

คุณสมบัติต้านกำลังและการซึมผ่านได้ของน้ำของคอนกรีตบดอัดผสมเถ้าลอยปริมาณสูง  
กรณีศึกษา เขื่อนคอนกรีตบดอัดโครงการท่าด่าน จังหวัดนครนายก

STRENGTH AND PERMEABILITY OF COMPACTED CONCRETE MIXED WITH HIGH  
VOLUME OF FLY ASH CASE STUDY OF THA DAN RCC DAM, NAKHON NAYOK  
PROVINCE



โดย  
นายธีรวัฒน์ นิมนต์โรจน์  
นายธนบดี นุชนารก

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมการก่อสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2542

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 36776  
วัน, เดือน, ปี 28 ส.ค. 2542

**STRENGTH AND PERMEABILITY OF COMPACTED CONCRETE MIXED WITH HIGH  
VOLUME OF FLY ASH CASE STUDY OF THA DAN RCC DAM, NAKHON NAYOK  
PROVINCE**



**MR.TEERAWATT NIMNAPHAROJ**

**MR.THANABODEE NUCHANARD**

**A SPECIAL PROJECT SUMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE BACHELOR  
DEGREE OF CONSTRUCTION ENGINEERING  
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGHUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**1999**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรอง โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ คุณสมบัติค้ำกันกำลังและการซึมผ่านได้ของน้ำของคอนกรีตบดอัดผสมเด็กลอย  
ปริมาณสูงกรณีศึกษา เชื้อนคอนกรีตบดอัด โครงการท่าค่าน จังหวัดนครนายก

นักศึกษา	นายธนบดี นุชนารด	รหัสประจำตัว	39014207
	นายธีรวัฒน์ นิมนภาโรจน์	รหัสประจำตัว	39014235
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมการก่อสร้าง
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา		
อาจารย์ที่ปรึกษา	อ.อุษะ สิริแก้ว		

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ

ลายมือชื่อ

อ.อำนาจ พานิชกุลพงศ์  
อ.อุษะ สิริแก้ว  
อ.แหยมทอง เหล่าคางถาวร

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

*Non Luang, Eng. M. Sc.*

(ผศ.ดร.แดง เจริญสุวรรณ)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 1 เดือน พฤษภาคม พ.ศ.2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ คุณสมบัติด้านกำลังและการซึมผ่านได้ของน้ำของคอนกรีตบดอัดผสมเถ้าลอย ปริมาณสูง กรณีศึกษา เขื่อนคอนกรีตบดอัด โครงการท่าด่าน จังหวัดนครนายก  
STRENGTH AND PERMEABILITY OF ROLLER COMPACTED  
CONCRETE DAM CASE STUDY THADAN RCC DAM NAKORNAYOK  
PROVINCE

นักศึกษา นายธนบดี นุชนารถ  
นายธีรวัฒน์ นิมนภาโรจน์  
ระดับการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการก่อสร้าง  
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
พ.ศ. 2543

## บทคัดย่อ

เขื่อนคอนกรีตบดอัดเป็นเทคโนโลยีการก่อสร้างเขื่อนที่ยังถือว่าค่อนข้างใหม่สำหรับวงการก่อสร้างในประเทศไทย แต่ก็เป็นที่มีการสร้างเขื่อนที่มีประสิทธิภาพมาวิธีหนึ่ง การก่อสร้างเขื่อนโดยวิธีนี้ได้มีการใช้เถ้าลอยลิกไนต์มาใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีต แล้วทำการบดอัดเพื่อให้ส่วนผสมมีความหนาแน่นตามต้องการ

เถ้าลอยลิกไนต์จากแม่เมาะเป็นวัสดุพอซโซลาน ซึ่งจะแข็งตัวได้เมื่อผสมกับน้ำในปริมาณที่เพียงพอ ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ทดลองนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ผสมในคอนกรีตแทนซีเมนต์ในอัตราส่วนต่างๆ แล้วทำการบดอัด เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมในด้าน ความหนาแน่น ปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการบดอัด กำลังอัด และความซึมผ่านได้ของน้ำ และยังได้ทำการศึกษาถึงความต้านทานต่อการสึกกร่อนของหิน 2 ชนิดที่ใช้เป็นวัสดุมวลรวมหยาบในการทดลองต่างๆด้วย

จากการศึกษาพบว่า ส่วนผสมคอนกรีตบดอัดที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เข้าไปแทนที่ซีเมนต์มากขึ้น ความหนาแน่นสูงสุดจะลดลงเล็กน้อย ในขณะที่ความต้องการน้ำในการบดอัดลดลงพอสมควร มีการพัฒนากำลังอัดช้าลง และมีความที่บ้น้ำมากขึ้น ส่วนการศึกษาผลกระทบต่อคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตบดอัดจากการใช้หินจากแหล่งภายในสถานที่ก่อสร้างจริง (หินTuff) เปรียบเทียบกับการใช้หินปูนพบว่า ส่วนผสมคอนกรีตบดอัดที่ใช้หินTuff จะมีกำลังอัดน้อยกว่า แต่มีความที่บ้น้ำมากกว่า ส่วนผสมที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title : STRENGTH AND PERMEABILITY OF ROLLER COMPACTED CONCRETE  
DAM CASE STUDY THADAN RCC DAM NAKORNAYOK PROVINCE

Name : MR.THANABODEE NUCHANARD  
MR.TEERAWATT NIMNAPHAROJ

Department : CONSTRUCTION ENGINEERING

Faculty : ENGINEERING

Advisor : MISS.UBA SIRIKEAW

## ABSTRACT

The Roller Compacted Concrete is still a new method of dam construction in Thailand but yet is a effective one.This new method of construction has applied the use of lignite fly ash to replace some of the cement content and then compacted to the desire density.

Mae Moh fly ash is a pozzolan material ,after being mixed with sufficient amount of water,it becomes harder.This project has applied the use of Mae Moh lignite fly ash to replace some of the cement content in various ratio and then studied the engineering properties of the mixtures on 3 basis which are density , compressive strength and permeability.Also has studied the abrasion test on Tha Dan coarse aggregate to determine the abrasion resistance.

The study has shown that the rcc mixture using high volume of fly ash has a bit less maximum density while the requirement of water for compaction decreases in considerable amount.Also slower strength development and less permeability.The effect of using Tha Dan coarse aggregate on engineering properties of the mixture compare to mixture using lime stone are lower compressive strength and less permeability.

# กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้ คุณความดีขอมอบให้แก่บุคคลผู้ให้ความอนุเคราะห์ ท่านอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ความหวังให้แก่ผู้จัดทำที่ได้มีโอกาสทำโครงการพิเศษเล่มนี้จนสำเร็จลุล่วง ขอขอบคุณ อาจารย์ อุบะ ศิริแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ,ข้าราชการกรมชลประทาน , คณะวิศวกรรมศาสตร์,ภาควิชาวิศวกรรมโยธา,พนักงาน ข้าราชการทุกท่าน และเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่แสนดีทุกคน

ขอบขอบพระคุณ บิดา และมารดา ที่ให้กำลังใจเสมอมา



นายธนบดี นุชนารถ  
นายธีรวัฒน์ นิมนภาโรจน์  
ผู้จัดทำโครงการพิเศษ  
30 เม.ย. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	ปกใน (ภาษาไทย)	ก
	ปกใน (ภาษาอังกฤษ)	ข
	หน้าอานุมัติ	ค
	บทคัดย่อภาษาไทย	ง
	บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
	กิตติกรรมประกาศ	ฉ
	สารบัญ	ช
	สารบัญตาราง	ฌ
	สารบัญภาพ	ญ
<b>1</b>	<b>บทนำ</b>	
	1.1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
	1.2. วัตถุประสงค์ของ โครงการงานพิเศษ	2
	1.3. ทฤษฎีหรือสมมติฐาน	2
	1.4. ขอบเขตของ โครงการงานพิเศษ	3
	1.5. วิธีการดำเนินการศึกษา	3
	1.6. ผลที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา	3
<b>2</b>	<b>วรรณกรรมปริทัศน์</b>	
	2.1. การเกิดปฏิกิริยาไฮเครชันของปูนซีเมนต์	4
	2.1.1. ปฏิกิริยาไฮเครชันของแคลเซียมซilikेट	4
	2.1.2. ปฏิกิริยาไฮเครชันของ ไตรแคลเซียมอลูมิเนต	5
	2.1.3. ปฏิกิริยาไฮเครชันของเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอไรท์	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2. Pozzolan Reactions	7
2.3. คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าลอย	8
2.3.1. คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย	8
2.3.1.1. รูปร่างของเถ้าลอย	9
2.3.1.2. ความละเอียดของเถ้าลอย	10
2.3.2. องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย	10
2.4. ประเภทของเถ้าลอย	12
2.4.1. เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F	12
2.4.2. เถ้าลอยชั้นคุณภาพ C	13
2.5. เหตุผลในการเลือกใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต	14
2.6. ผลกระทบของการใช้เถ้าลอยต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีต	15
2.6.1. ข้อดีของการใช้เถ้าลอยในคอนกรีต	15
2.6.2. ข้อเสียของการใช้เถ้าลอยในคอนกรีต	17
2.7. Mix Design ของเขื่อนคอนกรีตบดอัด	18
2.7.1. ตัวอย่าง Mix Design ที่ใช้ในต่างประเทศ	18
2.7.2. Mix Design ที่ใช้ในโครงการเขื่อนท่าด่าน	18
<b>3</b> <b>วิธีดำเนินการศึกษา</b>	
3.1. การศึกษาข้อมูล	23
3.2. การจัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์	23
3.2.1. วัสดุ	23
3.2.2. อุปกรณ์	25
3.3. การเตรียมตัวอย่างทดสอบและการทดสอบในห้องปฏิบัติการ	25
3.3.1. ข้อกำหนดและข้อจำกัดของการทดสอบ	25
3.3.2. Moisture – Density Test	28
3.3.3. Compression Test	29
3.3.4. Permeability Test	29
3.3.5. Abrasion Test (Los Angeles Test)	31

3.3.6	แผนงานและขั้นตอนที่ใช้ทำการทดสอบ	31
4	ผลการศึกษาและวิเคราะห์	
4.1.	คุณสมบัติของมวลรวม	35
4.2.	คุณสมบัติทางกายภาพของ RCC	36
4.3.	ผลการศึกษาด้านกำลังของ RCC	40
4.3.1	ผลกระทบของปริมาณ Fly Ash ต่อการพัฒนากำลังอัด	40
4.3.2	เปรียบเทียบกำลังอัดของส่วนผสมที่ใช้หินปูน และ หิน Tuff	45
4.4.	การเปรียบเทียบกำลังอัดกับส่วนผสมที่ใช้ในเงื่อนไขอื่น ๆ	46
4.5.	ผลการศึกษาด้านการซึมผ่านได้	46
4.5.1	ผลกระทบของปริมาณ Fly ash ต่อค่าความซึมผ่านได้ของน้ำ	48
4.5.2	ผลกระทบของวัสดุมวลรวมหยาบต่อค่าความซึมผ่านได้ของน้ำ	48
4.6.	การประยุกต์ใช้อัตราส่วนผสมที่ศึกษา	50
4.6.1	การเปรียบเทียบหน่วยน้ำหนัก ( Unit Weight )	50
4.6.2	การเปรียบเทียบการซึมผ่านได้ของน้ำ ( Coefficient of Permcability )	51
4.6.3	การเปรียบเทียบด้านกำลังอัด	51
4.6.4	การเปรียบเทียบด้านราคาและปริมาณ	51
4.6.5	การเปรียบเทียบด้านการทรุดตัวที่ไม่เท่ากัน	52
5	สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	
5.1.	สรุปผลการศึกษา	54
5.2.	ข้อเสนอแนะ	54
	บรรณานุกรม	93
	ภาคผนวก ก.	
	- ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเขื่อนคอนกรีตบดอัด	56
	ภาคผนวก ข.	
	- ผลการทดสอบ	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
2.1.	แสดงข้อกำหนดทางกายภาพของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM	8
2.2.	แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ	11
2.3.	แสดงการแบ่งชั้นคุณภาพของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM	12
2.4.	แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ	13
2.5.	แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากประเทศไทยในปีต่างๆ	14
2.6.	แสดงตัวอย่าง Mix Design ของเขื่อนคอนกรีตบดอัดใน USA & Canada	19
2.7.	แสดงตัวอย่าง Mix Design ของเขื่อนคอนกรีตบดอัดใน South Africa	19
2.8.	แสดงตัวอย่าง Mix Design ของเขื่อนคอนกรีตบดอัดใน South Spain	20
2.9	เกณฑ์กำหนดของ RCC เขื่อนท่าด่าน	
3.1.	แสดงอัตราส่วนผสมของ RCC ที่ได้จากวิธีของ ACI	31
4.1	แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของหินทั้ง 2 ชนิด	35
4.2	แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้านกายภาพ	37
4.3	แสดงค่ากำลังอัด (KSC) ของส่วนผสม ที่ระยะเวลาต่างๆ จากการทดสอบ Compression Test	40
4.4	แสดงค่าการซึมผ่านได้ของน้ำด้วยวิธีการทดสอบ Permeability Test	48
4.5	เปรียบเทียบปริมาณวัสดุที่ใช้	52
ผ.ข.1.	แสดงผลการทดสอบ Moisture – Density Test สำหรับ F : C = 10 : 90	62
ผ.ข.2.	แสดงผลการทดสอบ Moisture – Density Test สำหรับ F : C = 50 : 50	62
ผ.ข.3.	แสดงผลการทดสอบ Moisture – Density Test สำหรับ F : C = 70 : 30	62
ผ.ข.4.	แสดงผลการทดสอบกำลังอัด ที่ระยะเวลาการทดสอบ 1 วัน	66
ผ.ข.5	แสดงผลการทดสอบกำลังอัด ที่ระยะเวลาการทดสอบ 3 วัน	66

ผ.ข.6	แสดงผลการทดสอบกำลังอัด ที่ระยะเวลาการทดสอบ 7 วัน	67
ผ.ข.7	แสดงผลการทดสอบที่ 1 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินปูน	68
ผ.ข.8	แสดงผลการทดสอบที่ 1 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินTuft	72
ผ.ข.9	แสดงผลการทดสอบที่ 3 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินปูน	76
ผ.ข.10	แสดงผลการทดสอบที่ 3 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินTuft	80
ผ.ข.11	แสดงผลการทดสอบที่ 7 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินปูน	84
ผ.ข.12	แสดงผลการทดสอบที่ 7 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินTuft	89
ผ.ข.13	แสดงผลการทดสอบ Abrasion Test (Los Angeles Test)	92



# สารบัญภาพ

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
2.1	แสดงการเกิดขบวนการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของ $C_3A$	6
2.2	แสดงภาพขยาย Monosulphate และ Ettringite	6
2.3	แสดงภาพขยาย SEM ของอนุภาคเถ้าลอยที่มีลักษณะต่างๆกัน	9
2.4	แสดงผลกระทบเถ้าลอยต่อการหดและขยายตัว	16
2.5	แสดงภาพขยาย SEM ของอนุภาคนูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอย	22
3.1	แสดงขั้นตอนการศึกษา	24
3.2	แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ Permeability Test	30
3.3	Chart แสดงแผนผังการทดสอบ	32
4.1	แสดงการเปรียบเทียบ Maximum Density ของส่วนผสมที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยแทนซีเมนต์ในเปอร์เซ็นต์ต่างๆ ที่พลังงานการบดอัดเท่ากัน	38
4.2	แสดงการเปรียบเทียบ Optimum Moisture Content ของส่วนผสมที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยแทนซีเมนต์ในเปอร์เซ็นต์ต่างๆ ที่พลังงานการบดอัดเท่ากัน	39
4.3	การพัฒนากำลังอัดสำหรับส่วนผสมที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ	41
4.4	การพัฒนากำลังอัดสำหรับส่วนผสมที่ใช้หิน tuft เป็นวัสดุมวลรวมหยาบ	42
4.5	แสดงการเปรียบเทียบ กำลังอัดของส่วนผสมที่ใช้ % เถ้าลอยแทนซีเมนต์ต่างๆกัน ที่ระยะเวลาต่างๆ	47
4.6	แสดงการเปรียบเทียบค่าความชื้นผ่านได้ของส่วนผสมต่างๆ	49
4.7	รูปตัดมาตรฐานแสดงรายละเอียดของเข็ช้อน RCC	53
ผ.ข.1	Chart แสดงวิเคราะห์ผลการทดลอง Moisture – Density Test ; F:C=10:90	63
ผ.ข.2	Chart แสดงวิเคราะห์ผลการทดลอง Moisture – Density Test ; F:C=50:50	64
ผ.ข.3	Chart แสดงวิเคราะห์ผลการทดลอง Moisture – Density Test ; F:C=70:30	65

ผ.ข.4	แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 1 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินปูน F:C= 70:30	69
ผ.ข.5	แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 1 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินปูน F:C = 50: 50	70
ผ.ข.6	แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 1 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินปูน F:C = 10: 90	71
ผ.ข.7	แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 1 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินTuff F:C = 70:30	73
ผ.ข.8	แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 1 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินTuff F:C = 50: 50	74
ผ.ข.9	แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 1 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินTuff F:C = 10:90	75
ผ.ข.10	แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 3 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินปูน F:C = 70:30	77
ผ.ข.11	แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 3 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินปูน F:C = 50:50	78
ผ.ข.12	แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 3 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินปูน F:C = 10:90	79
ผ.ข.13	แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 3 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินTuff F:C = 70:30	81
ผ.ข.14	แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 3 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินTuff F:C = 50:50	82
ผ.ข.15	แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 3 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินTuff F:C = 10:90	83
ผ.ข.16	แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 7 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินปูน F:C = 70:30	85
ผ.ข.17	แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 7 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินปูน F:C = 50:50	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ.ข.18	แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 7 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินปูน F:C = 10:90	87
ผ.ข.19	แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 7 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินTuft F:C 70:30	89
ผ.ข.20	แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 7 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินTuft F:C 50:50	90
ผ.ข.21	แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 7 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินTuft F:C 10:90	91



# บทที่ 1

## บทนำ

เนื้อหาในบทที่ 1 นี้ จะกล่าวถึง ที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์และทฤษฎีที่ใช้ในโครงการพิเศษ รวมไปถึงขอบเขตและวิธีการศึกษา ตลอดจนผลที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา ดังนี้

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตต่างๆ ได้มีการนำวัสดุซีเมนต์มวลรวมมาใช้กันมากขึ้น เพราะนอกจากจะเป็นการประหยัดค่าก่อสร้างลงได้มากแล้ว ยังเป็นการช่วยกำจัดของเสียที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นอย่างซีเมนต์มวลรวมได้อีกด้วย เช่น ในการก่อสร้างถนนคอนกรีต อาคารหรือโครงสร้างขนาดใหญ่ เชื่อมคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการก่อสร้างเชื่อมคอนกรีตบดอัด ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการก่อสร้างเชิงนวัตกรรมใหม่ที่ได้ประยุกต์นำซีเมนต์มวลรวมมาใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีต

แต่เนื่องจากการก่อสร้างเชื่อมคอนกรีตบดอัดนี้ยังเป็นเทคโนโลยีการก่อสร้างเชื่อมที่ค่อนข้างใหม่สำหรับประเทศไทย ตลอดจนการนำซีเมนต์มวลรวมไปประยุกต์ใช้งานในงานคอนกรีต ยังไม่แพร่หลายมากนัก จึงควรที่จะได้มีการศึกษาวิจัยถึงการประยุกต์นำซีเมนต์มวลรวมไปใช้ในงานก่อสร้างเชื่อมคอนกรีตบดอัดนี้ให้มากขึ้น เพื่อให้เป็นที่รู้จักและแพร่หลายต่อไป

ดังนั้นใน โครงการพิเศษนี้ จะได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเรื่องการประยุกต์นำซีเมนต์มวลรวมไปใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีตบดอัดในการก่อสร้างเชื่อมคอนกรีตบดอัด(Roller Compacted Concrete, RCC) และศึกษาถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่างๆ

จากการศึกษาเบื้องต้นทางด้านเขื่อนคอนกรีตบดอัดของ Schrader, E. K., 1985 คอนกรีตซึ่งได้รับการบดอัดในลักษณะคล้ายกับการบดอัดดิน จะเรียกว่าคอนกรีตบดอัด คอนกรีตธรรมดาเมื่อได้รับการบดอัดซึ่งเป็นการเพิ่มพลังงานให้กับคอนกรีตแล้ว จะส่งผลทำให้มีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น เมื่อความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติอื่นๆของคอนกรีตด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะในเรื่องกำลังอัดของคอนกรีต (Compressive Strength)

#### 1.4 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

โครงการพิเศษนี้จะได้ทำการศึกษาถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมในด้านต่างๆดังนี้เท่านั้น คือ ความหนาแน่น (Density) กำลังอัดและการพัฒนากำลังอัด (Compressive Strength and Development) ค่าความซึมผ่านได้ของน้ำ (Permeability)

ข้อกำหนดและมาตรฐานต่างๆในการทดลอง อ้างอิงจากมาตรฐานของ ASTM เป็นหลัก และได้ทำการประยุกต์เกี่ยวกับบางเรื่องเพื่อให้เหมาะสมกับการสภาพการทดลอง

#### 1.5 วิธีการที่ใช้ในการดำเนินโครงการพิเศษ

วิธีการศึกษาคือเริ่มต้นจากการรวบรวมและศึกษาข้อมูลต่างๆที่จำเป็นสำหรับโครงการพิเศษนี้ จากนั้นนำข้อมูลต่างๆมากำหนดวางแผนการทดสอบ และใช้วิธีการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาทดสอบให้เห็นจริงถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่างๆที่ต้องการทราบ จากนั้นก็วิเคราะห์เปรียบเทียบถึงผลรับของการทดลองต่างๆ แล้วสรุปออกมาเป็นผลการทดลองและข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น ตลอดจนระบุถึงข้อเสนอะแนะและการนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อไป

#### 1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการพิเศษ

เพิ่มความเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีตบดอัดที่ใช้ซีเมนต์ลิกไนต์เป็นส่วนผสมแทนปูนซีเมนต์ ตลอดจนเพิ่มประสบการณ์ในการทำงานเกี่ยวกับการทดลอง และยังเป็นประโยชน์ต่อการศึกษา การอ้างอิง และเป็นฐานข้อมูลในอนาคตต่อไปอีกด้วย

## บทที่ 2

### วรรณกรรมปริทัศน์

ในบทที่ 2 นี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีต่างๆที่ใช้ประกอบการทำการศึกษาโครงการพิเศษนี้ และจัดแสดงให้เห็นถึงข้อมูลที่เคยได้มีการศึกษามาก่อนแล้ว เกี่ยวกับการศึกษาเรื่องเขื่อนคอนกรีตบดอัด โดยอ้างอิงจาก วินิต ช่อวิเชียร( 2539) ธันวรา คาราฮิม(2541) เทอดศักดิ์ บุญยขจรและคณะ (2542) และ Capp, J. P., and Spencer, J. D. (1970)

#### 2.1 การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

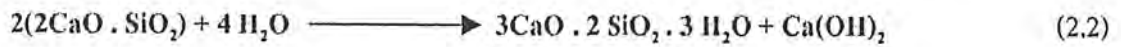
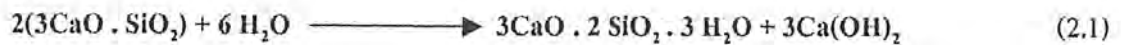
การก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์ เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบของซีเมนต์ โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะคือ

- (1) อาศัยสารละลาย ซีเมนต์จะละลายในน้ำ ก่อให้เกิด ไอออน(Ions) ในสารละลาย และ Ionsนี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น
- (2) การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็ง โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลายปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า “Solid State Reaction”

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยช่วงแรกจะอาศัยสารละลาย และในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง

##### 2.1.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ , $C_2S$ )

แคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิด แคลเซียมไฮดรอกไซด์  $Ca(OH)_2$  และ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต Calcium Silicate Hydrate (CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน ดังแสดงในสมการที่ 2.1 และ สมการที่ 2.2



จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะเกิด Gel ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการคือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน องค์ประกอบทางเคมีของ CSH นี้ขึ้นอยู่กับ อายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ส่วน  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่างอย่างมาก คือมี  $p_{\text{H}}$  ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้อย่างดีมาก

### 2.1.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ( $\text{C}_3\text{A}$ )

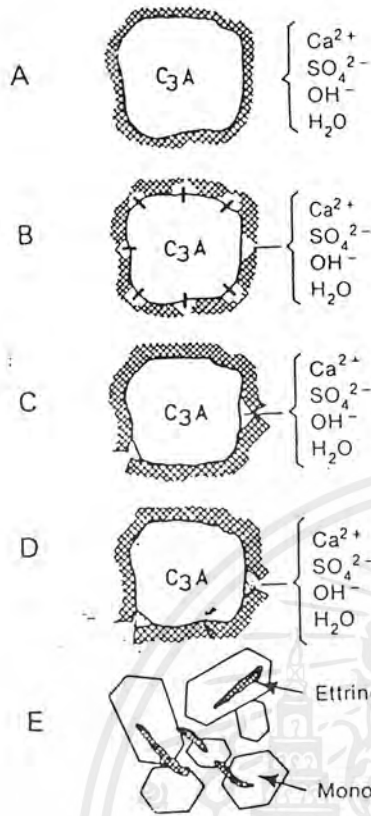
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $\text{C}_3\text{A}$  จะเกิดขึ้นที่ทันที และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการที่ 2.3



เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิบซั่ม ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) เข้าไปในขบวนการบดซีเมนต์ ยิบซั่มจะทำปฏิกิริยากับ  $\text{C}_3\text{A}$  ก่อให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาค  $\text{C}_3\text{A}$  ดังสมการที่ 2.4

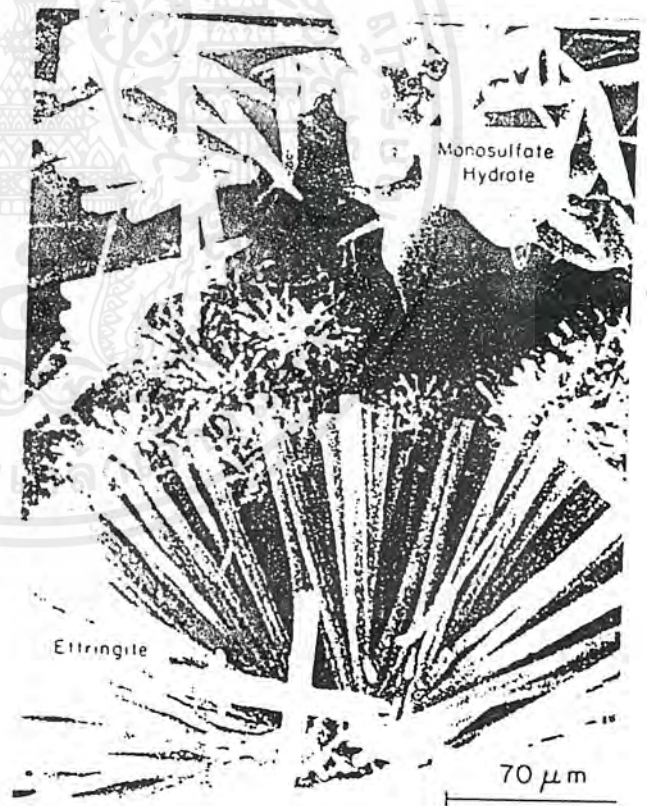


ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ  $\text{C}_3\text{A}$  และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $\text{C}_3\text{S}$  และ  $\text{C}_2\text{S}$  เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $\text{C}_3\text{A}$  กล่าวคือ เมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจากกรเพิ่มปริมาตรของของแข็งแรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $\text{C}_3\text{A}$  แต่เมื่อเกิดการแตกตัว จะเกิด Ettringite ใหม่เข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้งหนึ่ง ชั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ ไปจนกระทั่ง Sulphate Ions มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $\text{C}_3\text{A}$  โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และ รูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 แสดงการเกิดขบวนการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$  (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539)

รูปที่ 2.2 แสดงภาพถ่าย Monosulphate และ Ettringite (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539)



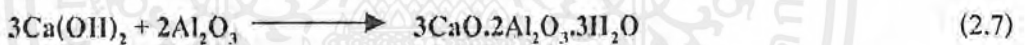
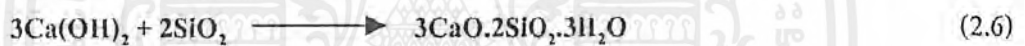
### 2.1.3 ปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ของเตตระแคลเซียมอะลูมิเนียมเฟอไรต์ ( $C_4AF$ )

ปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ของ  $C_4AF$  นี้จะเกิดในช่วงต้น โดย  $C_4AF$  จะทำปฏิกิริยากับซิปซัม และ  $Ca(OH)_2$  ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของ Sulphoaluminate และ Sulphoferrite ดังสมการที่ 2.5



### 2.2 Pozzolanic Reactions

ปฏิกิริยาเคมีที่สำคัญที่สุดของปฏิกิริยา Pozzolanic ก็คือปฏิกิริยาระหว่าง ซิลิกาไฮดรอกไซด์ กับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะ ได้ผลผลิตเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต และปฏิกิริยาระหว่าง อลูมินาไฮดรอกไซด์ กับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะ ได้ผลผลิตเป็นแคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรต ดังสมการที่ 2.6 และ สมการที่ 2.7



ซึ่งขบวนการเกิดปฏิกิริยาเคมีสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ ซิลิกาไฮดรอกไซด์ ( $SiO_2$ ) และอลูมินาไฮดรอกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) ซึ่งเป็นสารประกอบหลักใน Fly Ash จะทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ของปูนซีเมนต์ เรียกว่าเกิดปฏิกิริยา Pozzolanic ขึ้น ได้ผลผลิตเป็น 2 อย่าง คือ สารประกอบไดแคลเซียมซิลิเกต ( $2CaO \cdot SiO_2$ ) หรือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $3CaO \cdot SiO_2$ ) หรือ ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ( $3CaO \cdot Al_2O_3$ ) และ น้ำ ( $H_2O$ ) หลังจากนั้นผลผลิตจากปฏิกิริยา Pozzolanic ทั้ง 2 จะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกันไปในพื้นที่ ทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต ซึ่งเป็นสารเชื่อมประสานขึ้น เช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ของปูนซีเมนต์

แต่จากการศึกษาพบว่าปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมอยู่ด้วยจะช้ากว่าปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ของซีเมนต์ ด้วยสาเหตุนี้ในงานที่เป็นคอนกรีตหลายเมื่อใช้คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็น

ส่วนผสม ปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตผสมเถ้าลอยนี้จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ทำให้คอนกรีตหลายสามารถระบายความร้อนได้ทัน

อย่างไรก็ตามกลไกในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะซับซ้อนกว่าที่นำสาร Pozzolan มาทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยตรง มีรายงานพบว่า Fly Ash จะหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$  ซึ่งเกิดในช่วงแรก แต่จะหน่วงนานแค่ไหนขึ้นอยู่กับปริมาณซิลเฟต ปริมาณอัลคาไลน์ และปริมาณแคลเซียมในเถ้าลอย

