที่สูง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อราคาคอนกรีต เป็นต้น

ก.2 วิธีการทำงาน ขบวนการลำเลียงวัตถุดิบ วิธีการผสม การลำเลียงคอนกรีตสู่สถานที่เทรวมถึงการทำให้คอนกรีตอัดแน่น ล้วนแต่กระทบต้นทุนของคอนกรีต ที่ผู้ออกแบบต้องนำมาพิจารณา

ก.3 การควบคุมงานคอนกรีต ต้นทุนการควบคุมงานคอนกรีตนี้รวมตั้งแต่ต้นทุนการควบคุมคุณภาพคอนกรีต ณ หน่วยงานก่อสร้าง จนเริ่มใช้งานโครงสร้างนั้น

2.4.3 ความสัมพันธ์ที่มีประโยชน์ในการออกแบบ

2.4.3.1 กำลังอัดและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

2.4.3.2 คุณสมบัติของมวลรวมกับปริมาณน้ำ และความสามารถเทได้ของคอนกรีต มีดังนี้

ก. รูปร่างและลักษณะผิว

ข. ขนาดและส่วนคละ

ข.1 ขนาดคละของมวลรวม

ข.2 ขนาดใหญ่สุดของมวลรวม

ข.3 อัตราส่วนของมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบ

ค.ปริมาณความชื้น

ค.1 การดูดซึมของน้ำและความชื้นที่ผิว

ค.2 การเพิ่มขึ้นของปริมาตรของทราย

ง. ความถ่วงจำเพาะ

จ. หน่วยน้ำหนักและช่องว่าง ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดและส่วนคละของมวลรวม

2.4.3.3 ความสามารถเทได้และปริมาณน้ำ

ความสามารถเทได้ของคอนกรีตจะมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณน้ำในส่วนผสม กล่าวคือ ความสามารถเทได้ของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น แต่ความสัมพันธ์นี้ จะเปลี่ยนแปลงไปบ้าง เมื่อคุณสมบัติของวัสดุผสมเปลี่ยนแปลงไปรวม
ทั้งจะเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการใช้วัสดุผสมพิเศษอื่นๆ ด้วย

2.4.3.4 ต้นทุนและประสิทธิภาพการใช้งาน

เป้าหมายที่สำคัญที่สุดของการหาสัดส่วนผสมคอนกรีตก็เพื่อจะให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติเหมาะสมตามข้อกำหนดและการใช้งาน ในราคาที่ถูกที่สุด โดยทั่วไปข้อกำหนดของงานคอนกรีต สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ

ก.1 ค่ายุบตัวมาตรฐาน

ก.2 ค่ากำลังอัดทั่วๆไป

ก.3 ความทนทานทั่วๆไป

การที่จะให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติดังกล่าว ทำได้โดยกำหนดสัดส่วนผสมที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ที่สุดและใช้อัตราส่วนน้ำเป็น

ข. การกำหนดคุณสมบัติพิเศษ

ข.1 มีความสามารถเทได้สูงมากๆ

ข.2 เกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันไม่สูงมาก

ข.3 กำลังอัดสูง หรือกำลังอัดสูงในเวลารวดเร็ว

ข.4 ความทนทานพิเศษต่างๆ เช่น ทนต่อซัลเฟต เป็นต้น

คอนกรีตพวกนี้ อาจจำเป็นต้องใช้วัสดุพิเศษประเภทอื่นๆ เป็นส่วนผสมด้วย เช่น

- ปูนซีเมนต์และวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ เช่น ปูนปอร์ตแลนด์ ประเภท 3, ปูนปอร์ตแลนด์ต้านทานซัลเฟต(ประเภท 5) ,PFA ,GGBS ,MS

- สารผสมเพิ่ม เช่น สารเร่งหรือหน่วงการก่อตัว, สารลดน้ำหรือสารลดน้ำจำนวนมาก, สารกักกระจายฟองอากาศ

- มวลรวมพิเศษ เช่น มวลรวมหนัก, มวลรวมเบา, มวลรวมที่มีการหดตัวน้อย

2.4.4 ประเภทของสัดส่วนผสมคอนกรีต

2.4.4.1 สัดส่วนผสมโดยปริมาตร

ผู้ออกแบบจะกำหนดอัตราส่วนโดยปริมาตรของปูนซีเมนต์ทราย หิน เช่น 1:2:4 คือใช้ปูน 1 ส่วน ทราย 2 ส่วน และหิน 4 ส่วนโดยปริมาตร วิธีการนี้เหมาะสำหรับงานก่อสร้างขนาดเล็กๆ เท่านั้น

2.4.4.2 Prescribed Mix

วิศวกรผู้ออกแบบโครงสร้างหรือผู้รับเหมาจะกำหนดสัดส่วนผสมสำหรับโครงการก่อสร้างหนึ่งๆ รวมทั้งรับผิดชอบว่าสัดส่วนผสมนี้ จะสามารถผลิตเป็นคอนกรีตที่มีคุณสมบัติตามต้องการ

2.4.4.3 Designed Mix

ผู้ผลิตคอนกรีต เช่น ผู้ผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ จะเป็นผู้กำหนดสัดส่วนผสมเพื่อให้ตรงกับความต้องการตามข้อกำหนดรวมทั้งต้องรับผิดชอบต่อสัดส่วนผสมนี้ว่าเป็นไปตามความต้องการ

2.4.4.4 สัดส่วนผสมตามมาตรฐาน (Standard Mix)

ผู้ผลิตคอนกรีตคอนกรีตผสมเสร็จที่ผลิตและเก็บรวบรวมคุณสมบัติของคอนกรีตมาเป็นเวลานาน จนได้ข้อมูลมากำหนดเป็นสัดส่วนผสมมาตรฐาน

2.4.5 การออกแบบส่วนผสมโดยปริมาตร

สำหรับงานก่อสร้างขนาดเล็ก ส่วนใหญ่จะกำหนดสัดส่วนโดยปริมาตร เช่น 1:2:4 อัตราส่วนที่กล่าวถึงนี้ คือ ใช้ปูนซีเมนต์ 1 ส่วน ทราย 2 ส่วน 4 หิน 4 ส่วน โดยปริมาตร การที่จะแปลงส่วนผสมโดยปริมาตรดังกล่าวให้เป็นส่วนผสมโดยน้ำหนักสามารถทำได้ดังนี้

ตัวอย่าง การคำนวณการออกแบบผสมคอนกรีตใน 1 ลบ.ม.

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ – หน่วยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ = 1400 กก./ลบ.ม.

-หน่วยน้ำหนักของหินทราย = 1450 กก./ลบ.ม.

การคำนวณ - ปูน 1 ถุง 50 กก. มีปริมาตร = 50/1400 = 0.036 ลบ.ม.

- ทราย 2 ส่วน มีปริมาตร = 0.036 x 2 = 0.072 ลบ.ม.

- น้ำหนักทราย = 0.072 x 1450 = 104 กก.

- หิน 4 ส่วน มีปริมาตร = 0.036 x 4 = 0.144 ลบ.ม

วิธีการคำนวณ น้ำหนักหิน = 0.144 x 1450 = 209 กก.
ปริมาตรน้ำที่ใช้โดยทั่วไปสำหรับปูน 1 ถุง เพื่อให้ได้ค่ายุบตัวประมาณ 10 ซม. เท่ากับ 30 ลิตร
น้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมดเมื่อใช้ปูน 1 ถุง = 50 + 104 + 209 + 30 = 393 กก.
หน่วยน้ำหนักคอนกรีต 1 ลบ.ม. = 2400 กก.
ต้องใช้ปริมาณปูน = 2400/393 = 6.1 ถุง = 305 กก./ลบ.ม.

บทที่ 3
วิธีดำเนินโครงงาน

บทนี้กล่าวถึงวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในโครงงาน รวมถึงการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุประสาน มวลรวม และคุณสมบัติของคอนกรีต ตามมาตรฐานต่างๆ โดยคุณสมบัติของคอนกรีตที่ทำการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ สภาพคอนกรีตสด (คอนกรีตยังไม่แข็งตัว) คุณสมบัติที่ศึกษา ได้แก่ การยุบตัว และระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต โดยใช้ค่าระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายและเพิ่มอีก 2 ชั่วโมง เป็นจุดเริ่มต้นของการวัดค่าการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต และสภาพคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว คุณสมบัติที่ศึกษา ได้แก่ ดัชนีการพัฒนากำลัง (Strength Activity Index) การหดตัวแบบออโตจีนัส และการหดตัวแบบแห้ง หรือการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต ซึ่งการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตเป็นการหดตัวที่เกิดจากการสูญเสียความชื้นออกสู่สิ่งแวดล้อม แต่การหดตัวแบบแห้งไม่สามารถทำการวัดได้โดยตรง เนื่องจากตัวอย่างที่ไม่มีการห่อหุ้ม ซึ่งใช้วัดการหดตัวทั่วไปยังคงมีการหดตัวแบบออโตจีนัสเกิดขึ้นได้ ทำให้ค่าที่วัดได้จากตัวอย่างที่ไม่ห่อหุ้ม เป็นการหดตัวโดยรวม (Total Shrinkage) คือ มีทั้งการหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้งรวมกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของการหดตัวโดยรวม และการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต โดยทำการวัดตั้งแต่ถอดแบบ จนกระทั่งค่าการหดตัวของตัวอย่างมีค่าคงที่ โดยมีปัจจัยที่ศึกษาในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1) การศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของคอนกรีต
2) การศึกษาแนวทางในการลดการหดตัวของคอนกรีต

การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของคอนกรีต แบ่งออกเป็น 4 ปัจจัย ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน สารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารลดน้ำพิเศษ อัตราส่วนปริมาตรของเพสต์ต่อปริมาตรของช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น ขนาดคละมวลรวมหยาบตามมาตรฐานต่างๆ ตามลำดับ

การศึกษาแนวทางการลดการหดตัวของคอนกรีต แบ่งออกเป็น 3 ปัจจัย ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ซึ่งใช้ศึกษากรณีของคอนกรีตกำลังอัดสูง (w/b = 0.35) และคอนกรีตกำลังอัดปกติ (w/b = 0.55) ชนิดของมวลรวมละเอียดประกอบด้วย ทรายแม่น้ำ ศึกษาอัตราส่วนของมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมด คือ) (sa = 42) ซึ่งผสมกันตามมาตรฐานต่างๆดังนี้

ปริมาตรของช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.4 เท่ากันทุกส่วนผสม งานวิจัยนี้มุ่งเน้นวัสดุมวลรวมหยาบ 4 ชนิด ได้แก่ หินปูน หินบะซอลล์ หินแกรนิต หินกรวด เป็นส่วนผสมที่มีความสำคัญของการศึกษาแนวทางในการลดการหดตัวของคอนกรีต เพื่อใช้เป็นสัดส่วนผสมต้นแบบสำหรับแก้ไขปัญหาการแตกร้าว เนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต

3.1 วัสดุที่ใช้ในโครงงาน

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในโครงงาน

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย แบ่งออกเป็น 4 ประเภท ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ สารผสมเพิ่ม มวลรวม ได้แก่ มวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบ โดยใช้มวลรวมหยาบ ที่ต่างชนิดกันตามมาตรฐานต่างๆศึกษาผลต่อการหดตัวของคอนกรีต โดยมีสารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษ เพื่อใช้ศึกษาผลต่อการหดตัวของคอนกรีต และน้ำ ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัย คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ตราช้างแดง ผลิตโดย บริษัทปูนซีเมนต์ไทย (ลำปาง) จำกัด และจัดจำหน่ายโดย บริษัทเอสซีจีซีเมนต์ จำกัด ค่าความถ่วงจาเพาะของปูนซีเมนต์เท่ากับ 3.11

2) มวลรวม

มวลรวมที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย 2 ชนิด ได้แก่ มวลรวมหยาบ มวลรวมละเอียด โดยศึกษาขนาดคละมวลรวมหยาบชนิดต่างๆ 4 ชนิด ต่อการหดตัวของคอนกรีต เพื่อศึกษาหาแนวทางในการลดการหดตัวของคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังนี้

- มวลรวมหยาบ

มวลรวมหยาบที่ใช้ในการทดสอบมี 4 ชนิด ดังนี้

หินปูน (Limestone) แหล่งผลิตอยู่ที่ อำเภอปากช่อง จังหวัดสระบุรี ขนาดโตสุดของหินที่ใช้เท่ากับ 3/8, 3/4 และ 1 นิ้ว หาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบมาตรฐาน ASTM C127 หน่วยน้ำหนักตามมาตรฐาน ASTM C29 โดยมีองค์ประกอบทางกายภาพของมวลรวมหยาบ ขนาดคละของมวลรวมหยาบ ตามมาตรฐาน ASTM C136

หินแกรนิต (Granite) แหล่งผลิตอยู่ที่ จังหวัดตาก ขนาดโตสุดของหินที่ใช้เท่ากับ 3/8, 3/4 และ 1 นิ้ว หาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบมาตรฐาน ASTM C127 หน่วยน้ำหนักตามมาตรฐาน ASTM C29 โดยมีองค์ประกอบทางกายภาพของมวลรวมหยาบ ขนาดคละของมวลรวมหยาบ ตามมาตรฐาน ASTM C136

หินบะซอลต์ (Basalt stone) แหล่งผลิตอยู่ที่ อำเภอเมืองบุรีรัมย์ จังหวัดบุรีรัมย์ ขนาดโตสุดของหินที่ใช้เท่ากับ 3/8,3/4 และ 1 นิ้ว หาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบมาตรฐาน ASTM C127 หน่วยน้ำหนักตามมาตรฐาน ASTM C29 โดยมีองค์ประกอบทางกายภาพของมวลรวมหยาบ ขนาดคละของมวลรวมหยาบ ตามมาตรฐาน ASTM C136

หินกรวดแม่น้ำ (Gravel) แหล่งผลิตอยู่ที่ แม่น้ำโขง จังหวัดหนองคาย ขนาดโตสุดของหินที่ใช้เท่ากับ 3/8,3/4 และ 1 นิ้ว หาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบมาตรฐาน ASTM C127 หน่วยน้ำหนักตามมาตรฐาน ASTM C29 โดยมีองค์ประกอบทางกายภาพของมวลรวมหยาบ ขนาดคละของมวลรวมหยาบ ตามมาตรฐาน ASTM C136

- มวลรวมละเอียด

มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการทดสอบ คือ ทรายแม่น้ำ แหล่งผลิตอยู่ที่ แม่น้ำโขง จังหวัดหนองคาย โดยโครงงานนี้ใช้ทราย 1 ประเภท ได้แก่ ทรายทั่วไป (General Sand) มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร หรือร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 แต่ไม่เล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200)

3) น้ำ

ใช้น้ำสะอาด ซึ่งเป็นน้ำประปาภายในมหาวิทยาลัยนเรศวร มีค่าความเป็นกรด – ด่าง (pH) เท่ากับ 6.83 ที่อุณหภูมิ 26 ± 1 °C และงานวิจัยนี้ควบคุมอุณหภูมิของน้ำที่ผสมคอนกรีตที่ 23 ± 2 °C ทุกสัดส่วนผสม

4) สารเคมีผสมเพิ่ม

สารลดปริมาณน้ำ (WATER REDUCING ADMIXTURE หรือ Plasticizers) ช่วยลดปริมาณน้ำที่ต้องใช้ในส่วนผสมคอนกรีต แต่ยังได้ความข้นเหลวเทียบเท่ากับคอนกรีตธรรมดา เมื่อใช้น้ำในส่วนผสมคอนกรีตน้อยลง (อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์น้อยลง) จะมีผลในการเพิ่มกำลังของคอนกรีต สารชนิดนี้เป็นสารอินทรีย์ ส่วนใหญ่ทำมาจากเกลือลิกโนซัลโฟนิค (Lignosulfonic acid) หรือเกลือและสารประกอบของกรดไฮดรอกซี่คาร์บอซีลิค (Hydroxycarboxylic Acid) หรือสารประกอบโพลีเมอร์บางชนิด เช่น โพลิเมอร์ ไฮดรอกซีเลต (Hydroxylated Polymers)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- ตะแกรงร่อนมาตรฐานของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด
- ชุดทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์
- ชุดทดสอบหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต
- ชุดทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต
- เครื่องทดสอบกาลังอัด (Compression Tenting Machine)
- เครื่องผสมมอร์ต้า
- เครื่องผสมคอนกรีต
- โต๊ะเขย่าไล่อากาศ
- แบบหล่อปริซึมขนาด 7.5 x 7.5 x 28.5 เซนติเมตร
- แบบหล่อลูกบาศก์ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร
- เครื่องวัดการหดตัวของคอนกรีต
- เครื่องชั่งน้าหนัก
- ถังบ่มคอนกรีต
-ห้องปรับอุณหภูมิและความชื้นได้

3.3 ปัจจัยที่ทำการศึกษา

ปัจจัยที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1) การศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของคอนกรีต

2) การศึกษาแนวทางในการลดการหดตัวของคอนกรีต

โดยโครงงานนี้ศึกษาการหดตัวของคอนกรีต 2 วิธี คือ การหดตัวแบบออโตจีนัส และการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต โดยมีรายละเอียดการอ่านสัญลักษณ์และปัจจัยที่ทำการศึกษาในงานวิจัยดังต่อไปนี้

3.3.1 สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

สัญลักษณ์และตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย มีดังต่อไปนี้

- สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย
- γ หมายถึง อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น
- wc หรือ w/b หมายถึง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (Water /Cement)
- C หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- G หมายถึง มวลรวมหยาบ
- S หมายถึง มวลรวมละเอียด
- Sa หมายถึง อัตราส่วนระหว่างมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมด
- Sp หมายถึง สารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษ
- 3"/4" 3"/8" 3"/16" No.8 ถาด. หมายถึง การใช้ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบขนาด 3"/4" 3"/8" 3"/16" No.8 ถาด. ตามลาดับ
- 7.5 x 7.5 x 28.5 เซนติเมตร หมายถึง การใช้ก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่มีขนาด 7.5 x7.5 x 28.5 เซนติเมตร ตามลาดับ

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- γ1.4 หมายถึง คอนกรีตใช้อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.4
- wc55 หมายถึง คอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 หรือคอนกรีตที่ใช้ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานร้อยละ 55 โดยน้ำหนัก
- sa42 หมายถึง คอนกรีตใช้อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมดเท่ากับ 0.42 หรือ คอนกรีตใช้อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมดร้อยละ 42 โดยน้ำหนัก
- sp0.8 หมายถึง คอนกรีตใช้สารผสมเพิ่มเท่ากับ 0.8 หรือ ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก

ดังนั้น γ1.4w55sa42sp0.8 หมายถึง คอนกรีตใช้อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมเท่ากับ 1.4 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับร้อยละ 55 และใช้อัตราส่วนระหว่างมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 42 และใส่สารผสมเพิ่มร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก

3.3.2 การศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของคอนกรีต

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต ได้แก่

- อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (0.35 – 0.55)
- สารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษ (ร้อยละ) (0.7 – 0.8)
- อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น (γ) (1.1 -1.5)
- อุณหภูมิ (27 ℃ – 30 ℃)
- ความชื้นสัมพัทธ์ (ร้อยละ) (45 และ 55)
- ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ (3"/4" 3"/8" 3"/16 "No.8 ถาด.)
- ขนาดของก้อนตัวอย่าง (7.5 x 7.5 x 28.5. ซม.)