### 2.3 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าลอย (Physical and Chemical properties of Fly Ash)

#### 2.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย

คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยโดยทั่วไปจะแสดงพฤติกรรมของคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม (Fly Ash Concrete) แต่คุณสมบัติของเถ้าลอยอาจเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการเผาไหม้ เช่น มีการเผาน้ำมันเตาร่วมกับการเผาด่านหิน มีการเติมวัสดุบางประเภทเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ และลดการกักคาร์บอน ดังนั้นการทดสอบคุณสมบัติต่างๆของเถ้าลอยเพื่อนำไปใช้งาน อาศัยข้อกำหนดทางกายภาพตามมาตรฐาน ASTM C618 ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงข้อกำหนดทางกายภาพของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM (ASTM C618-97)

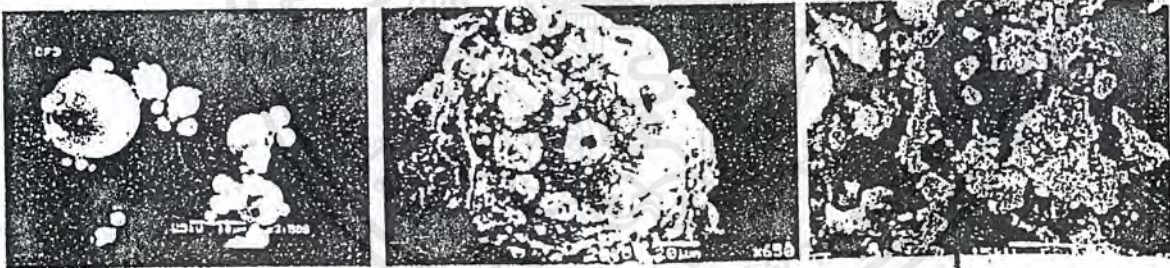
ข้อกำหนดด้านกายภาพ	Class of Fly Ash	
	F	C
ความละเอียด ส่วนที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 หลังจากการร่อนแบบเปียก ,max%	34	34
หาดัชนีกำลัง โดยผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์		
- 7 วัน ,min % เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	75	75
- 28 วัน ,min% เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	75	75
ความต้องการน้ำ,max% เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	105	105
ความอยู่ตัว การขยายหรือหดตัว โดยวิธี Autoclave,max%	0.8	0.8

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) แสดงข้อกำหนดทางกายภาพของเส้นลวดตามมาตรฐาน ASTM (ASTM C618-97)

การกำหนดความสม่ำเสมอ		
- ความหนาแน่น, max จากค่าเฉลี่ย %	5	5
- ส่วนที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325, max จากค่าเฉลี่ย %	5	5
Multiple Factor ผลคูณระหว่าง %LOI กับ % ของปริมาณที่ค้างตะแกรงเบอร์ 325	255	-
Drying Shrinkage ของแท่งมอร์ค่าที่ 28 วัน max% ที่แตกต่างจากตัวควบคุม	0.03	0.03

2.3.1.1 รูปร่างของเส้นลวด

เส้นลวดโดยทั่วไปจะมีรูปร่างลักษณะค่อนข้างเป็นทรงกลม บางครั้งอาจพบเป็นรูพรุน ซึ่งมีน้ำหนักเบาบอบง่ายได้หรืออาจพบในลักษณะที่มีรูปร่างไม่แน่นอน ซึ่งแตกต่างจากซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือสี่เหลี่ยม ทั้งนี้รูปร่างจะเป็นแบบใดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เผาถ่านหิน ความละเอียดของถ่านหินก่อนจะเผาและชนิดของถ่านหิน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และ รูปที่ 2.5



เส้นลวดลักษณะกลม      เส้นลวดที่มีลักษณะพรุน      เส้นลวดที่มีลักษณะไม่แน่นอน  
รูปที่ 2.3 แสดงภาพขยาย SEM ของอนุภาคเส้นลวดที่มีลักษณะต่าง ๆ กัน (รับมา ดาราอิม, 2541)

จากจุดเด่นทางด้านรูปร่างของเส้นลวดที่มีทรงกลม หลังจากทดแทนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีตแล้วจะเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของคอนกรีตทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นทึบ หรือ ในการเทคอนกรีตใน

ที่แคบๆที่ต้องการให้ไหลสั้น ได้ซึ่งคอนกรีตบางชนิดจำเป็นต้องอาศัยคุณสมบัติเหล่านี้ แต่ถ้ามีรูปร่างไม่แน่นอนหรือมีรูพรุนอาจมีผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้มีผลให้กำลังอัดของส่วนผสมที่ได้ต่ำลง

### 2.3.1.2 ความละเอียดของเถ้าลอย (Fineness of Fly Ash)

ขนาดหรือพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยจะบ่งบอกถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยา Pozzolanic ซึ่งจะใช้การทดสอบความละเอียดของเถ้าลอย ตามมาตรฐาน ASTM C430 โดยกำหนดปริมาณของเถ้าลอยที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 โดยวิธีร่อนแบบเปียก เนื่องจากเถ้าลอยที่มีอนุภาคหยาบจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยทำปฏิกิริยาได้ช้ากว่าอนุภาคที่ละเอียดกว่า นั่นคือส่วนที่ผ่านตะแกรงแล้วจะทำปฏิกิริยาได้ประสิทธิภาพดีกว่า นอกจากนี้ยังจะบอกขนาดของอนุภาคจากการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธีของบลาน ( Blaine Specific surface – area technique) ตามมาตรฐาน ASTM C204 หรือวิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET) มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อกรัม

### 2.3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ โดยใช้เทคนิค X – ray Fluorescence ประกอบด้วย องค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่างๆ ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) และ ออกไซด์ของธาตุอื่นๆปะปนอยู่อีกบ้างในปริมาณน้อย ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าแตกต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหินที่มาของเถ้าลอย ขบวนการเผาถ่านหินที่ใช้เผา ด้วยเหตุนี้จึงมีการแยกประเภทของเถ้าลอยมาตรฐาน ASTM C618 เป็น Class F และ Class C

ถ้าสำหรับข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C618 ใช้ผลรวมของปริมาณออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา และเหล็ก ในเถ้าลอยโดยที่ Class F และ Class C ผลรวมร้อยละของออกไซด์ดังกล่าวอย่างน้อย 70 และ 50 ตามลำดับ ทั้งนี้การกำหนดดังกล่าวเพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าในเถ้าลอยนั้นมีส่วนประกอบที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเพียงพอ นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยา Pozzolanic ในระยะยาวด้วย ถ้าสำหรับร้อยละของปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) กำหนดให้ไม่เกิน 5 ทั้งนี้เนื่องจาก

ปริมาณซัลเฟตในเถ้าลอย มีผลต่อการพัฒนาความสามารถในการรับกำลังอัดและเวลาในการก่อตัว นอกจากนี้ยังมีแนวโน้มช่วยเสริมการเกิด Sulphate Attack กับคอนกรีตอีกด้วย

สำหรับปริมาณร้อยละความชื้นของเถ้าลอยไม่ควรเกิน 3 มิฉะนั้นจะเป็นอุปสรรคต่อการปฏิบัติงาน (Handling difficulty) และสำหรับ Fly Ash Class C แล้ว จะเกิดปฏิกิริยาไฮดรชันขึ้นได้ง่ายนอกจากนี้ยังมีการกำหนดค่าร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI) ไว้ไม่เกิน 6 ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในเถ้าลอยหากมี LOI มากการควบคุมในด้าน Air entrainment ของคอนกรีตสดจะทำให้ยากและยังต้องการน้ำเพิ่ม ในคอนกรีตทั่วไปแล้ว Fly Ash จากโรงไฟฟ้าจะมีค่า LOI ต่ำกว่า 6 มาก ร้อยละของปริมาณอัลคาไล (Alkalies) ในรูปของโซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$  Equivalent) มากที่สุดไม่เกิน 1.5 ซึ่งเป็นข้อกำหนดเสริมใน ASTM C618 ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าลอยที่มีปริมาณ  $\text{CaO}$  สูงจะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาของ Alkali - aggregate ขึ้นได้ แต่อย่างไรก็ตาม เถ้าลอยที่มีร้อยละของปริมาณอัลคาไลมากกว่า 1.5 จะนำมาใช้กับมวลรวมที่ไวต่อปฏิกิริยาได้ก็ต่อเมื่อผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการไม่ปรากฏการขยายตัวจนเกิดความเสียหายได้ (Deleterious Expansion)

ตารางที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ (ชื่อนา ดาราสิม, 2541)

แหล่งวัสดุเถ้าลอย	องค์ประกอบทางเคมี(% โดยน้ำหนัก)								
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{SO}_3$	LOI
แม่เมาะ	46.25	28.43	10.71	7.61	2.21	1.11	3.07	1.85	0.23
ระยอง	45.02	36.21	4.09	3.64	0.54	0.44	0.31	0.48	5.32
สมุทรสาคร	43.92	36.61	3.97	3.05	0.55	0.38	0.44	0.64	7.52
กาญจนบุรี	47.39	22.73	6.29	8.36	2.64	0.63	2.95	3.38	3.12
ต่างประเทศ	49.04	37.91	2.75	1.03	0.39	0.38	0.52	0.18	4.7
ซีเมนต์	20.6	5.22	3.1	65	0.91	0.07	0.5	2.7	1.1

จะเห็นว่าเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆในประเทศ ดังตารางที่ 2.2 สามารถจัดอยู่ใน Class F ได้แต่มีข้อที่ น่าสังเกตคือ เถ้าลอยที่อยู่ใน Class F โดยทั่วไปจะมีปริมาณ CaO ค่อนข้างต่ำแต่ลักษณะเถ้าลอยถ่านหินในประเทศเราจะมี CaO ค่อนข้างสูง (มากกว่า 10 %)

#### 2.4 ประเภทของเถ้าลอย (Type of Fly Ash)

เถ้าลอยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชั้นคุณภาพตามมาตรฐาน ASTM C618-94a (1995) ได้แก่ ชั้นคุณภาพ F และ ชั้นคุณภาพ C โดยใช้องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยที่ได้หลังจากการเผาถ่านหินดัง แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงการแบ่งชั้นคุณภาพของเถ้าลอย ตามมาตรฐาน ASTM (ASTM C618-94a ,1995)

คุณสมบัติ	ประเภทของเถ้าลอย	
	ชั้นคุณภาพ F	ชั้นคุณภาพ C
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ , ร้อยละ	70	50
$SO_3$ ,มากที่สุดร้อยละ	5	5
ปริมาณความชื้น,มากที่สุดร้อยละ	3	3
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ ,มากที่สุดร้อยละ	6	6
ดัชนีกำลัง , น้อยที่สุดร้อยละ	75	75

##### 2.4.1 เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F

เป็นเถ้าลอยที่มีผลรวมของซิลิกาออกไซด์ เฟอรัริกออกไซด์ และ อลูมินาออกไซด์ มากกว่า ร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก เกิดจากการเผาถ่านหินประเภทแอนทราไซต์ และบิทูมินัส มีปริมาณแคลเซียม ออกไซด์น้อยกว่าร้อยละ 5 ดังนั้น เถ้าลอยประเภทนี้บางครั้งจะเรียกว่า Low Calcium Fly Ash ซึ่งมีคุณสมบัติ การเป็นซีเมนต์อยู่โดยหรือแทบจะไม่มี เถ้าลอยประเภทนี้ได้ถูกนำมาใช้งานแทนที่ซีเมนต์ในงานสร้างเขื่อน ตั้งแต่ปี ค.ศ.1935 โดยมีจุดประสงค์หลักเพื่อช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่เมื่อ พิจารณาถึงคุณสมบัติการรับแรงของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยประเภทนี้แทนที่ซีเมนต์ พบว่า การพัฒนากำลังรับ

แรงอัดในช่วงต้นจะต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา แต่หลังจากที่ปฏิกิริยา Pozzolanic ได้เริ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดในช่วงปลายของคอนกรีตที่ได้รับการผสมด้วยปฏิกิริยาที่เหมาะสมจะพัฒนาเท่าเทียมกับคอนกรีตธรรมดา

### 2.4.2 เถ้าลอยชั้นคุณภาพ C

เป็นเถ้าลอยที่มีผลรวมของซิลิกาออกไซด์ เฟอริกออกไซด์ และ อลูมินาออกไซด์ อยู่ระหว่างร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนัก เกิดจากการเผาถ่านหินประเภทลิกไนต์ และ ซับบิทูมินัส มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อยู่ประมาณร้อยละ 15-23 ดังนั้นเถ้าลอยประเภทนี้บางครั้งจะเรียกว่า High Calcium Fly Ash กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยประเภทนี้แทนที่ซีเมนต์ จะพัฒนาได้อย่างรวดเร็วในช่วงต้น

คุณภาพและปริมาณของเถ้าลอยสามารถแปรผันได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของโรงผลิตกระแสไฟฟ้า ชนิดของถ่านหิน อุณหภูมิที่ใช้เผาและระบบการลึกลับเถ้า ดังนั้นเถ้าลอยที่ได้ในแต่ละประเทศจะมีคุณสมบัติที่ไม่เหมือนกัน ดังตัวอย่างที่แสดงใน ตารางที่ 2.4 นอกจากนี้คุณภาพและองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยยังอาจเปลี่ยนแปลงได้ตามเวลาได้อีกด้วย ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ (ธันวา ตราฮีม, 2541)

องค์ประกอบทางเคมี	ซีเถ้าลอยจาก				
	เยอรมัน	ไต้หวัน	แคนาดา	อเมริกา	ไทย
	ปริมาณร้อยละเฉลี่ย,%โดยน้ำหนัก				
SiO <sub>2</sub>	51.5	53.13	42.2	30	42.45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27	30.44	21.6	17.6	22.51
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.79	3.59	27.6	4.9	9.02
CaO	2.32	2.12	1.87	27.9	9.82
SO <sub>3</sub>	0.77	-	1.1	-	1.51
MgO + Na <sub>2</sub> O	2.82	0.78	3.69	7.6	3.23
K <sub>2</sub> O	3.57	1.05	2.55	0.3	2.53
Loss on Ignition	2.73	6.63	1.85	0.2	1.36

ตารางที่ 2.5 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากประเทศไทยในปีต่างๆ (ชานว คาราอิม, 2541)

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณร้อยละเฉลี่ย (% โดยน้ำหนัก)							
	2533	2534	2535	2536	2537	2538	2539	2540
SiO <sub>2</sub>	37.8	42.8	40.3	43.1	52.8	39.6	39.6	39.9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.5	23.3	24	20.2	18	22.3	23	26.9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.2	14	15	13.2	8.5	12.5	12.6	11.8
CaO	17.4	10.5	11.2	13	13.3	14	12.7	9
SO <sub>3</sub>	3.9	3.9	3.1	2.6	2.8	2.7	2.4	0.9
MgO	3.3	2.4	2.8	2.7	1.4	2.5	2.4	1.2
Na <sub>2</sub> O	0.9	0.8	1	1.3	0.9	0.7	1.1	0.6
K <sub>2</sub> O	2.1	2.3	2.6	2.4	2	2.3	2.9	3.1
Loss on Ignition	0.8	0.7	0.5	0.6	0.3	0.9	0.8	0.8

## 2.5 เหตุผลในการเลือกใช้เถ้าลอย ในงานคอนกรีต

ปัจจุบันการนำเถ้าลอยมาใช้ในงานคอนกรีตได้แพร่หลายมากขึ้น โดยอาศัยข้อดีทั้งทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าลอยมาใช้ประโยชน์ กล่าวคือ เถ้าลอยมีอนุภาคค่อนข้างเป็นทรงกลมส่งผลดีต่อความสามารถในการเทได้ของคอนกรีต อีกทั้งอนุภาคยังมีความละเอียดสูงกว่าซีเมนต์ด้วย จึงทำหน้าที่เป็นวัสดุอุดช่องว่าง (Filler) ระหว่างอนุภาคของซีเมนต์ ซึ่งโดยปกติแล้วช่องว่างเหล่านี้จะถูกอุดด้วยปริมาณน้ำส่วนที่เกินจากการใช้ทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน

คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันช้าลงกว่าปกติ ทำให้คอนกรีตสามารถระบายความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาได้ทันโดยไม่ทำให้เกิดการแตกร้าวในคอนกรีต จึงเหมาะกับงานคอนกรีตหนา เช่น งานเขื่อนหรือโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่เป็นอย่างยิ่ง นอกจากนั้นแล้วเถ้าลอยยังช่วยเพิ่มคุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตให้ดียิ่งขึ้น เพิ่มคุณสมบัติการรับแรง ความทนทาน คุณสมบัติการรับแรง

ตัด ลดค่าความซึมผ่านได้ของน้ำ ลดการเข็งและการแยกตัว เพิ่มความทนทานต่อซัลเฟต ลดการแยกตัวและการแตกร้าวเนื่องจากปฏิกิริยา Alkali-Aggregate

ในแง่ของโครงสร้างของเขื่อนนั้น การที่ผสม Fly Ash ในส่วนผสมของคอนกรีต จะทำให้ได้คอนกรีตที่มีน้ำหนักเบากว่าปกติ แต่ให้ความสามารถในด้านกำลังเทียบเท่าหรือดีกว่า คอนกรีตธรรมดา จึงทำให้ได้โครงสร้างคอนกรีตที่มากกว่าทำให้ สามารถลดขนาดของ โครงสร้างในส่วนฐานรากที่รองรับให้มีขนาดเล็กลงได้เป็นการประหยัด

ส่วนผลดีในด้านทางเศรษฐศาสตร์ก็คือจะสามารถประหยัดวัสดุปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการผสม ทำคอนกรีตลงได้มาก โดยใช้วัสดุที่เก่าลดยแทนซึ่งเป็นวัสดุที่ไร้ประโยชน์และเป็นภาระในการกำจัดทิ้ง เมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายที่จะต้องซื้อปูนซีเมนต์แล้ว ถือว่าเป็นการประหยัดค่าวัสดุลงได้อย่างมหาศาลโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับงานที่ต้องใช้ปริมาณคอนกรีตเป็นจำนวนมาก

## 2.6 ผลกระทบของการใช้เถ้าลอยต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีต

การประยุกต์นำเถ้าลอยดิกในค้มาใช้ในงานก่อสร้างคอนกรีต อาจมีทั้งผลดีขึ้น และผลเสียลงต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านต่างๆ ดังนั้นก่อนที่นำเถ้าลอยดิกในค้มาใช้ในงานก่อสร้างใดๆ จะต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีต สำหรับสภาวะการทำงานนั้นๆ ให้รอบคอบเสียก่อน

### 2.6.1 ข้อดีของการใช้เถ้าลอยในคอนกรีต

#### (1) Workability

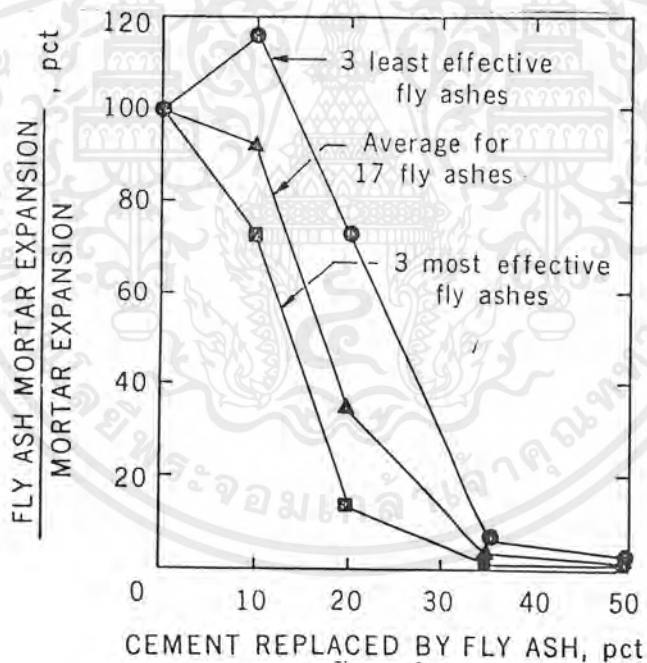
ผลที่ได้จาก fly ash จะคล้ายกับวัสดุ pozzolans อื่นๆ คือช่วยปรับปรุง workability ของคอนกรีต และช่วยลดการแยกตัวของมวลรวม และลดอัตราการเข็ง ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากลักษณะระของ fly ash ที่มีลักษณะกลม ดังนั้นการพิจารณาการใช้ fly ash นั้นอาจจะใช้เมื่อส่วนผสมของคอนกรีตขาดวัสดุเม็ดละเอียด หรือเมื่อคอนกรีตมีอัตราการเข็งสูง

## (2) Water Requirement and Heat of Hydration

ตามปกติการใช้ pozzolans เป็นส่วนผสม ในคอนกรีตจะทำให้คอนกรีตมีความต้องการน้ำมากกว่าคอนกรีตปกติ สำหรับค่าการยุบตัวที่เท่ากัน แต่ Fly ash แตกต่างจากวัสดุ Pozzolans ทั่วไป คอนกรีตที่ผสม Fly ash ที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ ( 2 เปอร์เซ็นต์ ) โดยทั่วไปจะต้องการปริมาณน้ำน้อยลง แต่คอนกรีตที่ผสม Fly ash ที่มีปริมาณคาร์บอนมากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ จะต้องการปริมาณน้ำมากกว่าคอนกรีต ทั่วไป คอนกรีตที่ผสม fly ash จะมีความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ต่ำกว่า ดังเช่น คอนกรีตที่ผสม Fly ash ที่ใช้ในการก่อสร้าง เช่น Hungry Horse ความร้อนที่เกิดขึ้นต่ำกว่าคอนกรีตปกติถึง 1 เท่าครึ่ง

## (3) การหดและขยายตัว

คอนกรีตที่ผสม Fly ash จะมีการอัตราหดตัวและแตกร้าวระหว่างการแข็งตัวของคอนกรีต น้อยกว่าคอนกรีตปกติหรือคอนกรีตที่ผสมวัสดุ Pozzolans ทั่วไป และที่มากกว่านั้นคือคอนกรีตที่ผสม Fly ash ปริมาณสูงจะมีอัตราการหดตัวที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสม Fly ash ในปริมาณต่ำ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงผลกระทบต่อการหดและขยายตัว (Capp, J. P., and Spencer, J. D., 1970)

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

จากรูปที่ 2.4 แสดงถึงความสัมพันธ์ของผลกระทบของ Fly ash 17 ชนิด ในการป้องกันหรือการลดการขยายตัวอันมีผลมาจาก ปฏิกิริยา Alkali-Aggregate Reaction ซึ่งจะเห็นได้ว่า Fly ash สามารถลดการขยายตัวอันเนื่องมาจาก ปฏิกิริยา Alkali-Aggregate Reaction ได้ อย่างไรก็ตาม การทดสอบมอร์ต้า อาจจะไม่ได้อะท้อนให้เห็นถึงพฤติกรรมที่แท้จริงของคอนกรีตได้ เนื่องจากว่าการทดลองไม่ได้ใช้ตัวอย่างคอนกรีตในการหาว่า fly ash ปริมาณเท่าไรที่ควรใช้ในการป้องกันการขยายตัว ซึ่งตามมาตรฐานของ ASTM มีวิธีการทดสอบทางกายภาพอยู่ 2 วิธี ( C227,C342 ) สำหรับการหาปริมาณของมอร์ต้าที่เปลี่ยนไปอันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง ซีเมนต์กับมวลรวม และมีวิธีทดสอบทางเคมีอีก 1 วิธี ( C298 ) สำหรับการหาค่าของการทำปฏิกิริยาของมวลรวม

### (4) ค่าความชื้นผ่านไต้ของน้ำและอากาศ

คอนกรีตที่มีค่าความชื้นน้ำต่ำนั้นเป็นองค์ประกอบที่สำคัญมากในการก่อสร้างเขื่อน ซึ่งพบว่าคอนกรีตจะมีค่าความชื้นน้ำต่ำลงเมื่อแทนบางส่วนของ ซีเมนต์ด้วย fly ash

### (5) ความทนทานต่อซัลเฟต

การเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตจาก น้ำทะเลในดิน และน้ำที่มีฤทธิ์เป็นกรดตามธรรมชาติ สามารถทำได้โดยการใช้ fly ash หรือวัสดุ pozzolans ชนิดอื่นๆ และจะดีขึ้นถ้าใช้ในคอนกรีตที่มีส่วนประกอบของซีเมนต์ค่า การเพิ่มวัสดุ pozzolans ใน ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิดทนซัลเฟตสูงจะไม่เพิ่มความสามารถในการทนซัลเฟตอีกแต่อย่างใด

### (6) Strength

จากตาราง เป็นการเปรียบเทียบ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ผสม fly ash และไม่ผสม fly ash จะเห็นได้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน ของคอนกรีตหยาบ ( 4-4.5 ถุง/ลูกบาศก์หลา ) ที่ผสม fly ash จะมีค่ามากกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสม fly ash และกำลังอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน ของคอนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์สูง ( 6 ถุง/ลูกบาศก์หลา ) ที่ผสม fly ash จะมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสม fly ash

### 2.6.2 ข้อเสียของการใช้เถ้าลอยในคอนกรีต

คอนกรีตที่ผสม fly ash ส่วนมากต้องการสารกักกระจายฟองอากาศมากกว่าปกติ เพื่อให้ได้ปริมาณฟองอากาศที่เท่ากับคอนกรีตปกติที่ไม่ได้ผสม fly ash จากการค้นคว้าของสถาบัน Battelle

Memorial ได้ชี้ชัดว่าสารกักกระจายฟองอากาศนั้นจะถูกดูดซับไว้โดย fly ash ซึ่งทำให้สารกักกระจายฟองอากาศไม่สามารถทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดการกระจายตัวของฟองอากาศได้ ซึ่งการกระจายตัวของคอนกรีตนี้จะช่วยให้คอนกรีตมีความคงทนต่อการแข็งตัวของน้ำ หรือเกลือที่ทำให้น้ำแข็งละลาย

## 2.7 Mix Design ของเขื่อนคอนกรีตบดอัด

เนื่องจาก เทคนิคการก่อสร้างเขื่อนแบบ RCC ยังเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่นำมาใช้ในการก่อสร้างเขื่อน ประกอบกับคุณสมบัติของ ส่วนผสมต่างๆเช่น fly ash มวลรวมหยาบ มวลรวมละเอียด รวมทั้ง น้ำที่ใช้ในการผสม มีความแตกต่างกันไปตามแต่ละภูมิภาค ดังนั้นจึงยังไม่มีรูปแบบของกระบวนการออกแบบอัตราส่วนผสมที่เป็นมาตรฐาน

ดังนั้นในการออกแบบอัตราส่วนผสม จึงต้องมีการทดสอบอัตราส่วนผสมต่างๆ ด้วยกระบวนการทดสอบตามมาตรฐานในการทดสอบดิน และการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐานในการทดสอบคอนกรีต ซึ่งในการตัดสินใจเลือกอัตราส่วนผสมจะคำนึงถึง องค์ประกอบดังต่อไปนี้

- กำลังของคอนกรีต
- ความคงทนและความสามารถในการเทได้
- การควบคุมอุณหภูมิที่สูงขึ้น
- ความประหยัด

### 2.7.1 ตัวอย่าง Mix Design ของเขื่อนคอนกรีตบดอัดที่ใช้ในต่างประเทศ

Mix Design ของเขื่อนคอนกรีตบดอัดที่ใช้ในต่างประเทศ สามารถจำแนกอัตราส่วนผสมที่ต่างกันและคุณสมบัติต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.6 ถึงตารางที่ 2.8

### 2.7.2 Mix Design ที่ใช้ในโครงการเขื่อนท่าด่าน

ส่วนผสมของคอนกรีตบดอัดแน่น(RCC) ประกอบด้วยหินเบอร์ 1 2 และ 3 ประมาณ 1,250 กิโลกรัม ทราย 850 กิโลกรัม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 60 - 90 กิโลกรัม น้ำเต็มของถาดหินลิกไนต์

50 - 100 กิโลกรัม ผสมกับน้ำ 140 ลิตร ซึ่งถ่วงผสมที่ออกแบบมานั้นจะต้องมีคุณสมบัติหลักทางวิศวกรรม ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.6 แสดงตัวอย่าง Mix Design ใน USA & Canada (Hansen, K. D., 1994)

Dam/State	Compressive Strength Criteria(MPa)	Vebe Time	W	C	F	W C+F	Aggregate			
							S	Nominal MSA	CA	Total
Quail Creek South/Utah	$f'_c=13.8@90\text{days}$		119	80	53	0.89		3"		2237
C.E. Siegest/Pensylvania	$f'_c=13.8@1\text{year}$		96	59	42	0.95	1130	1.5"	1224	2354
Zintel Canyon/Washington	$f'_c=9.7@1\text{year}$	12-20	111	74	-	1.50	994	2"	1466	2460
Elmer Thomas/Oklahoma	$f'_c=13.8@56\text{days}$		100	86	86	0.58		1"		2192
Littlerock-Modification/California	$f'_c=13.8@15.9\text{days}$	15-20	113	65	98	0.69	788	1.5"	1379	2167

ตารางที่ 2.7 แสดงในตัวอย่าง Mix Design ในSouth Africa (Hollingworth F. and et. al, 1989)

Dam/State	Compressive Strength at 24days(MPa)	Theoretical Maximum Density	W	C	F	W C+F	S	Aggregate(mm)		
								38-53	19-38	4.75-19
Wolwedans	23.7	2480	83	58	136	0.43	640	469	625	469
Knellpoort	18	2671	103	59	136	0.53	703	511	707	452

ตารางที่ 2.8 แสดงตัวอย่าง Mix Design ใน South Spain (Laa, G. G., 1992)

Name of Dam	W	C	F	W C+F	Aggregate		
					S	Nominal MSA	CA
Erizana	115	90	90	0.6	532	100	1668
Castilblanco de los Arroyos	102	102	86	0.54	628	40	1452
Los Morales	108	81	140	0.46	618	40	1426
	98	74	128	0.48	562	80	1548
Santa Eugenia	100	88	152	0.42	552	70	1635
	90	72	143	0.4	430	100	1830
Marono	100	80	160	0.42	670	70	1475
	98	65	170	0.42	670	70	1475
Hervas	95	80	155	0.4	540	80	1540
Burguillos del Cerro	85	75	135	0.4	593	60	1662
Los Canchales	105	120	120	0.44	620	40	1490
	100	100	115	0.46	585	80	1650
Puebla de	127	85	137	0.57	720	40	1409
Cazalla	113	80	130	0.51	688	80	1512
Amatisteros III	155	100	125	0.6	800	40	1364
Caballar I	155	100	125	0.6	800	40	1364
Belen Gato	155	100	125	0.6	800	40	1364
Belen Cagueta	155	100	125	0.6	800	40	1364

ตารางที่ 2.9 เกณฑ์กำหนดของ RCC เชื้อนทำด้าน(เทคกักตี บูลยขจรและคณะ, 2542)

คุณสมบัติ	เกณฑ์กำหนดของ RCC
ความหนาแน่น (Unit Weight)	ไม่ต่ำกว่า 2,300 กก./ลบ.ม.
Compression Strength ที่ 91 วัน	ไม่ต่ำกว่า 100 กก./ตร.ซม.
Coefficient of Permcability (k)	น้อยกว่า $10^{-7}$ ม.-วินาที
คุณภาพน้ำที่ไหลผ่านคอนกรีตบดอัด	ตามมาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรม

ซึ่งแหล่งวัสดุก่อสร้างที่นำมาใช้ทำคอนกรีตบดอัดแน่น(RCC) ที่ถ้าได้มีดังนี้

(1) แหล่งหิน

บริเวณซึ่งมีศักยภาพที่จะเปิดเป็นแหล่งขุดหินใช้ป้อนหินผสม RCC ถ้าเราพบบริเวณซึ่งจะถูกน้ำท่วมหลังสร้างเขื่อนแล้วเสร็จ หินในบริเวณดังกล่าวเป็นหินภูเขาไฟ จากการประมาณด้วยสภาพทางภูมิประเทศในเบื้องต้นพบว่าปริมาณสำรองสูงสุดของหินจากแหล่งนี้จะมีถึง 17.5 ล้าน ลบ.ม. ตามปกติ หิน Rhyolite และ Andesite เป็นหินที่มีความแข็งแรง แกร่งและทนทาน เหมาะสำหรับการใช้เป็นหินถมตัวเขื่อน (Rockfill) แต่ในกรณีจะใช้เป็นหินผสมคอนกรีตโครงสร้างหรือคอนกรีตบดอัดเขื่อน (RCC) จะต้องทำการทดสอบคุณสมบัติหินจากแหล่งดังกล่าวให้ละเอียดมากขึ้น โดยเฉพาะคุณสมบัติทางด้าน Alkali Aggregate Reaction ซึ่งถ้าหินมีคุณสมบัติดังกล่าวอาจจะก่อให้เกิดปัญหาแตกร้าวของคอนกรีตในระยะยาวได้ เพราะหินอาจจะทำปฏิกิริยากับ Alkali ในปูนซีเมนต์ของคอนกรีต จากผลการศึกษาทางคอนกรีตเทคโนโลยีที่ผ่านมาพบว่าหิน Rhyoliteบางชนิดจะมีปัญหาดังกล่าว ซึ่งถ้าจะนำมาใช้ผสมคอนกรีตจะต้องมีมาตรการแก้ไข เช่น ใช้ปูนซีเมนต์ที่มี Alkali ต่ำ หรือใช้ส่วนผสมเพิ่มแก่ เช่น Fly Ash

ในกรณีที่ไม่สามารถใช้แหล่งขุดหินในอ่างได้ จำเป็นต้องอาศัยหินจากเหมืองหินเอกชนนอกพื้นที่โครงการ พบว่า แหล่งหินที่อยู่ใกล้ที่สุดคือ ที่อำเภอหน้าพระลาน จังหวัดสระบุรีห่างจากโครงการถึง 75 กม. หินที่แหล่งนี้เป็นหินปูนซึ่งใช้เป็นหินก่อสร้างผสมคอนกรีตทำถนนและงานอื่นๆ ในพื้นที่บริเวณกรุงเทพฯ และใกล้เคียงมาตลอด หินมีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับงานก่อสร้างและผสมคอนกรีต

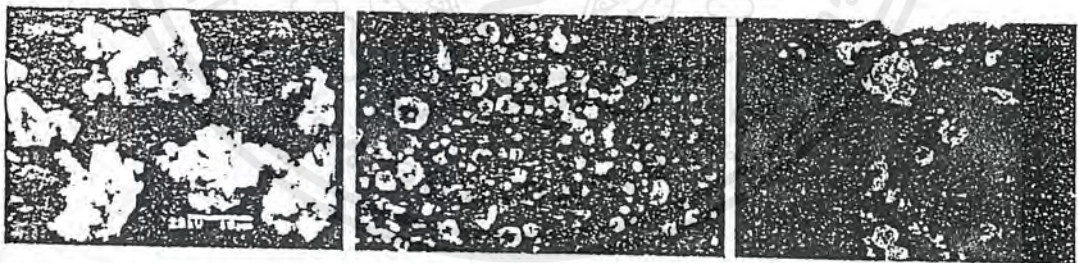
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## (2) แหล่งทราย

ทรายที่สามารถใช้เป็นวัสดุกรอง ( Filter) และผสมคอนกรีตในโครงการนี้จะต้องนำมาจากแหล่งเอกชนภายนอก เพราะว่าการสำรวจไม่พบแหล่งทรายอยู่ในบริเวณพื้นที่อ่างเก็บน้ำและท้ายเขื่อนเลย แหล่งทรายของเอกชนที่สำรวจพบในพื้นที่ใกล้เคียงที่มีคุณสมบัติเหมาะสม ที่อยู่ใกล้โครงการที่สุดคือ บริเวณอำเภอบ้านนา จังหวัดนครนายก ห่างจากโครงการประมาณ 31 กม.