3.3.3 การศึกษาแนวทางในการลดการหดตัวของคอนกรีต

ปัจจุบันเทคโนโลยีการก่อสร้างของโครงสร้างคอนกรีตได้ให้ความสำคัญกับความคงทนของคอนกรีตมากขึ้น เพราะมีผลต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต ซึ่งปัญหาการเกิดรอยแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีต นับเป็นสาเหตุหนึ่งที่สำคัญต่อความคงทนของคอนกรีต โดยปกติแล้วการเกิดการหดตัวของคอนกรีตเพียงอย่างเดียวนั้น ไม่สามารถทำให้เกิดการแตกร้าวได้ ซึ่งคอนกรีตที่เกิดการหดตัวแบบอิสระจะไม่มีแรงดึงเกิดขึ้น จึงไม่มีการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัว แต่ในรูปการใช้งานจริงโครงสร้างคอนกรีตมักจะถูกยึดรั้ง ส่งผลให้คอนกรีตเกิดแรงดึงและเกิดการแตกร้าวขึ้น ซึ่งหนึ่งวิธีที่ป้องกันหรือลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นได้ คือ การออกแบบให้คอนกรีตมีการหดตัวที่ต่ำ จึงมีงานวิจัยมากมายที่ศึกษาเกี่ยวกับการนำวัสดุชนิดใหม่มาใช้ผสมร่วมกับวัสดุที่มีอยู่เดิม เพื่อลดการใช้พลังงานช่วยอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม และปรับปรุงคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต เช่น การพัฒนากำลังอัดและการลดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต เป็นต้น

3.4 วิธีการศึกษาโครงงาน

ในหัวข้อนี้จะเป็นการกล่าวถึงการเตรียมวัสดุก่อนการผสมคอนกรีต รวมถึงขั้นตอนและวิธีการทดสอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงงาน ซึ่งประกอบด้วย

1) วิธีการเตรียมวัสดุก่อนการผสมคอนกรีต โดยการหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ มวลรวมละเอียด และค่าการดูดซึมของมวลรวมละเอียด

2) ขั้นตอนการผสมคอนกรีต

3) การทดสอบคุณสมบัติจำเพาะของวัสดุประสาน ซึ่งวัสดุประสานที่ใช้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์

4) วิธีการทดสอบหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต

5) วิธีการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต โดยใช้ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีตและเพิ่มอีก 2 ชั่วโมง เป็นจุดเริ่มต้นของการวัดการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต

6) วิธีการทดสอบการหดตัวของคอนกรีต ซึ่งประกอบด้วย การหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต ซึ่งมีรายละเอียดของการทดสอบต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.4.1. วิธีการเตรียมวัสดุก่อนการผสมคอนกรีต

3.4.1.1. การหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ มวลรวมละเอียดและการดูดซึมของมวลรวมละเอียด

ก.) ความถ่วงจำเพาะของมวลรวม (Specific Gravity) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของปริมาตรเนื้อแท้ของมวลรวมต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากัน โดยที่มวลรวมมีรูพรุน ดังนั้นความถ่วงจำเพาะของมวลรวมจึงอาจแยกออกได้เป็น 3 ลักษณะ คือ

1) **ความถ่วงจำเพาะทั้งหมด** (Bulk Specific Gravity) เป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของปริมาตรของมวลรวม (ที่รวมทั้งรูพรุนทั้งหมดและช่องว่างภายในของมวลรวม) ต่อน้ำหนักน้ำที่มีปริมาตรเท่ากัน

2) **ความถ่วงจำเพาะปรากฏ** (Apparent Specific Gravity) เป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของปริมาตรเนื้อแท้มวลรวม (ที่รวมรูพรุนที่น้ำเข้าไม่ได้ (Impermeable porous) และช่องว่างภายในของมวลรวม) ต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากัน

3) **ความถ่วงจำเพาะสมบูรณ์** (Absolute or True Specific Gravity) เป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของปริมาตรเนื้อแท้ของมวลรวม (ที่รวมรูพรุนและช่องว่าง) ต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากัน ความถ่วงจำเพาะสัมบูรณ์อาจหาได้โดยทำเป็นผงละเอียดที่ไม่ช่องว่างอยู่เลยอย่างไรก็ตามความถ่วงจาเพาะสัมบูรณ์มิได้ประโยชน์ในงานคอนกรีต

ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมขึ้นอยู่กับสมบัติของแร่ธาตุที่เป็นส่วนผสมและความพรุนของก้อนมวลรวม ความชื้นอาจทาให้ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมเปลี่ยนแปลงไปได้ ความถ่วงจำเพาะนี้ใช้ประโยชน์ในการคำนวณหาปฏิภาคส่วนผสมของหินและทรายในคอนกรีตโดยใช้เป็นตัวเปลี่ยนน้ำหนักที่กำหนดให้ของมวลรวมเป็นปริมาตรเนื้อแท้ หรือเปลี่ยนปริมาตรเนื้อแท้ให้เป็นน้ำหนัก เพื่อหาปริมาตรมวลรวม ข.)

การดูดซึมของมวลรวม (Absorption of Aggregates) หมายถึง โครงสร้างภายในก้อนวัสดุผสม ประกอบด้วยเนื้อของแข็งและช่องว่าง ช่องว่างเหล่านั้นจะดูดความชื้นเข้าไปเก็บไว้ได้ การผสมคอนกรีตจึงต้องคำนึงถึงคุณสมบัติข้อนี้ด้วย เพื่อควบคุมปริมาณน้ำในส่วนผสมให้ได้ความข้นเหลวคงที่อันจะทาให้คอนกรีตมีเนื้อสม่ำเสมอ

ปริมาณน้ำในมวลรวมอาจอยู่ในสภาวะใดสภาวะหนึ่งใน 4 อย่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.1

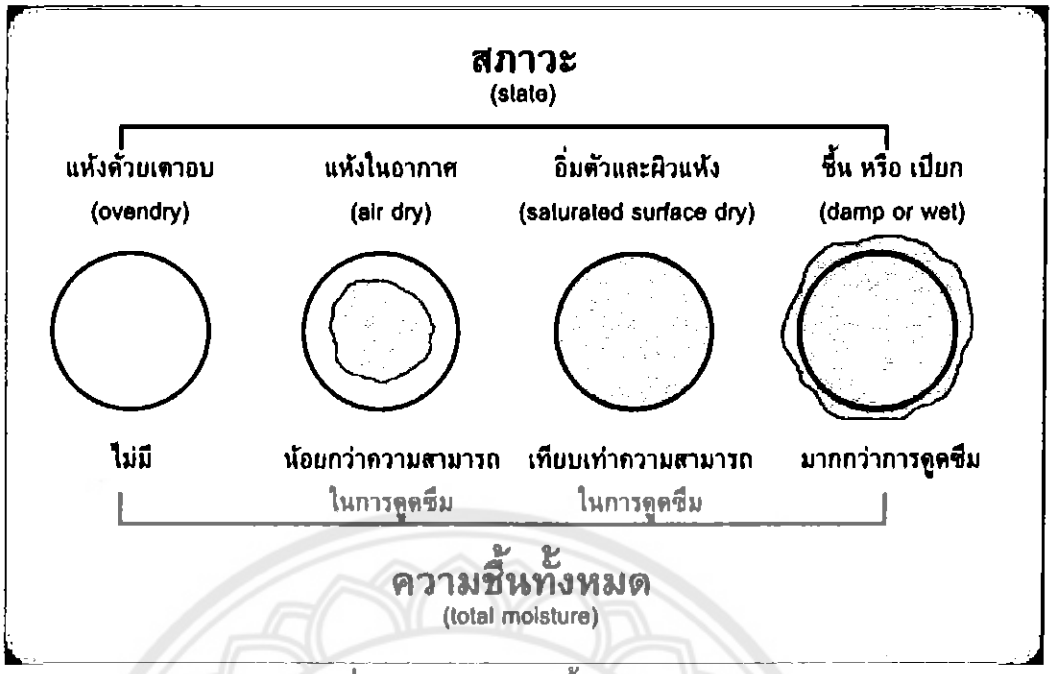
1) แห้งด้วยเตาอบ (Oven Dry) ในสภาวะนี้มวลรวมสามารถดูดซึมความชื้นได้เต็มที่

2) แห้งในอากาศ (Air Dry) หรือแห้งที่ผิวแต่มีความชื้นอยู่ภายในช่องว่างข้างใน ในปริมาณที่น้อยกว่าสภาวะอิ่มตัวและผิวแห้ง ดังนั้นมวลรวมจึงอาจดูดซึมความชื้นได้บ้าง

3) อิ่มตัวและผิวแห้ง (Saturated Surface-Dry) เป็นสภาวะที่ดีที่สุด โดยที่มวลรวมไม่คายน้ำออกหรือดูดน้ำจากคอนกรีต

4) ชื้นหรือเปียก (Damp or Wet) เป็นสภาวะที่ปริมาณความชื้นสูงมากเกินไป โดยมีน้ำหุ้มก้อนมวลรวมอยู่ด้วย

ดังนั้น การทดสอบหาการดูดซึมของมวลรวมจึงมีประโยชน์ในการหาปริมาณของน้ำที่มวลรวมคายออกมาหรือดูดซึมเข้าไปจากส่วนผสมของคอนกรีต ซึ่งทาให้เราสามารถปรับปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตให้เหมาะสมตามสภาวะของมวลรวมที่แท้จริง สำหรับการผสมนั้น ๆ



รูปที่ 3.1 สภาวะความชื้นของมวลรวม

3.4.2 ขั้นตอนการผสมคอนกรีต

ขั้นตอนการผสมคอนกรีตเริ่มจากการคำนวณสัดส่วนผสมคอนกรีต แสดงในตาราง 3.1 ถึง 3.4 จากนั้นชั่งน้ำหนักและเตรียมส่วนผสมต่างๆ ตามที่คำนวณไว้ในตารางข้างต้น แสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้างแดง น้ำสะอาด สารเคมีผสมเพิ่ม (สำหรับส่วนผสมที่ใช้สารเคมีผสมเพิ่ม) หินและทราย ซึ่งอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง ก่อนการผสมคอนกรีตทุกครั้งจะมีการเคลือบเครื่องผสมคอนกรีตด้วยมอร์ต้า เพื่อป้องกันการดูดซึมน้ำของเครื่องผสมคอนกรีต แสดงรูปที่ 3.3 จากนั้นนำทรายและหินใส่ลงในเครื่องผสมคอนกรีต แสดงดังรูป 3.4 จากนั้นนำปูนซีเมนต์ที่เตรียมไว้ค่อยๆ ใส่ลงไปในเครื่องผสมตามลำดับ และทำการผสมแห้งประมาณ 2 นาที แสดงดังรูป 3.5 จากนั้นใส่น้ำลงในเครื่องผสมคอนกรีตเพื่อทำการผสมเปียก โดยแบ่งออกเป็นอยู่ 2 ลักษณะ ได้แก่ ส่วนผสมที่ใช้สารเคมีผสมเพิ่ม จะใส่น้ำที่เตรียมไว้ โดยการแบ่งน้ำออกเป็นสองส่วนเท่าๆ กัน คือ ส่วนแรกเป็นน้ำเพียงอย่างเดียวและส่วนที่สองเป็นน้ำผสมสารเคมีผสมเพิ่ม ซึ่งการใส่น้ำเพียงอย่างเดียวหรือน้ำผสมสารเคมีผสมเพิ่ม จะต้องพยายามใส่ให้น้ำกระจายและทั่วถึงวัสดุผสม จากนั้นทำการผสมเปียกประมาณ 2 - 3 นาที และสำหรับส่วนผสมที่ไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่ม จะใส่น้ำที่เตรียมไว้ โดยการแบ่งน้ำออกเป็นสองส่วนเท่าๆ กัน ซึ่งการใส่น้ำจะต้องพยายามใส่ให้น้ำกระจายและทั่วถึงวัสดุผสม และทำการผสมเปียกประมาณ 2 - 3 นาที แสดงดังรูปที่ 3.6 ตามลำดับ เมื่อทำการผสมคอนกรีตเสร็จแล้ว นำเอาคอนกรีตสดมาทดสอบหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 3.8 เทคอนกรีตลงในแบบหล่อปริซึม ซึ่งงานวิจัยนี้ทดสอบแบบหล่อที่มีขนาด 7.5 x 7.5 x 28.5 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C157 แล้วนำไปวางบนเครื่องเขย่าคอนกรีต ทำการเขย่าประมาณ 20 - 30 วินาที แสดงดังรูปที่ 3.8 แล้วนำไปเก็บในที่ร่มที่จัดเตรียมไว้ และปิดบริเวณผิวหน้าของคอนกรีตด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น แกะคอนกรีตออกจากแบบเมื่ออายุครบระยะ

เวลาการก่อตัวสุดท้ายและเพิ่มอีก 2 ชั่วโมง เพื่อเริ่มต้นวัดค่าการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต และส่วนผสมที่วัดการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต สามารถแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีแรก แกะคอนกรีตออกจากแบบเมื่ออายุครบ 23 ชั่วโมงครึ่ง จากนั้นนำคอนกรีตไปบ่มในน้ำ ½ ชั่วโมง จนอายุครบ 24 ชั่วโมง (1 วัน) แล้วทำการวัดการวัดค่าการหดตัวของคอนกรีต โดยการศึกษากรณีนี้จะทำการวัดบ่มน้ำจนครบ 7 วัน แล้วนำคอนกรีตขึ้นจากน้ำ และวางคอนกรีตบนชั้นวางก้อนตัวอย่างคอนกรีตในห้องควบคุมอุณหภูมิ ส่วนกรณีที่สอง แกะคอนกรีตออกจากแบบเมื่ออายุครบ 23 ชั่วโมงครึ่ง จากนั้นนำคอนกรีตไปวางบนชั้นบนชั้นวางก้อนตัวอย่างคอนกรีตในห้องควบคุมอุณหภูมิ ½ ชั่วโมง เพื่อปรับอุณหภูมิของคอนกรีต จนอายุครบ 24 ชั่วโมง (1 วัน) แล้วทำการวัดการวัดค่าการหดตัวของคอนกรีต โดยการศึกษาทั้งกรณีนี้จะทำการวัดค่าการหดตัวจนการหดตัวของคอนกรีตมีค่าคงที่

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมคอนกรีตของหินปูน

Mix Proportion	γ	w/b	Sp (%)	Mix Proportion (kg)										Slump (cm)
				C	W	G							S	S p	
						1"	3"/4"	1"/2"	3"/8"	No.4	No.8	sum			
γ1.4wc35sa42r0	1.4	0.35	0.8	11.66	4.024		1.32	-	15.16	8.57	1.32	26.38	18.47	0.093	7
γ1.4wc55sa42	1.4	0.55	-	8.98	4.942		1.32	-	15.16	8.57	1.32	26.38	18.47	-	7.5
γ1.4wc55sa42	1.4	0.55	-	8.98	4.942		26.38	-	-	-	-	26.38	18.47	-	7
γ1.4wc55sa42	1.4	0.55	-	8.98	4.942		-	-	26.38	-	-	26.38	18.47	-	7.5

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมคอนกรีตของหินบะซอลล์

Mix Proportion	γ	w/b	Sp (%)	Mix Proportion (kg)											Slump (cm)
				C	W	G							S	S p	
						1"	3"/4"	1"/2"	3"/8"	No.4	No.8	sum			
γ1.4wc35sa42r0	1.4	0.35	0.8	11.66	4.024		1.32	-	15.16	8.57	1.32	26.38	18.47	0.093	7
γ1.4wc55sa42	1.4	0.55	-	8.98	4.942		1.32	-	15.16	8.57	1.32	26.38	18.47	-	7.5

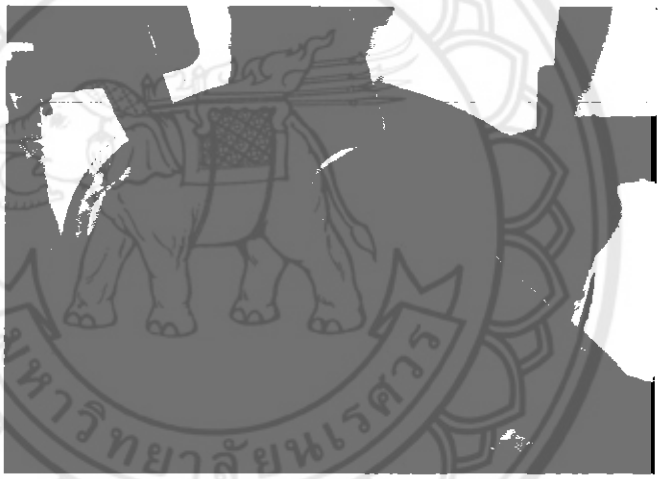
ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมคอนกรีตของหินกรวด

Mix Proportion	γ	w/b	Sp (%)	Mix Proportion (kg)											Slump (cm)
				C	W	G							S	S p	
						1"	3"/4"	1"/2"	3"/8"	No.4	No.8	sum			
γ1.4wc35sa42r0	1.4	0.35	0.8	11.66	4.024		1.28	-	14.77	8.35	1.28	25.7	18.47	0.093	13.5
γ1.4wc55sa42	1.4	0.55	-	8.98	4.942		1.28	-	14.77	8.35	1.28	25.7	18.47	-	15.5

ตารางที่ 3.4 สัดส่วนผสมคอนกรีตของแกรนิต

Mix Proportion	γ	w/b	Sp (%)	Mix Proportion (kg)											Slump (cm)
				C	W	G							S	S p	
						1"	3"/4"	1"/2"	3"/8"	No.4	No.8	sum			
γ1.4wc35sa42r0	1.4	0.35	0.8	11.66	4.024		1.32	-	15.16	8.67	1.32	26.09	18.47	0.093	7.5
γ1.4wc55sa42	1.4	0.55	-	8.98	4.942		1.32	-	15.16	8.67	1.32	26.09	18.47	-	8

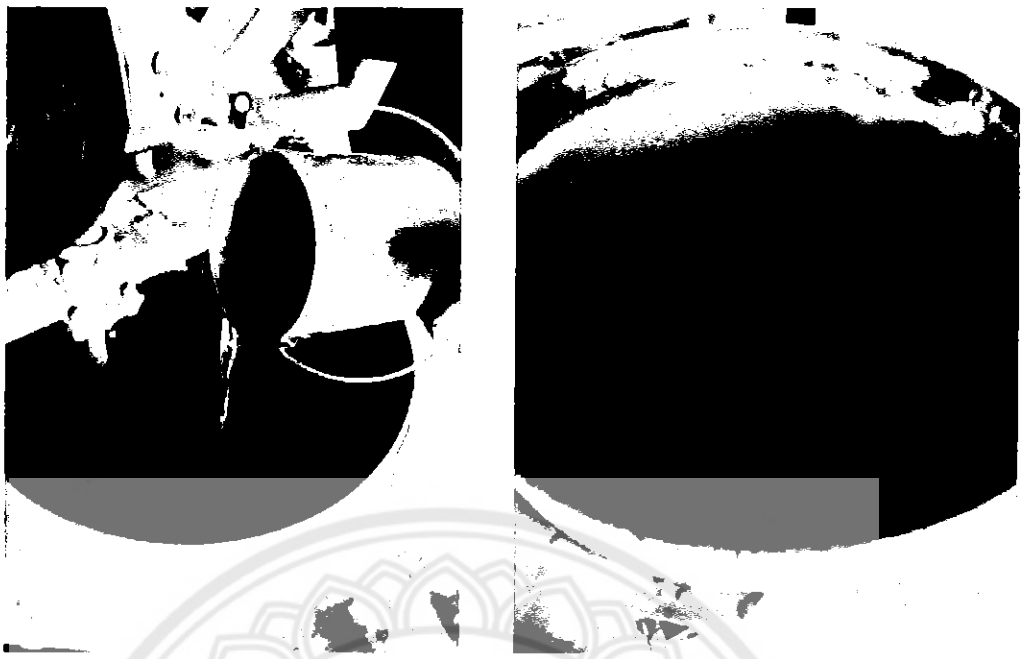
รูปที่ 3.2 ชั่งน้ำหนักและเตรียมวัสดุก่อนการผสมคอนกรีต



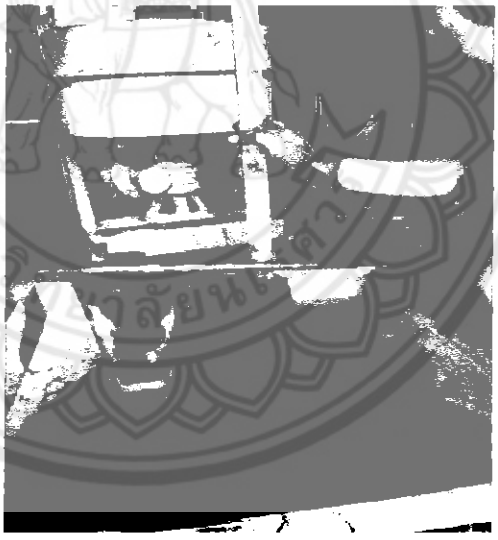
รูปที่ 3.3 การเคลือบเครื่องผสมด้วยซีเมนต์มอร์ต้าเพื่อป้องกันการดูดซึมน้ำของเครื่องผสมคอนกรีต

รูปที่ 3.4 การผสมทรายกับหินก่อนการผสมคอนกรีต

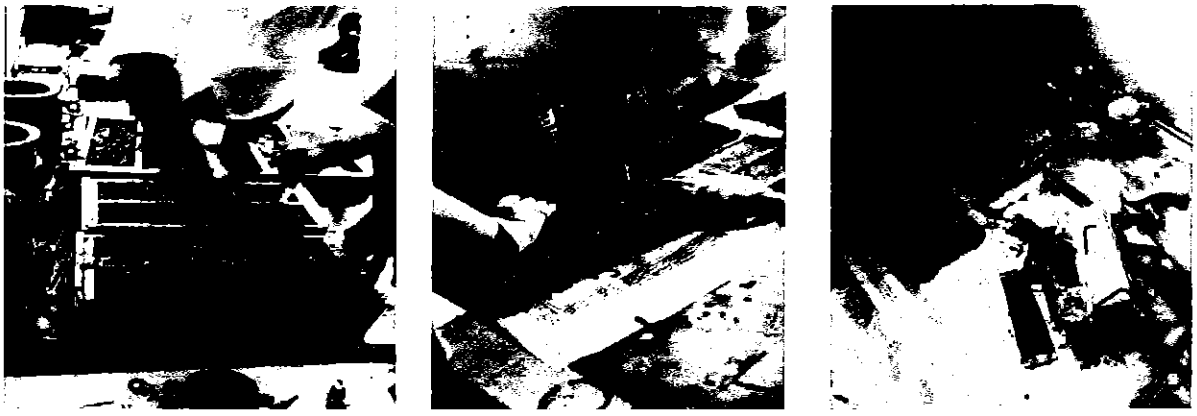
รูปที่ 3.5 การผสมคอนกรีตแบบแห้ง



รูปที่ 3.6 การผสมคอนกรีตแบบเปียก



รูปที่ 3.7 การทดสอบหาการยุบตัวของคอนกรีต



รูปที่ 3.8 การเทคอนกรีตลงในแบบหล่อและใช้เครื่องเขย่าไล่ฟองอากาศออกจากคอนกรีต ปิดบริเวณผิวหน้าของคอนกรีตด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น

3.4.3 การทดสอบคุณสมบัติจำเพาะของวัสดุประสาน

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบคุณสมบัติจำเพาะต่างๆ ของวัสดุประสาน ซึ่งประกอบด้วย การทดสอบความถ่วงจำเพาะ ซึ่งมีรายละเอียดของการทดสอบวัสดุต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.4.3.1 ความถ่วงจำเพาะ

การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของมวลรวมละเอียด

วัสดุทดสอบ

มวลรวมละเอียดที่ต้องการทดสอบน้ำหนักประมาณ 500 กรัม

เครื่องมือทดสอบ

1. เครื่องชั่งที่สามารถชั่งได้ละเอียด 0.1 กรัม
2. กระบอกตวง ขนาดความจุ 500มล.
3. กรวยโลหะ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.75 ซม. เส้นผ่านศูนย์กลางส่วนล่าง 8.9 ซม. ความสูง 7.4 ซม. ทาด้วยแผ่นโลหะหนาประมาณ 0.9 มิลลิเมตร
4. เหล็กกระทุ้ง ปลายเรียบเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 ซม. น้ำหนัก 340 กรัม
5. ตะกร้าลวดเหล็ก
6. เครื่องเป่าผม
7. ถาดโลหะ
8. ผ้าแห้ง
9. เตาอบ

วิธีทดสอบ

1. นำเอามวลรวมละเอียดจากที่เก็บมาประมาณ 1000 กรัม โดยใช้วิธีการของการแบ่งสี่ (Method of Quartering)

2. จากนั้นนำมวลรวมละเอียดมาทำให้แห้งโดยใช้เครื่องเป่าผมเป่ามวลรวมละเอียดให้ทั่ว จนมวลรวมละเอียดนั้นแห้งสม่ำเสมอและอยู่ในสภาวะของการไหลอิสระ (Free Flowing)

3. การทดสอบว่ามวลรวมละเอียดอยู่ในสภาวะของการไหลอิสระทำได้โดยเทมวลรวมละเอียดนั้นลงในกรวยโลหะจนเต็ม แล้วกระทุ้งเบา ๆ ด้วยเหล็กกระทุ้ง เป็นจานวน 25 ครั้ง จากนั้น

ยกกรวยขึ้นตรง ๆ ในแนวดิ่ง ถ้าหากว่ามวลรวมละเอียดยังมีความชื้นที่ผิว (Surface Moisture) อยู่ มวลรวมละเอียดนั้นจะยังคงรูปร่างเป็นรูปกรวยอยู่

4. ในกรณีที่ยังมีความชื้นที่ผิวอยู่ ให้ใช้เครื่องเป่าผมไล่ความชื้นที่ผิวต่อไปอีก แล้วนำมวลรวมละเอียดไปทดสอบในกรวยโลหะอีกเช่นเดิม ทาเช่นนี้เป็นช่วง ๆ จนกระทั่งเห็นว่า เมื่อยกกรวยขึ้นแล้ว มวลรวมละเอียดยุบตัวลงเล็กน้อย ซึ่งแสดงว่ามวลรวมละเอียดนั้นมีการไหลตัวอิสระ ไม่มีความชื้นที่ผิว เราเรียกว่าอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry)

5. จากนั้นให้เทมวลรวมละเอียดจานวน 500 กรัม ลงไปในกระบอกตวง แล้วเติมน้ำจนถึงขีดระดับประมาณ 450 มล.

6. เขย่ากระบอกตวงเพื่อไล่ฟองอากาศออก เติมน้ำจนถึงระดับ 500 มิลลิลิตร

7. ชั่งหาน้ำหนักของกระบอกตวง มวลรวมและน้ำทั้งหมด

8. เทมวลรวมละเอียดออกจากกระบอกตวงใส่ในถาดโลหะ แล้วนาไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 100-110 เซลเซียส จนกระทั่งได้น้ำหนักคงที่ (อบประมาณ 24 ชั่วโมง) จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นประมาณ 1 – 1 ½ชั่วโมง แล้วชั่งหาน้ำหนักของมวลรวมละเอียดที่แห้ง

9. ชั่งหาน้ำหนักของกระบอกตวงที่มีน้ำที่ระดับ 500 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิประมาณ 23 °C

การคำนวณ

คำนวณหาความถ่วงจาเพาะทั้งหมด (Bulk Specific Gravity) ที่สภาวะอิ่มตัว ผิวแห้ง (Saturated Surface Dry Basis) ได้จาก

ทรายบก

ถ่วงจำเพาะทั้งหมด (อิ่มตัวผิวแห้ง) = 2.6

ทรายแม่น้ำ

ถ่วงจำเพาะทั้งหมด (อิ่มตัวผิวแห้ง) = 2.6

คำนวณหาร้อยละของการดูดซึม ได้จาก = [(73.5 - 72.5)/ 72.5] x100 = 1.379

= [(95.4 - 93.6)/ 93.6] x100 = 1.923

การดูดซึม, % = 1.65

การทดสอบหาค่ำความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ

วัสดุทดลอง

หินโม่ (หรือกรวด) ที่ต้องการทดสอบ

เครื่องมือทดสอบ

1. ตะแกรงมาตรฐานอเมริกัน (U.S. Sieves) สำหรับร่อนหิน ขนาด 2", 1 ½ ", 1", 3/4" ,1/2", 3/8" และเบอร์ 4

2. เครื่องชั่งซึ่งมีความละเอียดไม่น้อยกว่าร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักของมวลรวมที่ต้องการทดสอบ

3. แปรงทำความสะอาดตะแกรง

4. เครื่องร่อนมวลรวมละเอียดและเครื่องร่อนมวลรวมหยาบ

5. ผ้าสำหรับเช็ด

6. ตะกร้าลวดเหล็ก

7. เตาอบ

วิธีทดสอบ

1. นำมวลรวมหยาบจากที่เก็บมาประมาณเท่าที่ต้องการ โดยวิธีการของการแบ่งสี่ (Method of Quartering) ร่อนเอาส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ทิ้งไป

2. ล้างมวลรวมหยาบด้วยน้ำ เพื่อขจัดฝุ่นและสิ่งสกปรกที่ติดตามผิวของมวลรวมหยาบนั้น

3. นำเอามวลรวมหยาบแต่ละก้อนมาเช็ดถูด้วยผ้า ให้น้ำที่เกาะตามผิวของมวลรวมหยาบถูกดูดซับไป โดยที่ผิวของมวลรวมหยาบยังชื้นอยู่ หลีกเลี่ยงอย่าให้มีการระเหยของความชื้นในขณะเช็ดถู มวลรวมหยาบจะอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง

4. ชั่งน้ำหนักของมวลรวมหยาบในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง

5. เทมวลรวมหยาบในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งนี้ลงในตะกร้าลวดเหล็กแล้วชั่งหาน้ำหนักในน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 23 °C

6. จากนั้นนำเอามวลรวมหยาบนั้นไปอบในเตาอบอุณหภูมิประมาณ 100–110 °C. จนได้น้ำหนักคงที่แล้วทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1-3 ชั่วโมง จากนั้นจึงนาไปชั่ง

การคำนวณ

คำนวณหาความถ่วงจำเพาะทั้งหมด (Bulk Specific Gravity) ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface-Dry) ได้จาก

ความถ่วงจำเพาะทั้งหมด (อิ่มตัวผิวแห้ง) = 2.417/(2.417-1.522) = 2.70

เอกสารอ้างอิง

มาตรฐาน ASTM C 127 และ C 128

3.4.3.2. การทดสอบคุณสมบัติจำเพาะของวัสดุประสาน ซึ่งวัสดุประสานที่ใช้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์

ความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ คือค่าอัตราส่วนของน้ำหนักของซีเมนต์ในอากาศต่อน้ำหนักของน้ำหนักของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 4 °C ที่มีปริมาตรเท่ากับซีเมนต์ ค่าความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ โดยปกติมักใช้ประกอบในการคำนวณหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface) ของซีเมนต์ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการบอกถึงความละเอียด (Fineness) ของซีเมนต์ นอกจากนั้นความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ยังใช้เป็นข้อมูลที่สำคัญการคำนวณหาปฏิภาคส่วนผสม (Mix Proportion or Mix Design) ของคอนกรีตอีกด้วย ความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ยังใช้เป็นข้อมูลที่สำคัญในการคำนวณหาปฏิภาคส่วนผสม (Mix Proportion or Mix Design) ของคอนกรีตอีกด้วย ความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์จะมีค่าอยู่ระหว่าง 3.05 – 3.20 ซึ่งค่าจะมากหรือน้อยนั้นโดยทั่ว ๆ ไปขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของเนื้อซีเมนต์และความละเอียดของซีเมนต์ ซีเมนต์ผสมหรือซีเมนต์ซิลิก้าจะมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าค่าดังกล่าวข้างต้น ซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากก็จะมีค่าความถ่วงจาเพาะสูง ในกรณีที่ไม่ได้มีการทดสอบหาค่ามาก่อนมักจะสมมุติค่าความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ปริมาณ 3.15

วัสดุทดสอบ

ซีเมนต์ผงที่ต้องการทดสอบหนักประมาณ 1000 กรัม

เครื่องมือทดสอบ

1. ขวดทดลองมาตรฐานเลอแชทที่เลียร์ (Standard Le Chatelier Flask) จำนวน 1 ใบ
2. หลอดกรวยสำหรับกรอกซีเมนต์ผงลงในขวดมาตรฐาน จำนวน 1 ใบ
3. เทอร์โมมิเตอร์ (0 – 100 องศาเซลเซียส) จำนวน 1 อัน

4. น้ำมันก๊าด (Kerosene) ปริมาตรประมาณ 1000 มล.