## (3) แหล่ง Fly ash

แหล่งนี้ถ้ำลอย ซึ่งเป็นถ้ำวนผสมสำคัญสำหรับวัสดุผสม Roller Compacted Concrete สำหรับเขื่อน RCC นี้ ในประเทศไทยที่มากที่สุดมีอยู่แหล่งเดียวคือ ที่เหมืองถ่านหินแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ปริมาณ Fly Ash ที่ผลิตได้ในแต่ละวันในช่วงทั้งสองของแต่ละปี มีเพียงพอสำหรับปริมาณที่ต้องการใช้ในกรณีที่จะเลือกสร้างเขื่อนคลองท่าด่านเป็นเขื่อน RCC ซึ่งจะใช้ปริมาณทั้งหมดรวม 600,000 ตัน หรือ 650 ตัน/วัน ซึ่งลักษณะของถ้ำลอยจากแม่เมาะเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์และถ้ำลอยจากแหล่งอื่นๆ มีลักษณะดังรูปที่ 2.5



ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ถ้ำลอยแม่เมาะ

ถ้ำลอยจากกระยอง

รูปที่ 2.5 ภาพขยาย SEM ของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และถ้ำลอยจากแหล่งต่างๆ  
(ชันทวี คาราฮิม, 2541)

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการศึกษา

ในบทที่ 3 นี้ จะกล่าวถึงขั้นตอน และ รายละเอียดของวิธีการดำเนินการศึกษา เพื่อให้ได้มาซึ่งผลการทดลองต่างๆ ตลอดจนแสดงแผนผังต่างๆเกี่ยวกับการทำงาน

#### 3.1 การศึกษาข้อมูล

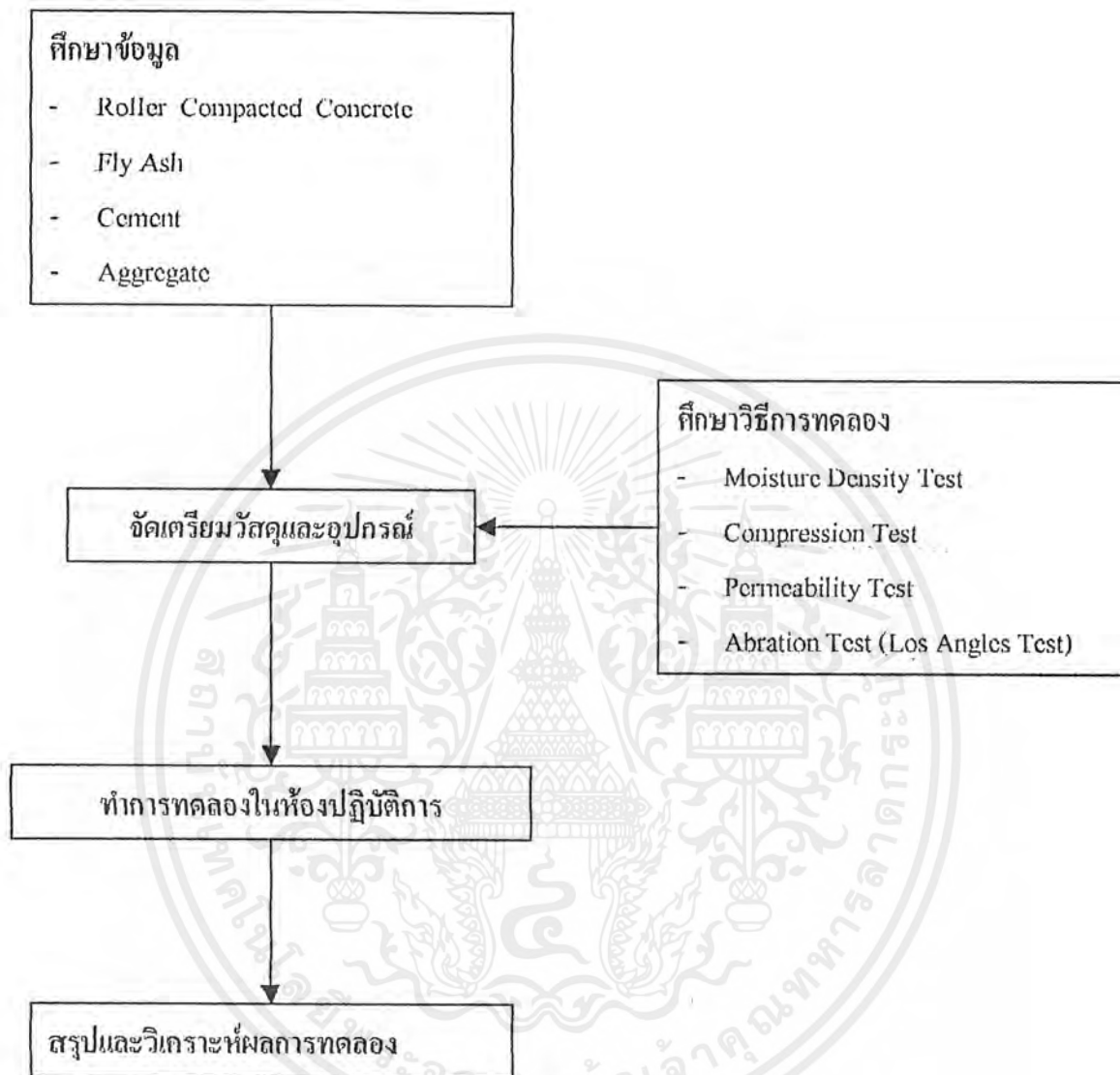
เป็นการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับ ขี้เถ้าลอยลิกไนต์ (Fly Ash) ซีเมนต์ (Cement) วัสดุมวลรวมหยาบ (Aggregate) คอนกรีต (Concrete) และ คอนกรีตบดอัด (Roller Compacted Concrete , RCC) เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการออกแบบการทดลองในห้องปฏิบัติการ กระบวนการดำเนินการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 3.1

#### 3.2 การจัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์

เป็นการจัดเตรียม วัสดุและอุปกรณ์ตลอดจนการศึกษาถึงมาตรฐานข้อกำหนดของ วัสดุและอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้ในการทดลอง

##### 3.2.1 วัสดุ:- วัสดุที่ต้องใช้ในการเตรียมส่วนผสมประกอบไปด้วยวัสดุต่างๆดังต่อไปนี้

- (1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ซึ่งมีคุณสมบัติตามกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก.15-2514/2517 ประเภทที่ 1 และมาตรฐานอเมริกัน ASTM C150 Type 1 ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ปูนซีเมนต์ตราเสือ
- (2) ขี้เถ้าลอยลิกไนต์ ได้จาก โรงไฟฟ้าพลังความร้อนแม่เมาะ จ.ลำปาง คุณสมบัติทางด้านกายภาพและ ส่วนประกอบทางเคมีดังแสดงในตาราง ในส่วนวรรณกรรมปริทัศน์



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการศึกษา

- (3) นำ ใช้น้ำประปาจากโรงปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา ของภาควิชาวิศวกรรมโยธา
- (4) วัสดุมวลรวมหยาบ (หิน) การทดลองในโครงการนี้ใช้หินในการทดลอง 2 ประเภทคือ หินจากแหล่งหินภายในสถานที่ก่อสร้าง (จากท่าด่าน) และหินจากภายนอกสถานที่ก่อสร้าง (หินปูนที่มีขายทั่วไป)
- (5) วัสดุมวลรวมละเอียด (ทราย) ใช้ทรายจากแหล่งขายวัสดุก่อสร้างทั่วไป

3.2.2 อุปกรณ์:- อุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆดังต่อไปนี้

- (1) ชุดทดสอบ Compaction Test สำหรับดินแบบ Standard Proctor 1 ชุด
- (2) แบบหล่อ Cylinder Mold ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm สูง 30 cm (D15x30 cm) จำนวน 18 ชุด
- (3) แบบหล่อท่อ PVC ชนิดบาง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว สูง 5 นิ้ว (D2.5x5 in) จำนวน 18 ชุด
- (4) โม่ผสมคอนกรีตแบบตั้ง 1 ชุด
- (5) ชุดเครื่องมือทดสอบค่าความชื้นน้ำแบบ Constant head แบบอัดความดันคงที่
- (6) ชุดเครื่องมือทดสอบค่าความต้านทานการสึกกร่อน Los Angeles Machine

### 3.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบและการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดลองในห้องปฏิบัติการ เป็นการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตบดอัดผสมซีเมนต์ลยลิกไนต์ในปริมาณเปอร์เซ็นต์ต่างๆ ในสภาพที่สอดคล้องกับสภาพการทำงานจริงของการทำงานเช่นคอนกรีตบดอัด และศึกษาถึงผลกระทบและความแตกต่างของการใช้วัสดุมวลรวมหยาบจากแหล่งวัสดุภายในสถานที่ก่อสร้างต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่างๆของคอนกรีตบดอัดเปรียบเทียบกับการใช้วัสดุมวลรวมหยาบจากแหล่งวัสดุภายนอกสถานที่ก่อสร้าง

#### 3.3.1 ข้อกำหนดและข้อจำกัดของการทดลอง

- (1) มาตรฐานการทดลองทั้งหมดอ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM เป็นหลักและประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับสภาพการทดลองในบางเรื่อง
- (2) การพิจารณาเลือกใช้ปริมาณซีเมนต์รวมกับซีเมนต์ลยลิกไนต์พิจารณาจากปริมาณที่ใช้ในการทำงานจริงโดยประมาณและได้ประยุกต์คิดแปลงให้เหมาะสมกับการทดลองโดยใช้เท่ากับ  $250 \text{ kg/m}^3$
- (3) กำหนดใช้ปริมาณซีเมนต์ลยลิกไนต์เป็นเปอร์เซ็นต์ในการเข้าไปแทนที่ซีเมนต์ ( $\%F = F/C + F$ ) โดยเลือกใช้อัตราส่วนปริมาณซีเมนต์ลยลิกไนต์ต่อปริมาณซีเมนต์เป็นเปอร์เซ็นต์ ต่างกัน 3 ค่าดังนี้คือ  $F:C = 10:90$  ,  $F:C = 50:50$  และ  $F:C = 70:30$

เนื่องจากปัจจุบันนี้ยังไม่มีมาตรฐานที่ใช้กัน โดยทั่วไปในการเตรียมตัวอย่างทดสอบสำหรับทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาคุณสมบัติของส่วนผสม RCC ดังนั้นในการเตรียมตัวอย่างทดสอบเพื่อหา

คุณสมบัติต่างๆของ RCC จึงยังมีข้อแตกต่างกันอยู่บ้างในแต่ละพื้นที่ ปัญหาอยู่ที่ว่าจะเตรียมตัวอย่างทดสอบ สำหรับทดสอบในห้องปฏิบัติการอย่างไรให้มีสภาวะ(condition) เหมือนกับคอนกรีตที่จะทำการเท RCC ลงในสถานที่ก่อสร้างจริง ที่ซึ่งมี รถบรรทุก รถบดและสันตะเทือน ส่งผลกระทบต่อส่วนผสม RCC ที่จะเท

วิธีการที่ใช้กันก็คือ จัดการกับตัวอย่างทดสอบให้มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับ ที่จะใช้จริง ในคอนกรีตที่ย่ำให้มากที่สุด อาจจะเป็นเพราะสมมติฐานที่ว่า ความหนาแน่น นั้นเป็นสัดส่วนกับคุณสมบัติ อื่นๆ ที่ต้องการของส่วนผสมนั้น และที่มีผลกระทบมากที่สุดก็คือ กำลังกดอัดสำหรับส่วนผสมเดียวกันนั้น เช่นส่วนผสมที่บดอัดด้วยพลังงานต่างกันจะทำให้ได้ความหนาแน่นของส่วนผสมนั้นต่างกัน ส่งผลให้ได้ กำลังกดอัด (Compressive Strength) ต่างกัน รวมทั้งคุณสมบัติอื่นๆของ RCC ที่อาจแตกต่างกันได้อีกด้วย ดังนั้นจะเห็นได้ว่าสิ่งสำคัญในการจัดเตรียมตัวอย่างทดสอบก็คือ จะต้องเตรียมตัวอย่างทดสอบให้มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับสภาพใช้งานจริงมากที่สุด

สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ใช้สำหรับทดสอบ RCC ในปัจจุบันได้ถูกพัฒนามา จากการทดสอบสำหรับคอนกรีตแบบธรรมดา (conventional concrete) หรือ ในบางกรณีมาจากการทดสอบ สำหรับดิน(soils) ซึ่งมีความคล้ายคลึงกันมาก แต่ก็ยังมีความแตกต่างจากการทดสอบทั่วไปของ conventional concrete หรือ soil อยู่บ้างในบางเรื่อง

การทดลองสำหรับ โครงการพิเศษนี้จะมุ่งศึกษาถึงประเด็นหลัก 2 ประการดังนี้คือ

- (1) ทดลองศึกษาคุณสมบัติทางด้านกำลังและการซึมผ่าน ได้ของน้ำของส่วนผสมคอนกรีตบดอัด เมื่อมีการ ใช้ซีเมนต์ลอยลิกไนต์ในปริมาณต่างๆในส่วนผสมแทนปูนซีเมนต์
- (2) ทดลองศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบต่อคุณสมบัติทางด้านกำลังและการซึมผ่าน ได้ของน้ำของการใช้วัสดุ มวลรวมหยาบจากแหล่งวัสดุภายในสถานที่ก่อสร้างจริงกับการใช้วัสดุมวลรวมหยาบจากแหล่งวัสดุ ภายนอกสถานที่ก่อสร้างจริง

ดังนั้นในโครงการพิเศษนี้จะได้มีการใช้ซีเมนต์ลอยลิกไนต์เป็นถ่วงผสมในคอนกรีตบดอัด แทนซีเมนต์ในปริมาณเป็นเปอร์เซ็นต์ต่างๆกัน 3 ค่า คือ  $F:C = 10:90$  ,  $F:C = 50:50$  และ  $F:C = 70:30$  สำหรับการทดลองหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่างๆ ซึ่งได้กำหนดไว้แล้วในข้อกำหนดของการทดลอง และในแต่ละการทดลองศึกษาหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่างๆนั้น จะมีการใช้วัสดุมวลรวมหยาบ จากแหล่งวัสดุ ภายในสถานที่ก่อสร้างจริงซึ่งเป็นหินภูเขาไฟ (หินTuft) และจากแหล่งวัสดุนอกสถานที่ก่อสร้าง

สร้างจริง (หินปูน) เป็นวัสดุมวลรวมหยาบในส่วนผสมคอนกรีตบดอัดด้วยเพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมในเรื่องต่างๆ

สำหรับงานเท็อนคอนกรีตบดอัด คุณสมบัติของวัสดุที่สำคัญที่จะต้องพิจารณาเพื่อนำวัสดุนั้นมาใช้ในการสร้างเป็นตัวเชื่อมได้แก่

- (1) ความหนาแน่นของวัสดุเมื่อบดอัดแล้ว (Density)
- (2) กำลังอัด (Compressive Strength)
- (3) ความซึมผ่านไค้ของน้ำ (Permeability)

เนื่องจากโครงการพิเศษนี้ต้องการที่จะศึกษาถึงความแตกต่างของคุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสม Roller Compacted Concrete (RCC) ที่ใช้วัสดุมวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) จากแหล่งหินในบริเวณสถานที่ก่อสร้างจริงตามแอ่งหิน (เป็นหินประเภทหินภูเขาไฟ) ในส่วนผสม กับกรวัสดุมวลรวมหยาบ จากแหล่งหินปูนในบริเวณนอกสถานที่ก่อสร้าง (หินที่มีการซื้อขายกันทั่วไป) จึงได้มีการทำการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุมวลรวมหยาบที่สำคัญด้วยคือ การทดสอบความต้านทานการสึกกร่อนของหิน (Abrasion Test) โดยใช้วิธี Los Angeles Test สำหรับวัสดุมวลรวมหยาบจากภายในสถานที่ก่อสร้างจริง (หินภูเขาไฟ) และวัสดุมวลรวมหยาบจากภายนอกสถานที่ก่อสร้าง (หินปูนที่ซื้อขายกันทั่วไป) เปรียบเทียบกัน เพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อการใช้หินจากแหล่งหินภายในสถานที่ก่อสร้างจริงต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่างๆ ให้ชัดเจนยิ่งขึ้น

ดังนั้นจะต้องมีการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติต่างๆเหล่านี้กับวัสดุที่จะนำมาใช้ทำเป็นตัวเชื่อมเพื่อให้แน่ใจได้ว่ามีความปลอดภัยและมั่นคงแข็งแรงต่อสภาพแวดล้อมแบบต่างๆ การทดสอบที่จะนำมาปฏิบัติในโครงการนี้ก็คือ

- (1) Moisture – Density Test
- (2) Compression Test
- (3) Permeability Test
- (4) Abrasion Test (Los Angeles Test)

ถ้ารับรายละเอียดของการทดสอบแบบต่างๆมีดังนี้

### 3.3.2 Moisture – Density Test

จากหลักการที่ว่าส่วนผสมที่บดอัดด้วยพลังงานต่างกันจะทำให้ได้ความหนาแน่นต่างกัน ซึ่งส่งผลให้กำลังกดอัดต่างกันด้วย แต่ในสภาพการทำงานจริงนั้นจะต้องพยายามบดอัดส่วนผสมให้ได้ความหนาแน่นมากที่สุดอยู่แล้ว เพื่อที่จะให้ได้กำลังกดอัดและคุณสมบัติอื่นๆของส่วนผสมมีแนวโน้มที่ดีขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นในการทดสอบคุณสมบัติอื่นๆของวัสดุ RCC จะต้องทำการเตรียมตัวอย่างทดสอบให้ได้ความหนาแน่นสูงสุดเช่นกัน จึงจำเป็นจะต้องทำการทดสอบ Moisture – Density Test เพื่อที่จะหาปริมาณน้ำที่จะใช้ในส่วนผสมที่เหมาะสม เพื่อที่มีบดอัดแล้วจะ ได้ความหนาแน่นมากที่สุดนั่นเอง

Moisture-Density Test เป็นการทดสอบเพื่อหาปริมาณน้ำในส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Moisture Content) ซึ่งเมื่อบดอัดแล้วจะทำให้ได้ส่วนผสมที่มีความหนาแน่นสูงสุด (Maximum Density) โดยการ Trail หาปริมาณน้ำที่เหมาะสมกับส่วนผสมนั้น ซึ่งจะหาได้จากกราฟ Plot Graph Moisture-Density Curve เนื่องจากส่วนผสม RCC จะมีความแห้งมากเมื่อเทียบกับส่วนผสม Concrete ธรรมดา คือมี Slump เกือบเป็น 0 หรือ ไม่มี Slump เลย ดังนั้นในแง่ของการทดสอบนี้จะเปรียบส่วนผสม RCC นี้เป็นเหมือนดินชนิดหนึ่งที่มีสารซีเมนต์เชื่อมประสานเป็นองค์ประกอบด้วย (Cement Enriched) ดังนั้นในการทดสอบ Moisture – Density Test สำหรับ ส่วนผสม Roller Compacted Concrete นี้ ก็จะใช้วิธีการที่คล้ายคลึงกันกับการทดสอบ Moisture Density Test สำหรับดินเกือบทั้งหมด

หลักการของการทดสอบของ RCC ก็เหมือนกับของดิน คือ การที่จะบดอัดดินให้ได้ความหนาแน่นสูงตามความต้องการหรือตามจุดประสงค์ของการใช้งานจะต้องอาศัยน้ำเป็นตัวหล่อลื่น แต่ถ้ามีน้ำอยู่มากเกินไปน้ำจะไปหุ้มเคลือบรอบอนุภาคดินทำให้อายุของเม็ดดินแยกตัวห่างจากกันหรือถ้ามีน้ำอยู่น้อยเกินไป การหล่อลื่นจะไม่ดีพอที่จะช่วยให้การบดอัดเม็ดดินบีบชิดกันเท่าที่ควร สำหรับ RCC ก็เช่นกัน ดังนั้นจุดประสงค์ของการทดสอบนี้ก็เพื่อต้องการหาปริมาณน้ำในส่วนผสมที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) ที่เมื่อทำการบดอัดแล้วจะให้ความหนาแน่นมากที่สุด (Maximum Density) ในแต่ละระยะของ Fly Ash ที่ต่างกันในส่วนผสม

ถ้ารับวิธีการทดสอบนั้นจะอ้างอิงตามวิธีการทดสอบ Standard Proctor Test ตามมาตรฐาน (ASTM , 1981) สำหรับการทดสอบ Moisture – Density Test นี้จะใช้วัสดุมาตรฐานหยาบที่เป็นหินปูนเท่านั้นในการทดสอบ

### 3.3.3 Compression Test

กำลังกดอัดเป็นคุณสมบัติทางวิศวกรรมอีกอย่างหนึ่งที่จะต้องพิจารณาสำหรับวัสดุที่จะนำมาใช้ทำเป็นตัวเชื่อม RCC กำลังกดอัดแปรผันตามกับค่าความหนาแน่นของส่วนผสม ถ้าความหนาแน่นมีค่ามากจะส่งผลให้ได้กำลังกดอัดที่มากตามไปด้วย กำลังกดอัดของคอนกรีตธรรมดาจะมีผลต่อคุณสมบัติอื่นๆของคอนกรีตมาก โดยมากเมื่อคอนกรีตมีกำลังกดอัดที่ดีแล้ว คุณสมบัติอื่นๆก็มักจะดีตามไปด้วย ส่วนผสมของ RCC ก็เช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบ Compression Test กับส่วนผสม RCC ด้วยเพื่อจะได้ทราบว่าส่วนผสมมีกำลังกดอัดที่ดีได้ตามต้องการหรือไม่

ถ้ารับการเตรียมตัวอย่างทดสอบ Compressive Strength ของ RCC นั้นจะมีความแตกต่างจากของ Concrete ธรรมดา คือ จะต้องมีการบดอัดตัวอย่างด้วย โดยวิธีการที่ใช้ในการบดอัด ในที่นี้จะใช้วิธีของ Standard Proctor Test เช่นเดียวกันกับตอนทดสอบ Moisture – Density Test ซึ่งให้พลังงานในการบดอัดเท่ากับ 12,400 ft-lb /ft<sup>3</sup> จากนั้นจึงนำตัวอย่างไปบ่มตามระยะเวลาแล้วจึงนำมาทดสอบเพื่อหาค่ากำลังอัดของแท่งตัวอย่าง

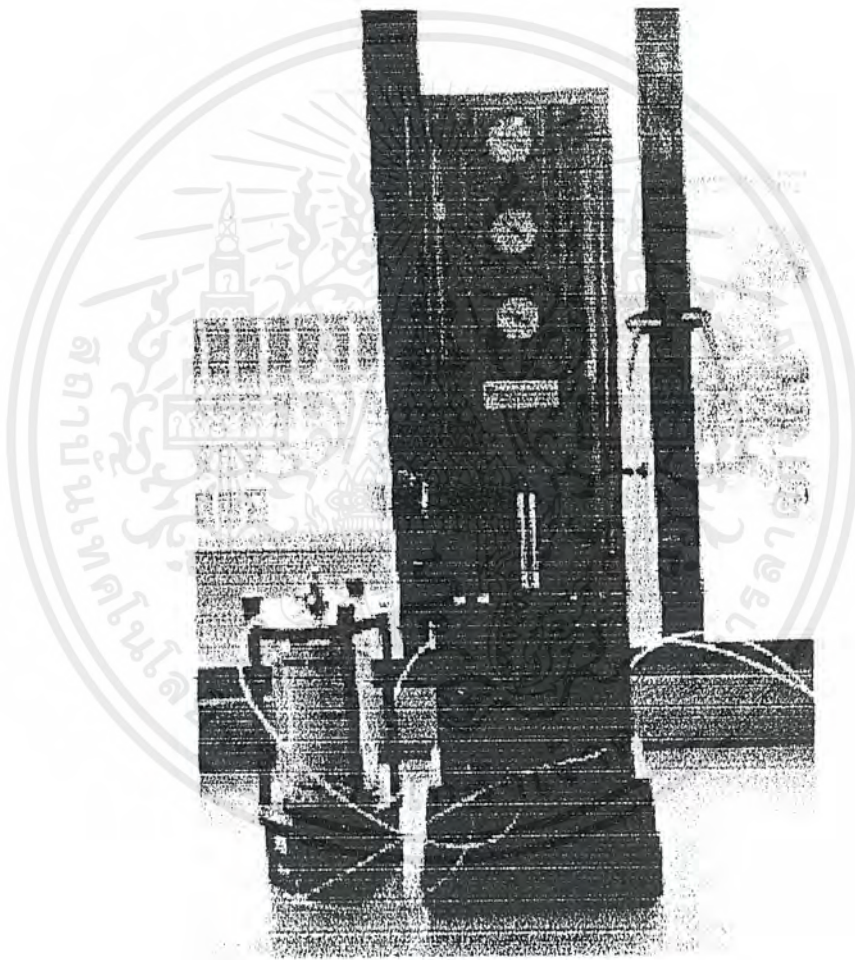
### 3.3.4 Permeability Test

หน้าที่หลักของเขื่อนก็คือการกั้นขวางน้ำและเก็บกักน้ำไว้ในบริเวณที่ต้องการเพื่อนำน้ำนั้นไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ และยังสามารถป้องกันน้ำท่วมในบริเวณที่ไม่ต้องการให้มีน้ำไหลไปท่วมได้ด้วย ดังนั้นคุณสมบัติทางวิศวกรรมอีกอย่างที่สำคัญมากสำหรับวัสดุที่จะนำมาใช้ในการทำตัวเชื่อมก็คือ ค่าความซึมผ่านได้ของน้ำผ่านวัสดุนั้นๆ หมายถึงความสามารถของวัสดุนั้นๆในการต้านทานการไหลผ่านของน้ำผ่านตัววัสดุได้ดีมากน้อยเพียงใด จุดประสงค์ของการทดสอบนี้ก็เพื่อทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำ (Coefficient of Permeability , k) ของส่วนผสม RCC ที่มีปริมาณ Fly Ash ในส่วนผสมต่างๆกันที่ระยะเวลาต่างๆนั่นเอง

สำหรับการเตรียมตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบ Permeability Test จะใช้ท่อ PVC ทรงกระบอกขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว สูง 5 นิ้ว เป็นแบบ แล้วทำการเทส่วนผสม RCC ลงในแบบ โดยต่อ 1 แบบการเทแบ่งเทเป็น 3 ชั้นเท่าๆกัน แต่ละชั้นทำการบดอัดด้วยแท่งเหล็กน้ำหนัก 2.05 lb ระยะยกสูงปล่อยตก 1.15 ft (13.8 inches) เป็นจำนวน 25 ครั้ง ซึ่งถือรวมเป็นพลังงานบดอัดทั้งหมดที่ให้กับตัวอย่าง