5. อ่างน้ำขนาดประมาณ 2000 มล. จำนวน 1 ใบ

6. เครื่องชั่งอ่านได้ละเอียดไม่น้อยกว่า 0.1 กรัม

7. ถาดสำหรับใส่ซีเมนต์ จำนวน 1 ใบ

<u>วิธีทดสอบ</u>

1. จัดเตรียมน้ำในอ่างให้มีอุณหภูมิคงที่ที่ 20 °C ตามที่กำหนดไว้ พยายามควบคุมอุณหภูมิในอ่างน้ำให้มีอุณหภูมิคงที่ตลอดการทดลอง

2. เทน้ำมันก๊าดลงในขวดทดลองมาตรฐานเลอแชททีเลียร์ จนกระทั่งระดับของน้ำมันก๊าดอยู่ระหว่างขีดบอกปริมาตร 0 และ 1 มล. คอขวดซึ่งอยู่เหนือระดับน้ำมันก๊าดควรเช็ดให้แห้ง

3. จุ่มขวดทดลองในอ่างน้ำในข้อที่ 1. แล้วให้ทิ้งไว้จนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำมันก๊าดและน้ำในอ่างเท่ากัน อ่านค่าอุณหภูมิของน้ำและขีดค่าปริมาตรของน้ำมันก๊าดในขวดทดลอง

4. ชั่งน้ำหนักของขวดทดลองและน้ำมันก๊าดครั้งแรก จากนั้นค่อย ๆ ใส่ซีเมนต์ลงในขวดทดลอง การใส่ซีเมนต์ควรไม่ให้ซีเมนต์ตกกระจาย และจะต้องระวังไม่ให้ซีเมนต์เกาะติดตามคอขวดทดลองด้วย

5. ให้หยุดใส่ซีเมนต์เมื่อระดับของน้ำมันก๊าดขึ้นมาอยู่ระหว่างช่วงของขีดบอกปริมาตรส่วนบนของขวดทดลอง จากนั้นหาการไล่ฟองอากาศซึ่งอาจเกาะอยู่กับผงซีเมนต์ การไล่ฟองอากาศให้ปิดปากขวดทดลองด้วยจุกแก้ว แล้วเอียงขวดและหมุนช้า ๆ จนกระทั่งไม่มีฟองอากาศลอยขึ้นมาอีก

6. จุ่มขวดทดลองในอ่างน้ำอีกครั้งหนึ่ง เช่นเดียวกับข้อที่ 3. ก่อนจะอ่านปริมาตรทุกครั้ง ผู้ทำการทดลองจะต้องแน่ใจว่าอุณหภูมิของน้ำมันก๊าดในขวดทดลองเท่ากับอุณหภูมิของน้ำในอ่าง เพื่อที่จะไม่ให้อุณหภูมิของน้ำมันก๊าดในการอ่านครั้งแรกและครั้งที่สองต่างกันไม่เกินกว่า 0.2 °C

7. อ่านอุณหภูมิของน้ำและปริมาตรของน้ำมันก๊าดในขวดทดลอง

8. ชั่งน้ำหนักของขวดทดลองและน้ำมันก๊าดครั้งหลัง ผลต่างของน้ำหนักของการชั่งสองครั้งจะเท่ากับน้ำหนักของซีเมนต์ที่ใส่ลงไปในขวดทดลอง

9. ทำการทดลองซ้ำอีกอย่างน้อย 1 ครั้ง จากข้อ 2. ถึงข้อ 8. จนกว่าจะได้ผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจ

หมายเหตุ :ในการทำความสะอาดขวดทดลองให้ใช้น้ำมันก๊าดล้างเท่านั้น ห้ามใช้น้ำล้างเป็นอันขาด

การคำนวณ ความถ่วงจาเพาะซีเมนต์ = 3.12

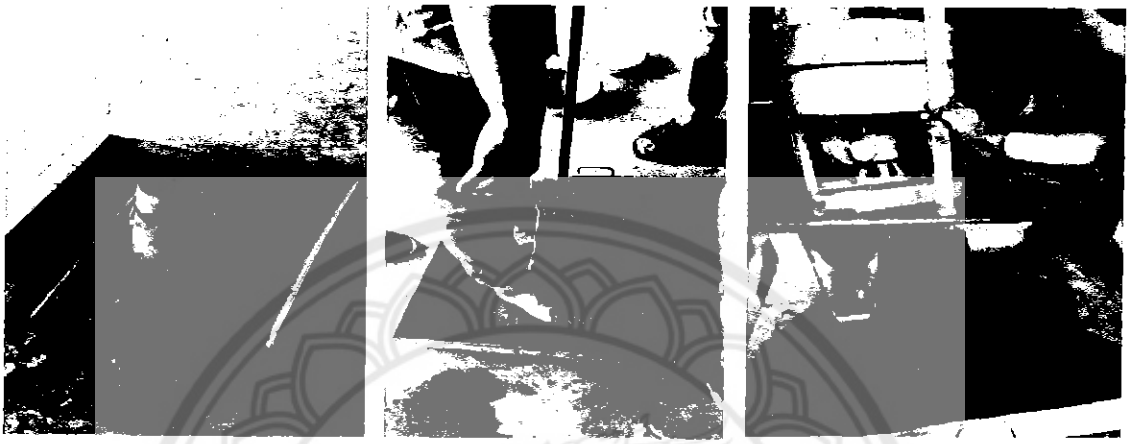
<u>เอกสารอ้างอิง</u>

มาตรฐาน ASTM C 187, C 191 , มาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 15 เล่ม 8, เล่ม 9

3.4.4 วิธีการทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต

การทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C 143 เป็นวิธีการทดสอบหาปริมาณน้ำที่พอเหมาะสำหรับคอนกรีต เพื่อให้คอนกรีตมีความข้นเหลวเหมาะที่จะนำไปใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ให้คอนกรีตเกิดการแยกตัว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงกำหนดค่าการยุบตัวของคอนกรีตระหว่าง 7.5–12.5 เซนติเมตร สำหรับส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ เพื่อหาปริมาณสารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษที่เหมาะสม เพื่อทำให้คอนกรีตมีความสามารถเทได้ โดยคอนกรีตในแต่ละส่วนผสมจะใช้สารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษในปริมาณที่ไม่เท่ากันทั้งนี้ขึ้นอยู่

กับค่าการยุบตัวของคอนกรีตระหว่าง 7.5 - 12.5 เซนติเมตร ซึ่งก่อนการผสมจริงทุกครั้งต้องทำการทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต โดยถ้าส่วนผสมคอนกรีตที่มีค่าการยุบตัวมากกว่า 12.5 เซนติเมตร จะไม่ใส่สารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษ และในทางกลับกันถ้าค่าการยุบตัวมีค่าต่ำกว่า 7.5 เซนติเมตร จะต้องทำการทดสอบผสมคอนกรีตใหม่ โดยการใส่สารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดสารลดน้ำพิเศษไปในส่วนผสมนั้นๆ เพื่อให้ค่าการยุบตัวอยู่ระหว่าง 7.5 - 12.5 เซนติเมตร



รูปที่3.9 การทดสอบหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต

3.4.5 วิธีการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต เพื่อใช้ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายและเพิ่มอีก 2 ชั่วโมง เป็นจุดเริ่มต้นของการวัดการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต ซึ่งระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM 403 ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบการก่อตัวมีขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร ในแต่ละส่วนผสมใช้จำนวน 2 ตัวอย่าง ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายและเพิ่มอีก 2 ชั่วโมง จะใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดเวลาเริ่มวัดการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตเนื่องจากการทดสอบพบว่าเป็นระยะเวลาที่พอเหมาะ สำหรับการแข็งตัวของคอนกรีตและคอนกรีตไม่ก่อให้ เกิดความเสียหายเมื่อแกะแบบ และง่ายต่อการห่อหุ้มและเริ่มต้นวัดการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตได้อย่างเหมาะสม การหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตแบ่งเป็น 2 ช่วงเวลา ได้แก่ การทดสอบหาระยะตั้งแต่เริ่มทำการผสมคอนกรีตจนกระทั่งคอนกรีตไม่มีคุณสมบัติการลื่นไหลหรือมีคุณสมบัติ พลาสติกได้อีกต่อไป หรือเรียก ช่วงระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น ณ จุดแข็งตัวของคอนกรีตและระยะตั้งแต่เริ่มผสมคอนกรีตจนกระทั่งคอนกรีตเปลี่ยนสภาพเป็นของแข็ง หรือเรียก ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย ณ จุดแข็งตัวสุดท้ายของคอนกรีต โดยระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 35 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือ 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 276 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือ 4,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งค่าเหล่านี้เป็นค่าที่กำหนดขึ้นโดยการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตด้วยวิธีการหาความต้านทานต่อการกด (Penetration Resistance) ของมอร์ต้าที่ได้จากการร่อนส่วนผสมคอนกรีตผ่านตะแกรงร่อนตามมาตรฐาน ASTM 403 จากการศึกษาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต เนื่องการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตจะมีเปลี่ยนแปลงมากในช่วงระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นก่อนการแข็งตัว

ของคอนกรีต แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถทำการวัดการหดตัวได้เพราะว่าคอนกรีตอยู่ในสภาพไม่แข็งตัว ดังนั้นการวัดการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตจึงทำการวัดหลังจากระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีต

3.4.6 วิธีการทดสอบการหดตัวของคอนกรีต

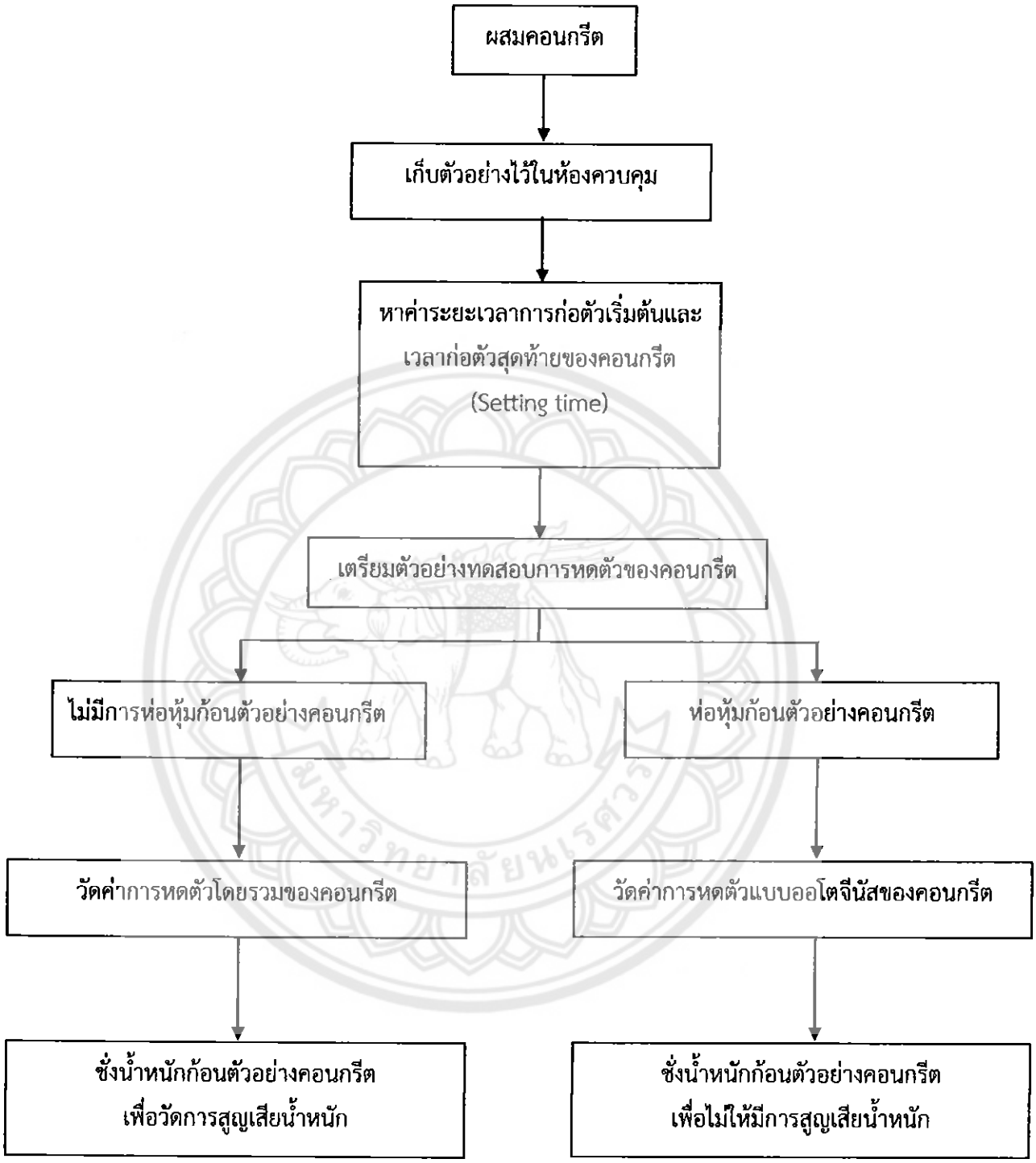
ในหัวข้อนี้จะเป็นการกล่าวถึง การเตรียมตัวอย่างและวิธีการทดสอบการหดตัวของคอนกรีต สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ การเตรียมตัวอย่างการทดสอบการหดตัวของคอนกรีต วิธีการทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัสและวิธีการทดสอบการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต โดยมีรายละเอียดวิธีการทดสอบต่างๆ ดังต่อไปนี้

1) วิธีการเตรียมตัวอย่างการทดสอบการหดตัวของคอนกรีต

วิธีการเตรียมตัวอย่างการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตในหัวข้อนี้ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การเตรียมตัวอย่างการทดสอบการหดตัวของคอนกรีต และวิธีการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวหรือการหดตัวของคอนกรีต โดยมีรายละเอียดวิธีการทดสอบดังต่อไปนี้

1.1) การเตรียมตัวอย่างการทดสอบการหดตัวของคอนกรีต

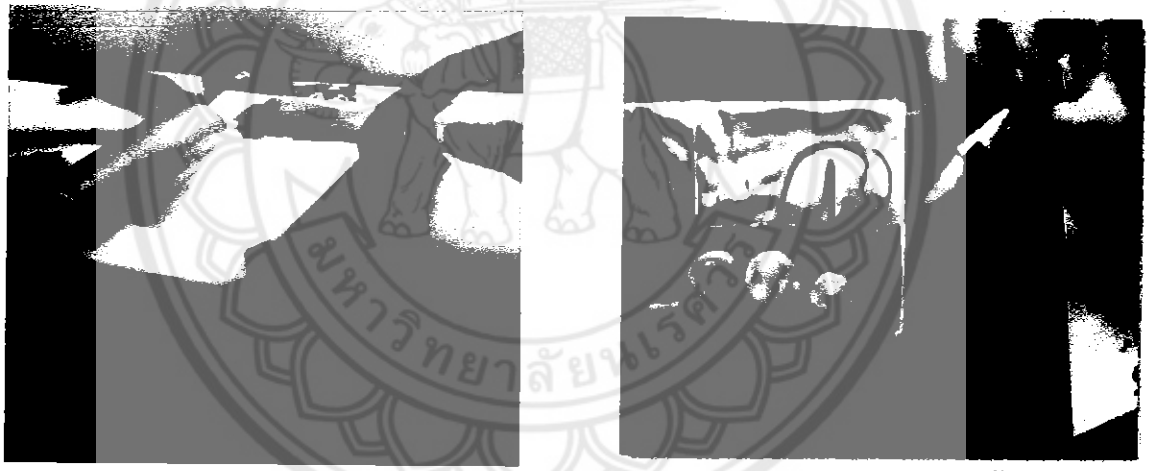
การเตรียมตัวอย่างการทดสอบการหดตัวของคอนกรีต แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การเตรียมตัวอย่างการวัดการหดตัวแบบออโตจีนัสและการเตรียมตัวอย่างการวัดการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต ซึ่งการเตรียมตัวอย่างของการวัดการหดตัวทั้งสองนี้ มีลักษณะการเตรียมที่แตกต่างกัน คือ การวัดการหดตัวแบบออโตจีนัสจะมีการห่อหุ้มตัวอย่างคอนกรีตเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นออกจากก้อนตัวอย่าง ส่วนการวัดการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตจะไม่มีการห่อหุ้มก้อนตัวอย่าง ซึ่งการทดสอบการหดตัวทั้ง 2 ชนิด ใช้ตัวอย่างปริซึมขนาด 7.5 x 7.5 x 28.5 เซนติเมตร หรือ 10 x 10 x 28.5 เซนติเมตร ในแต่ละส่วนผสมใช้ตัวอย่างจำนวน 4 ตัวอย่าง เก็บตัวอย่างไว้ในห้องควบคุมที่มีอุณหภูมิ 27-30 ℃ และความชื้นสัมพัทธ์ 45-55% ตลอดการทดสอบ โดยมีรูปของการเตรียมตัวอย่างสำหรับการหาค่าการหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.10 กระบวนการตัวอย่างของการวัดค่าการหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต

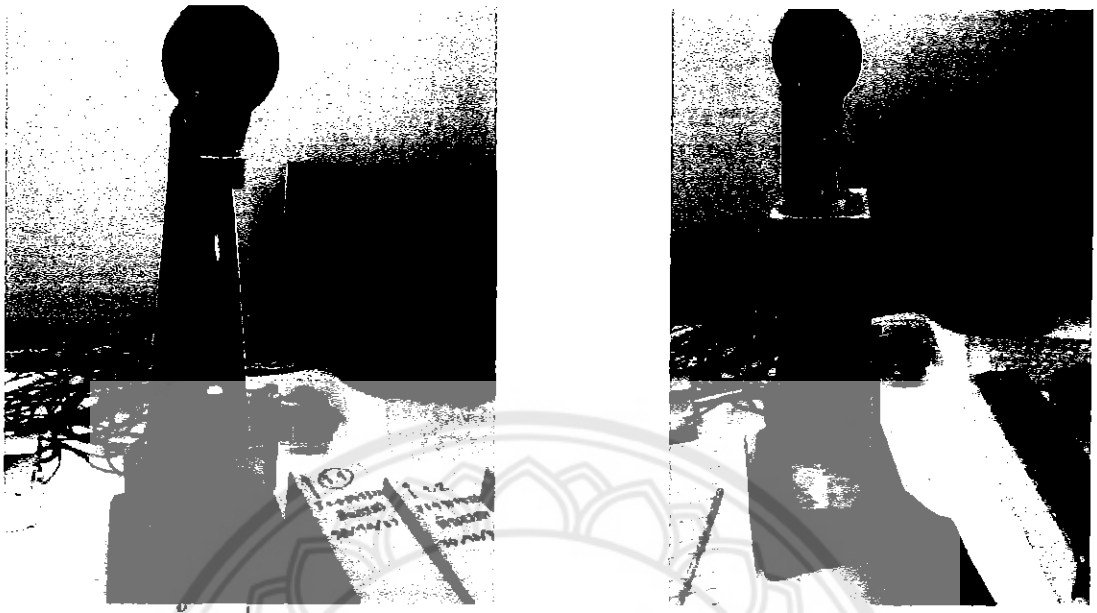
2) วิธีการทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต

ทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัส ตามมาตรฐาน ASTM C490 และ ASTM C157 ตัวอย่างที่ใช้มีขนาด 7.5 x 7.5 x 28.5 เซนติเมตร หรือ 10 x 10 x 28.5 เซนติเมตร จำนวน 4 ตัวอย่างเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย ในงานวิจัยนี้เริ่มวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวอย่าง เมื่อคอนกรีตมีอายุครบระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายและเพิ่มอีก 2 ชั่วโมง เพื่อให้ก้อนตัวอย่างมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะถอดออกจากแบบโดยไม่เกิดความเสียหาย การหดตัวแบบออโตจีนัสเป็นการหดตัวที่ไม่มีการสูญเสียความชื้นออกสู่สิ่งแวดล้อม จึงทำการห่อหุ้มก้อนตัวอย่างด้วยเทปอลูมิเนียมหนา 5 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชั้นตามด้วย พลาสติกใส 5 ชั้นและเทปกาวใส 2 ชั้น แสดงดังรูป 3.10 วัดค่าการหดตัวพร้อมทั้งชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 3.11 และรูปที่ 3.12 ตามลำดับ เพื่อตรวจสอบว่ามีน้ำระเหยออกจากตัวอย่างหรือไม่ การสูญเสียน้ำหนักต้องไม่เกินร้อยละ 0.05 ของน้ำหนัก เก็บตัวอย่างไว้ในห้องควบคุมที่มีอุณหภูมิ 27-30 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 45-55% ตลอดการทดสอบและเก็บก้อนตัวอย่างไว้บนชั้นวาง แสดงดังรูปที่ 3.13



(ก) การห่อหุ้มก้อนตัวอย่างคอนกรีต (ข) หยอดกาว เพื่อป้องกันความชื้นตรงหัวน็อต

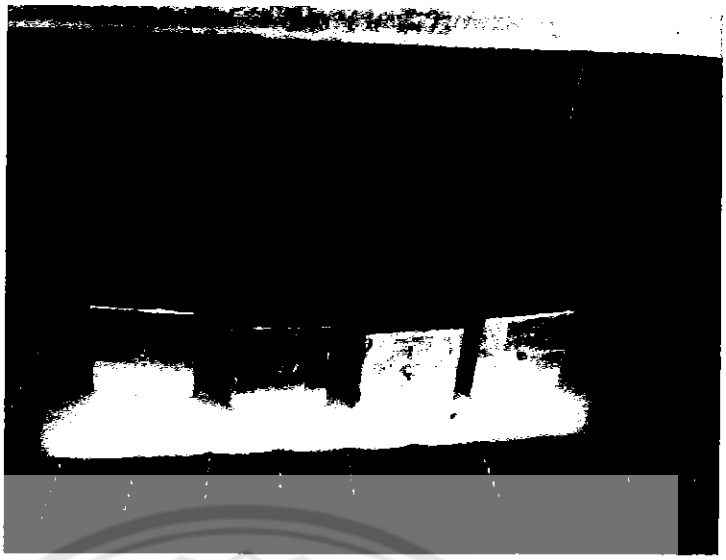
รูปที่ 3.11 การห่อหุ้มก้อนตัวอย่างคอนกรีตแบบออโตจีนัส



(ก) การตั้งค่าเริ่มต้นก่อนวัดการหดตัว (ข) การวัดค่าการหดตัวแบบออโตจีนัส

รูปที่ 3.12 การวัดก้อนตัวอย่างคอนกรีตแบบออโตจีนัส

รูปที่ 3.13 ชั่งน้ำหนักหาค่าการสูญเสียความชื้นของก้อนตัวอย่าง

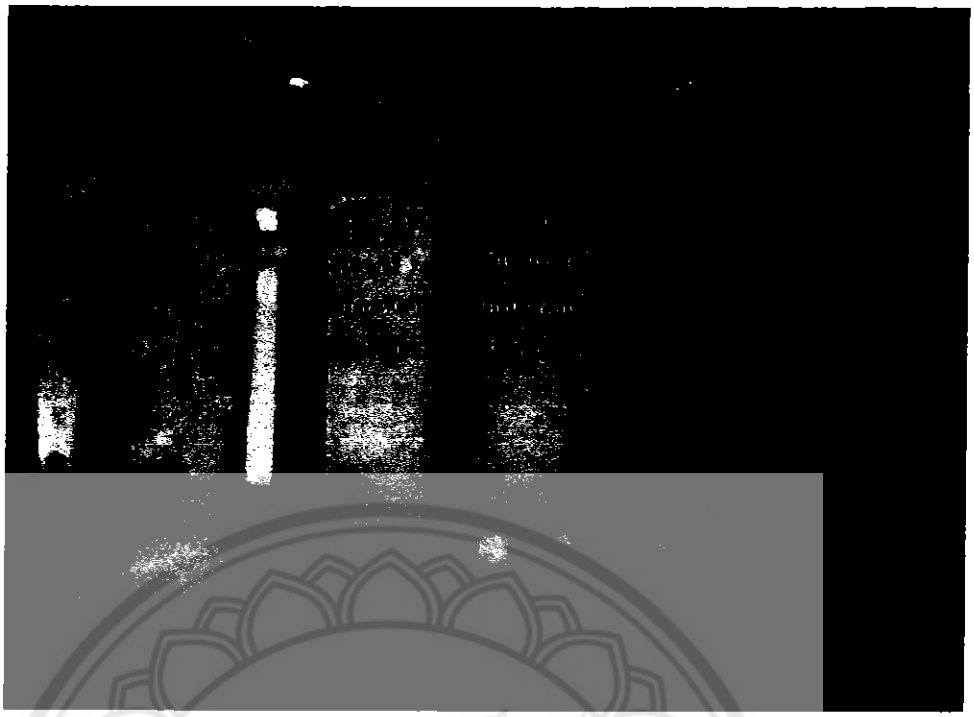


รูปที่ 3.14 การเก็บก้อนตัวอย่างคอนกรีต เพื่อวัดการหดตัวแบบออโตจีนัส

3) วิธีการทดสอบการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต

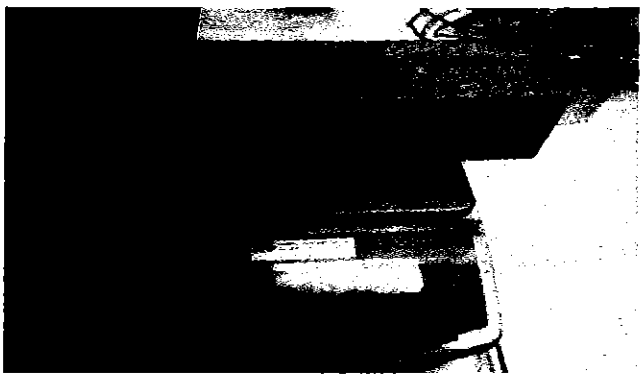
การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตไม่สามารถวัดค่าได้จากก้อนตัวอย่างโดยตรง เนื่องจากก้อนตัวอย่างที่ไม่มีการหุ้มผิว (Unsealed Specimen) ยังคงมีการหดตัวแบบออโตจีนัสเกิดขึ้นได้ ทำให้ค่าที่วัดได้จากก้อนตัวอย่างที่ไม่หุ้มผิวเป็น "การหดตัวโดยรวมของคอนกรีต" คือ มีทั้งการหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้งรวมกันอยู่ ซึ่งการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตนี้จะเกิดขึ้นในช่วงก่อนการแข็งตัวของคอนกรีต แต่เมื่อคอนกรีตเกิดการแข็งตัวและยังคงสภาพมีการหดตัวไปเรื่อยๆ โดยที่ไม่มีการห่อหุ้มคอนกรีตนั้นจะเรียกการหดตัวในช่วงนี้ว่า "การหดตัวแบบแห้งแบบสมบูรณ์" ดังนั้น ในการหาค่าการหดตัวแบบแห้งจะต้องทำการวัดการหดตัวของก้อนตัวอย่างที่ถูกหุ้มและไม่ถูกหุ้มควบคู่กันไป ซึ่งงานวิจัยนี้จะทำการศึกษา "การหดตัวโดยรวมของคอนกรีต" ซึ่งแบ่งการวัดออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีหนึ่ง นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตบ่มในน้ำ 7 วัน แสดงดังรูปที่ 3.14 และกรณีสองไม่มีการบ่มน้ำ (หรือบ่มน้ำ 0 วัน)

ทดสอบการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตจะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C490 และ ASTM C157 ตัวอย่างที่ใช้มีขนาด 7.5 x 7.5 x 28.5 เซนติเมตร หรือ 10 x 10 x 28.5 เซนติเมตร จำนวน 4 ตัวอย่าง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย ถอดแบบเมื่ออายุครบ 231/2 ชั่วโมง โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่ง นำคอนกรีตไปบ่มในน้ำเป็นระยะเวลา 30 นาที จนครบ 7 วัน และส่วนที่สองไม่บ่มน้ำ (หรือบ่มน้ำ 0 วัน) โดยนำก้อนตัวอย่างคอนกรีตไปปรับอุณหภูมิภายในห้องควบคุมประมาณ 30 นาที (เพื่อศึกษาการบ่มคอนกรีตที่ 0 วัน) ต่อจากนั้นนำก้อนตัวอย่างคอนกรีตมาวัดค่าการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต บันทึกค่าวันที่ 1 ของการทดสอบ (ครบ 24 ชั่วโมง) แสดงดังรูปที่ 3.15 และนำมาเก็บไว้ในห้องควบคุมที่มีอุณหภูมิ อุณหภูมิ 27-30 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 45-55 % วัดค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวพร้อมทั้งชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง ทั้งในช่วงที่บ่มในน้ำและหลังจากขึ้นจากน้ำ แสดงดังรูปที่ 3.16 ซึ่งการวัดค่าการหดตัวทั้งสองกรณีนี้จะกระทำตั้งแต่หลังจากการแกะคอนกรีตออกจากแบบหล่อ จนกระทั่งตัวอย่างมีการหดตัวคงที่ และเก็บก้อนตัวอย่างไว้บนชั้นวาง แสดงดังรูปที่ 3.17

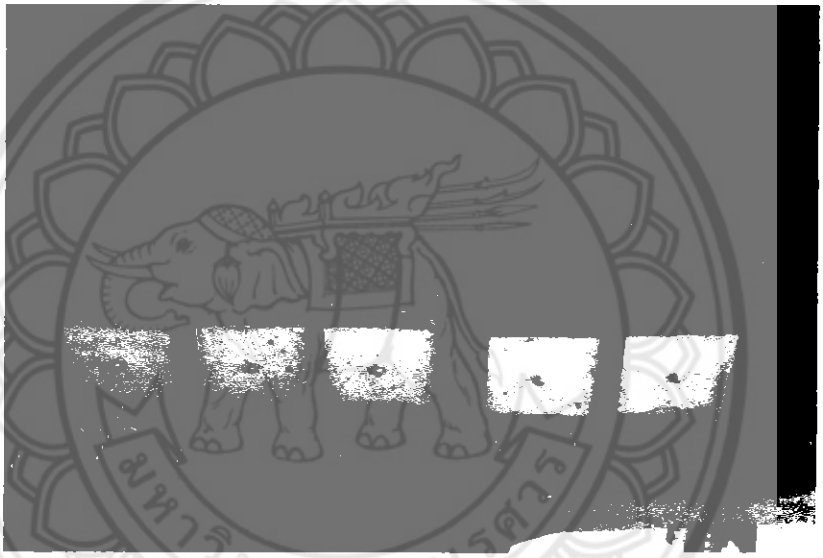


รูปที่ 3.15 การบ่มก้อนตัวอย่างคอนกรีต เพื่อวัดการหดตัว

รูปที่ 3.16 การวัดค่าการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต



รูปที่ 3.17 การหาค่าการสูญเสียความชื้นของก้อนตัวอย่าง



รูปที่ 3.18 การเก็บก้อนตัวอย่างคอนกรีต เพื่อวัดการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์

บทนี้เป็นการกล่าวถึงผลการศึกษาต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงงาน คือ ผลการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องการหดตัวของคอนกรีต และผลการศึกษาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต เพื่อใช้เป็นข้อมูลและแนวทางในการลดปัญหาการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต โดยจะแบ่งผลการศึกษาระหว่าง ผลการหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดโดยรวมของคอนกรีต ซึ่งแบ่งการศึกษาตามปัจจัยต่างๆ ออกเป็น 3 ส่วน คือ

- อัตราส่วนผสมน้ำต่อซีเมนต์
- สัดส่วนขนาดคละของหินที่มีผลต่อการหดตัว
-ชนิดของหิน

4.1 คุณสมบัติของวัสดุประสาน

4.1.1 วัสดุประสานที่ใช้ในโครงงานนี้ ได้แก่

4.1.1.1 ปูนซีเมนต์ องค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งมีอยู่ในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 65.03 ส่วนองค์ประกอบของ Sio_2 , Al_2O_3 , และ Fe_2O_3 มีอยู่ในปริมาณร้อยละ 19.87 , 4.87 และ 3.55 ตามลำดับ นอกจากนี้ค่าการสูบเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผามีอยู่ในปริมาณร้อยละ 2.26

4.1.1.2 น้ำ เป็นสารประกอบเคมีชนิดหนึ่ง มีสูตรเคมี คือ H_2O โมเลกุลของน้ำประกอบด้วย ออกซิเจน 1 อะตอม และไฮโดรเจน 2 อะตอม เชื่อมติดกันโดยพันธะโควาเลนต์ น้ำเป็นของเหลวที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน

4.1.1.3 สารเคมีผสมเพิ่ม ชนิดลดน้ำพิเศษ (WATER REDUCING ADMIXTURE หรือ Plasticizers) ใช้สำหรับลดปริมาณน้ำในการผสมคอนกรีต โดยความข้นเหลวยังคงเดิม มีผลท้าให้คอนกรีตแข็งแรงเพิ่มขึ้น กลับกันถ้าให้ปริมาณน้ำคงเดิม จะมีผลท้าให้คอนกรีตสดมีความข้นเหลวเพิ่มขึ้น ท้าให้การเทคอนกรีตลงแบบได้ดี และยังลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ เนื่องจากเราสามารถเพิ่มปริมาณหิน – ทรายได้ โดยความข้นเหลวยังคงเดิม สานผสมเพิ่มนี้ท้าให้ลดการใช้น้ำลง 5%-15% กำลังคอนกรีตเพิ่มขึ้น 10%-20%

4.2 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุผสม

4.2.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 =3.11

4.2.2 ทราย

ทรายแม่น้ำ =2.6

4.2.3 หิน

หินปูน (Limestone) = 2.69

หินแกรนิต (Granite) = 2.66

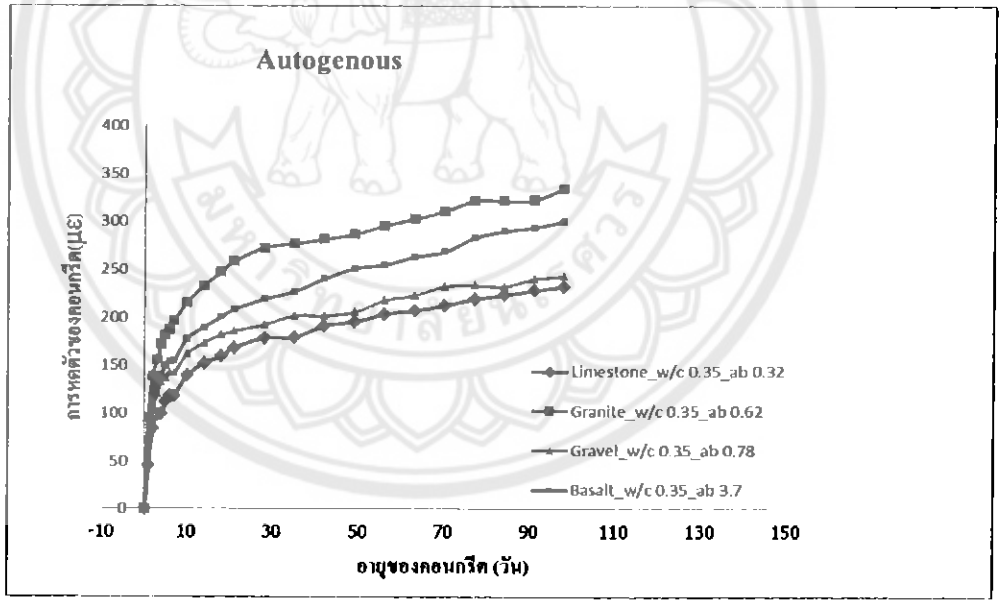
หินกรวดแม่น้ำ (Gravel) = 2.62

หินบะซอลต์ (Basalt stone) = 2.7

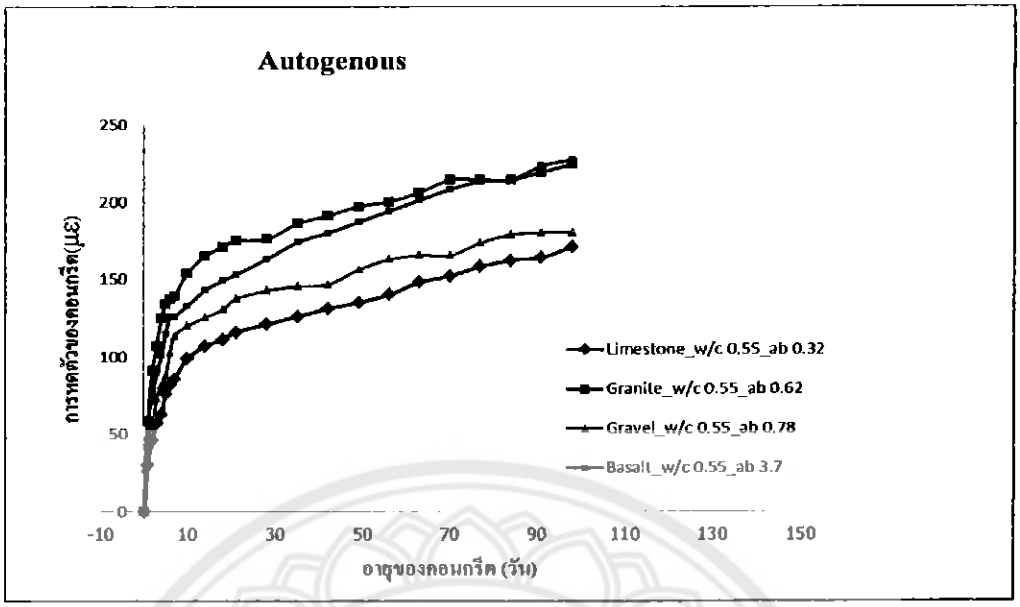
4.3 ผลการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต

4.3.1 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างกัน

ผลการทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบค่าการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตโดยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างกัน ของหินแต่ละชนิด



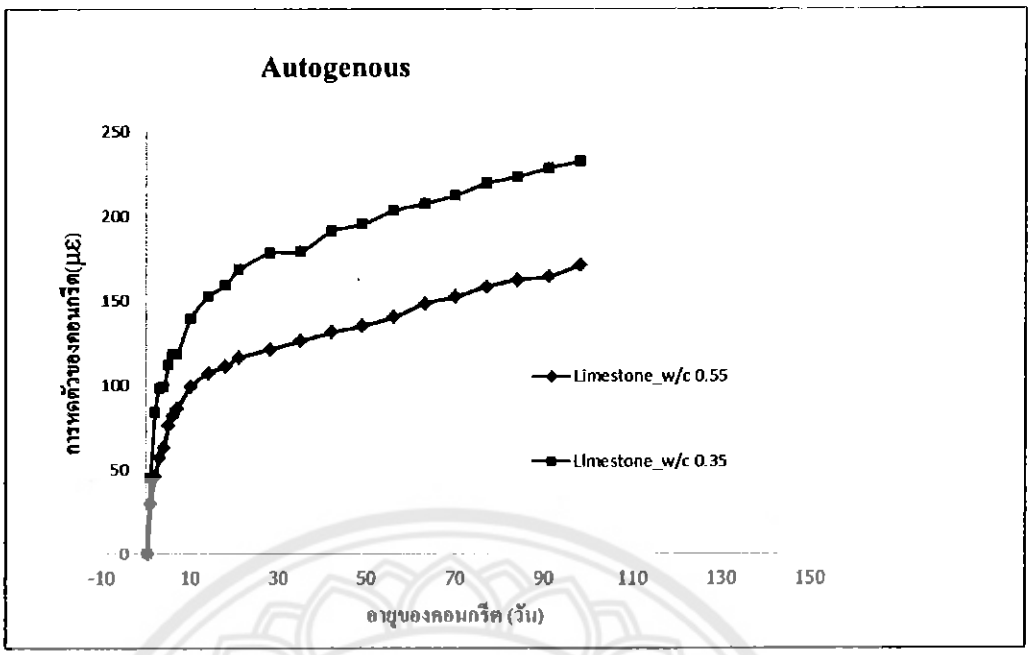
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการหดตัวแบบออโตจีนัสของอัตราส่วน W/C 0.35



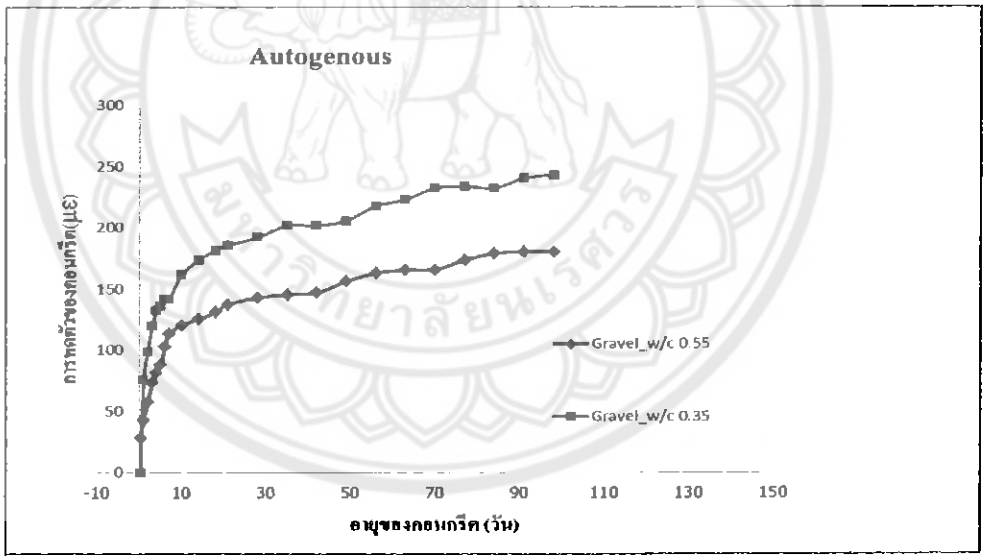
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการหดตัวแบบออโตจีนัสของอัตราส่วน W/C 0.55

จากกราฟผลการทดลอง คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.35 จะมีการหดตัวมากกว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.55

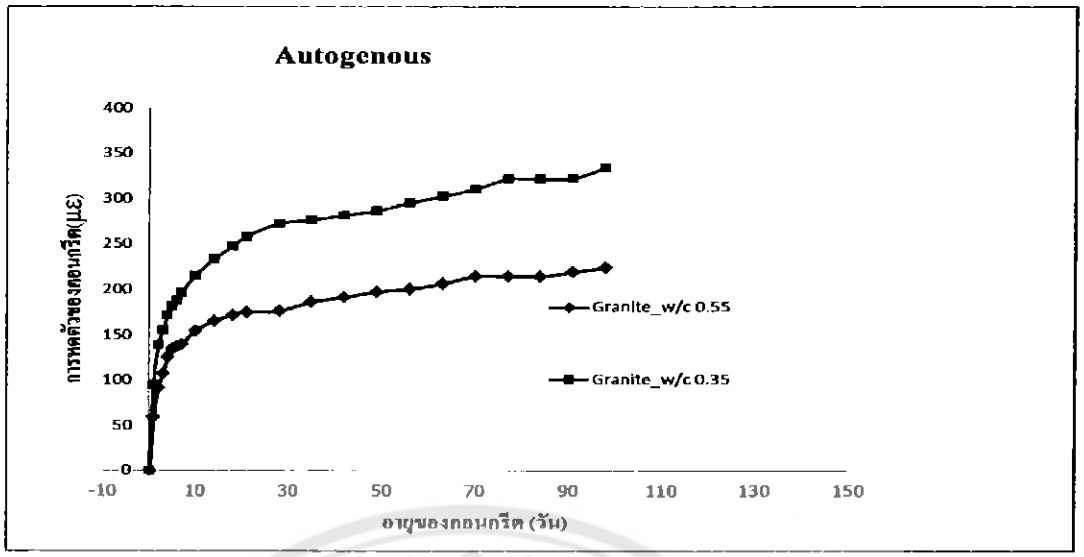
ผลการทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบค่าการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตโดยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างกัน ของหินชนิดเดียวกัน



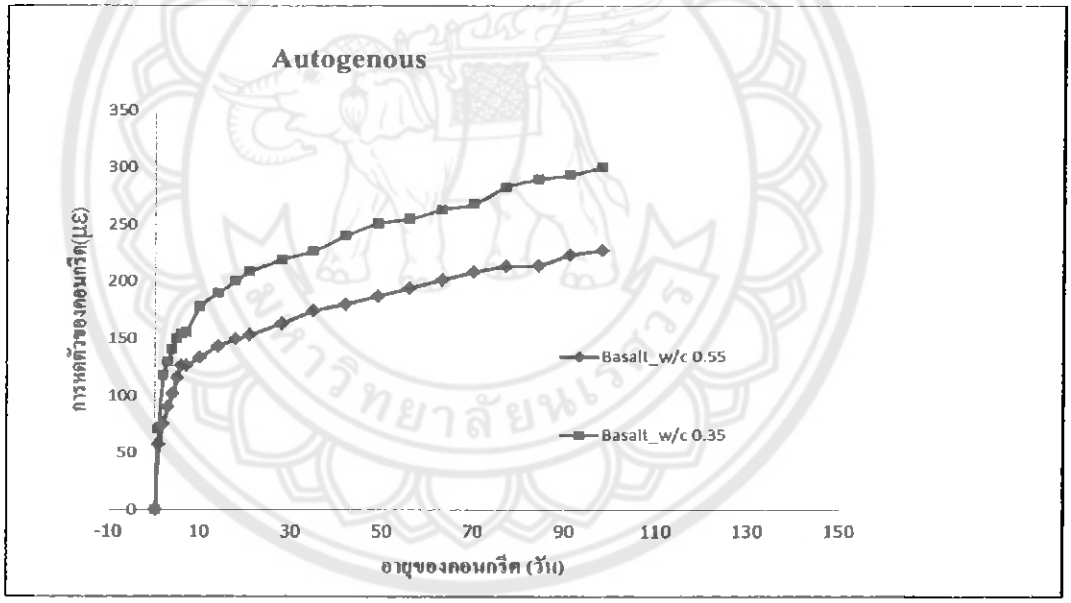
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการหดตัวของหินปูน



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการหดตัวของหิน กรวดแม่น้ำ



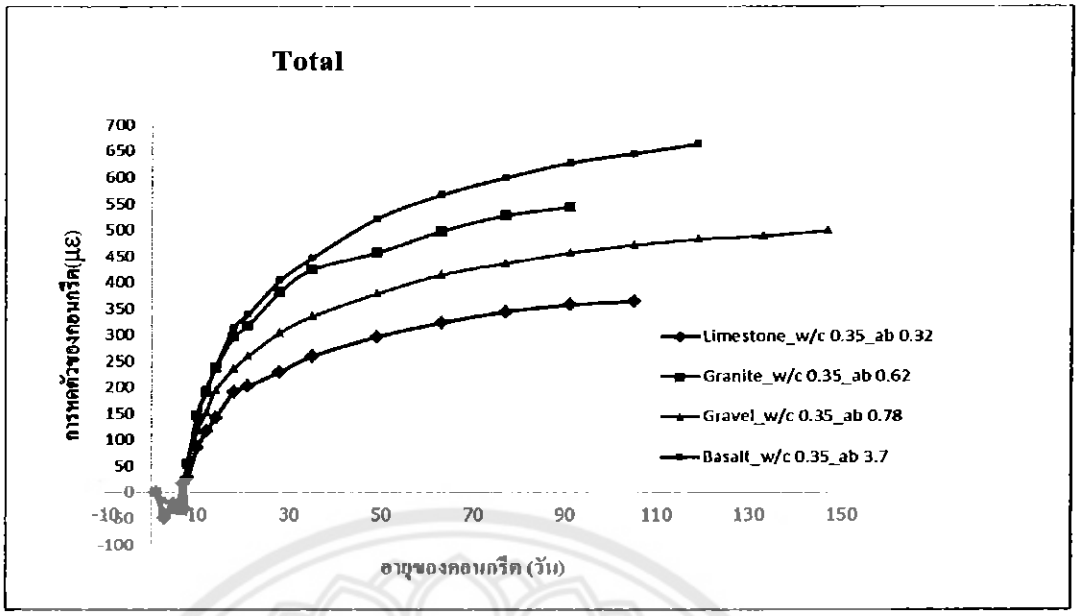
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการหดตัวของหินแกรนิต



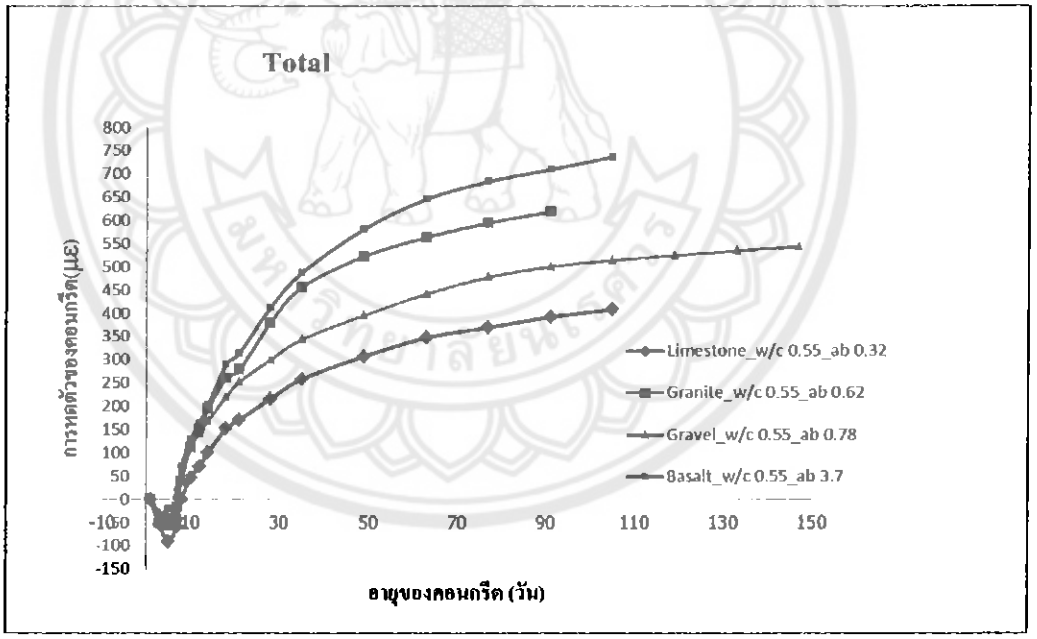
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการหดตัวของหินบะซอลต์

จากกราฟผลการทดลอง คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.35 จะมีการหดตัวมากกว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.55

ผลการทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบค่าการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตโดยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างกันของหินแต่ละชนิด



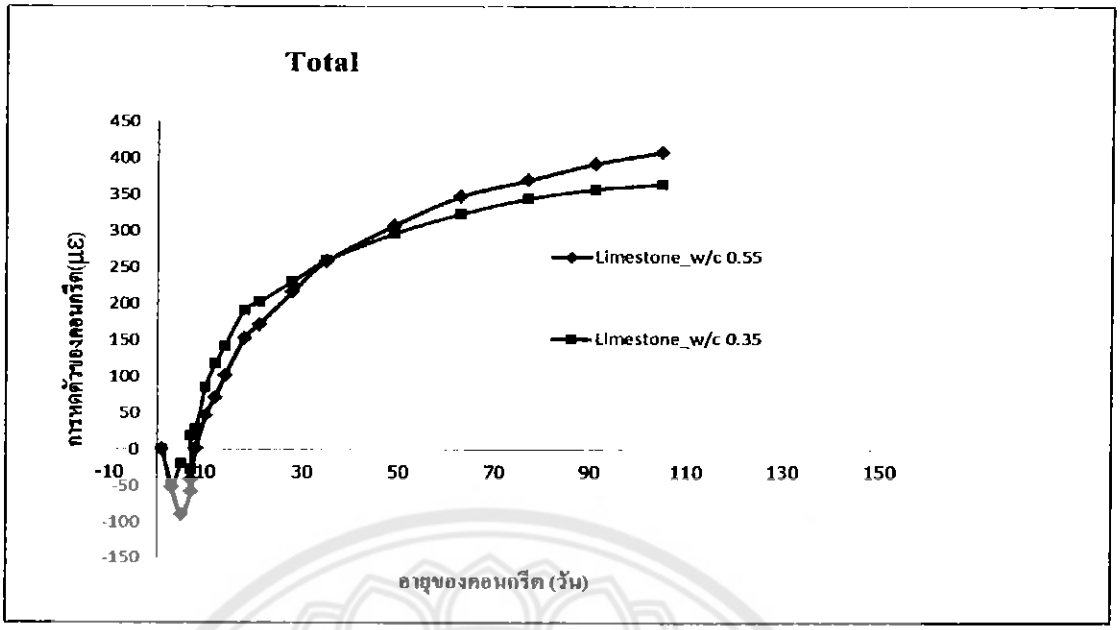
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการหดตัวโดยรวมของอัตราส่วน W/C 0.35