ทดสอบประมาณ 12,400  $\mu\text{-lb} / \text{ft}^3$  สำหรับตัวอย่างที่ใช้หินจากแหล่งหินภายในสถานที่ก่อสร้าง (หินจากท่า  
ค่าน) และสำหรับตัวอย่างที่ใช้หินจากภายนอกสถานที่ก่อสร้าง (หินปูนที่ซื้อขายทั่วไป)

การทดสอบ Permeability Test จะใช้ชุดอุปกรณ์ทดสอบการไหลซึมผ่านของน้ำ โดยใช้วิธี  
ทดสอบการไหลซึมผ่านของน้ำผ่านดินตามมาตรฐาน ASTM D-2434, D-4511, 1944 ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ Permeability Test

### 3.3.5 Abrasion Test (Los Angeles Test)

ถ้ารับขนาดของตัวอย่างมวลรวมนี้ ได้เลือกใช้ตามขนาด Grading B เพราะมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของวัสดุมวลรวมหยาบที่นำมาใช้ในโครงการพิเศษนี้มากที่สุด และสะดวกต่อการทดสอบ ดังนั้นเลือกใช้ Grading แบบ B และใช้ลูกเหล็ก 11 ลูกในการทดสอบ โดยใช้วิธีการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C 131

### 3.3.6 แผนงานและขั้นตอนที่ใช้ทำการทดสอบ

เริ่มต้นจากการหาสัดส่วนผสมของคอนกรีตอัดแข็งเบื้องต้น (Initial Mix Design) ตามวิธีของ ACI (The American Concrete Institution) โดยมีข้อมูลเริ่มต้นในการคำนวณหาสัดส่วนผสมดังนี้

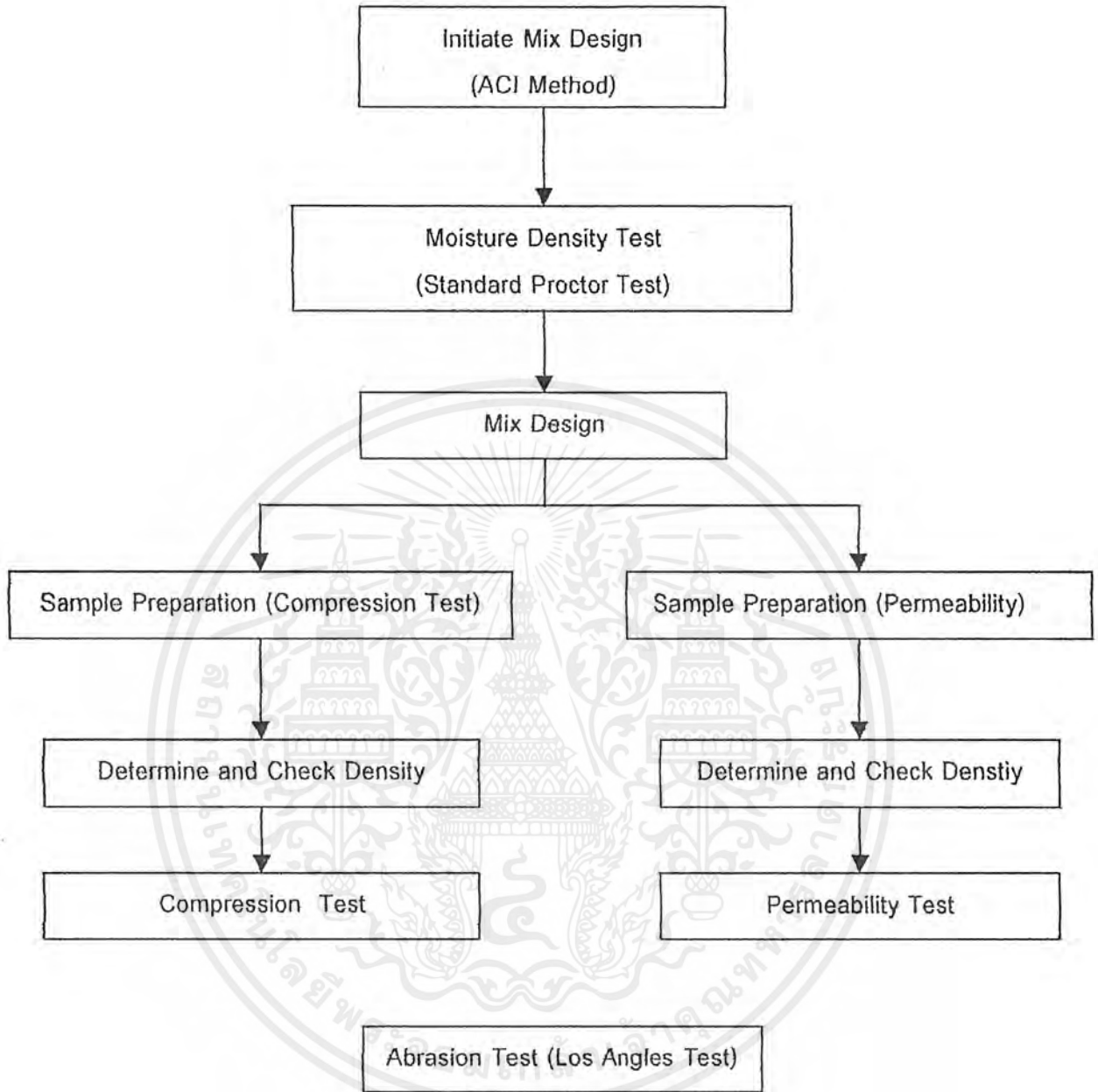
- (1) กำหนดให้ปริมาณสารเชื่อมประสานซีเมนต์ (Cementitious Material) หรือคือ ปริมาณซีเมนต์ + ซีเมนต์ลอยลิกไนต์ (C+F) เท่ากับ  $250 \text{ kg/m}^3$
- (2) กำหนดให้ใช้ค่าความขรุขระตัวต่ำสุดที่มีในตารางวิธีออกแบบของ ACI คือเท่ากับ 3 ซม. ในการหาสัดส่วนผสมอื่นๆ
- (3) กำหนดให้ใช้วัสดุมวลรวมหยาบขนาดใหญ่สุดในการออกแบบ Mix Design เท่ากับ  $\frac{3}{4}$  นิ้ว

ซึ่งจากการคำนวณสามารถหาอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมต่างๆดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนผสมของ RCC ที่ได้จากวิธีของ ACI

วัสดุผสม	ปริมาณ
ซีเมนต์ + ซีเมนต์ลอยลิกไนต์ (C+F)	$250 \text{ kg/m}^3$
วัสดุมวลรวมหยาบ (หิน)	$1,024 \text{ kg/m}^3$
วัสดุมวลรวมละเอียด (ทราย)	$875 \text{ kg/m}^3$

\* ปริมาณซีเมนต์ และ ซีเมนต์ลอยลิกไนต์ จะใช้เป็นอัตราส่วนต่อกัน (F:C) เป็นเปอร์เซ็นต์ต่างๆ 3  
ถ้า คือ  $F:C = 10:90$  ,  $F:C = 50:50$  ,  $F:C = 70:30$  \*



รูปที่ 3.3 Chart แสดงแผนผังการทดสอบ

เมื่อได้สัดส่วนผสมต่างๆ คือ ปริมาณปูนซีเมนต์ (Cement) , ี่เ้าลอยถิกไนต์ (Fly Ash) , วัสดุควมรวมหยาบ(Coarse Aggregate) คือหิน, วัสดุควมรวมละเอียด(Fine Aggregate) คือทราย ครบแล้วก็ เริ่มต้นทำการ Trial หาปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการบดอัดที่สุด โดยการทำการทดสอบ Moisture – Density

Test สำหรับ 3 Mix Design ที่ปรับเปลี่ยนปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมแทนซีเมนต์ในเปอร์เซ็นต์ต่างๆกัน 3 ค่า เพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) และความหนาแน่นบดอัดสูงสุด (Maximum Density) สำหรับแต่ละ Mix Design ที่มีเปอร์เซ็นต์ Fly Ash ต่างกัน โดยจะใช้หินปูนเป็นวัสดุมวลรวมหายาในส่วนผสมเท่านั้น สำหรับวิธีทดสอบ Moisture – Density Test จะใช้วิธี Standard Proctor Test เช่นเดียวกับกับการทดสอบสำหรับดิน

หลังจากที่ได้ทำการทดสอบ Moisture – Density Test เสร็จแล้ว ก็จะได้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการบดอัดที่สุดสำหรับแต่ละ Mix Design ที่มีเปอร์เซ็นต์ Fly Ash ต่างกัน และจะนำปริมาณน้ำนั้นๆ สำหรับแต่ละ Mix Design ไปใช้ในการผสมจริงเพื่อทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมอื่นๆต่อไป เมื่อได้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับแต่ละ Mix Design แล้ว ก็เริ่มทำการเตรียมตัวอย่างทดสอบ สำหรับกาทดสอบ Compression Test โดยการเตรียมตัวอย่างใช้วิธีบดอัดแบบ Standard Proctor เช่นเดียวกัน แต่แบบคนละขนาด เตรียมตัวอย่างทั้งหมด 18 ตัวอย่าง โดยใช้วัสดุมวลรวมหายา (หิน) จากแหล่งวัสดุภายในสถานที่ก่อสร้าง (หิน Tuff) 9 ตัวอย่าง และวัสดุมวลรวมหายา (หิน) จากแหล่งภายนอกสถานที่ก่อสร้าง (หินปูน) 9 ตัวอย่าง ในแต่ละ 9 ตัวอย่างใช้สำหรับแต่ละ Mix Design (แต่ละเปอร์เซ็นต์ Fly Ash แทนซีเมนต์) ซึ่งมี 3 Mix อย่างละ 3 ตัวอย่าง สำหรับ 3 เวลาบ่มถึงนาน 1 วัน , 3 วัน และ 7 วัน รวมเป็น 9 ตัวอย่าง

หลังจากบ่ม (Curing) ตัวอย่างทดสอบได้ตามเวลาที่ต้องการแล้วก็นำมาทดสอบหากำลังกดอัด (Compression Strength) ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ โดยก่อนจะทำการกดแต่ละตัวอย่างทดสอบ ให้ทำการหาความหนาแน่นเสียก่อน แล้วตรวจสอบดูว่าแตกต่างจากค่าความหนาแน่นสูงสุด (Maximum Density) ของแต่ละ Mix นั้นๆอย่างไรบ้าง จากนั้นทำการกดลูกปูนแล้วบันทึกผลไว้จนครบทุกตัวอย่างทดสอบ ในขณะเดียวกัน หลังจากได้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการบดอัดสำหรับแต่ละ Mix Design แล้ว ก็ให้ทำการเตรียมตัวอย่างทดสอบสำหรับ Permeability Test จำนวน 18 ตัวอย่างเช่นกัน โดย 9 ตัวอย่าง สำหรับที่ใช้หินจากแหล่งวัสดุภายในสถานที่ก่อสร้าง (หิน Tuff) และ อีก 9 ตัวอย่างสำหรับใช้หินจากภายนอกสถานที่ก่อสร้าง (หินปูน) แต่ละ 9 ตัวอย่างนั้น ใช้สำหรับ 3 Mix Design ที่ระยะเวลาการทดสอบ 3 เวลา คือ 1 วัน , 3 วัน และ 7 วัน หลังหล่อตัวอย่างทดสอบเสร็จ การเตรียมตัวอย่างทดสอบใช้วิธีการบดอัดประยุกต์จากแบบวิธี Standard Proctor เพื่อให้เหมาะสมกับขนาดของแบบตัวอย่างทดสอบซึ่งมีขนาดต่างออกไป โดยให้พลังงานการบดอัดที่ใกล้เคียงกัน

หลังจากบ่มตัวอย่างให้ได้ตามเวลาการทดสอบที่ต้องการแล้วก็นำมาทำการทดสอบ Permeability Test แต่ก่อนการทดสอบให้ทำการหาความหนาแน่นของตัวอย่างเสียก่อนแล้วตรวจสอบดูว่าแตกต่างจากความหนาแน่นสูงสุดของแต่ละ Mix Design อย่างไร ในระหว่างที่รอเวลาการบ่มตัวอย่างทดสอบ (Curing) ก็ทำการทดสอบหาความต้านทานต่อการเสียดร่อนของวัสดุมวลรวมหยาบจากแหล่งวัสดุภายในสถานที่ก่อสร้างจริง (หินรฟค) เปรียบเทียบกับวัสดุมวลรวมหยาบจากแหล่งวัสดุนอกสถานที่ก่อสร้าง (หินปูน) โดยใช้วิธี Los Angeles Test เพื่อศึกษาถึงเปอร์เซ็นต์การเสียดร่อนของวัสดุมวลรวมหยาบที่สอดคล้องต่อการกระทบและการกัดกร่อน สำหรับแผนงานการทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและวิเคราะห์

ในบทที่ 4 นี้ จะได้แสดงถึงคุณสมบัติด้านกายภาพและด้านวิศวกรรมของ RCC แบ่งการอธิบายเป็นทางด้านกายภาพ ด้านกำลังอัด ด้านการซึมผ่านได้ของน้ำและคุณสมบัติของมวลรวม รวมถึงการวิเคราะห์ผลการทดสอบ และอธิบายถึงเหตุผลต่างๆที่ได้จากการทดสอบ

#### 4.1 คุณสมบัติของมวลรวม

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาถึงคุณสมบัติของมวลรวม โดยทำการศึกษาถึงความแตกต่างของหิน 2 ชนิด ได้แก่ หินปูนซึ่งเป็นหินที่ใช้ในการก่อสร้างทั่วไป และมีขายตามแหล่งวัสดุก่อสร้าง กับหิน tuft ซึ่งเป็นหินภูเขาไฟที่พบในแหล่งหินภายในสถานที่ก่อสร้าง โดยการรวบรวมข้อมูลคุณสมบัติและทำการทดสอบหาค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียโดยวิธี Abrasion Test (Los Angeles Test) ตามมาตรฐาน ASTM C 131 ซึ่งจากผลการศึกษาสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของหินทั้ง 2 ชนิด (ชัชวาลย์ เทรษฐบุตร, 2539 และ Penchan Kuptawanich., 1977)

คุณสมบัติ	ชนิดของหิน	
	หินปูน	หินTuft
Uniaxial Compressive Strength (Mpa)	70 - 350	30 - 160
Water Content (%)	0.5 - 1.5	0.19 - 0.71
Effective Porosity (%)	1.0 - 8.0	0.50 - 7.03
Unit Weight (gm/cm <sup>3</sup> )	1.4 - 1.9	2.42 - 2.77
Bulk Specific Gravity	2.4 - 2.9	2.42 - 2.77

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของหินทั้ง 2 ชนิด (ซัชวาลย์ - เศรษฐบุตร, 2539 และ Penchan Kuptawanich., 1977)

Apparent Specific Gravity	2.4 - 2.9	2.61 - 2.79
Absorption (%)	0.5	0.19 - 3.44
Vp (m/sec)	4,570-6,850	3,667 - 5,195
Vs (m/sec)	2,290-3,942	2,340 - 3,434
Modulus of Rigidity (Mpa)	35,387-95,343	15,395 - 33,848
Poisson's Ratio	0.06-0.55	0.02 - 0.22
Lame's Constant (Mpa)	44,606-142,199	13,847 - 41,520
% Loss (by Abrasion Test) *	24.72	19.47

\* ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบ

จากผลการทดสอบความต้านทานการสึกกร่อนของหินทั้งสองชนิดดังตารางที่ 4.1 พบว่า หินที่ได้จากเขื่อนท่าด่าน (หิน Tuff) มี % การสูญเสีย (%การสึกกร่อน) น้อยกว่าหินปูน หรืออาจกล่าวได้ว่า หิน Tuff มีความต้านทานต่อการสึกกร่อนมากกว่า หินปูนนั่นเอง เนื่องจากมี % การสูญเสียน้อยกว่า สาเหตุ อาจเป็นเพราะว่า หินที่ได้จากเขื่อนท่าด่าน (หิน Tuff) นั้น เป็นหินภูเขาไฟเหมือนกับที่สำรวจพบจากหลุม เาะบริเวณฐานรากเขื่อน ขาดการสำราจหินโผล่ ( Outcrop ) ซึ่งมีความแข็งแรงมาก จึงทำให้หินดังกล่าวมีความต้านทานต่อการสึกกร่อนมากกว่าหินปูน อย่างไรก็ตามจะต้องมีการนำหินทั้ง 2 ชนิดไปทดสอบโดยการนำไปเป็นส่วนผสมของ RCC เพื่อทำการศึกษาถึงผลกระทบทางด้านกำลังอัดต่อไป

#### 4.2 คุณสมบัติทางกายภาพของ RCC

เนื่องจากโครงการพิเศษนี้ได้ทำการทดสอบตัวอย่างที่ 1 วัน 3 วันและ 7 วัน จากการสังเกต ลักษณะด้านกายภาพของอัตราส่วนผสมเดียวกันที่เวลาต่าง ๆ กันนั้น ปรากฏว่าลักษณะด้านกายภาพของตัวอย่างทดสอบ ไม่พบการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงใช้ลักษณะด้านกายภาพของตัวอย่างทดสอบที่ระยะเวลา 7 วัน มาทำการเปรียบเทียบที่เขาระหว่างส่วนผสมที่ต่าง ๆ กัน ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้านกายภาพ

คุณสมบัติ ด้านกายภาพ	อัตราส่วนปริมาณเถ้าลอยแทนซีเมนต์ (%)					
	F:C 10:90		F:C 50:50		F:C 70:30	
	หินTuft	หินปูน	หินTuft	หินปูน	หินTuft	หินปูน
สี	เทาอ่อน	เทาอ่อน	เทา	เทา	เทาเข้ม	เทาเข้ม
โพรงอากาศ	ปานกลาง	ปานกลาง	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย
ความหนาแน่น(kg/m <sup>3</sup> )*	-	2567	-	2537	-	2518

\*จากการทดสอบ Moisture – Density Test

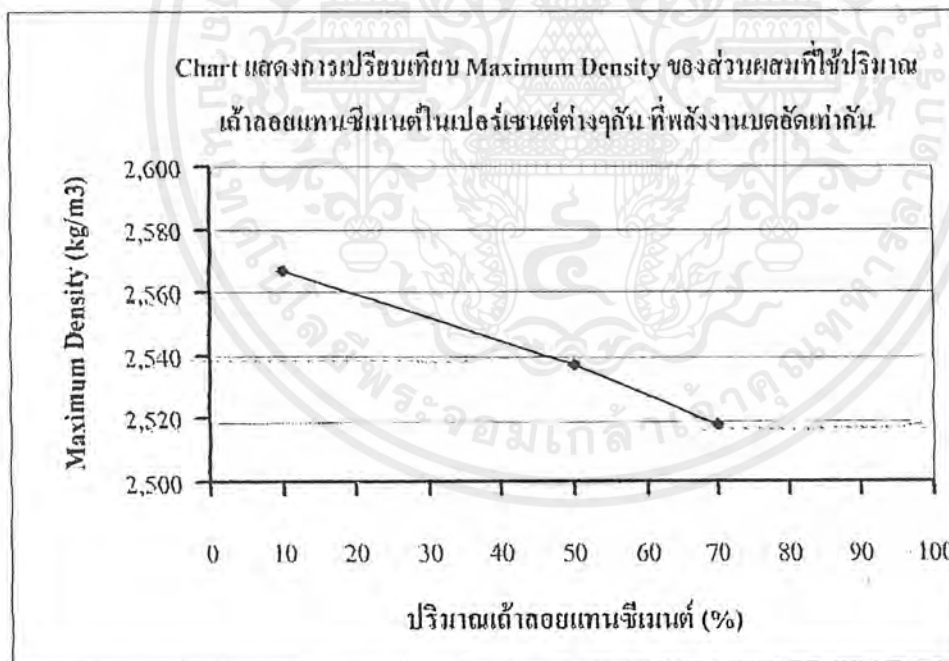
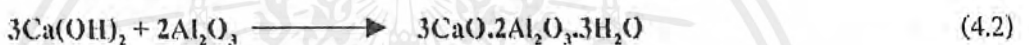
จากการสังเกตด้วยตาเปล่าจะเห็นว่าที่อัตราส่วนผสม F:C 70:30 จะมีสีเข้มกว่าและมีโพรงอากาศที่น้อยกว่าอัตราส่วนผสมต่างๆ เนื่องจากผิวของเถ้าลอยลิกไนต์ ซึ่งมีสีเทาที่เข้มกว่าปูนซีเมนต์มาก

จากผลการทดสอบ Moisture – Density Test เมื่อนำข้อมูลมาทำการ Plot กราฟ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสูงสุด (Maximum Density) กับ ปริมาณเถ้าลอยแทนซีเมนต์ (%) จะได้ความสัมพันธ์ออกมาดังรูปที่ 4.1 และในทำนองเดียวกัน ถ้าทำการ Plot กราฟระหว่าง ปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่สุดในการบดอัด (Optimum Moisture Content) กับ ปริมาณเถ้าลอยแทนซีเมนต์ (%) ก็จะได้ความสัมพันธ์ออกมาดังรูปที่ 4.2

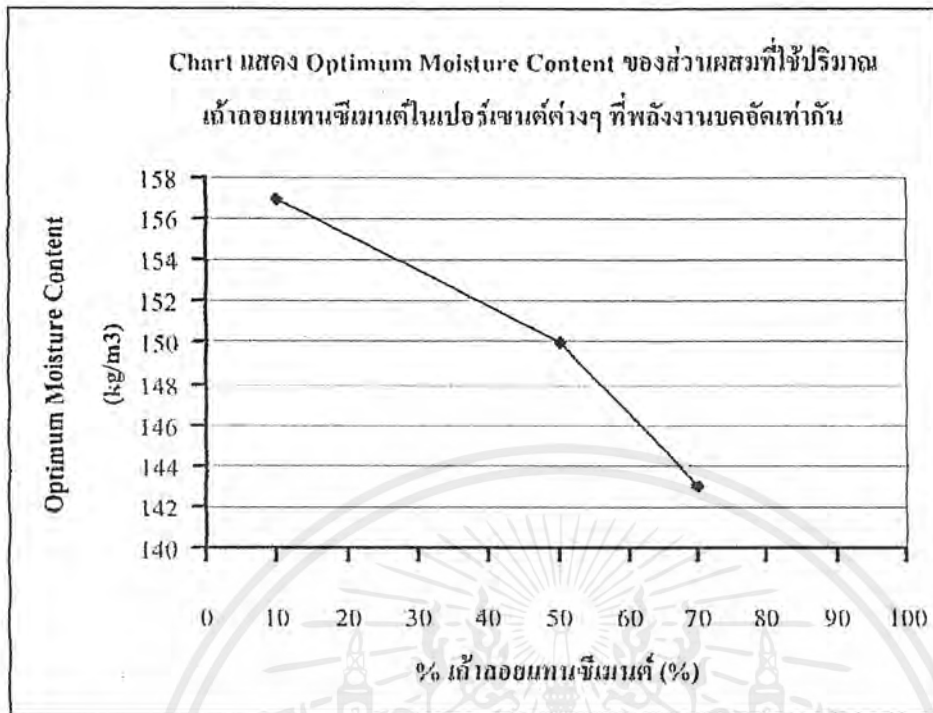
จากรูปที่ 4.1 จะสังเกตได้ว่า เมื่อทำการใช้ปริมาณเถ้าลอยแทนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่มากขึ้น (เป็นเปอร์เซ็นต์) ค่าความหนาแน่นสูงสุด (Maximum Density) ของส่วนผสมหลังบดอัดแล้วจะมีแนวโน้มที่ลดลง โดยค่าความหนาแน่นสูงสุดจะลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า เถ้าลอยเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและมีความละเอียดสูง โดยเบาและละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ ถ้าเทียบสำหรับปริมาตรของเถ้าลอยและซีเมนต์เท่าๆกันแล้ว น้ำหนักต่อปริมาตรของเถ้าลอยจะเบากว่าน้ำหนักต่อปริมาตรของซีเมนต์พอสมควร และเนื่องจากส่วนผสมที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยแทนซีเมนต์ในเปอร์เซ็นต์ต่างๆ ได้รับความหนาแน่นจากการบดอัดเท่ากันหมด ดังนั้นการใช้ปริมาณเถ้าลอยแทนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่มากขึ้นในส่วนผสมจะทำให้ความหนาแน่นของส่วนผสมนั้นลดลง เนื่องจากน้ำหนักต่อปริมาตร หรือหน่วยน้ำหนักของส่วนผสมนั้นลดลง อันเป็นผลมาจากการใช้ปริมาณเถ้าลอยแทนซีเมนต์มากขึ้นนั่นเอง

จากรูปที่ 4.2 จะสังเกตได้ว่า สำหรับส่วนผสมต่างๆ เมื่อใช้ปริมาณเถ้าลอยแทนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่มากขึ้น (เป็นเปอร์เซ็นต์) แล้ว ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่สุดในที่ต้องใช้ในการบดอัด (Optimum Moisture Content) จะมีแนวโน้มที่ลดลงเช่นกัน โดยปริมาณน้ำจะลดลงพอสมควร สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ อาจอธิบายได้จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังต่อไปนี้

เนื่องจากเถ้าลอย ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีหลักๆเป็น ซิลิกาไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) หรือ อลูมินาไดออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) จะทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ แล้วเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นสารเชื่อมประสาน โดยปฏิกิริยานี้เรียกว่า ปฏิกิริยา Pozzolanic ดังสมการที่ 4.1 และ สมการที่ 4.2



รูปที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบ Maximum Density ของส่วนผสมที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยแทนซีเมนต์ในเปอร์เซ็นต์ต่างๆ ที่พลังงานการบดอัดเท่ากัน



รูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบ Optimum Moisture Content ของส่วนผสมที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยแทนซีเมนต์ในเปอร์เซ็นต์ต่างๆ ที่พลังงานบดอัดเท่ากัน

จากสมการปฏิกิริยา Pozzolanic ดังที่ได้แสดงนี้ จะเห็นได้ว่า เถ้าลอย ( $\text{SiO}_2$  หรือ  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) จะทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ซึ่งเป็นผลผลิตมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์แล้วได้ผลผลิตเป็น สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ได้เลยโดยไม่ต้องอาศัยน้ำจากภายนอกในการทำปฏิกิริยามื่อดังปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ เพราะจากขบวนการเกิดปฏิกิริยา Pozzolanic นั้นได้ทำให้เกิดน้ำขึ้นจากปฏิกิริยาเอง และน้ำนั้นก็ได้ออกไปในการทำปฏิกิริยาภายในอย่างต่อเนื่องจนเกิดเป็นผลผลิตสุดท้ายคือ สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) การที่ปฏิกิริยาเกิดการเกิดสารเชื่อมประสาน (CSH) ของเถ้าลอยไม่ต้องการน้ำจากภายนอกมาช่วยในการเกิดปฏิกิริยานี้เอง ทำให้ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนซีเมนต์มีความต้องการน้ำในส่วนผสมลดลง ดังนั้นถ้าส่วนผสมยังมีการใช้เปอร์เซ็นต์เถ้าลอยแทนซีเมนต์มากขึ้น ก็จะทำให้ส่วนผสมยังมีความต้องการน้ำน้อยลงนั่นเอง

สาเหตุอีกประการหนึ่งคือ ลักษณะทางกายภาพของเถ้าลอยนั้นมีรูปร่างเป็นเม็ดกลมขนาดเล็กเพียง 1 ถึง 150 ไมครอน ซึ่งมีความละเอียดสูงมาก ดังนั้นเมื่อใช้ในการผสมคอนกรีตแล้วทำการบดอัด

เถ้าลอยจะช่วยหล่อลื่นให้วัสดุมวลรวมต่างๆเบียดชิดอัดแน่นกันได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นตามทฤษฎีการบดอัด จึงทำให้มีความต้องการน้ำเพื่อที่จะมาใช้ในการหล่อลื่นวัสดุมวลรวมในการบดอัดให้เบียดชิดกันแน่นน้อยลงซึ่งสาเหตุทั้ง 2 ประการนี้เป็นไปในรูปแบบเดียวกับที่เกิดขึ้นในการใช้เถ้าลอยลิกในค้ผสมในคอนกรีตปกติ

#### 4.3 ผลการศึกษาทางด้านกำลังของ RCC

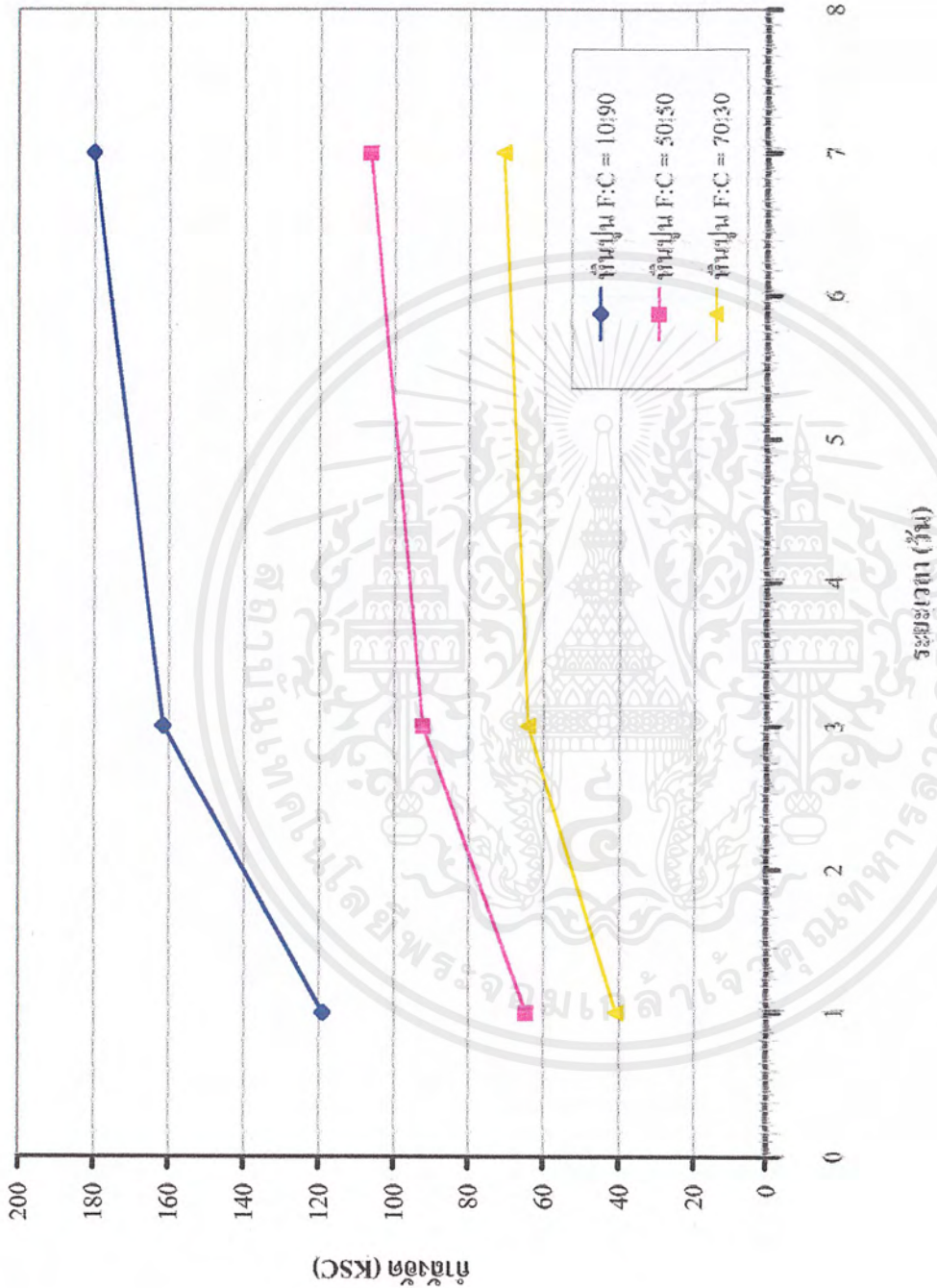
โครงการพิเศษนี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบด้านกำลังอันเนื่องมาจากชนิดของมวลรวมและปริมาณเถ้าลอยลิกในค้ที่แทนที่ซีเมนต์ในส่วนผสม RCC ซึ่งทำการทดสอบหาค่ากำลังอัดของแต่ละส่วนผสมได้ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่ากำลังอัด (KSC) ของส่วนผสม ที่ระยะเวลาต่างๆ จากการทดสอบ Compression Test

ระยะเวลา ทดสอบ	ค่ากำลังอัด ( KSC )					
	10:90		50:50		70:30	
	หินTuff	หินปูน	หินTuff	หินปูน	หินTuff	หินปูน
1	112	119	38	64	24	41
3	153	161	59	92	39	64
7	181	180	92	106	51	71

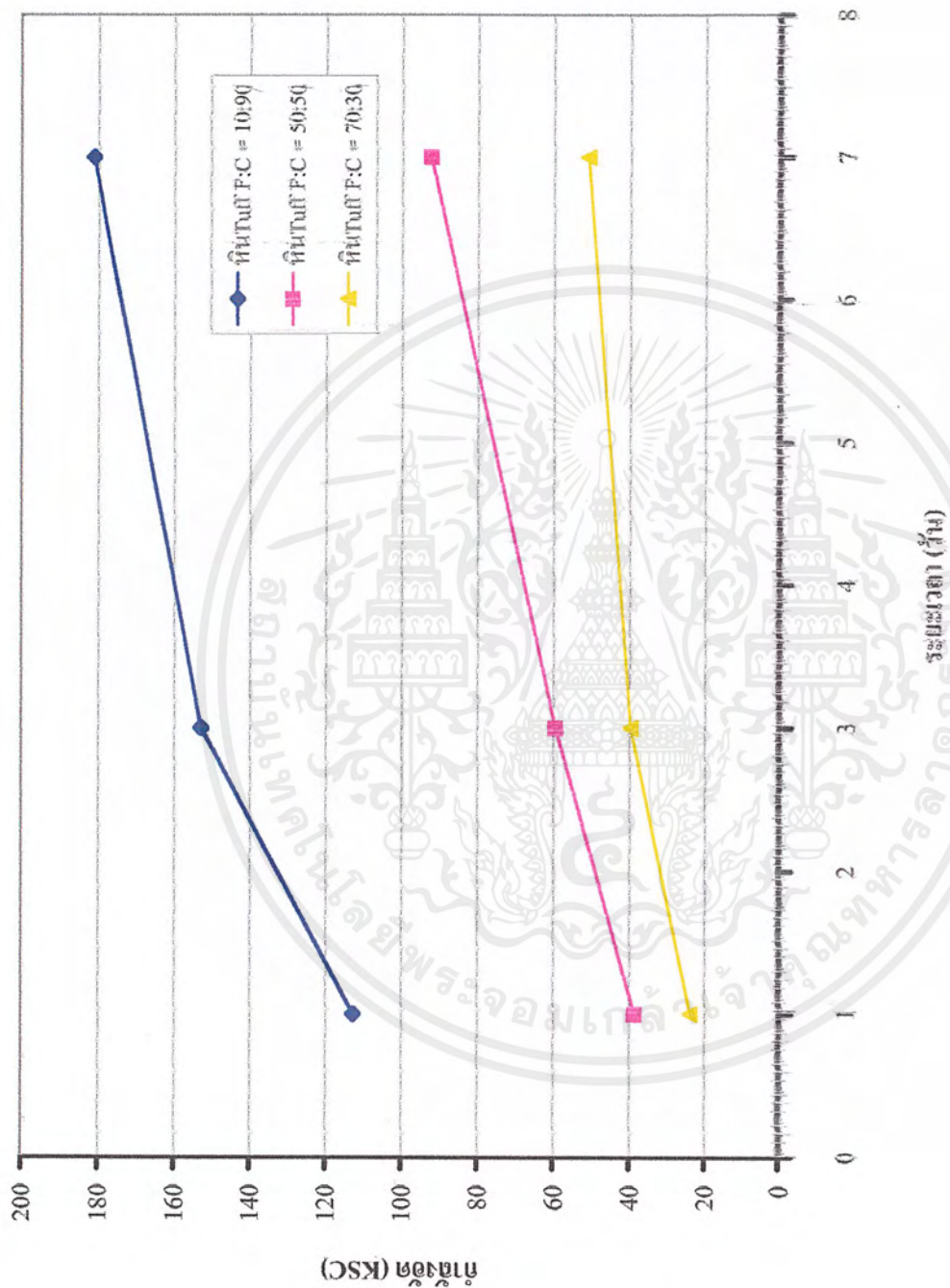
##### 4.3.1 ผลกระทบของปริมาณ Fly Ash ต่อการพัฒนากำลังอัด

จากตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงผลการทดสอบ Compression Test เมื่อนำข้อมูลมา Plot เป็น Chart เพื่อหาความสัมพันธ์ ระหว่าง กำลังอัดของส่วนผสม และ ระยะเวลาการทดสอบ สำหรับส่วนผสมที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยแทนซีเมนต์ในเปอร์เซ็นต์ต่างๆกัน จะได้เป็น Chart ดังรูปที่ 4.3 สำหรับส่วนผสมที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ และ รูปที่ 4.4 สำหรับส่วนผสมที่ใช้หิน Tuff เป็นวัสดุมวลรวมหยาบ



รูปที่ 4.3 แสดงการพัฒนากำลังอัดสำหรับส่วนผสมที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุผสมรวมมวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ผลของการพัฒนาการกำลังอัดสำหรับส่วนผสมที่ใช้หินทุฟเป็นวัสดุผสมรวมหยาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการทดสอบ Compression Test สำหรับตัวอย่างต่างๆ ในโครงการพิเศษนี้ ได้ใช้ Mix Design เดียวกันทั้งหมดในการผสมส่วนผสม แต่ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนปริมาณเถ้าลอยแทนซีเมนต์เป็นเปอร์เซ็นต์ต่างๆกัน 3 ค่า ดังนั้นถ้าใช้สมมติฐานที่ว่า ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ปริมาณสารซีเมนต์เชื่อมประสาน (Cementitious Materials) ในปริมาณเท่ากัน และใช้ปริมาณส่วนผสมอื่นๆเท่ากัน จะมีกำลังอัดสูงสุดที่ใกล้เคียงกัน แล้วจะสามารถวิเคราะห์การพัฒนากำลังอัดของส่วนผสมคอนกรีตบดอัดได้ดังนี้

จากรูปที่ 4.3 สำหรับส่วนผสมที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ เมื่อพิจารณาการพัฒนา กำลังอัดของส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนปริมาณเถ้าลอยแทนซีเมนต์ในปริมาณน้อย คือ เท่ากับ 10:90 (F:C = 10:90) จะสังเกตได้ว่า ลักษณะการพัฒนา กำลังอัดจะมีความใกล้เคียงกับ ลักษณะการพัฒนา กำลังอัดของ ส่วนผสมคอนกรีตทั่วไปคือ พัฒนากำลังอัดได้รวดเร็วในช่วงต้น หลังจากนั้นจะค่อยๆพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้น อย่างช้าๆ

เมื่อทำการเปรียบเทียบการพัฒนา กำลังอัด โดยใช้อัตราส่วนปริมาณเถ้าลอยแทนซีเมนต์ใน ปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น คือเป็น 50:50 (F:C = 50:50) จะสังเกตได้ว่า ลักษณะการพัฒนา กำลังอัดจะเปลี่ยนแปลง ไปเมื่อเทียบกับ ลักษณะของ F:C = 10:90 คือกำลังอัดจะพัฒนาได้ช้ากว่าในช่วงต้น สังเกตได้จากผลการ ทดลองคือ ที่ระยะเวลา 1 วัน ส่วนผสมที่ใช้ F:C = 50:50 มีกำลังอัดเท่ากับ 64.51 KSC ในขณะที่ ส่วนผสมที่ ใช้ F:C = 10 :90 มีกำลังอัดถึง 118.835 KSC แล้ว ในทำนองเดียวกัน ที่ระยะเวลา 3 วัน และ 7 วัน ส่วนผสม ที่ใช้ F:C = 50:50 มีกำลังอัดเท่ากับ 92.239 KSC และ 106.386 KSC ตามลำดับ ในขณะที่ส่วนผสมที่ใช้ F:C = 10:90 มีกำลังอัดถึง 161.277 KSC และ 179.951 ตามลำดับ

เช่นเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบการพัฒนา กำลังอัด โดยใช้อัตราส่วนปริมาณเถ้าลอยแทน ซีเมนต์ในปริมาณที่มากขึ้น ไปอีก คือเป็น 70:30 (F:C = 70:30) จะสังเกตได้ว่า ลักษณะการพัฒนา กำลังอัดจะ ยิ่งช้าลงไปอีก คือที่ 1 วัน มีกำลังอัดเท่ากับ 40.743 KSC ในขณะที่ส่วนผสมที่ใช้ F:C = 50:50 มีกำลังอัดเท่า กับ 64.51 KSC ในทำนองเดียวกัน ที่ระยะเวลา 3 วัน และ 7 วัน ส่วนผสมที่ใช้ F:C = 70:30 มีกำลังอัดเท่ากับ 63.945 KSC และ 70.735 KSC ตามลำดับ ในขณะที่ส่วนผสมที่ใช้ F:C = 50:50 มีกำลังอัดเท่ากับ 92.239 KSC และ 106.386 KSC

ในทำนองเดียวกัน จากรูปที่ 4.4 สำหรับส่วนผสมที่ใช้หิน Tuft เป็นวัสดุมวลรวมหยาบ ก็ สามารถวิเคราะห์ได้เช่นเดียวกับส่วนผสมที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุมวลรวมหยาบทุกประการ จะต่างกันที่ตัวเลข

กำลังอัดที่ระยะเวลาต่างๆเท่านั้น แต่แนวโน้มของการพัฒนากำลังอัดสำหรับส่วนผสมที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยแทนซีเมนต์ในเปอร์เซ็นต์ต่างๆเหมือนกัน

จากการวิเคราะห์นี้สามารถสรุปได้ว่า ถ้ามีการใช้ปริมาณเถ้าลอยแทนซีเมนต์ในส่วนผสมยิ่งมากเท่าไร ส่วนผสมก็จะยิ่งมีการพัฒนากำลังอัดช้าลงมากเท่านั้น ตรงตามทฤษฎีที่ระบุไว้ สาเหตุก็เพราะสารแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) ซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการพัฒนากำลังอัดให้คอนกรีต เกิดขึ้นช้าลง โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

เถ้าลอยซึ่งมีสารประกอบหลักคือ ซิลิกาไฮดรอกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) จะทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ เรียกว่า เกิดปฏิกิริยา Pozzolanic ขึ้น ซึ่งจะช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดขึ้น และใช้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ให้ได้มากในปริมาณหนึ่งเล็กน้อย หลังจากนั้นผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยา Pozzolanic นี้ จะไปทำปฏิกิริยากับน้ำ และจะเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) ขึ้น เช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นสารเชื่อมประสาน ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตพัฒนาขึ้น การที่ปฏิกิริยา Pozzolanic เกิดขึ้นช้าก็เนื่องเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดที่ช้าลง ดังนั้นยิ่งใช้ปริมาณเถ้าลอยแทนซีเมนต์มากเท่าไร ก็จะทำให้ปริมาณของ สาร CSH ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มกำลังอัดให้กับคอนกรีตเกิดขึ้นช้าลง เพราะปฏิกิริยา Pozzolanic ซึ่งจะให้ปริมาณสาร CSH จำนวนมากในคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยปริมาณสูง เกิดขึ้นช้านั่นเอง นอกจากนี้ Fly Ash จะหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของไฮดรอกไซด์ ( $\text{C}_3\text{A}$ ) ซึ่งเกิดในช่วงแรกอีกด้วย ทำให้สาร CSH ยังเกิดช้าลงอีก แต่จะหน่วงนานแค่ไหนขึ้นอยู่กับปริมาณซัลเฟต ปริมาณอัลคาไลน์ และปริมาณแคลเซียมในเถ้าลอย

อย่างไรก็ตาม การทดลองนี้ได้ทำการศึกษากำลังอัดในช่วงต้นเท่านั้น (ภายในระยะเวลา 7 วันหลังผสมเสร็จ) ซึ่งจากผลการศึกษาดังกล่าว ผลกระทบของเถ้าลอยต่อคอนกรีตของ Capp, J. P., and Spencer, J. D. (1970) พบว่าถ้ามีการปล่อยให้ส่วนผสมมีการพัฒนากำลังอัดนานขึ้น ไปอีกจะกำลังอัดของส่วนผสมที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยแทนซีเมนต์ในเปอร์เซ็นต์ต่างๆก็จะพัฒนาขึ้นมาใกล้เคียงกันกับกำลังอัดของส่วนผสมที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยแทนซีเมนต์ในปริมาณต่ำในที่สุด

#### 4.3.2 เปรียบเทียบกำลังอัดของส่วนผสมที่ใช้หินปูน และ หิน Tuft

จากผลการทดลอง Compression Test ดังแสดงในตารางที่ 4.2 เมื่อนำข้อมูลมาหาความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังอัดที่ระยะเวลาต่างๆ (KSC) กับ ปริมาณเถ้าลอยแทนซีเมนต์ (%) จะได้ความสัมพันธ์ออกมาดังรูปที่ 4.5

จากรูปที่ 4.5 ถ้าทำการพิจารณาถึง กำลังอัดของส่วนผสมคอนกรีตบดอัดที่ใช้หิน Tuft เป็นวัสดุผลรวมหยาบ เปรียบเทียบกับ กำลังอัดของส่วนผสมที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุผลรวมหยาบ ที่ระยะเวลาเดียวกัน จะพบว่า ไม่ว่าส่วนผสมนั้นจะใช้ปริมาณเถ้าลอยแทนซีเมนต์ในเปอร์เซ็นต์เท่าใด ส่วนผสมที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุผลรวมหยาบจะมีกำลังอัดมากกว่า ส่วนผสมที่ใช้หิน Tuft เป็นวัสดุผลรวมหยาบเสมอ ดังแสดงได้จากรูปที่ 4.5 คือ เส้นกราฟของส่วนผสมที่ใช้หินปูนจะอยู่เหนือ เส้นกราฟของส่วนผสมที่ใช้หิน Tuft เสมอ โดยถ้าลองพิจารณาถึงกำลังอัดของส่วนผสมที่ใช้หินปูน เปรียบเทียบกับ ส่วนผสมที่ใช้หิน Tuft เป็นวัสดุผลรวมหยาบ ที่ระยะเวลาและเปอร์เซ็นต์เถ้าลอยแทนซีเมนต์เดียวกัน จะพบว่ากำลังอัดจะแตกต่างกัน อยู่เล็กน้อย ถึง พอสมควร

ยกตัวอย่างเช่น ที่ระยะเวลา 3 วัน และที่เปอร์เซ็นต์เถ้าลอยแทนซีเมนต์เท่ากับ 10 % จะพบว่ากำลังอัดของส่วนผสมที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุผลรวมหยาบ มีกำลังอัดมากกว่า ส่วนผสมที่ใช้หิน Tuft 5 % หรือ ที่ระยะเวลา 7 วัน และเปอร์เซ็นต์เถ้าลอยแทนซีเมนต์เท่ากับ 50 % จะพบว่ากำลังอัดของส่วนผสมที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุผลรวมหยาบ มีกำลังอัดมากกว่าส่วนผสมที่ใช้หิน Tuft 15 % สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ ก็เพราะว่า ส่วนผสมที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุผลรวมหยาบมี Bonding ระหว่างซีเมนต์พอสต์กับหินปูนดีกว่า ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยพิจารณาถึงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ และวัสดุผลรวมทั้ง 2 ชนิด ดังนี้

สำหรับวัสดุจำพวกปูนซีเมนต์นั้น ได้มาจากการบดอัดวัสดุจำพวก Calcareous Material ซึ่งได้แก่ หินปูน ( $\text{CaCO}_3$ ) และดินสอพอง กับวัสดุจำพวกอื่นๆ แล้วนำเข้ามาเผาเพื่อหลอมวัสดุชนิดต่างๆ ให้มีเนื้อเดียวกัน จนออกมาเป็นปูนซีเมนต์ และเมื่อพิจารณาถึงออกไซด์หลักๆ ที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์แล้ว จะพบว่า ประกอบไปด้วย ออกไซด์จำพวกหินปูน ( $\text{CaO}$ ) เป็นออกไซด์หลัก (ประมาณ 65 % โดยน้ำหนัก) และออกไซด์จำพวกซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) รองลงมา (ประมาณ 20 % โดยน้ำหนัก) ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ปูนซีเมนต์เดิมผลิตมาจากสารประกอบจำพวกหินปูน ( $\text{CaCO}_3$ ) และมีออกไซด์หลักเป็นออกไซด์จำพวกหินปูน ( $\text{CaO}$ ) อีกด้วย

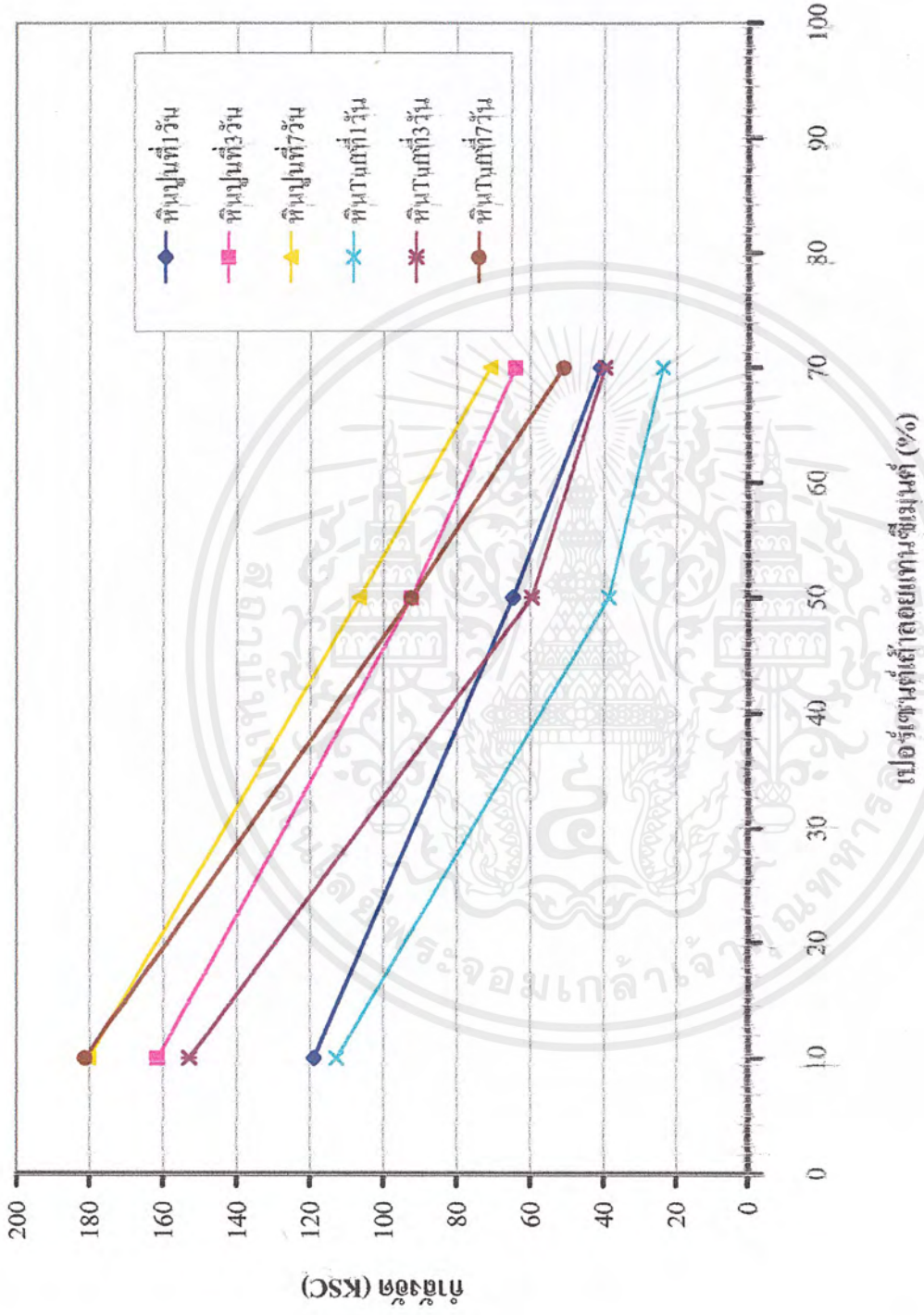
สำหรับวัสดุมวลรวมหยาบ หินปูนประกอบไปด้วยสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบทางเคมีแล้ว จะเห็นได้ว่าหินปูน และ ปูนซีเมนต์ นั้นต่างก็มีพื้นฐานขององค์ประกอบทางเคมีที่ใกล้เคียงกันคือแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) หรืออาจกล่าวได้ว่า ปูนซีเมนต์ กับ หินปูน นั้นมีเนื้อของวัสดุที่คล้ายคลึงและกลมกลืนกัน ในขณะที่หิน Tuff นั้น จะประกอบไปด้วยสารประกอบซิลิกาไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งถึงแม้ซิลิกาไดออกไซด์นี้จะอยู่ในปูนซีเมนต์ก็ตาม แต่จะมีอยู่ในปริมาณที่น้อยกว่า ดังนั้นจึงทำให้ปูนซีเมนต์สามารถจับตัวกับหินปูน ได้ดีกว่า หิน Tuff หรือ เรียกว่ามี Bonding ของซีเมนต์เพศต์กับวัสดุมวลรวมหยาบดีกว่านั่นเอง เมื่อส่วนผสมที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ มี Bonding กับซีเมนต์เพศต์ดีกว่า จึงเป็นสาเหตุให้ ส่วนผสมที่ใช้หินปูนนี้มีกำลังอัดที่มากกว่า ส่วนผสมที่ใช้หิน Tuff นั้นเอง ถึงแม้ว่าตามปกติแล้ววัสดุมวลรวมที่ดีจะต้องไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับวัสดุผสมอื่นๆ ในส่วนผสมคอนกรีต แต่องค์ประกอบทางเคมีของตัววัสดุมวลรวมหยาบก็มีผลต่อ Bonding ระหว่างซีเมนต์เพศต์ กับ ผิวของมันเอง ซึ่งจะส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตได้เช่นกัน

#### 4.4 การเปรียบเทียบกำลังอัดกับส่วนผสมที่ใช้ในเงื่อนไขอื่น ๆ

จากตารางที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าเงื่อนไขที่มีผลการทดสอบกำลังอัดในเวลาใกล้เคียงกับที่โครงการพิเศษได้ทำการทดสอบ ก็คือเงื่อนไข Littlerock-Modification California เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดที่ 7 วัน ของส่วนผสมที่ใช้หิน tuff เป็นมวลรวมหยาบและปริมาณเถ้าลอย F:C ที่ 70:30 จากตารางที่ 4.2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 51 KSC หรือประมาณ 12.4 Mpa กับค่ากำลังอัดของส่วนผสมของเงื่อนไข Littlerock-Modification California ซึ่งมีค่ากำลังอัดที่ 15.9 วัน เท่ากับ 13.8 Mpa จะเห็นว่าค่าปริมาณซีเมนต์ที่ใช้มีค่าใกล้เคียงกันคือ ส่วนผสมของเงื่อนไข Littlerock-Modification California ใช้ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ  $65 \text{ Kg/m}^3$  และอัตราส่วนผสมของโครงการที่ใช้อัตราส่วน F:C ที่ 70:30 ใช้ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ  $75 \text{ Kg/m}^3$  แต่ค่ากำลังอัดที่ 7 วัน มีค่าใกล้เคียงกับกำลังอัดที่ 15.9 วันของส่วนผสมของเงื่อนไข Littlerock-Modification California โดยที่ส่วนผสมที่จะประหยัดทรายได้ถึง  $87 \text{ Kg/m}^3$

#### 4.5 ผลการศึกษาทางด้านการซึมผ่านได้

โครงการพิเศษนี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบด้านการซึมผ่านได้ของน้ำเนื่องมาจากชนิดของมวลรวมและปริมาณเถ้าลอยในคอนกรีตที่แทนที่ซีเมนต์ในส่วนผสม RCC ซึ่งทำการทดสอบหาค่าการซึมผ่านได้ (Permeability Test) ของแต่ละส่วนผสมได้ดังแสดงในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบกำลังอัดของกำแพงกันดินที่บ่มต่างกัน ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการซึมผ่านได้ของน้ำด้วยวิธีการทดสอบ Permeability Test

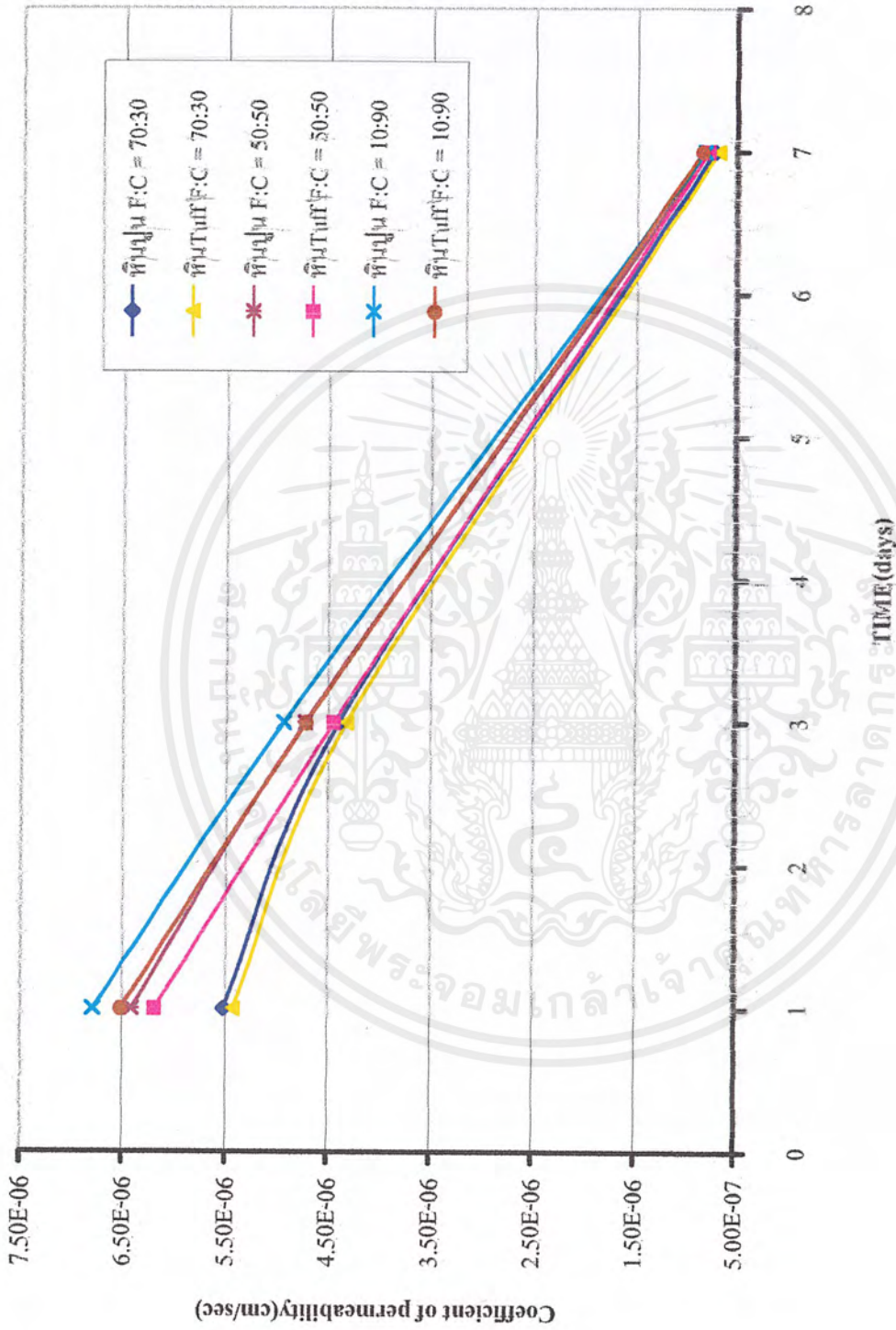
ระยะเวลา ทดสอบ	Coefficient of Permeability at 20°C (cm/sec)					
	F:C = 70:30		F:C = 50:50		F:C = 10:90	
	หินปูน	หิน Tuft	หินปูน	หิน Tuft	หินปูน	หิน Tuft
1	5.52E-06	5.42E-06	6.41E-06	6.19E-06	6.79E-06	6.52E-06
3	4.39E-06	4.31E-06	4.72E-06	4.44E-06	4.93E-06	4.71E-06
7	7.20E-07	6.80E-07	7.80E-07	7.76E-07	8.11E-07	8.38E-07

#### 4.5.1 ผลกระทบของปริมาณ Fly ash ต่อค่าความซึมผ่านได้ของน้ำ

จากผลการทดสอบเมื่อนำค่าที่ได้มา Plot กราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าความซึมผ่านได้ของน้ำระหว่างส่วนผสมที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ กับ ส่วนผสมที่ใช้หินจากท่าค่านซึ่งเป็นหิน Tuft เป็นวัสดุมวลรวมหยาบจะได้อัตราความสัมพันธ์ของค่าความซึมผ่านได้ของน้ำดังรูปที่ 4.6 ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่า ส่วนผสมที่ใช้เปอร์เซ็นต์ของเถ้าลอยแทนซีเมนต์สูง ณ ที่เวลาใดๆจะมีค่าความซึมผ่านของน้ำต่ำกว่าส่วนผสมที่ใช้เปอร์เซ็นต์ของเถ้าลอยแทนซีเมนต์ต่ำ สาเหตุอาจเนื่องมาจากลักษณะทางกายภาพของ Fly ash ที่มีลักษณะเม็ดที่กลมและมีความละเอียดสูง จึงเข้าไปแทรกตามช่องว่างที่มีอยู่ในส่วนผสม ทำให้ส่วนผสมมีความทึบน้ำมากขึ้นเมื่อมีปริมาณเถ้าลอยแทนซีเมนต์มากขึ้น