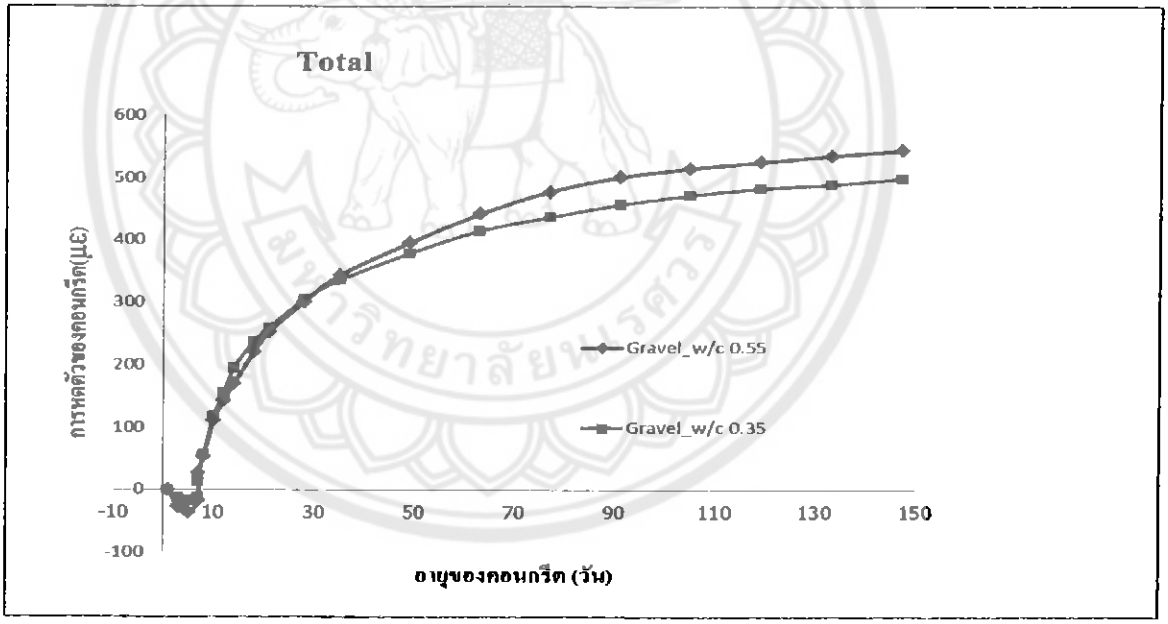
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการหดตัวโดยรวมของอัตราส่วน W/C 0.55

จากกราฟผลการทดลอง คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.55 จะมีการหดตัวมากกว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.35

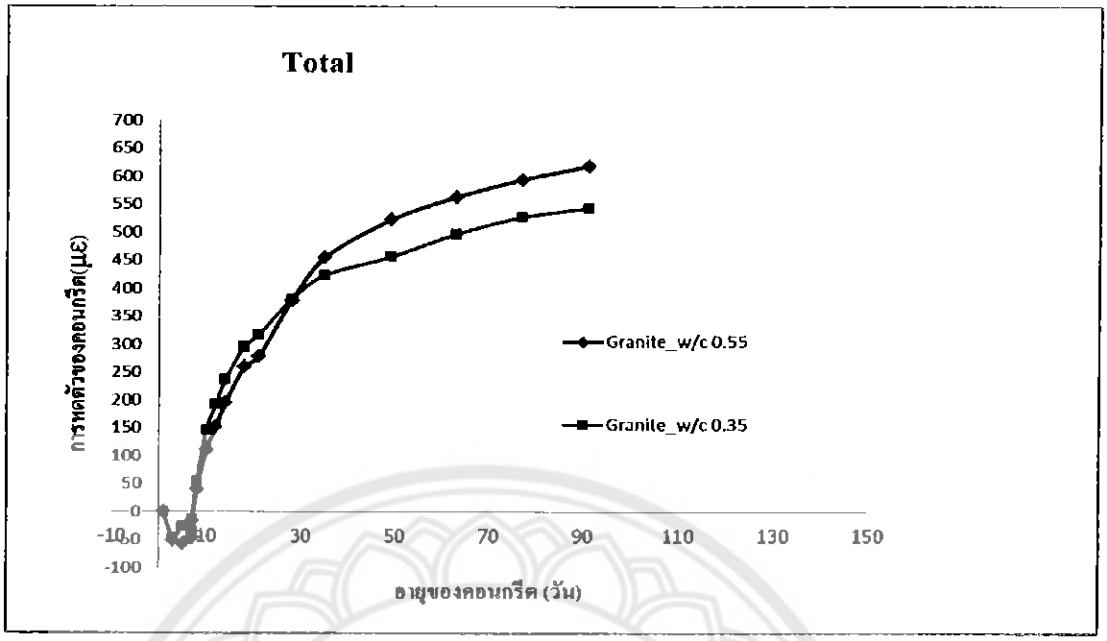
ผลการทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบค่าการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตโดยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างกัน ของหินชนิดเดียวกัน



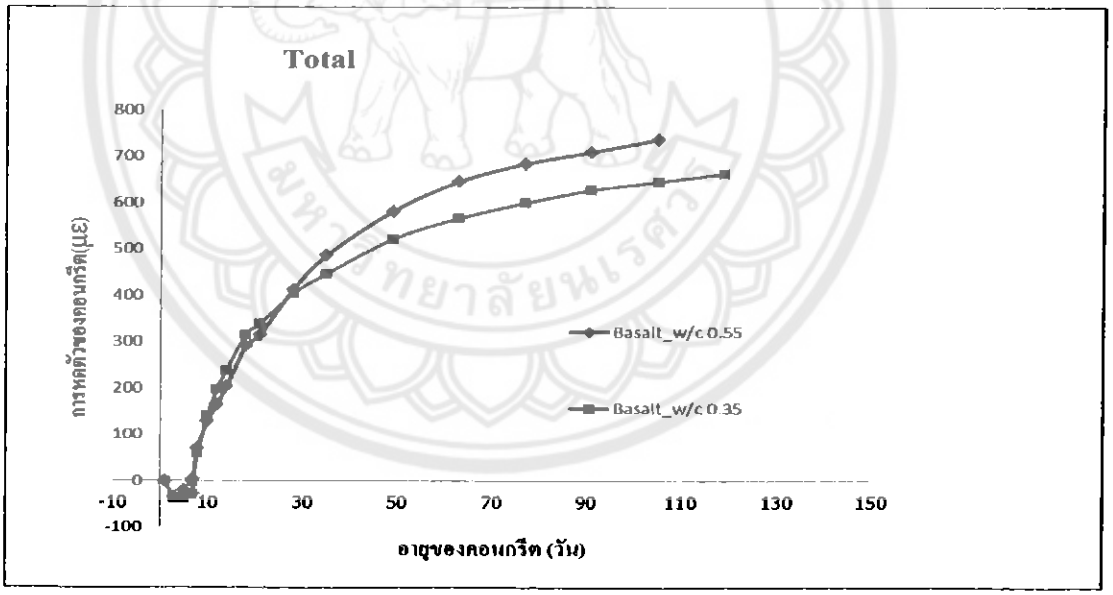
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการหดตัวโดยรวมของหินปูน



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการหดตัวโดยรวมของหินกรวด



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการหดตัวโดยรวมของหินแกรนิต

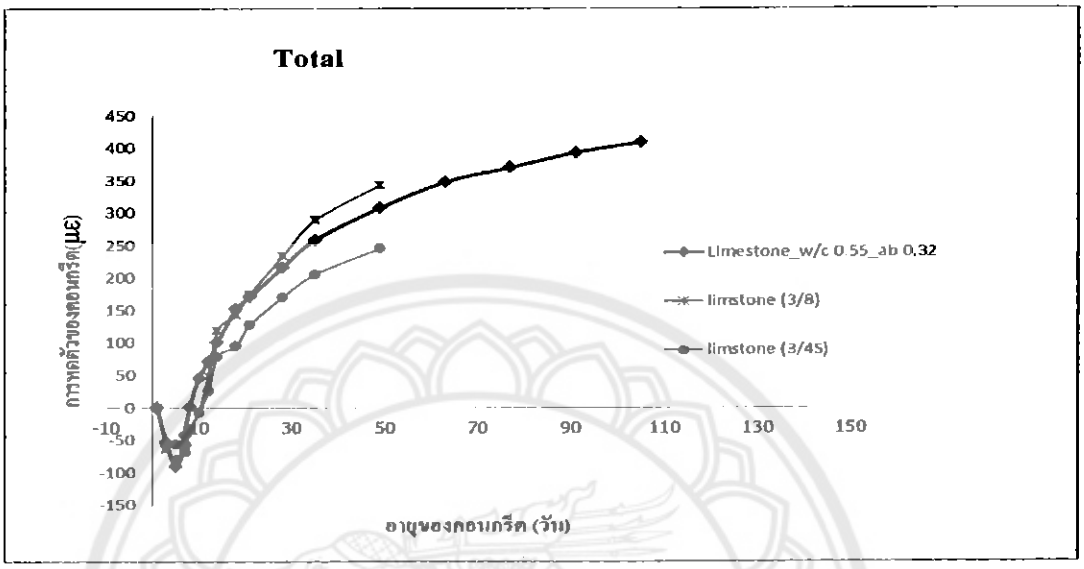


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการหดตัวโดยรวมของหินบะซอลล์

จากกราฟผลการทดลอง คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.55 จะมีการหดตัวมากกว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.35

4.3.2 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากัน ขนาดคละที่ต่างกัน

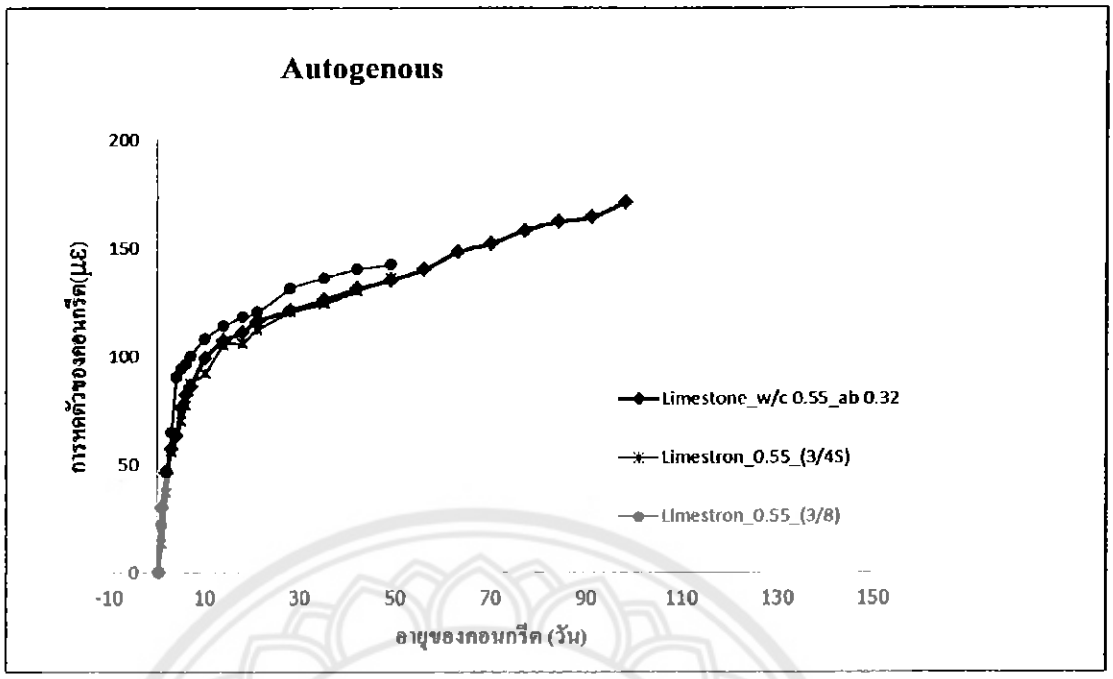
ผลการทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบค่าการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตโดยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากันของหินชนิดเดียวกัน



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการหดตัวโดยรวมของหินปูน

จากกราฟผลการทดลอง มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.55 หินที่มีขนาด 3/8 จะมีการหดตัวมากกว่า หินขนาดคละ และ หินขนาด ¾ ตามลำดับ

ผลการทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบค่าการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตโดยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากันของหินชนิดเดียวกัน



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการหดตัวแบบออโตจีนัสของหินปูน

จากกราฟผลการทดลอง มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.55 หินที่มีขนาด 3/8 จะมีการหดตัวมากกว่า หินขนาดคละ และ หินขนาด 3/4 ตามลำดับ

4.4 การวิเคราะห์ผลของปัจจัยและแนวทางในการหดตัวของคอนกรีต

หัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์ผลของการศึกษาปัจจัยและและคุณสมบัติของมวลรวม วัสดุ ที่ส่งผลต่อการหดตัวของคอนกรีต โดยแบ่งการสรุปออกเป็น 3 ส่วน คือ การศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อการหดตัวของคอนกรีต คือ น้ำ อัตราส่วนมวลรวม ชนิดของหิน และแนวทางในการนำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งมีรายละเอียดการสรุปและวิเคราะห์ผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.4.1 การศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อการหดตัวของคอนกรีต

4.4.1.1 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

การหดตัวแบบออโตจีนัส

การหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ลดลง เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ ทำให้ปริมาณน้ำอิสระภายในคอนกรีตลดลง ซึ่งการหดตัวแบบออโตจีนัสเกิดจากการสูญเสียน้ำจากปฏิกิริยาไฮเดรชันออกจากช่องว่างคาปิลารี ดังนั้นเมื่อมีปริมาณน้ำอิสระลดลง จึงทำให้การหดตัวแบบออโตจีนัสสูง และการใช้ปริมาณน้ำในส่วนผสมน้อย ทำให้ขนาดของช่องว่างคาปิลารีเล็ก เมื่อลักษณะโครงสร้างของช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ยิ่งมีขนาดเล็ก จะทำให้แรงดึงแบบคาปิลารี สูง จึงทำให้คอนกรีตเกิดการบีบอัดของแรงภายในช่องว่างคาปิลารี ส่งผลให้เกิด Self-desiccation มาก ค่าการหดตัวแบบออโตจีนัสจึงมีค่ามาก

การหดตัวโดยรวมของคอนกรีต

การหดตัวโดยรวมของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ จะทำให้ปริมาณน้ำอิสระมีมาก ช่องว่างคาปิลารีในซีเมนต์มีขนาดใหญ่ การที่คอนกรีตมีช่องว่างคาปิลารีที่ใหญ่และจำนวนมาก จะทำให้น้ำสามารถระเหยออกจากคอนกรีตได้สะดวก ส่งผลให้เกิดแรงดึงในช่องว่างคาปิลารีมาก การหดตัวโดยรวมของคอนกรีตจึงมีค่ามาก

4.4.1.2 อัตราส่วนมวลรวม

การหดตัวแบบออโตจีนัส

การหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนมวลรวมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นผิวสัมผัสของมวลรวมมีมากขึ้นจึงทำให้มีการดูดซึมน้ำมาก ส่งผลให้การหดตัวของคอนกรีตมีค่ามาก

การหดตัวโดยรวมของคอนกรีต

การหดตัวโดยรวมของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนมวลรวมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นผิวสัมผัสของมวลรวมมีมากขึ้นจึงทำให้มีการดูดซึมน้ำมาก และน้ำสามารถระเหยออกจากคอนกรีตได้สะดวก ส่งผลให้การหดตัวโดยรวมของคอนกรีตจึงมีค่ามาก

4.4.1.3) ชนิดหิน

การหดตัวแบบออโตจีนัส

การหดตัวแบบออโตจีนัสของหินขึ้นอยู่กับมวลโดยหินขนาดใหญ่จะมีการหดตัวน้อย และความพรุนก็มีส่วนในการหดตัวของหินแต่ละชนิดด้วย

การหดตัวโดยรวมของคอนกรีต

การหดตัวโดยรวมของหินขึ้นอยู่กับขนาดของหินโดยหินขนาดใหญ่จะมีการหดตัวน้อย และความพรุนก็มีส่วนในการหดตัวของหินแต่ละชนิดด้วย

4.4.1.4) สภาพแวดล้อม

ก. ความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกัน

สภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต ซึ่งการหดตัวแบบออโตจีนัสเป็นการหดตัวที่เกิดจากการสูญเสียน้ำจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันภายในคอนกรีต โดยความชื้นสัมพัทธ์จากสภาพแวดล้อมภายนอกของคอนกรีตไม่ส่งผลกระทบใดๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์ภายในคอนกรีตได้ การหดตัวโดยรวมของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อมที่ลดลง เนื่องจากคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมที่มีความความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ทำให้น้ำที่มีอยู่ภายในคอนกรีตสามารถระเหยออกสู่สภาพแวดล้อมได้ง่ายและปริมาณมาก การหดตัวจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

ข. อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

การหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิสูงจะทำให้น้ำที่มีอยู่ภายในช่องว่างเกิดการระเหยออกจากช่องว่างได้มาก ส่งผลให้การหดตัวของคอนกรีตจึงเกิดขึ้นมากตามไปด้วย

บทที่ 5
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

หัวข้อเป็นการสรุปผลของการศึกษาปัจจัยและแนวทางในการลดการหดตัวของคอนกรีต โดยแบ่งการสรุปออกเป็น 2 ส่วน คือ ผลของการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อการหดตัวของคอนกรีต และผลของการหาแนวทางในการลดการหดตัวของคอนกรีต ซึ่งมีรายละเอียดการสรุปผลการศึกษาดังต่อไปนี้

5.1 ผลของการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อการหดตัวของคอนกรีต

1) การหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นหรือการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตมีค่าลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง

2) การหดตัวแบบออโตจีนัส และการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเคมีผสมเพิ่มและอัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น ที่เพิ่มขึ้น

3) สภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์แตกต่างกันไม่มีผลต่อการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต แต่การหดตัวโดยรวมของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์ที่ลดลง

4) การหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

5) การหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตมีค่าลดลงตามการใช้ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบที่มีขนาดเพิ่มขึ้น

5.2 ผลของการศึกษาแนวทางในการลดการหดตัวของคอนกรีต

1) การหดตัวแบบออโตจีนัสจะมีค่าการหดตัวลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น ส่วน การหดตัวโดยรวมจะมีค่าการหดตัวลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง

2) คอนกรีตที่ผสมหินบะซอลต์มีค่าการหดตัวสูงที่สุด ตามด้วยคอนกรีตที่ผสมด้วยหินกรวด หินแกรนิต และหินปูนตามลำดับ

3) ขนาดคละของมวลรวมหยาบที่มีการหดตัวจากมากสุดไปน้อยสุด คือ 3/8 เดี่ยว , 3/4 คละ, 3/4 เดี่ยว

บรรณานุกรม

[1] ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). ปูนซีเมนต์ ปอซโซลานและคอนกรีต. (1).