#### 4.5.2 ผลกระทบของวัสดุมวลรวมหยาบต่อค่าความซึมผ่านได้ของน้ำ

จากข้อมูลผลการทดลอง และจากรูปที่ 4.6 จะสังเกตเห็นได้ว่า ที่ระยะเวลาและเปอร์เซ็นต์ของเถ้าลอยแทนซีเมนต์ใดๆ ค่าความซึมผ่านของน้ำของส่วนผสมที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุมวลรวมหยาบจะมีค่าความซึมผ่านที่ต่ำกว่า (มีความทึบน้ำต่ำกว่า) ส่วนผสมที่ใช้หินจากเตี๊ยนท่าค่าน (หิน Tuft) เป็นวัสดุมวลรวมหยาบเสมอ สาเหตุอาจสามารถสรุปได้จากผลการที่มวลรวมหยาบที่ตีหินจากเตี๊ยนท่าค่าน (หิน Tuft) นั้นมีขนาดคละกันดี



รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าความซึมผ่านได้ของส่วนผสมต่างๆ

หลายขนาดและมีส่วนที่เป็นเม็ดละเอียดปะปนอยู่ด้วย ในขณะที่มวลรวมหยานที่เป็นหินปูนนั้นมีขนาดเพียงขนาดเดียว ดังนั้นเมื่อผสมในส่วนผสมคอนกรีต ส่วนผสมที่ใช้หิน Tuff จะมีช่องว่าง (Void) ในส่วนผสมน้อยกว่า ส่งผลให้มีค่าความซึมผ่านได้น้ำต่ำกว่า หรือมีความที่น้ำมากกว่าส่วนผสมที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุมวลรวมหยานนั่นเอง

#### 4.6 การประยุกต์ใช้อัตราส่วนผสมที่ศึกษา

##### 4.6.1 การเปรียบเทียบหน่วยน้ำหนัก (Unit Weight)

จากผลการศึกษพบว่าค่าหน่วยน้ำหนักของอัตราส่วนที่โครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาจากผลการทดสอบ Moisture - Density Test ดังตารางที่ 4.2 จะมีค่าหน่วยน้ำหนักอยู่ระหว่าง  $2510 \text{ Kg/m}^3$  ถึง  $2570 \text{ Kg/m}^3$  ซึ่งเมื่อพิจารณาส่วนผสมที่มีปริมาณ F:C เท่ากับ 70:30 เนื่องจากเป็นอัตราส่วนผสมที่ประหยัดที่สุด คือใช้ปริมาณซีเมนต์น้อยที่สุด พบว่าจะมีค่าความหนาแน่นสูงสุดเท่ากับ  $2518 \text{ Kg/m}^3$  และเมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วนผสมที่ได้จากผลการศึกษาและออกแบบเงื่อนไขค่าด้านพบว่ามีความหน่วยน้ำหนักประมาณ  $2300 \text{ Kg/m}^3$  ซึ่งสังเกตได้ว่าค่าหน่วยน้ำหนักที่ได้จากในโครงการนี้มีค่าหน่วยน้ำหนักสูงกว่าค่าหน่วยน้ำหนักที่ได้จากผลการศึกษาและออกแบบเงื่อนไขค่าด้านมาก ดังนั้นเมื่อพิจารณาเสถียรภาพของการเคลื่อนที่ตั้งสมการที่ 4.1

$$F_s = \frac{\Sigma W \mu}{P_H} \quad (5.1)$$

เมื่อ  $F_s$  = ค่าตัวประกอบความปลอดภัยของเสถียรภาพของการเคลื่อน

$\Sigma W$  = ผลรวมของแรงที่กระทำในแนวตั้ง

$\mu$  = สัมประสิทธิ์ของความเสียดทานที่พื้นเขื่อน

$P_H$  = ผลรวมของแรงค้ำน้ำที่กระทำต่อเขื่อน

จากสมการที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าค่าตัวประกอบความปลอดภัยขึ้นอยู่กับน้ำหนักที่กระทำในแนวตั้ง ดังนั้นถ้าใช้วัสดุที่มีหน่วยน้ำหนักสูงที่ปริมาณวัสดุที่เท่ากัน ค่าตัวประกอบความปลอดภัยก็จะมีความสูงขึ้นเช่นกัน ในทางเดียวกันถ้าใช้วัสดุที่มีหน่วยน้ำหนักสูง โดยใช้กัน ค่าตัวประกอบความปลอดภัยค่าเดียวกัน ปริมาณของวัสดุที่มีหน่วยน้ำหนักสูงที่ใช้ก็จะน้อยกว่าปริมาณของวัสดุที่มีหน่วยน้ำหนักต่ำ

#### 4.6.2 การเปรียบเทียบการซึมผ่านได้ของน้ำ (Coefficient of Permeability)

จากผลการศึกษาพบว่าค่าการซึมผ่านได้ของส่วนผสมที่ทางโครงการได้ทำการศึกษาที่เวลา 7 วันพบว่าค่าที่ทำการทดสอบได้ของอัตราส่วนผสมที่มีปริมาณ F:C เท่ากับ 70:30 โดยใช้หินจากท่าด่านเป็นวัสดุผสมมวลรวมหยาบ มีค่าเท่ากับ  $8.38 \times 10^{-7}$  cm/sec ซึ่งมีค่าเป็นไปตามคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำเงื่อนไขท่าด่านในตารางที่ 2.9

#### 4.6.3 การเปรียบเทียบด้านกำลังอัด

จากผลการศึกษาพบว่าค่ากำลังอัดของส่วนผสมที่ทางโครงการได้ทำการศึกษาที่เวลา 7 วันพบว่าค่าที่ทำการทดสอบได้ของอัตราส่วนผสมที่มีปริมาณ F:C เท่ากับ 70:30 โดยใช้หินจากท่าด่านเป็นวัสดุผสมมวลรวมหยาบ มีค่าเท่ากับ 51 KSC ซึ่งจากคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำเงื่อนไขท่าด่านในตารางที่ 2.9 ได้กำหนดค่ากำลังอัดที่ 91 วัน ต้องมากกว่า 100 KSC ซึ่งจากการศึกษาถึงการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยพบว่าการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตจะสูงขึ้นเมื่อคอนกรีตผ่านการพัฒนากำลังอัดขั้นต้นไปแล้ว ดังนั้นค่ากำลังอัดของส่วนผสมที่ระยะเวลา 91 วัน ของอัตราส่วนผสมที่มีปริมาณ F:C เท่ากับ 70:30 โดยใช้หินจากท่าด่านเป็นวัสดุผสมมวลรวมหยาบควรมีค่ามากกว่า 100 KSC ในที่สุด

#### 4.6.4 การเปรียบเทียบด้านราคาและปริมาณ

จากผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านกำลังและการซึมผ่านได้ของน้ำจะเห็นได้ว่าส่วนผสมที่มีปริมาณ F:C เท่ากับ 70:30 โดยใช้หินจากท่าด่านเป็นวัสดุผสมมวลรวมหยาบ ซึ่งเป็นส่วนผสมที่ประหยัดที่สุดเนื่องจากใช้ปริมาณปูนซีเมนต์น้อยที่สุดนั้น สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุที่นำมาก่อสร้างเสี้ยน RCC ของโครงการท่าด่านได้ และสามารถเปรียบเทียบส่วนผสมกับอัตราส่วนผสมที่ได้จากผลการศึกษาและออกแบบเงื่อนไขท่าด่านดังตารางที่ 4.5 โดยที่สามารถหาปริมาณวัสดุ RCC ต้องใช้เมื่อเลือกส่วนผสมที่มีปริมาณ F:C เท่ากับ 70:30 ได้จากอัตราส่วนผสมที่ได้จากผลการศึกษาและออกแบบเงื่อนไขท่าด่านที่มีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ  $2300 \text{ Kg/m}^3$  จะมีปริมาตรเงื่อนไขเท่ากับ 5 ล้านลูกบาศก์เมตร ดังนั้นถ้าใช้ส่วนผสมที่มีปริมาณ F:C เท่ากับ 70:30 โดยใช้หินจากท่าด่านเป็นวัสดุผสมมวลรวมหยาบซึ่งมีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ  $2518 \text{ Kg/m}^3$  จะทำให้ได้ปริมาตรเงื่อนไขที่ทำให้ค่าตัวประกอบความปลอดภัยของเสี้ยนสภาพของการเงื่อนไขดังสมการที่ 4.1 เท่าเดิมคือ 4.57 ล้านลูกบาศก์เมตร

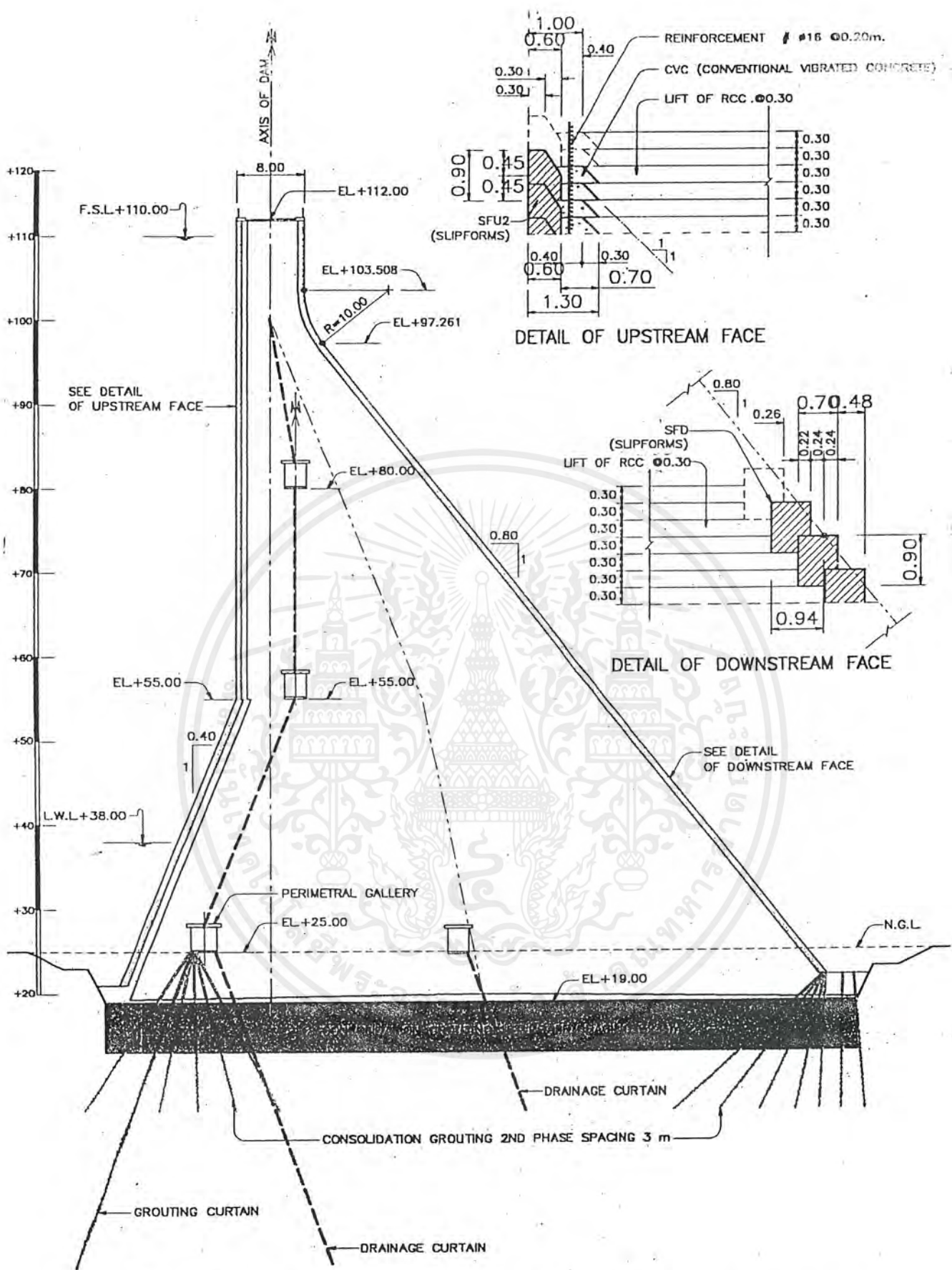
ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบปริมาณวัสดุที่ใช้

ส่วนผสม	ปริมาณ	
	ทำค่าน	โครงการพิเศษ
ปูนซีเมนต์ ( $\text{Kg/m}^3$ )	60-90	75
เถ้าลอย ( $\text{Kg/m}^3$ )	50-100	175
ปูนซีเมนต์+เถ้าลอย ( $\text{Kg/m}^3$ )	110-190	250
มวลรวมละเอียด(ทราย) ( $\text{Kg/m}^3$ )	850	875
มวลรวมหยาบ(หิน) ( $\text{Kg/m}^3$ )	1250	1024
น้ำ (ลิตร)	140	143
ปริมาณ RCC (ด้านลูกบาศก์เมตร)	5	4.57

จากตารางที่ 4.5 จะพบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนผสมที่ทำการศึกษาในโครงการนี้ที่มีปริมาณ F:C เท่ากับ 70:30 โดยใช้หินจากทำค่านเป็นวัสดุผสมมวลรวมหยาบ จะทำให้สามารถลดขนาดของเขื่อนลงได้ถึง 0.47 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตรที่ใกล้เคียงกัน

#### 4.6.5 การเปรียบเทียบด้านการทรุดตัวที่ไม่เท่ากัน

จากรูปที่ 4.7 จะพบว่า RCC จะถูกหุ้มอยู่ด้วย Conventional concrete และ Formwork ซึ่งโดยทั่วไปแล้วหน่วยน้ำหนักของ Conventional concrete จะมากกว่า  $2400 \text{ Kg/m}^3$  ซึ่งมีอัตราส่วนน้ำหนักของเหล็กเสริมและค้ำ Formwork แล้วคาดว่าจะทำให้หน่วยน้ำหนักของบริเวณที่เป็น Conventional concrete ซึ่งหุ้ม RCC อยู่มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นไปถึง  $2500 \text{ Kg/m}^3$  การเลือกใช้น้ำหนักที่ใกล้เคียงกันก็จะก่อให้เกิดการทรุดตัวที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นการเลือกใช้อัตราส่วนผสมที่ทำการศึกษาในโครงการนี้ที่มีปริมาณ F:C เท่ากับ 70:30 โดยใช้หินจากทำค่านเป็นวัสดุผสมมวลรวมหยาบซึ่งมีค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ  $2518 \text{ Kg/m}^3$  ก็จะทำให้ปัญหาที่เกิดจากการทรุดตัวที่ไม่เท่ากันของเขื่อนเกิดขึ้นน้อยกว่าการเลือกใช้อัตราส่วนผสมที่ได้จากผลการศึกษาและออกแบบเขื่อนทำค่านที่มีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ  $2300 \text{ Kg/m}^3$



รูปที่ 4.7 รูปตัดมาตรฐานแสดงรายละเอียดของเขื่อน RCC (เทอดศักดิ์ บุญขจรและคณะ, 2542)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

ในบทที่ 5 จะกล่าวถึงการสรุปผลที่ได้จากการศึกษา และได้เสนอแนะในส่วนที่ควรเพิ่มเติม เพื่อที่จะทำให้ผลการศึกษามีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาและการทดสอบสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- (1) จากผลการศึกษาทางด้านกายภาพพบว่าเมื่อใช้ปริมาณเกลือลอยลิกไนต์เข้าไปแทนที่ซีเมนต์ยิ่งมาก ทำให้ส่วนผสมมีหน่วยน้ำหนักที่น้อยลง และทำให้ความต้องการปริมาณน้ำในส่วนผสมลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลกระทบจากเกลือที่เกิดขึ้นในคอนกรีตในบทที่ 2
- (2) จากผลการศึกษาทางด้านกำลังอัดพบว่าเมื่อใช้ปริมาณเกลือลอยลิกไนต์เข้าไปแทนที่ซีเมนต์ยิ่งมาก ทำให้ส่วนผสมมีกำลังอัดที่ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลกระทบจากเกลือที่เกิดขึ้นในคอนกรีตในบทที่ 2
- (3) จากผลการศึกษาทางด้านการซึมผ่านได้พบว่าเมื่อใช้ปริมาณเกลือลอยลิกไนต์เข้าไปแทนที่ซีเมนต์ยิ่งมาก ทำให้ส่วนผสมมีความต้านน้ำสูงขึ้น หรือกล่าวได้ว่ามีค่าการซึมผ่านได้ของน้ำลดลง ลง ซึ่งสอดคล้องกับผลกระทบจากเกลือที่เกิดขึ้นในคอนกรีตในบทที่ 2
- (4) จากผลการศึกษาทางด้านการประยุกต์ใช้อัตราส่วนผสมที่ศึกษาพบว่าสามารถใช้อัตราส่วนผสมที่มีปริมาณ F:C เท่ากับ 70:30 โดยใช้หินจากท่าด่านเป็นวัสดุผสมมวลรวมหยาบได้ โดยจะสามารถลดขนาดของเขื่อนลงได้อีกด้วย

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาที่ผ่านมาผู้จัดทำการศึกษาได้รวบรวมข้อเสนอแนะที่อาจทำให้ผลการศึกษามีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- (1) ในการทดสอบหาค่าความซึมผ่านได้ของน้ำ โครงการนี้ใช้วิธีการทดสอบด้วยวิธี Constant Head ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว ตัวอย่างทดสอบที่มีค่าความซึมผ่านได้ของน้ำที่น้อยกว่า  $10^{-5}$  ควรทำการทดสอบแบบ Variable Head
- (2) สำหรับค่ากำลังอัดของส่วนผสม โครงการนี้ได้ทำการทดสอบที่ระยะเวลามากที่สุด 7 วัน ซึ่งควรจะมีการศึกษาและทดสอบหาค่ากำลังอัดที่แท้จริงที่ 91 วัน ต่อไป
- (3) ควรศึกษาเพิ่มเติมการวัดพลังงานของ pozzolan
- (4) เปรียบเทียบอัตราส่วนผสมให้มากกว่าเดิม



## ภาคผนวก ก

### ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเขื่อนคอนกรีตบดอัด (Roller Compacted Concrete Dam , RCC Dam)

#### 1. เติ้นชนิดใหม่

คอนกรีตบดอัด (Roller Compacted Concrete – RCC) คือวัสดุก่อสร้างและวิธีการก่อสร้างชนิดใหม่ที่น่าเอาคอนกรีตมาทำการก่อสร้างแบบดิน โดยมีการบดอัด อย่างไรก็ตามคอนกรีตบดอัดมีความแตกต่างจากดินซีเมนต์ (Soil Cement) เนื่องจากคอนกรีตบดอัดใช้วัสดุผสมที่มีขนาดใหญ่กว่า 19 มม. จึงมีความแข็งแรงสูงกว่าดินซีเมนต์มาก การก่อสร้างโดยใช้คอนกรีตบดอัดเป็นการคิดค้นของวิศวกรออกแบบเขื่อน และวิศวกรธรณีเทคนิค ที่นำวิธีการก่อสร้างเขื่อนดินมาใช้ในการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตทำให้ได้เขื่อนที่มีค่าก่อสร้างต่ำ ก่อสร้างได้รวดเร็ว และมีความแข็งแรงปลอดภัยเช่นเดียวกันกับเขื่อนคอนกรีต จึงทำให้เป็นที่ยอมรับตั้งแต่ปี พ.ศ.2523 เป็นต้นมา

#### 2. วิศวกรรมงานดินและคอนกรีต

การผสมผสานวิศวกรรมงานดิน กับวิศวกรรมงานคอนกรีตเข้าด้วยกัน ทำให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีของคอนกรีตจากเหลวมาแข็งจนไม่มีค่ายุบตัว (No Slump) ทำให้สามารถบดทับได้เหมือนบดทับดิน

ในงานวิศวกรรมงานดินนั้น การออกแบบส่วนผสมจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของความชื้นกับความแน่น (Moisture-Density) ความแข็งแรงจะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture) กับการบดอัด ถ้าการบดอัดกระทำ ณ ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ก็จะทำให้ความแน่นขณะแห้ง (Dry Density) มีค่าสูง ซึ่งจะทำให้ Compressive Strength at 7 days สูงขึ้นด้วย ตามหลักการ Zero Air Void ของวิศวกรรมงานดิน

ส่วนวิศวกรรมงานคอนกรีตนั้น ความแข็งแรง (Compressive Strength) จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (Water-Cement Ratio) คือ เมื่อซีเมนต์มีปริมาณมากจะทำให้ความสามารถในการรับ

กำลังมีค่าสูง และโดยเฉพาะที่ปริมาณซีเมนต์คงที่ ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้น้ำน้อยลงจะทำให้ความแข็งแรงสูงขึ้น

การผสมผสานหลักการด้านวิศวกรรมงานดินและงานคอนกรีตเข้าด้วยกันโดยวิธี No-Slump-Zero-Air-Void-Concrete คือ พัฒนาคอนกรีตใช้ปริมาณน้ำน้อยแล้วบดทับจนไม่มีช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุ จะทำให้ได้คอนกรีตบดอัดที่มี Compressive Strength สูง โดยจากการทดลองในห้องปฏิบัติการในประเทศไทย ญี่ปุ่น พบว่า RCC ที่ใช้น้ำในการผสมน้อยในปริมาณประมาณ 90 กก. ต่อ ลบ.ม. จะทำให้ได้ RCC ที่มี Compressive Strength สูงที่สุด

### 3. วัสดุที่ใช้

วัสดุที่ใช้ในคอนกรีตบดอัดประกอบด้วย

- Cementitious Materials (สารซีเมนต์ที่เชื่อมประสาน) ได้แก่ Portland Cement และ Pozzolan ได้แก่ ซีเมนต์ลอย (Fly Ash)
- วัสดุผสม (Aggregates) ได้แก่ หินและทราย
- น้ำ
- สารผสมเพิ่ม (Admixtures)

เนื่องจากตัวเชื่อมเป็นอาคารที่มีมวลขนาดใหญ่ ดังนั้นเขื่อนคอนกรีตจึงมีความร้อนจากการก่อตัว (Heat of Hydration) ของสารซีเมนต์ก่อประสานสูง ดังนั้นในการก่อสร้างเขื่อนจึงใช้ Portland Cement ที่มีความร้อนจากการก่อตัวต่ำ เช่น Portland – Pozzolan Cement และ Portland Blast Furnace Slag Cement ซึ่งจะมีการก่อตัวช้า แต่อย่างไรก็ตาม ก็จะทำให้ Strength ที่ 90 วันสูงกว่า Portland Cement ธรรมดา

Pozzolans ที่จะใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตบดอัดนั้น จะต้องเป็นวัสดุที่ได้มาตรฐาน เช่น ASTM C618 และจะต้องมีราคาต่ำและมีปริมาณมากเพียงพอเช่น ซีเมนต์ลอย (Fly Ash) ซึ่งควรเป็นชนิดที่มีปริมาณ Lime ต่ำ (Low-Lime Class F Fly Ash) อย่างไรก็ตามก็ได้มีการใช้ High-Lime Class C Fly Ash ในการก่อสร้างอาคารระบายน้ำล้นของเขื่อน Stacy มาแล้ว นอกจากนี้ยังมีการใช้ Ground Blast Furnace Slag ที่เรียกว่า Slagment และดินเหนียวขมิ้น Calcined (Calcined Clay) เป็น Pozzolan ด้วย ขนาดและการกระจายขนาด (Gradation) ของวัสดุผสมที่ใช้กับคอนกรีตบดอัดนั้นจะมีผลมากต่อคุณสมบัติของคอนกรีตบดอัด ทั้งหินและทรายจะมีขนาดเล็กกว่าขนาดที่ใช้ในงานคอนกรีตทั่วไป เพื่อป้องกันการแยกตัวของหิน (Segregation) ไปอยู่ส่วนล่างของชั้นคอนกรีตบดอัดในแต่ละชั้น วัสดุผสมที่มีคุณภาพดีก็จะทำให้คอนกรีต

บดอัดมี Strength สูงด้วย น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตบดอัดต้องสะอาด ไม่มีค้าง กรวด หรือ สารอินทรีย์มากเกินไป จนมีผลต่อความแข็งแรง โดยทั่วไปแล้ว จะใช้น้ำประมาณ 80 – 119 กก.ต่อ ลบ.ม. เพื่อให้มีการยุบตัวน้อย หรือไม่ยุบตัว (No Slump) สารผสมเพิ่มนั้นจะมีผลทำให้สามารถใช้น้ำในส่วนผสมน้อยลงซึ่งจะมีผลทำให้คอนกรีตบดอัด มีกำลังแข็งแรงมากขึ้นเช่นกันกับคอนกรีตทั่วไป

#### 4. ชนิดของเขื่อนคอนกรีตบดอัด

การพัฒนาเขื่อนคอนกรีตบดอัดได้เริ่มขึ้นในปี พ.ศ.251. เป็นต้นมา โดยมีการพัฒนาเป็น 3 ทิศทาง ทำให้ในปัจจุบันมีเขื่อนคอนกรีตบดอัดอยู่ 3 ชนิด คือ

##### 4.1 Lean RCC Dam

พัฒนาโดย United States Army Corps of Engineers เริ่มตั้งแต่ปี พ.ศ.2513 เป็นต้นมาโดยเริ่มใช้ทดสอบก่อสร้างเขื่อน Jackson ใน Mississippi ในปี พ.ศ.2515 และ Lost Creek Dam ใน Oregon ในปี พ.ศ.2516 และได้ใช้ชื่อ Roller Compacted Concrete นี้เป็นครั้งแรก นับแต่นั้นมา และได้ใช้ประสบการณ์ดังกล่าวในการพัฒนาเขื่อนคอนกรีตบดอัดอย่างต่อเนื่อง Lean RCC Dam จะเป็นเขื่อนคอนกรีตบดอัดที่มีส่วนผสมที่ใช้สารซีเมนต์เชื่อมประสาน (Cementitious Material = Pozzolan + Portland Cement) ในเกณฑ์ต่ำ กล่าวคือน้อยกว่า 99 กก. ต่อ ลบ.ม.. โดยใช้สัดส่วน Pozzolan ต่อ Cement เป็น 40:60 หรือ ต่ำกว่าร้อยละ 40 จึงทำให้เกิดความร้อนต่ำในเนื้อคอนกรีตในระหว่างการก่อตัวของคอนกรีต ทำให้ได้โดย มีรอยต่อ(Joint) น้อย ส่งผลให้ก่อสร้างได้รวดเร็ว และราคาก่อสร้างต่ำ

##### 4.2 Roller Compacted Dam (RCD)

เป็น RCC Dam ที่ได้คิดค้นและพัฒนาขึ้นในประเทศญี่ปุ่นซึ่งอาจจะเรียกว่าเป็น Medium Paste RCC เนื่องจาก มีส่วนผสมที่ใช้ Cementitious Material ประมาณ 120 -130 กก. ต่อ ลบ.ม. โดยใช้สัดส่วน Pozzolan ต่อ Cement ในช่วงตั้งแต่ 20:80 ถึง 35:65 ในการก่อสร้างจะมีการเกลี่ยโดยมีความหนาของชั้นคอนกรีตถึงการบดอัดแล้วหนากว่าชนิดอื่น กล่าวคือชั้นละ 50 –100 ซม. และมีการก่อสร้างชั้นคอนกรีต (Conventional Concrete) ด้านเหนือน้ำ และท้ายน้ำ หนากว่าชนิดอื่นๆ กล่าวคือหนาประมาณ 2- 3 เมตร จึงเป็นเขื่อนที่เหมาะสมกับสภาพแผ่นดินไหว อุทกวิทยา และภูมิประเทศของประเทศญี่ปุ่น ซึ่งได้ใช้ในการก่อสร้างเขื่อน Shimajigawa สูง 89 เมตร และเขื่อน Okawa ในปี พ.ศ. 2521

### 4.3 High Paste RCC Dam

High Paste RCC Dam เป็นเขื่อนคอนกรีตบดอัดที่มีส่วนผสมที่ใช้ Cementitious Material เพิ่มขึ้นเป็นมากกว่า 150 กก. ต่อ ลบ.ม. โดยใช้สัดส่วน Pozzolan ต่อ Cement อยู่ในช่วง 70:30 ถึง 80:20 โดยมีความหนาของคอนกรีตบดอัดแน่นขึ้นประมาณ 30 ซม. ริเริ่มขึ้นโดย Tennessee Valley Authority แล้วได้รับการพัฒนาให้ก้าวหน้าขึ้นที่ประเทศอังกฤษในปี พ.ศ. 2520 โดยได้มีการวิจัยอย่างกว้างขวาง และนำผลงานวิจัยมาใช้ในการออกแบบก่อสร้างเขื่อน Milton Brook ที่ Devon ประเทศอังกฤษ ซึ่งพบว่า High Paste RCC Dam มีความแข็งแรง เช่นเดียวกับกับเขื่อนคอนกรีต แต่ก่อสร้างได้ง่ายเช่นเดียวกับเขื่อนดิน จึงทำให้ก่อสร้างได้รวดเร็วและได้นำไปพัฒนาใช้ในการก่อสร้างเขื่อนต่างๆมากมายเช่น เขื่อน Upper Stillwater ในอเมริกา ซึ่งออกแบบโดย United States Bureau of Reclamation (USBR) เป็นเขื่อนสูง 90 ม. สร้างเสร็จในปี พ.ศ. 2531

## 5. คุณสมบัติทางวิศวกรรม

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีตบดอัดขึ้นอยู่กับคุณภาพของวัสดุที่ใช้ สัดส่วนผสม และการบดอัด อย่างไรก็ตามจะขึ้นอยู่กับวัสดุผสม (Aggregates) ได้แก่ Elasticity และคุณสมบัติทางความร้อน (Thermal Property) เช่นเดียวกับกับคอนกรีตทั่วไป แต่กำลังแข็งแรงขึ้นอยู่กับระดับความแน่นของการบดอัดมากกว่าสัดส่วนผสม ดังนั้นคอนกรีตที่บดอัดแน่นกว่า มีช่องว่างระหว่างวัสดุ (Void) น้อยกว่า ก็จะมีกำลังแข็งแรงมากกว่า อย่างไรก็ตามส่วนผสมที่มีวัสดุมวลรวมหยาบ (Course Aggregates) มากจะทำให้เกิดมีช่องว่างระหว่างวัสดุมากกว่า ทำให้ความแน่นและกำลังแข็งแรงต่ำ ซึ่งจากการทดสอบเขื่อนคอนกรีตบดอัดทั่วไปไม่มีข้อมูลพอสรุปได้ดังนี้

### 1. Compressive Strength ที่อายุ 28 วัน

คอนกรีตบดอัดที่ทดสอบจากการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดทั่วไปที่เคยก่อสร้างจะอยู่ในเกณฑ์ดังนี้

- ทดสอบจากแท่งทดสอบ 25 -240 กก./ตร.ซม.
- ทดสอบจากแท่งเจาะจากคอนกรีตบดอัด 80 -145 กก./ตร.ซม.
- ทดสอบจากเขื่อนป่าถมูล 100 - 225 กก./ตร.ซม.

### 2. Tensile Strength

จากการทดสอบโดยวิธี Splitting Tension Test จากแท่งเจาะจากคอนกรีตพบว่า

- คอนกรีตทั่วไปมี Tensile Strength เทียบประมาณร้อยละ 10 ของ Compressive Strength
- คอนกรีตบดอัดมี Tensile Strength ร้อยละ 11 ถึง 14 ของ Compressive Strength

จึงพอสรุปได้ว่า คอนกรีตบดอัดมี Tensile Strength สูงกว่าคอนกรีตทั่วไป

3. ข้อดี ข้อเสีย ของเขื่อนคอนกรีตบดอัด

การใช้คอนกรีตบดอัดโดยทั่วไปนั้นจะได้ประโยชน์จากข้อดีของคอนกรีตบดอัดได้แก่

- 3.1 ขี้เถ้าลอยถิกไนต์ (Lignite Fly Ash) จากโรงไฟฟ้าถ่านหินมีผลเป็นทรงกลม ช่วยให้คอนกรีตมี Workability ดีขึ้น
- 3.2 ลดความร้อนระหว่างคอนกรีตก่อตัว เนื่องจากการใช้ซีเมนต์ในการผสมคอนกรีตน้อยลง การเกิดปฏิกิริยาคายความร้อน (Hydration) จึงลดลง
- 3.3 ลดอันตรายต่อโครงสร้างอาคารจากการเกิด Aggregate Alkali Reaction (การขยายปริมาณเกิดการแตกร้าวในระยะยาว) จากการใช้วัสดุผสมที่เป็นหินชนิดหินภูเขาไฟบางชนิด
- 3.4 ลดการเกิดการกัดกร่อนเนื้อคอนกรีตจากซัลเฟต และน้ำทะเล

ข้อดีของการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตแบบ RCC Dam เมื่อเปรียบเทียบกับก่อสร้างเขื่อนประเภทเขื่อนดิน เขื่อนหิน ที่มีความสูงเท่ากันมีดังนี้

- 1) การก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัด จะทำการก่อสร้างได้รวดเร็วกว่า
- 2) รูปค้ำของเขื่อนคอนกรีตบดอัดเมื่อเปรียบเทียบกับเขื่อนดิน เขื่อนหินจะเล็กกว่า ทำให้ปริมาณงานก่อสร้างคอนกรีตน้อยลง
- 3) อาคารทางระบายน้ำอัน อาคารท่อส่งน้ำของเขื่อนประเภทคอนกรีตบดอัดจะอยู่ที่ตัวเขื่อน ไม่ต้องแยกออกจากตัวเขื่อน เช่นประเภท เขื่อนดิน เขื่อนหิน
- 4) เขื่อนคอนกรีต มีความแข็งแรงต่อการกัดเซาะของน้ำ ทางค้ำหน้าเขื่อนและลาดค้ำท้ายเขื่อน
- 5) การใช้วัสดุ Pozzolan มาเป็นส่วนผสมของซีเมนต์ทำให้ปริมาณการใช้ซีเมนต์ลดลง ราคาค่าก่อสร้างจะถูกลงกว่าเขื่อนคอนกรีตแบบธรรมดา
- 6) จากการศึกษาของเขื่อนมีขนาดเล็กลง และทำการก่อสร้างเสร็จได้ในระยะเวลาอันสั้น ทำให้ราคาค่าก่อสร้างลดลง เป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง

ข้อเสียของการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดเมื่อเปรียบเทียบกับก่อสร้างเขื่อนประเภทอื่นมีดังนี้

- 1) การก่อสร้างเขื่อนประเภทคอนกรีตบดอัดก็เหมือนคอนกรีตทั่วไปที่มีน้ำหนักมาก จะต้องตั้งอยู่บนชั้นหินฐานรากที่แข็งแรง

- 2) ในการก่อสร้างต้องการผู้ที่มีความชำนาญในการก่อสร้าง และทดสอบวัสดุ ควบคุมอย่างใกล้ชิด
- 3) การขนส่ง วัสดุ ซีเมนต์ Pozzolans ไปสถานที่ก่อสร้างมีจำนวนมากเหมือนกรณีเขื่อนคอนกรีตทั่วไป

สรุปแล้ว เขื่อนคอนกรีตบดอัดเป็นวัสดุและเทคนิคการก่อสร้างใหม่ ที่ทำให้การก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตมีราคาก่อสร้างถูกลง และสร้างได้รวดเร็วขึ้น เหมาะสมที่ใช้ในการก่อสร้างเขื่อนในที่ที่มีหินฐานรากแข็งแรง รับน้ำหนักได้ดี และมีวัสดุหินหรือหินที่จะใช้ในการก่อสร้างตัวเขื่อนในบริเวณใกล้เคียงไม่เพียงพอ นอกจากนั้นยังเหมาะสมที่จะใช้ก่อสร้างฝายอาคารประกอบเขื่อน หรือ อาคารคอนกรีตขนาดใหญ่ประเภทอื่นๆ เพราะนอกจาก Workability ที่ดีแล้ว ยังช่วยประหยัดซีเมนต์ เกิดความร้อนสะสมในตัวคอนกรีตบดอัดในระหว่างคอนกรีตก่อตัวต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการบ่มคอนกรีต และยังมีผลพลอยได้จากการนำน้ำแก้วอลยิกไนต์ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้กลับมาใช้ให้เป็นประโยชน์อีกด้วย จึงควรมีการสนับสนุนการออกแบบและการก่อสร้าง เพื่อให้วิศวกรไทยได้มีความชำนาญในการออกแบบและก่อสร้างเขื่อนและอาคารคอนกรีตบดอัด เพื่อจะได้ศึกษาเปรียบเทียบ และพิจารณานำไปใช้ในงานก่อสร้าง โครงสร้างคอนกรีตให้เป็นที่แพร่หลายต่อไป

## ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบ Moisture – Density Test

ตารางที่ ผ.ข.1 แสดงผลการทดสอบ Moisture – Density Test สำหรับ F : C = 10 : 90

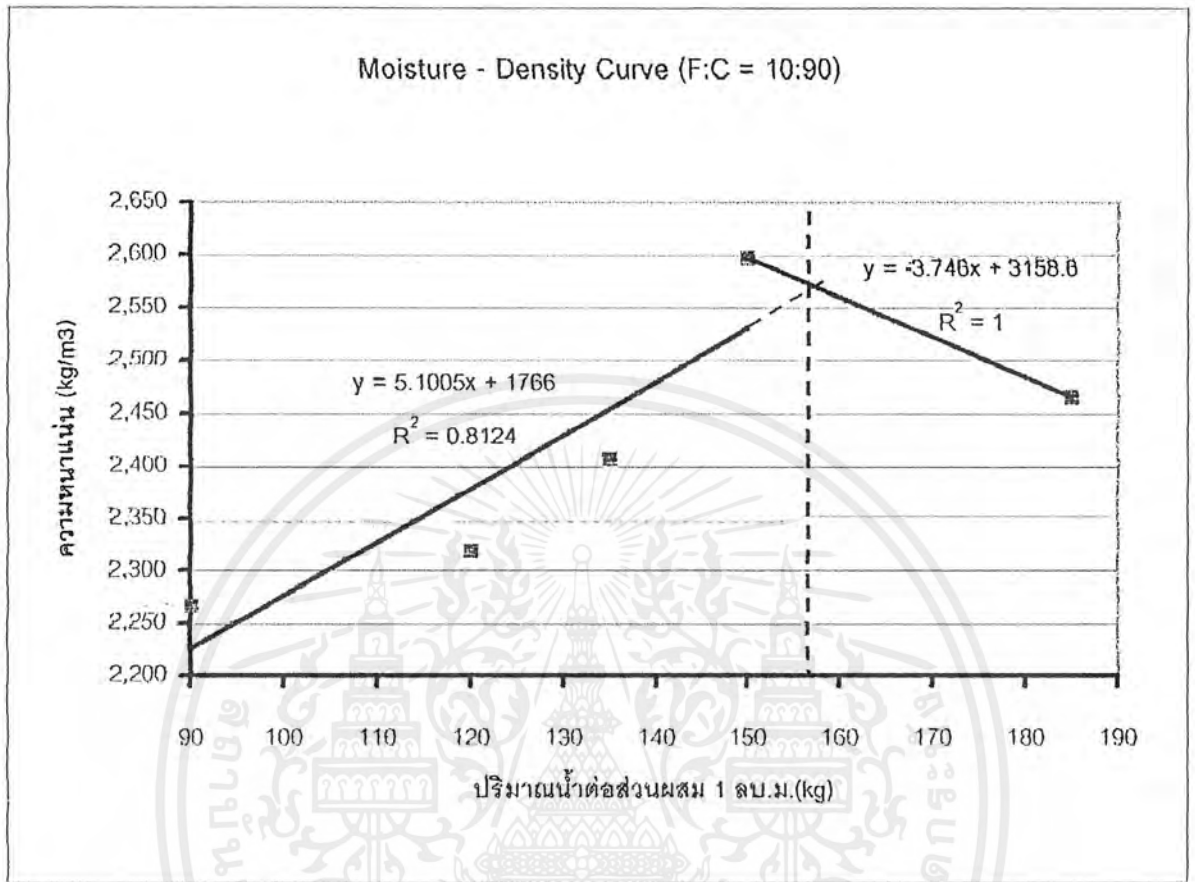
ปริมาณน้ำต่อส่วนผสม 1 m <sup>3</sup>	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	ปริมาตรแบบ	ความหนาแน่น
(Kg)	(Kg)	(m <sup>3</sup> )	(Kg/m <sup>3</sup> )
90	2,04	0.0009	2,266.67
120	2,087	0.0009	2,318.89
135	2,166	0.0009	2,406.67
150	2,337	0.0009	2,596.67
185	2,219	0.0009	2,465.56

ตารางที่ ผ.ข.2 แสดงผลการทดสอบ Moisture – Density Test สำหรับ F : C = 50 : 50

ปริมาณน้ำต่อส่วนผสม 1 m <sup>3</sup>	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	ปริมาตรแบบ	ความหนาแน่น
(Kg)	(Kg)	(m <sup>3</sup> )	(Kg/m <sup>3</sup> )
90	1,974	0.0009	2,193.33
120	2,19	0.0009	2,433.33
135	2,175	0.0009	2,416.67
150	2,288	0.0009	2,542.22
185	2,193	0.0009	2,436.67

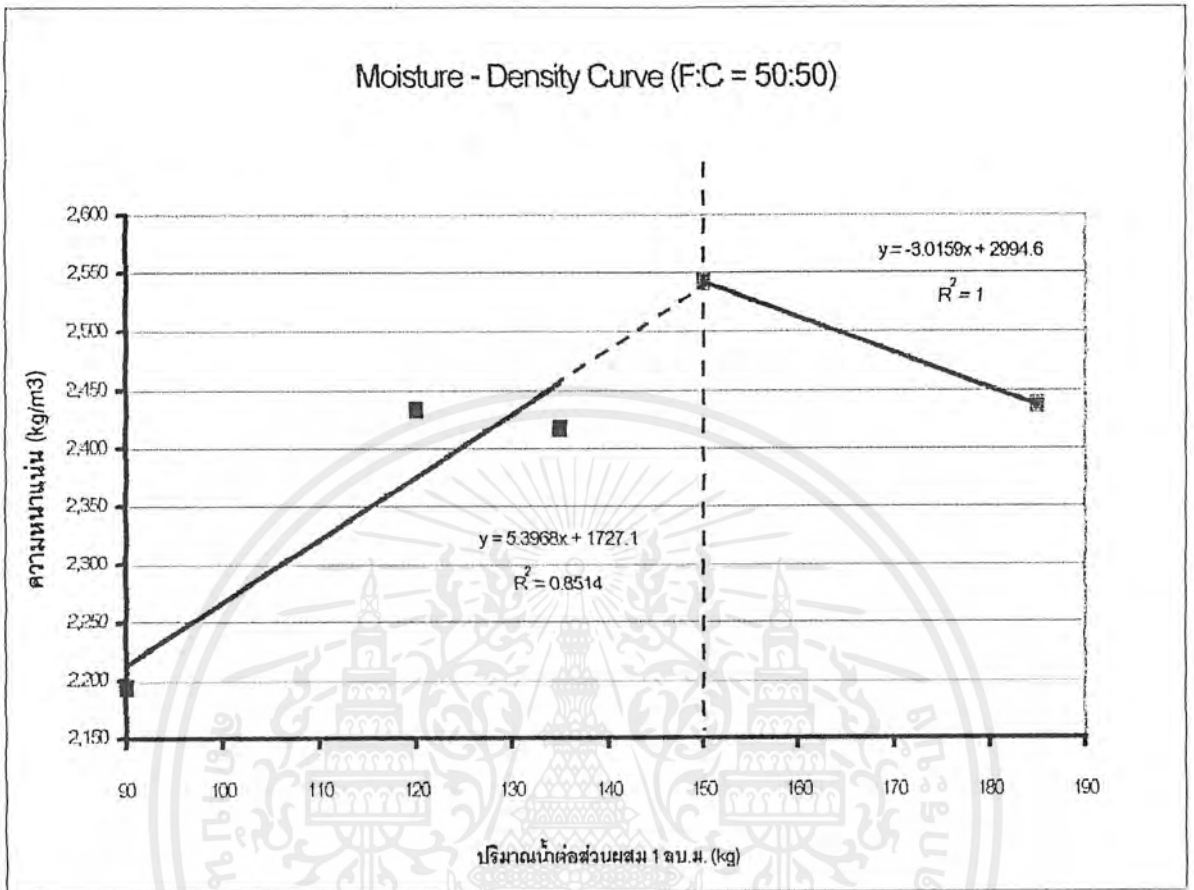
ตารางที่ ผ.ข.3 แสดงผลการทดสอบ Moisture – Density สำหรับ F : C = 70 : 30

ปริมาณน้ำต่อส่วนผสม 1 m <sup>3</sup>	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	ปริมาตรแบบ	ความหนาแน่น
(Kg)	(Kg)	(m <sup>3</sup> )	(Kg/m <sup>3</sup> )
90	2,024	0.0009	2,248.89
120	2,221	0.0009	2,467.78
135	2,197	0.0009	2,441.11
150	2,25	0.0009	2,500.00
185	2,148	0.0009	2,386.67



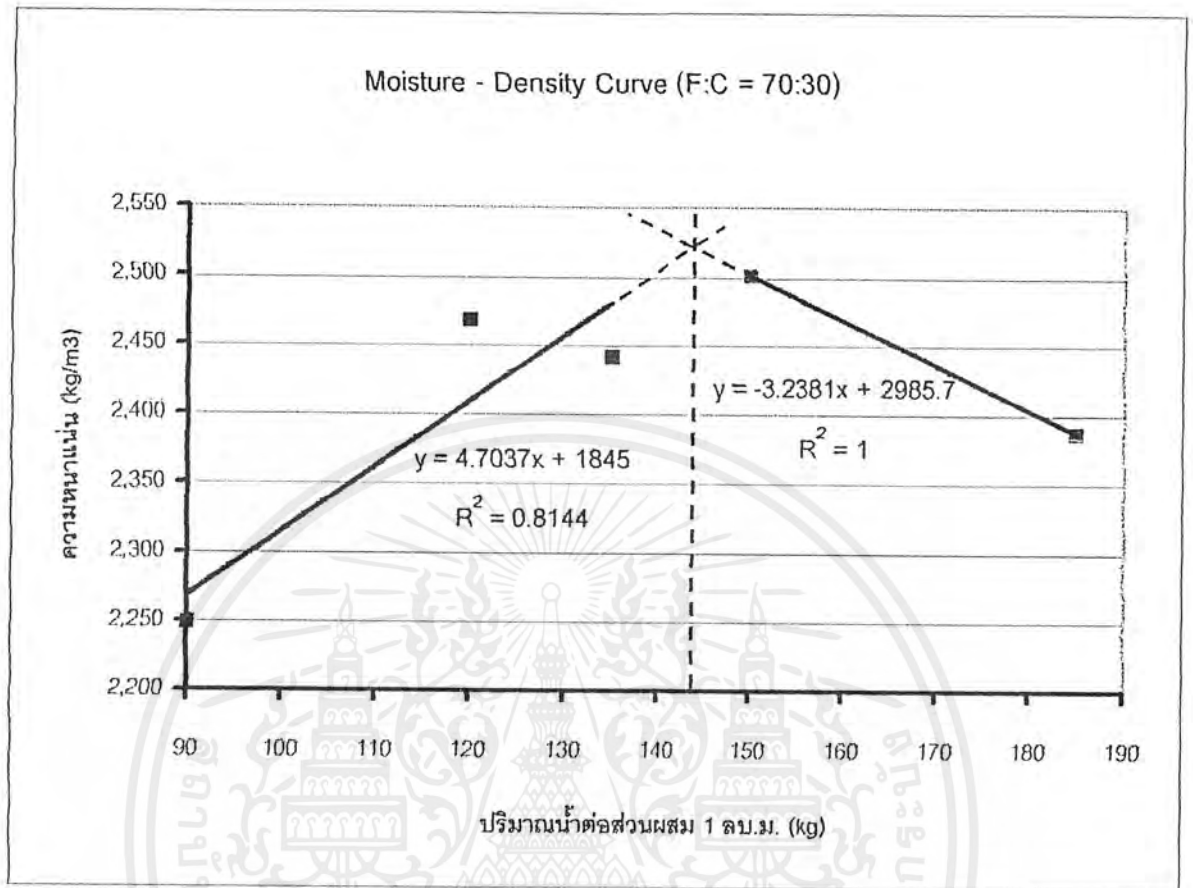
รูปที่ ผ.ข.1

Chart แสดงวิเคราะห์ผลการทดลอง Moisture - Density Test ; F:C=10:90



รูปที่ ผ.ข.2

Chart แสดงวิเคราะห์ผลการทดลอง Moisture – Density Test ; F:C=50:50



ผลการทดสอบ Compression Test

ตารางที่ ผ.ข.4 แสดงผลการทดสอบกำลังอัด ที่ระยะเวลาการทดสอบ 1 วัน

หินปูน				
อัตราส่วน F:C (%)	น้ำหนักตัวอย่างทดสอบ (kg)	แรงกด (Tons)	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	กำลังอัด (KSC)
90 : 10	12.554	21	2,368.68	118.835
50 : 50	12.704	11.4	2,396.98	64.51
70 : 30	12.787	7.2	2,412.64	40.743
หินTuft				
อัตราส่วน F:C (%)	น้ำหนักตัวอย่างทดสอบ (kg)	แรงกด (Tons)	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	กำลังอัด (KSC)
90 : 10	12.378	19.9	2,335.47	112.61
50 : 50	12.445	6.8	2,348.11	38.48
70 : 30	12.466	4.2	2,352.08	23.767

ตารางที่ ผ.ข.5 แสดงผลการทดสอบกำลังอัด ที่ระยะเวลาการทดสอบ 3 วัน

หินปูน				
อัตราส่วน F:C (%)	น้ำหนักตัวอย่างทดสอบ (kg)	แรงกด (Tons)	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	กำลังอัด (KSC)
10 : 90	12.544	28.5	2,366.79	161.277
50 : 50	12.828	16.3	2,420.38	92.239
70 : 30	12.945	11.3	2,442.45	63.945
หินจากท่าด่าน				
อัตราส่วน F:C (%)	น้ำหนักตัวอย่างทดสอบ (kg)	แรงกด (Tons)	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	กำลังอัด (KSC)
10 : 90	12.468	27	2,352.45	152.788
50 : 50	12.416	10.5	2,342.64	59.418
70 : 30	12.486	7	2,355.85	39.612

ตารางที่ ผ.ข.6 แสดงผลการทดสอบกำลังอัด ที่ระยะเวลาการทดสอบ 7 วัน

หินปูน				
อัตราส่วน F:C (%)	น้ำหนักตัวอย่างทดสอบ (kg)	แรงกด (Tons)	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	กำลังอัด (KSC)
10 : 90	12.629	31.8	2,382.83	179.951
50 : 50	12.786	18.8	2,412.45	106.386
70 : 30	12.773	12.5	2,410.00	70.735
หินจากทำดำน				
อัตราส่วน F:C (%)	น้ำหนักตัวอย่างทดสอบ (kg)	แรงกด (Tons)	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	กำลังอัด (KSC)
10 : 90	12.499	32	2,358.30	181.083
50 : 50	12.564	16.3	2,370.57	92.239
70 : 30	12.441	9	2,347.36	50.929

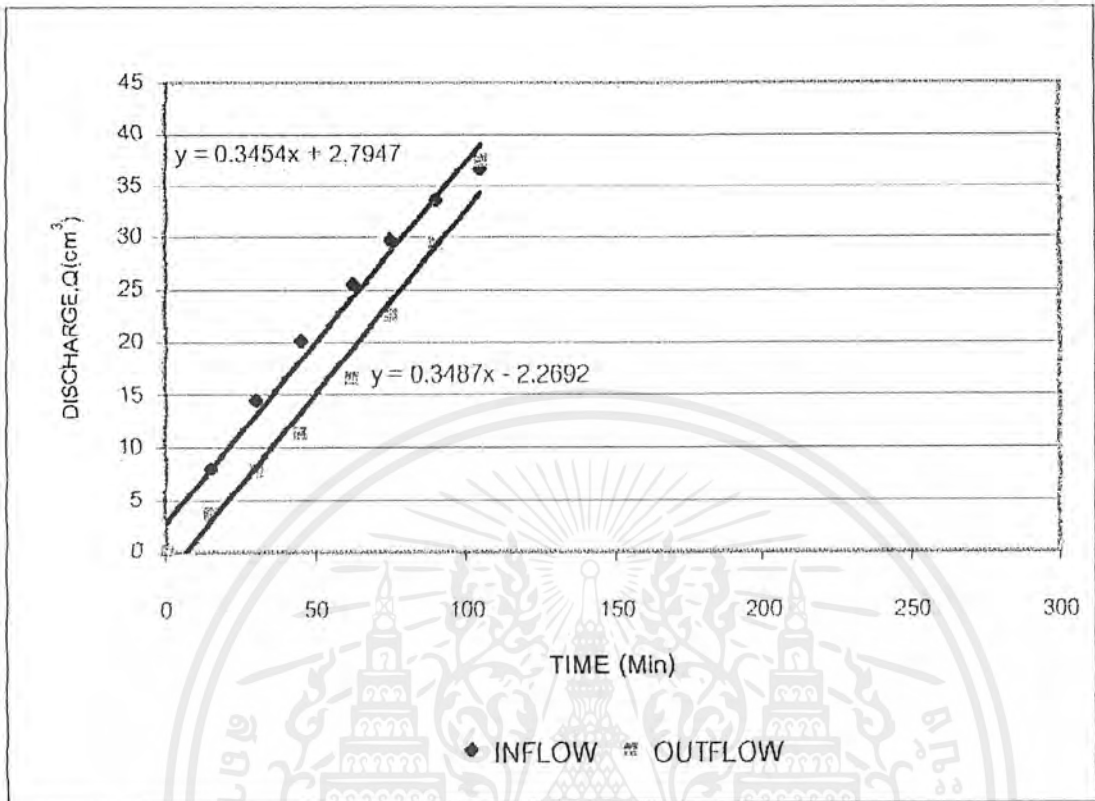
**ผลการทดสอบ Permeability Test**

ตารางที่ ผ.ข.7 แสดงผลการทดสอบที่ 1 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มาสรวมหยาบเป็นหินปูน

High back pressure = 24.613 T/m<sup>2</sup> : Low back pressure = 21.097 T/m<sup>2</sup>

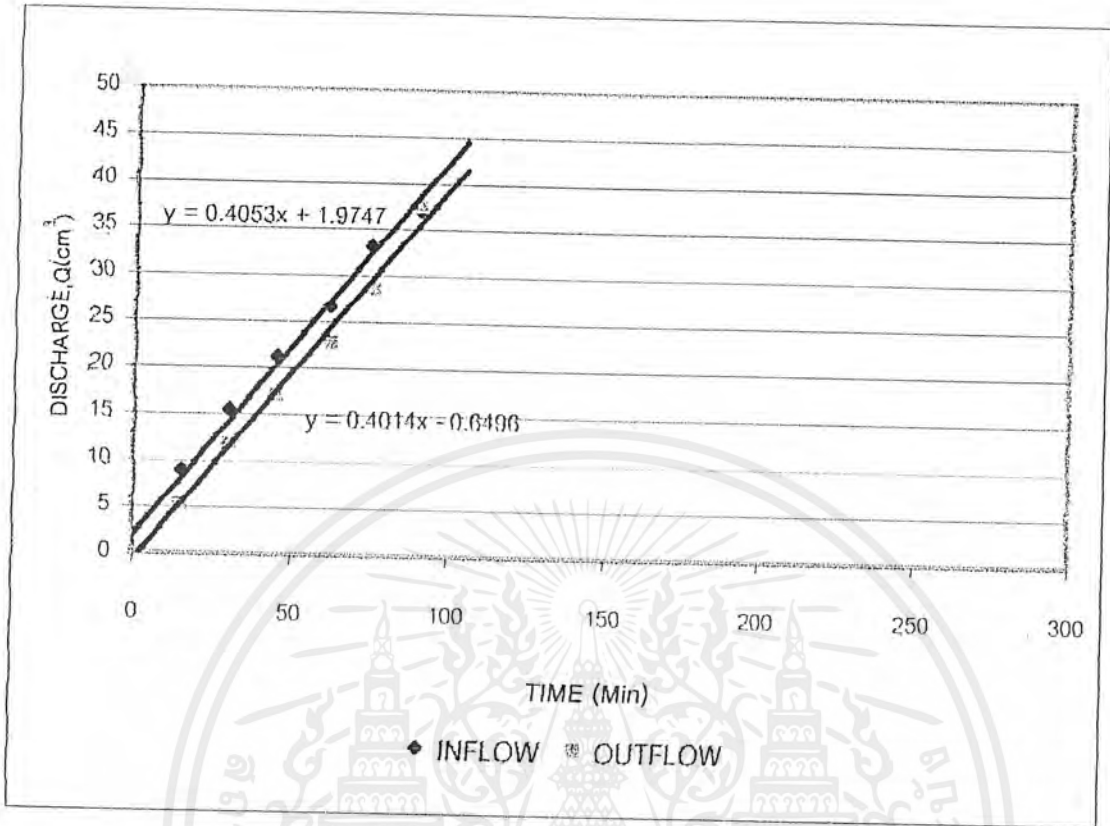
C cell pressure = 25.316 T/m<sup>2</sup>

ELAPSED TIME Min	INFLOW (cm <sup>3</sup> ) 70:30		OUTFLOW (cm <sup>3</sup> ) 70:30		INFLOW (cm <sup>3</sup> ) 50:50		OUTFLOW (cm <sup>3</sup> ) 50:50		INFLOW (cm <sup>3</sup> ) 10:90		OUTFLOW (cm <sup>3</sup> ) 10:90	
	RDG.	VOL.	RDG.	VOL.	RDG.	VOL.	RDG.	VOL.	RDG.	VOL.	RDG.	VOL.
0	2.50	0	39.80	0	1.90	0	39.60	0	0.90	0	39.20	0
15	10.50	8.00	36.10	3.70	10.80	8.90	34.30	5.30	10.00	9.10	35.90	3.30
30	17.00	14.50	32.00	7.80	17.30	15.40	27.80	11.80	17.10	16.20	28.70	10.50
45	22.60	20.10	28.40	11.40	23.00	21.10	22.60	17.00	22.60	21.70	22.70	16.50
60	28.00	25.50	23.20	16.60	28.50	26.60	16.90	22.70	28.90	28.00	16.50	22.70
75	32.30	29.80	17.20	22.60	35.10	33.20	11.20	28.40	36.10	35.20	10.20	29.00
90	36.10	33.60	10.50	29.30	39.00	37.10	2.10	37.50	39.80	38.90	0.40	38.80
105	39.10	36.60	2.20	37.60								



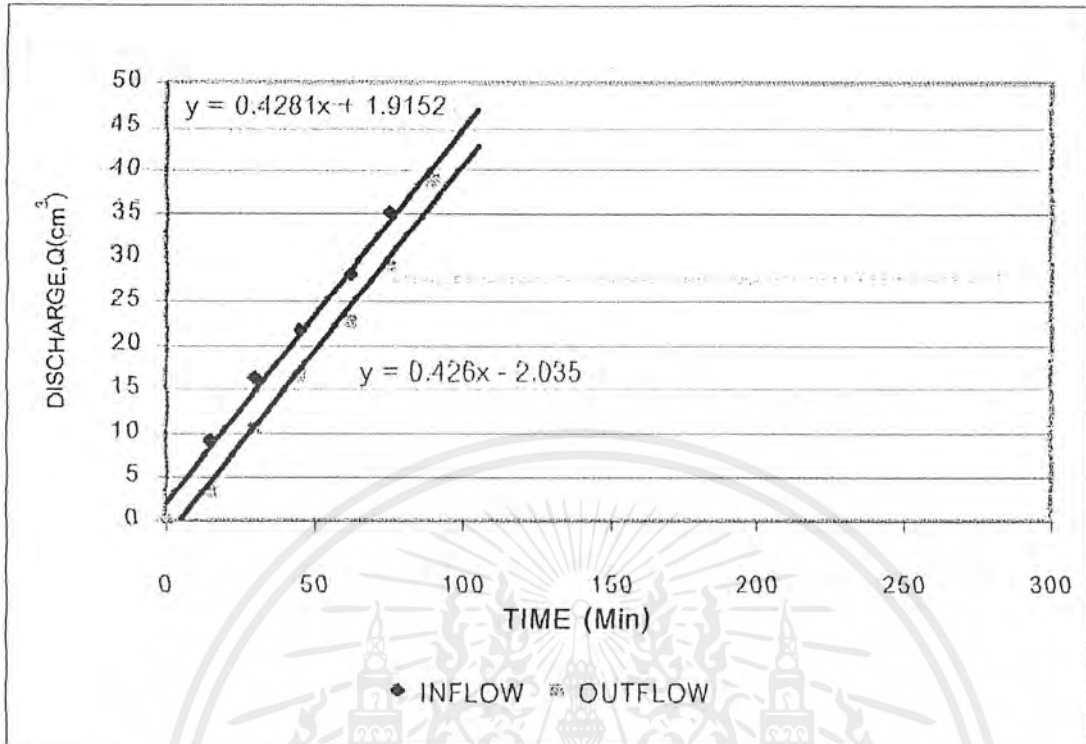
HYDRAULIC HEAD = 3.516 T/m <sup>2</sup>					
GRADIENT		27.906			
OUTFLOW			INFLOW		
FLOW RATE	0.3487	cm <sup>3</sup> /Min	FLOW RATE	0.3454	cm <sup>3</sup> /Min
K <sub>28</sub>	6.68E-06	cm/s	K <sub>28</sub>	6.61E-06	cm/s
K <sub>20</sub>	5.54E-06	cm/s	K <sub>20</sub>	5.49E-06	cm/s
AVERAGE K <sub>20</sub>	5.52E-06	cm/s			

รูปที่ ผ.ข.4 แสดงกราฟและผลการทดสอบที่ 1 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินปูน F:C= 70:30



HYDRAULIC HEAD = 3.516 T/m <sup>2</sup>					
GRADIENT		27.906			
OUTFLOW			INFLOW		
FLOW RATE	0.4014	cm <sup>3</sup> /Min	FLOW RATE	0.4053	cm <sup>3</sup> /Min
K <sub>28</sub>	7.69E-06	cm/s	K <sub>28</sub>	7.76E-06	cm/s
K <sub>20</sub>	6.38E-06	cm/s	K <sub>20</sub>	6.44E-06	cm/s
AVERAGE K <sub>20</sub>	6.41E-06	cm/s			

รูปที่ ผ.ข.5 แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 1 วัน ของส่วนผสมที่ใช้น้ำรวมหยาบเป็นหินปูน F:C = 50: 50