[2] Design Manual for Roads and Bridges. (1987). Early Thermal Cracking of Concrete, (1).

[3] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุในคณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา. (2540). ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต. มาตรฐาน ว.ส.ท. 1014-40, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, (1).

[4] คอนกรีตผสมเสร็จ (CPAC). (2539). คอนกรีตเทคโนโลยี (Concrete Technology). (4).

[5] American Society for Testing and Materials, ASTM C 494. (2004). Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. Annual Book of ASTM Standard.

[6] สุพะไชย์ จินดาวุฒิกุล. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ, 60(189), 22-24.

[7] สุพัฒน์ชัย ใจช่วย, สรัณกร เหมะวิบูลย์, สนธยา ทองอรุณศรี, วรางคณา แสงสร้อย และ สมนึก ตั้งเติมสิริกุล. (2555). การหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตจากแหล่งต่างๆ ในประเทศไทย. การประชุม วิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17, โรงแรมเซ็นทารา แอนด์คอนเวนชั่นเซ็นเตอร์ จังหวัดอุดรธานี.

[8] ทวิช กล้าแท้ และ คมสัน มาลีสี. (2553). อิทธิพลของผงหินปูนปรับปรุงคุณสมบัติที่มีผลกระทบต่อค่ากำลังอัดและการหดตัวแบบออโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6, โรงแรมแกรนด์ แปซิฟิค ซอฟเฟอริน รีสอร์ท แอนด์ สปา อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี.

[9] The American Association of State Highway Officials. Standard Specification for Highway Materials and Methods of Sampling and Testing, Part 1, AASHTO Designation: M80-87 (1995).

[10] The American Society for Testing and Materials. ASTM Designation: C33-99.

[11] ศักรินทร์ เหลืองกำจร. การควบคุมการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต (Control Drying Shrinkage Crack in Concrete). Available from: www.cpacacademy.com/download/cpacacademy_com/b-p0059.pdf.

[12] American Concrete Institute, ACI 308. (1997). Standard Prectice for Curing Concrete. Annual Book of ACI Standard.

[13] Buchole, N.r G. and Jeffrey. (1997). Properties of High-Calcium Dry Bottom Ash for Structural Concrete. ACI Materials Journal, 94(2), 90-101.

[14] สมนึก ตั้งเติมสิริกุล, สุวิมล สัจจวานิชย์, บุญรอด คุปติทัฬหิ และ มนสิช สาริกะภูติ. (2543). ความคงทนของคอนกรีต.

[15] Holt, E. E..(2001). Early age Autogenous shrinkage of Concrete. Technical Research Centre of Finland (VTT): Finland. 184 - 193.

[16] Design Manual for Roads and Bridges. (1987). Early Thermal Cracking of Concrete, (1).

[17] ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. (1).

[18] Tazawa, E-i. and Miyazawa, S. (1995).Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste. Cement and Concrete Research, 25(2), 281-287.

[19] ศ.ดร. ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2553). เถ้าลอยในงานคอนกรีต. ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, (4).

[20] Kasemchaisiri, R. and Tangtermsirikul, S. (2007). A method to determine water retainability of porous fine aggregate for design and quality control of fresh concrete. Construction and Building Materials, 21(6), 1322-1334.

[21] Ye, G., Liu, X., Schutter, D.G., Poppe, A. M. and Taerwe, L. (2007). Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes. Cement and Concrete Composites, 29(2), 94-102.

ภาคผนวก

ภาคผนวก
คุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ในการทดลอง

การทดสอบคุณสมบัติจำเพาะของวัสดุประสาน ซึ่งวัสดุประสานที่ใช้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์

ความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ คือค่าอัตราส่วนของน้ำหนักของซีเมนต์ในอากาศต่อน้ำหนักของน้ำหนักของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 4 °ซ. ที่มีปริมาตรเท่ากับซีเมนต์ ค่าความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ โดยปกติมักใช้ประกอบในการคำนวณหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface) ของซีเมนต์ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการบอกถึงความละเอียด (Fineness) ของซีเมนต์ นอกจากนั้นความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ยังใช้เป็นข้อมูลที่สำคัญการคำนวณหาปฏิภาคส่วนผสม (Mix Proportion or Mix Design) ของคอนกรีตอีกด้วย ความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ยังใช้เป็นข้อมูลที่สำคัญในการคำนวณหาปฏิภาคส่วนผสม (Mix Proportion or Mix Design) ของคอนกรีตอีกด้วย ความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์จะมีค่าอยู่ระหว่าง 3.05 – 3.20 ซึ่งค่าจะมากหรือน้อยนั้นโดยทั่ว ๆ ไปขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของเนื้อซีเมนต์และความละเอียดของซีเมนต์ ซีเมนต์ผสมหรือซีเมนต์ซิลิก้าจะมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าค่าดังกล่าวข้างต้น ซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากก็จะมีค่าความถ่วงจำเพาะสูง ในกรณีที่ไม่ได้มีการทดสอบหาค่ามาก่อนมักจะสมมุติค่าความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ปริมาณ 3.15

<u>วัสดุทดสอบ</u>

ซีเมนต์ผงที่ต้องการทดสอบหนักประมาณ 1000 กรัม

<u>เครื่องมือทดสอบ</u>

1.ขวดทดลองมาตรฐานเลอแชททีเลียร์ (Standard Le Chatelier Flask) จำนวน 1 ใบ
2.หลอดกรวยสำหรับกรอกซีเมนต์ผงลงในขวดมาตรฐาน จำนวน 1 ใบ
3.เทอร์โมมิเตอร์ (0 – 100 องศาเซลเซียส) จำนวน 1 อัน
4.น้ำมันก๊าด (Kerosene) ปริมาตรประมาณ 1000 มล.
5.อ่างน้ำขนาดประมาณ 2000 มล. จำนวน 1 ใบ
6.เครื่องชั่งอ่านได้ละเอียดไม่น้อยกว่า 0.1 กรัม
7.ถาดสำหรับใส่ซีเมนต์ จำนวน 1 ใบ

<u>วิธีทดสอบ</u>

1.จัดเตรียมน้ำในอ่างให้มีอุณหภูมิคงที่ที่ 20 องศาเซลเซียส ตามที่กำหนดไว้ พยายามควบคุมอุณหภูมิในอ่างน้ำให้มีอุณหภูมิคงที่ตลอดการทดลอง

2.เทน้ำมันก๊าดลงในขวดทดลองมาตรฐานเลอแชททีเลียร์ จนกระทั่งระดับของน้ำมันก๊าดอยู่ระหว่างขีดบอกปริมาตร 0 และ 1 มล. คอขวดซึ่งอยู่เหนือระดับน้ำมันก๊าดควรเช็ดให้แห้ง

3.จุ่มขวดทดลองในอ่างน้ำในข้อที่ 1. แล้วให้ทิ้งไว้จนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำมันก๊าดและน้ำในอ่างเท่ากัน อ่านค่าอุณหภูมิของน้ำและขีดค่าปริมาตรของน้ำมันก๊าดในขวดทดลอง

4.ชั่งน้ำหนักของขวดทดลองและน้ำมันก๊าดครั้งแรก จากนั้นค่อย ๆ ใส่ซีเมนต์ลงในขวดทดลอง การใส่ซีเมนต์ควรไม่ให้ซีเมนต์ตกกระจาย และจะต้องระวังไม่ให้ซีเมนต์เกาะติดตามคอขวดทดลองด้วย

5.ให้หยุดใส่ซีเมนต์เมื่อระดับของน้ำมันก๊าดขึ้นมาอยู่ระหว่างช่วงของขีดบอกปริมาตรส่วนบนของขวดทดลอง จากนั้นทำการไล่ฟองอากาศซึ่งอาจเกาะอยู่กับผงซีเมนต์ การไล่ฟองอากาศให้ปิดปากขวดทดลองด้วยจุกแก้ว แล้วเอียงขวดและหมุนช้า ๆ จนกระทั่งไม่มีฟองอากาศลอยขึ้นมาอีก

6. จุ่มขวดทดลองในอ่างน้ำอีกครั้งหนึ่ง เช่นเดียวกับข้อที่ 3. ก่อนจะอ่านปริมาตรทุกครั้ง ผู้ทำการทดลองจะต้องแน่ใจว่าอุณหภูมิของน้ำมันก๊าดในขวดทดลองเท่ากับอุณหภูมิของน้ำในอ่าง เพื่อที่จะไม่ให้อุณหภูมิของน้ำมันก๊าดในการอ่านครั้งแรกและครั้งที่สองต่างกันไม่เกินกว่า 0.2 องศาเซลเซียส

7. อ่านอุณหภูมิของน้ำและปริมาตรของน้ำมันก๊าดในขวดทดลอง

8. ชั่งน้ำหนักของขวดทดลองและน้ำมันก๊าดครั้งหลัง ผลต่างของน้ำหนักของการชั่งสองครั้งจะเท่ากับน้ำหนักของซีเมนต์ที่ใส่ลงไปในขวดทดลอง

9.ทำการทดลองซ้ำอีกอย่างน้อย 1 ครั้ง จากข้อ 2. ถึงข้อ 8. จนกว่าจะได้ผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจ

หมายเหตุ :ในการทำความสะอาดขวดทดลองให้ใช้น้ำมันก๊าดล้างเท่านั้น ห้ามใช้น้ำล้างเป็นอันขาด

การหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ มาตรฐาน ASTM C188[12]

รายการ	ผลการทดสอบ	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1. ขีดปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งแรก, มล.	0.4	0.7
2. อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งแรก , ^{o}C	20	20
3. น้ำหนักปูนซีเมนต์และถาดครั้งแรก,ก.	1109.2	1053.1
4. ขีดปริมาตรของน้ำมันก๊าดครั้งหลัง, มล.	18.5	18.2
5. อุณหภูมิของน้ำในอ่างครั้งหลัง, ^{o}C	20	20
6. น้ำหนักปูนซีเมนต์และถาดครั้งหลัง,ก	1053.1	999.1
7. น้ำหนักผงหินปูนที่ใช้ , ก. (3) - (6)	56.1	54.1
8. ปริมาตรของน้ำมันก๊าดที่ถูกแทนที่,มล (4) – (1)	18.1	17.5
9. ความถ่วงจำเพาะ , (7) / (8)	3.10	3.09
10. ความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย	3.1	

การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ

วัสดุทดลอง

หินโม่ (หรือกรวด) ที่ต้องการทดสอบ

เครื่องมือทดสอบ

1.ตะแกรงมาตรฐานอเมริกัน (U.S. Sieves) สำหรับร่อนหิน ขนาด 2", 1 ½ ", 1", 3/4" ,1/2", 3/8" และเบอร์ 4

2.เครื่องชั่งซึ่งมีความละเอียดไม่น้อยกว่าร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักของมวลรวมที่ต้องการทดสอบ

3.แปรงทำความสะอาดตะแกรง

4.เครื่องร่อนมวลรวมละเอียดและเครื่องร่อนมวลรวมหยาบ

5.ผ้าสำหรับเช็ด

6.ตะกร้าลวดเหล็ก

7.เตาอบ

วิธีทดสอบ

1. นำมวลรวมหยาบจากที่เก็บมาประมาณเท่าที่ต้องการ โดยวิธีการของการแบ่งสี่ (Method of Quartering) ร่อนเอาส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ทิ้งไป

2. ล้างมวลรวมหยาบด้วยน้ำ เพื่อขจัดฝุ่นและสิ่งสกปรกที่ติดตามผิวของมวลรวมหยาบนั้น

3. นำเอามวลรวมหยาบแต่ละก้อนมาเช็ดถูด้วยผ้า ให้น้ำที่เกาะตามผิวของมวลรวมหยาบถูกดูดซับไป โดยที่ผิวของมวลรวมหยาบยังชื้นอยู่ หลีกเลี่ยงอย่าให้มีการระเหยของความชื้นในขณะเช็ดถู มวลรวมหยาบจะอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง

4. ชั่งน้ำหนักของมวลรวมหยาบในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง

5. เทมวลรวมหยาบในสภาวะอิ่มตัวผิวห้างนี้ลงในตะกร้าลวดเหล็กแล้วชั่งหาน้ำหนักในน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 23 o ซ.

6. จากนั้นนำเอามวลรวมหยาบนั้นไปอบในเตาอบอุณหภูมิประมาณ 100–110 o ซ. จนได้น้ำหนักคงที่แล้วทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1-3 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปชั่ง

การหาค่าความถ่วงจำเพาะของหินปูน มาตรฐาน ASTM C127[12]

รายการ	ผลการทดสอบ	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1. น้ำหนักของหินในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง, กก.	2.276	2.417
2. น้ำหนักของตะกร้าลวดเหล็กในน้ำ, กก.	2.50	2.50
3. น้ำหนักของตะกร้าลวดเหล็กรวมหินในน้ำ, กก.	3.931	4.021
4. น้ำหนักของหินในน้ำ, กก. (3-2)	1.431	1.521
5. น้ำหนักของหินในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ, กก.	2.269	2.408
6. ความถ่วงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ	2.67	2.66
7. ความถ่วงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง	2.69	2.69
8. ความถ่วงจำเพาะปรากฏ	2.71	2.71
9. ร้อยละของการดูดซึม	0.335	0.374

ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ 2.67
ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง 2.69
ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะปรากฏ 2.71
ค่าเฉลี่ยร้อยละของการดูดซึม 0.3545

การหาค่าความถ่วงจำเพาะของหินกรวดแม่น้ำ มาตรฐาน ASTM C127[12]

รายการ	ผลการทดสอบ	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1. น้ำหนักของหินในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง, กก.	2.442	1.993
2. น้ำหนักของตะกร้าลวดเหล็กในน้ำ, กก.	2.50	2.50
3. น้ำหนักของตะกร้าลวดเหล็กรวมหินในน้ำ, กก.	4.011	3.731
4. น้ำหนักของหินในน้ำ, กก. (3-2)	1.511	1.231
5. น้ำหนักของหินในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ, กก.	2.423	1.978
6. ความถ่วงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ	2.61	2.15
7. ความถ่วงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง	2.62	2.62
8. ความถ่วงจำเพาะปรากฏ	2.63	2.63
9. ร้อยละของการดูดซึม	0.788	0.773

ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ 2.61
ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง 2.62
ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะปรากฏ 2.63
ค่าเฉลี่ยร้อยละของการดูดซึม 0.7805

การหาค่าความถ่วงจำเพาะของหินแกรนิต มาตรฐาน ASTM C127[16]

รายการ	ผลการทดสอบ	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1. น้ำหนักของหินในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง, กก.	1.616	1.109
2. น้ำหนักของตะกร้าลวดเหล็กในน้ำ, กก.	2.50	2.50
3. น้ำหนักของตะกร้าลวดเหล็กรวมหินในน้ำ, กก.	3.51	3.192
4. น้ำหนักของหินในน้ำ, กก. (3-2)	1.010	0.692
5. น้ำหนักของหินในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ, กก.	1.606	1.102
6. ความถ่วงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ	2.66	2.66
7. ความถ่วงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง	2.67	2.66
8. ความถ่วงจำเพาะปรากฏ	2.68	2.68
9. ร้อยละของการดูดซึม	0.610	0.626

ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ 2.66
ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง 2.67
ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะปรากฏ 2.68
ค่าเฉลี่ยร้อยละของการดูดซึม 0.618

การหาค่าความถ่วงจำเพาะของหินบะซอลล์ มาตรฐาน ASTM C127[16]

รายการ	ผลการทดสอบ	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1. น้ำหนักของหินในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง, กก.	1.240	1.297
2. น้ำหนักของตะกร้าลวดเหล็กในน้ำ, กก.	2.5	2.50
3. น้ำหนักของตะกร้าลวดเหล็กรวมหินในน้ำ, กก.	3.28	3.731
4. น้ำหนักของหินในน้ำ, กก. (3-2)	0.780	0.814
5. น้ำหนักของหินในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ, กก.	1.2	1.251
6. ความถ่วงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ	2.6	2.6
7. ความถ่วงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง	2.7	2.7
8. ความถ่วงจำเพาะปรากฏ	2.8	2.8
9. ร้อยละของการดูดซึม	3.34	3.717

ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ 2.6
ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง 2.7
ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะปรากฏ 2.8
ค่าเฉลี่ยร้อยละของการดูดซึม 3.528

การหาค่าความถ่วงจำเพราะของมวลรวมละเอียด (ทรายแม่น้ำ) มาตรฐาน ASTM C128[18]

รายการ	การคำนวณ	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
น้ำหนักทรายในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง(S),g	501.8	503.7
น้ำหนักขวดหา ถ.พ.+ทราย+น้ำ(C),g	970.2	945.7
น้ำหนักทรายที่อบแห้ง(A),g	497.3	498.6
น้ำหนักขวดหา ถ.พ.+น้ำ(B),g	661.4	635.4
ความถ่วงจำเพราะทั้งหมดที่สภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Bulk specific gravity)	2.58	2.58
ความถ่วงจำเพราะทั้งหมดที่สภาพ SSD (Bulk specific gravity at SSD)	2.6	2.6
ความถ่วงจำเพราะปรากฏ(Apparent specific gravity)	2.64	2.65
การดูดซึม,%	0.90	1.02

1. ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพราะทั้งหมดที่สภาพอิ่มตัวผิวแห้ง 2.58
2. ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพราะทั้งหมดที่สภาพ SSD 2.6
3. ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพราะปรากฏ 2.645
4. ค่าเฉลี่ยการดูดซึม,% 0.96