HYDRAULIC HEAD = $3.516 \text{ T/m}^2$					
GRADIENT		27.906			
OUTFLOW			INFLOW		
FLOW RATE	0.426	$\text{cm}^3/\text{Min}$	FLOW RATE	0.4281	$\text{cm}^3/\text{Min}$
$K_{28}$	$8.16\text{E-}06$	$\text{cm/s}$	$K_{28}$	$8.20\text{E-}06$	$\text{cm/s}$
$K_{20}$	$6.77\text{E-}06$	$\text{cm/s}$	$K_{20}$	$6.80\text{E-}06$	$\text{cm/s}$
AVERAGE $K_{20}$	$6.79\text{E-}06$	$\text{cm/s}$			

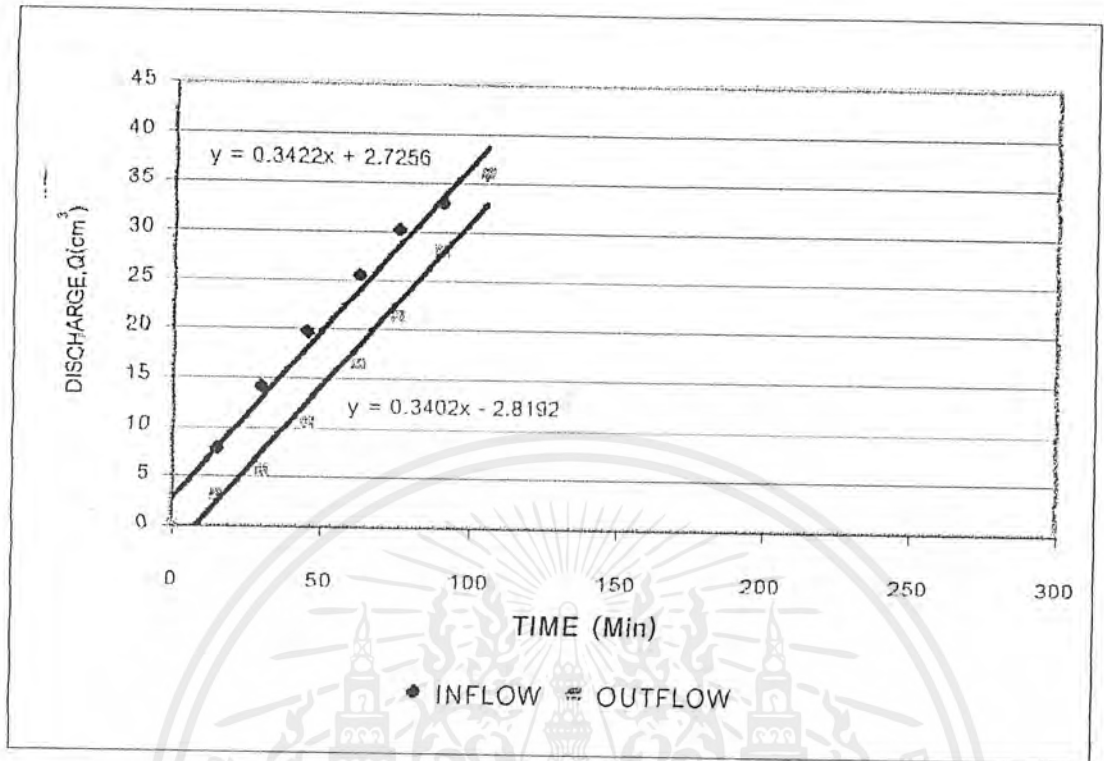
รูปที่ ผ.ข.6 แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 1 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหายาเป็นหินปูน F:C = 10: 90

ตารางที่ ผ.ข.8 แสดงผลการทดสอบที่ 1 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินTuff

High back pressure = 24.613 T/m<sup>2</sup> : Low back pressure = 21.097 T/m<sup>2</sup>

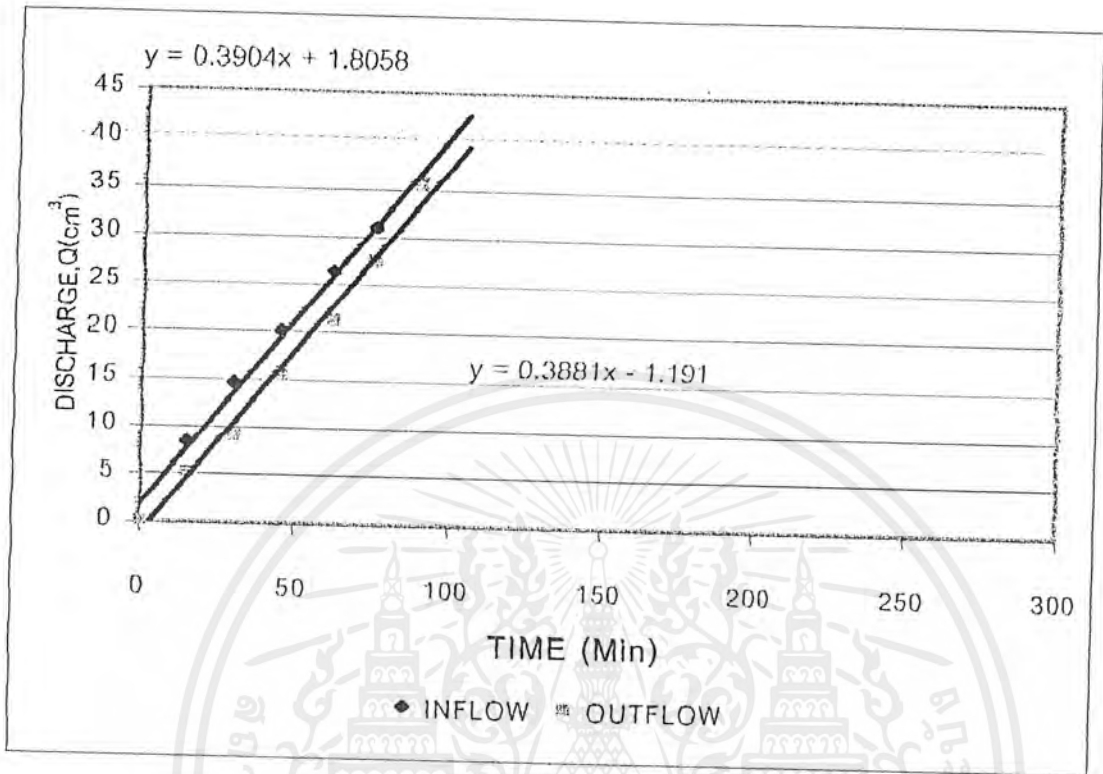
Cell pressure = 25.316 T/m<sup>2</sup>

ELAPSED TIME Min	INFLOW (cm <sup>3</sup> )		OUTFLOW (cm <sup>3</sup> )		INFLOW (cm <sup>3</sup> )		OUTFLOW (cm <sup>3</sup> )		INFLOW (cm <sup>3</sup> )		OUTFLOW (cm <sup>3</sup> )	
	RDG.	VOL.	RDG.	VOL.	RDG.	VOL.	RDG.	VOL.	RDG.	VOL.	RDG.	VOL.
0	2.70	0	38.40	0	1.90	0	39.20	0	1.30	0	39.50	0
15	10.50	7.80	35.30	3.10	10.30	8.40	34.00	5.20	10.60	9.30	34.60	4.90
30	16.80	14.10	32.80	5.60	16.50	14.60	30.00	9.20	16.50	15.20	28.00	11.50
45	22.40	19.70	27.90	10.50	22.00	20.10	23.50	15.70	22.10	20.80	22.00	17.50
62	28.20	25.50	22.00	16.40	28.30	26.40	17.90	21.30	27.90	26.60	16.70	22.80
75	32.90	30.20	17.00	21.40	32.90	31.00	11.60	27.60	35.00	33.70	10.90	28.60
90	35.70	33.00	10.40	28.00	37.80	35.90	3.50	35.70	39.20	37.90	1.60	37.90
105	38.60	35.90	2.40	36.00								



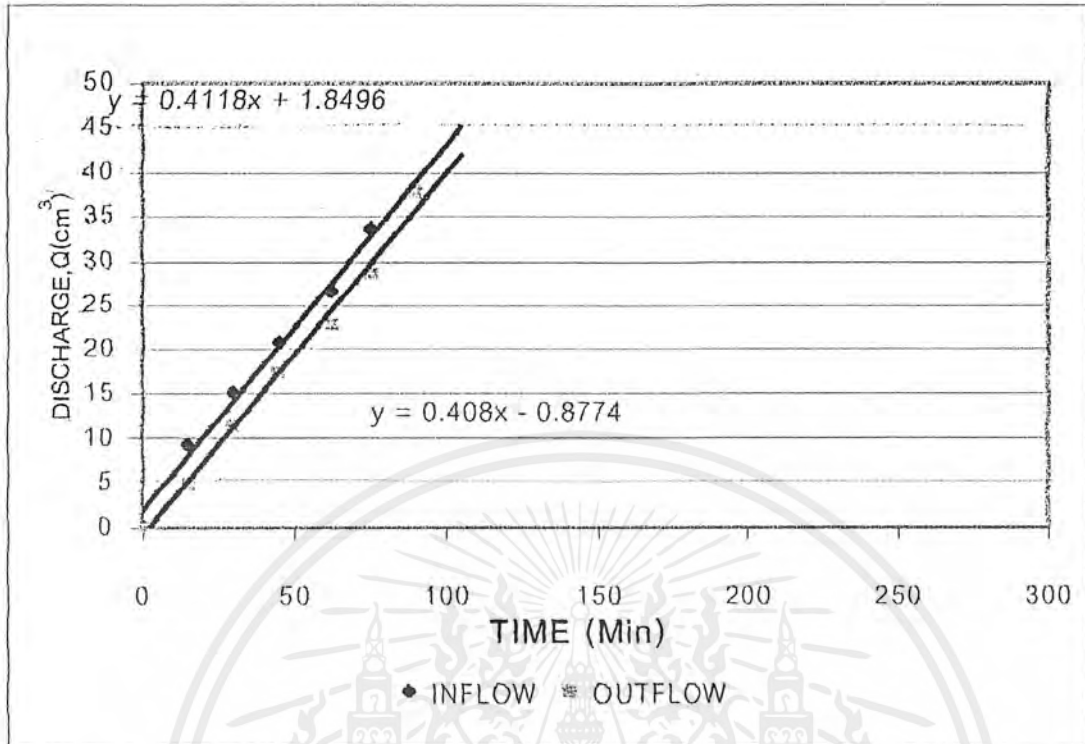
HYDRAULIC HEAD = $3.516 \text{ T/m}^2$					
GRADIENT		27.906			
OUTFLOW			INFLOW		
FLOW RATE	0.3402	$\text{cm}^3/\text{Min}$	FLOW RATE	0.3422	$\text{cm}^3/\text{Min}$
$K_{28}$	$6.52\text{E-}06$	$\text{cm/s}$	$K_{28}$	$6.55\text{E-}06$	$\text{cm/s}$
$K_{20}$	$5.41\text{E-}06$	$\text{cm/s}$	$K_{20}$	$5.44\text{E-}06$	$\text{cm/s}$
AVERAGE $K_{20}$	$5.42\text{E-}06$	$\text{cm/s}$			

รูปที่ ผ.ข.7 แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 1 วัน ของส่วนผสมที่ใช้น้ำรวมหยาบเป็นหิน Tuff F:C = 70:30



HYDRAULIC HEAD = $3.516 T/m^2$					
GRADIENT		27.906			
OUTFLOW			INFLOW		
FLOW RATE	0.3881	cm <sup>3</sup> /Min	FLOW RATE	0.3904	cm <sup>3</sup> /Min
K <sub>2s</sub>	7.43E-06	cm/s	K <sub>2s</sub>	7.48E-06	cm/s
K <sub>20</sub>	6.17E-06	cm/s	K <sub>20</sub>	6.21E-06	cm/s
AVERAGE K <sub>20</sub>	6.19E-06	cm/s			

รูปที่ ๘.๘ แสดงกราฟผลการทดสอบที่ ๑ วัน ของส่วนผสมที่ใช้น้ำรวมหยาบเป็นหินปูน F:C = 50: 50



HYDRAULIC HEAD = $3.516 \text{ T/m}^2$					
GRADIENT		27.906			
OUTFLOW			INFLOW		
FLOW RATE	0.408	$\text{cm}^3/\text{Min}$	FLOW RATE	0.4118	$\text{cm}^3/\text{Min}$
$K_{28}$	$7.81\text{E-}06$	$\text{cm/s}$	$K_{28}$	$7.89\text{E-}06$	$\text{cm/s}$
$K_{20}$	$6.49\text{E-}06$	$\text{cm/s}$	$K_{20}$	$6.55\text{E-}06$	$\text{cm/s}$
AVERAGE $K_{20}$	$6.52\text{E-}06$	$\text{cm/s}$			

รูปที่ ผ.ข.9 แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 1 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหายาเป็นหิน TmC F:C = 10:90

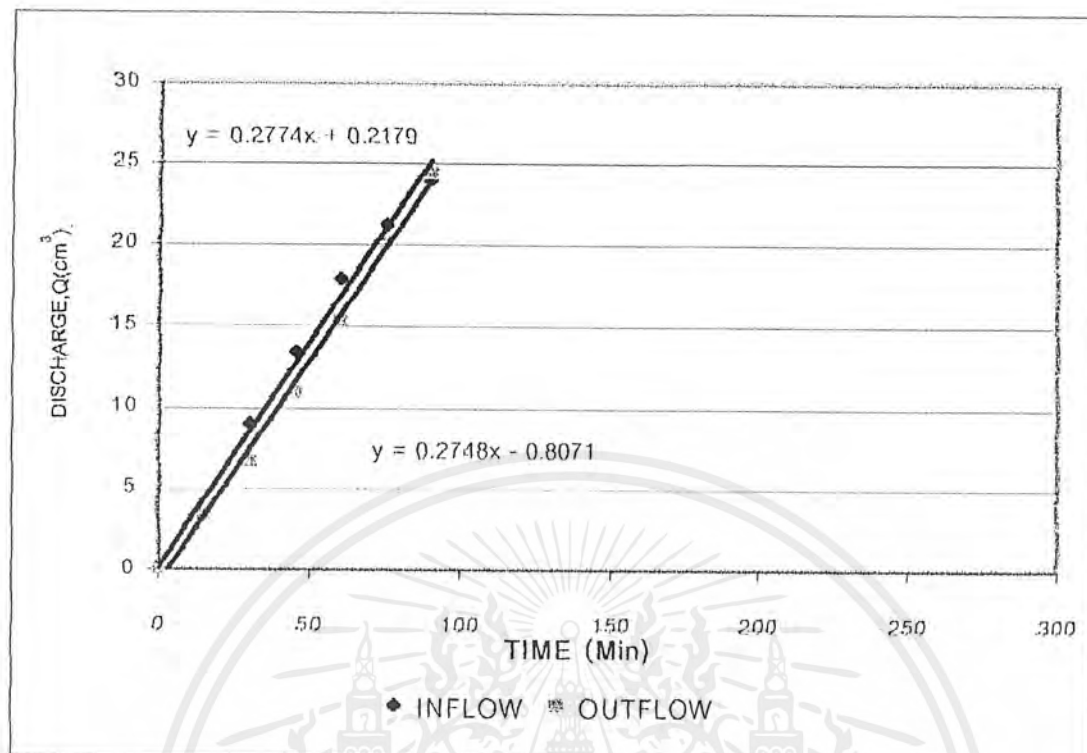
ตารางที่ ผ.ข.9 แสดงผลการทดสอบที่ 3 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินปูน

High back pressure = 24.613 T/m<sup>2</sup> : Low back pressure = 21.097 T/m<sup>2</sup>

Cell pressure = 25.316 T/m<sup>3</sup>

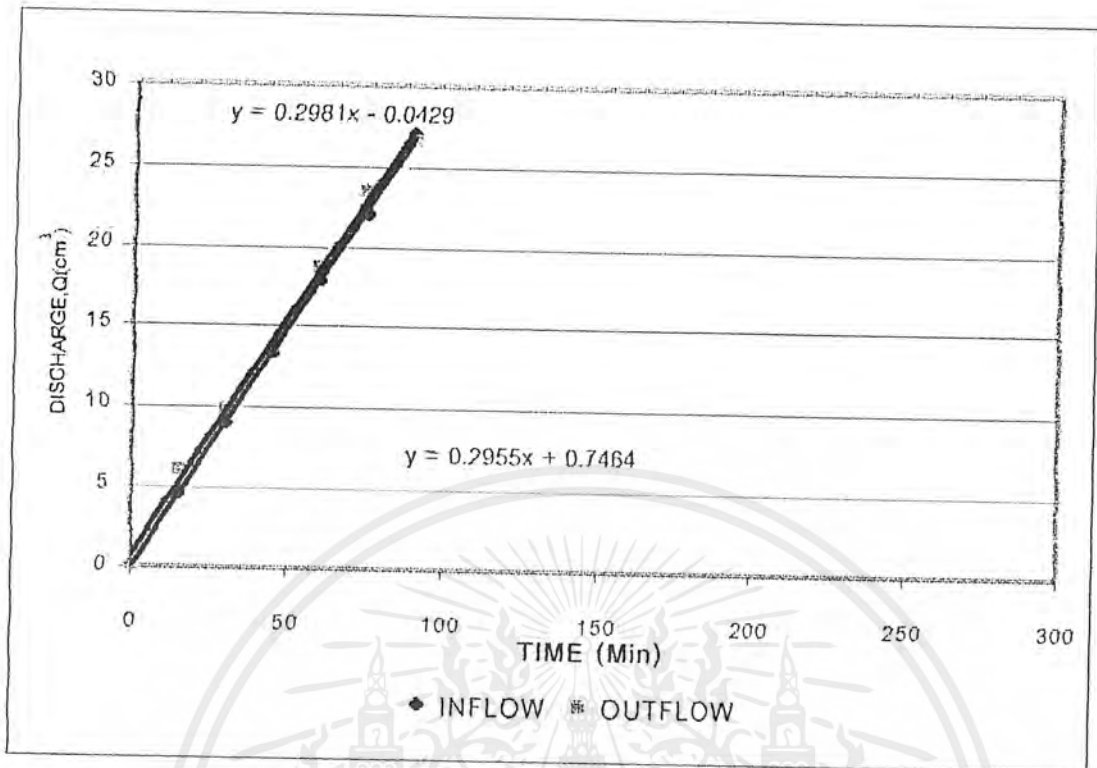
ELAPSED TIME Min	INFLOW (cm <sup>3</sup> )		OUTFLOW (cm <sup>3</sup> )		INFLOW (cm <sup>3</sup> )		OUTFLOW (cm <sup>3</sup> )		INFLOW (cm <sup>3</sup> )		OUTFLOW (cm <sup>3</sup> )	
	RDG.	VOL.	RDG.	VOL.	RDG.	VOL.	RDG.	VOL.	RDG.	VOL.	RDG.	VOL.
0	10.80	0	36.20	0	9.20	0	37.00	0	7.20	0	37.50	0
15	14.20	3.40	32.80	3.40	13.70	4.50	31.00	6.00	12.40	5.20	31.60	5.90
30	19.80	9.00	29.50	6.70	18.10	8.90	27.30	9.70	16.90	9.70	27.30	10.20
45	24.20	13.40	25.30	10.90	22.50	13.30	23.30	13.70	21.90	14.70	24.00	13.50
60	28.70	17.90	20.90	15.30	27.00	17.80	18.30	18.70	26.00	18.80	18.10	19.40
75	32.00	21.20	16.00	20.20	31.20	22.00	13.50	23.50	30.20	23.00	14.30	23.20
90	34.80	24.00	11.80	24.40	36.30	27.10	10.30	26.70	36.30	29.10	9.30	28.20





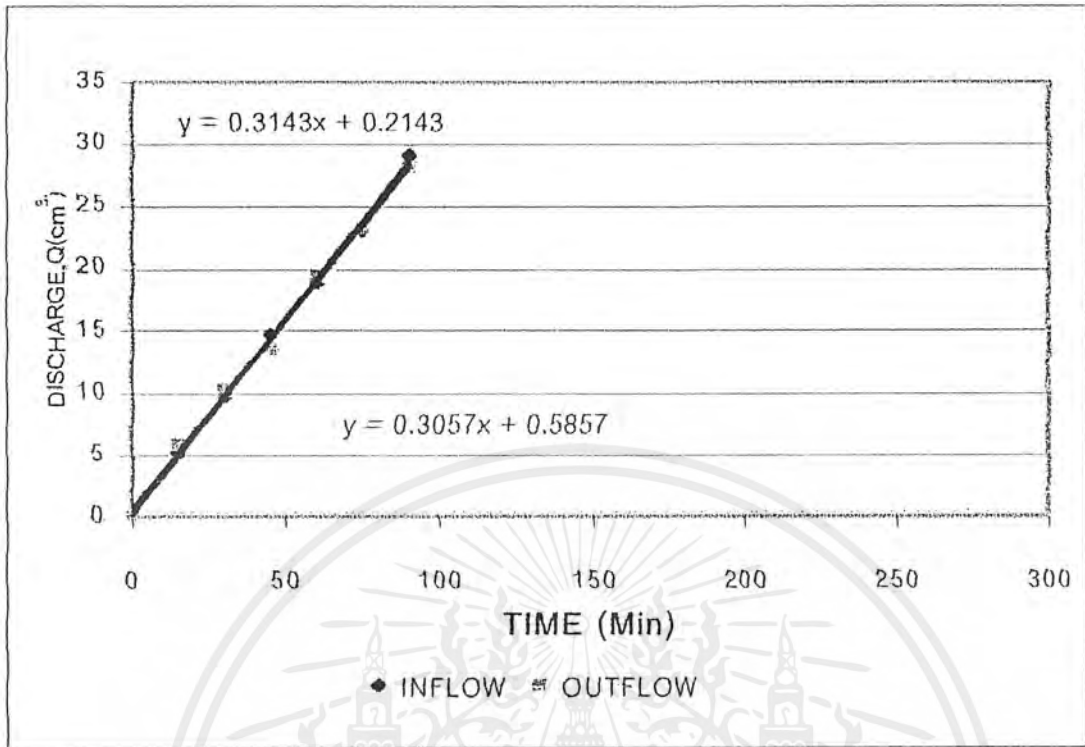
HYDRAULIC HEAD = $3.516 \text{ T/m}^2$					
GRADIENT		27.906			
OUTFLOW			INFLOW		
FLOW RATE	0.2748	$\text{cm}^3/\text{Min}$	FLOW RATE	0.2774	$\text{cm}^3/\text{Min}$
$K_{2s}$	5.26E-06	cm/s	$K_{2s}$	5.31E-06	cm/s
$K_{20}$	4.37E-06	cm/s	$K_{20}$	4.41E-06	cm/s
AVERAGE $K_{20}$	4.39E-06	cm/s			

รูปที่ ผ.ข.10 แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 3 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินปูน F:C = 70:30



HYDRAULIC HEAD = $3.516 \text{ T/m}^2$					
GRADIENT		27.906			
OUTFLOW			INFLOW		
FLOW RATE	0.2955	$\text{cm}^3/\text{Min}$	FLOW RATE	0.2981	$\text{cm}^3/\text{Min}$
$K_{28}$	$5.66\text{E-}06$	$\text{cm/s}$	$K_{28}$	$5.71\text{E-}06$	$\text{cm/s}$
$K_{20}$	$4.70\text{E-}06$	$\text{cm/s}$	$K_{20}$	$4.74\text{E-}06$	$\text{cm/s}$
AVERAGE $K_{20}$	$4.72\text{E-}06$	$\text{cm/s}$			

รูปที่ ผ.ข.11 แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 3 วัน ของส่วนผสมที่ใช้น้ำรวมหยาบเป็นหินปูน F:C = 50:50



HYDRAULIC HEAD = 3.516 T/m <sup>2</sup>					
GRADIENT		27.906			
OUTFLOW			INFLOW		
FLOW RATE	0.3057	cm <sup>3</sup> /Min	FLOW RATE	0.3143	cm <sup>3</sup> /Min
K <sub>2s</sub>	5.85E-06	cm/s	K <sub>2s</sub>	6.02E-06	cm/s
K <sub>20</sub>	4.86E-06	cm/s	K <sub>20</sub>	5.00E-06	cm/s
AVERAGE K <sub>20</sub>	4.93E-06	cm/s			

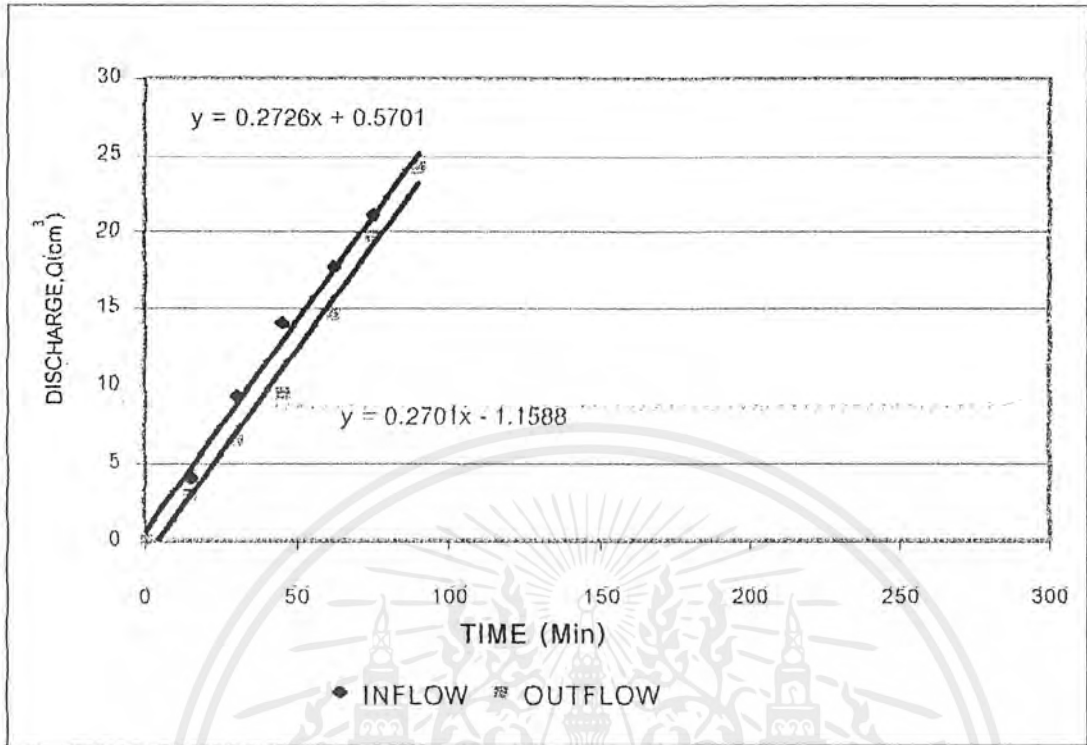
รูปที่ ผ.ข.12 แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 3 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินปูน F:C = 10:90

ตารางที่ ผ.ข.10 แสดงผลการทดสอบที่ 3 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินTuft

High back pressure = 24.613 T/m<sup>2</sup> : Low back pressure = 21.097 T/m<sup>2</sup>

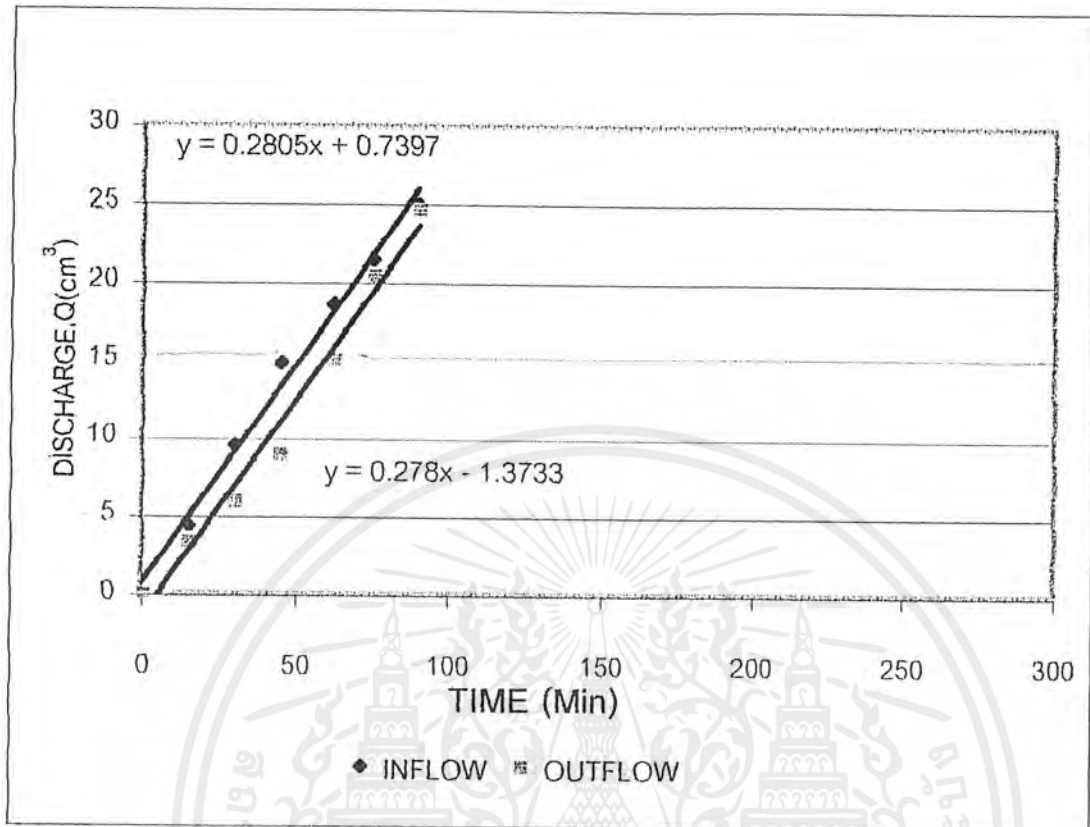
Cell pressure = 25.316 T/m<sup>2</sup>

ELAPSED TIME Min	INFLOW (cm <sup>3</sup> )		OUTFLOW (cm <sup>3</sup> )		INFLOW (cm <sup>3</sup> )		OUTFLOW (cm <sup>3</sup> )		INFLOW (cm <sup>3</sup> )		OUTFLOW (cm <sup>3</sup> )	
	RDG.	VOL.	RDG.	VOL.	RDG.	VOL.	RDG.	VOL.	RDG.	VOL.	RDG.	VOL.
0	11.00	0	36.00	0	11.00	0	37.00	0	9.00	0	38.00	0
15	15.10	4.10	33.00	3.00	15.40	4.40	33.70	3.30	13.50	4.50	32.30	5.70
30	20.30	9.30	29.50	6.50	20.60	9.60	31.00	6.00	18.00	9.00	28.30	9.70
45	25.00	14.00	26.50	9.50	25.90	14.90	28.00	9.00	22.00	13.00	25.00	13.00
60	28.70	17.70	21.40	14.60	29.70	18.70	21.90	15.10	26.90	17.90	19.30	18.70
75	32.10	21.10	16.30	19.70	32.50	21.50	16.60	20.40	31.30	22.30	14.50	23.50
90	35.20	24.20	11.80	24.20	36.00	25.00	12.30	24.70	36.20	27.20	11.50	26.50



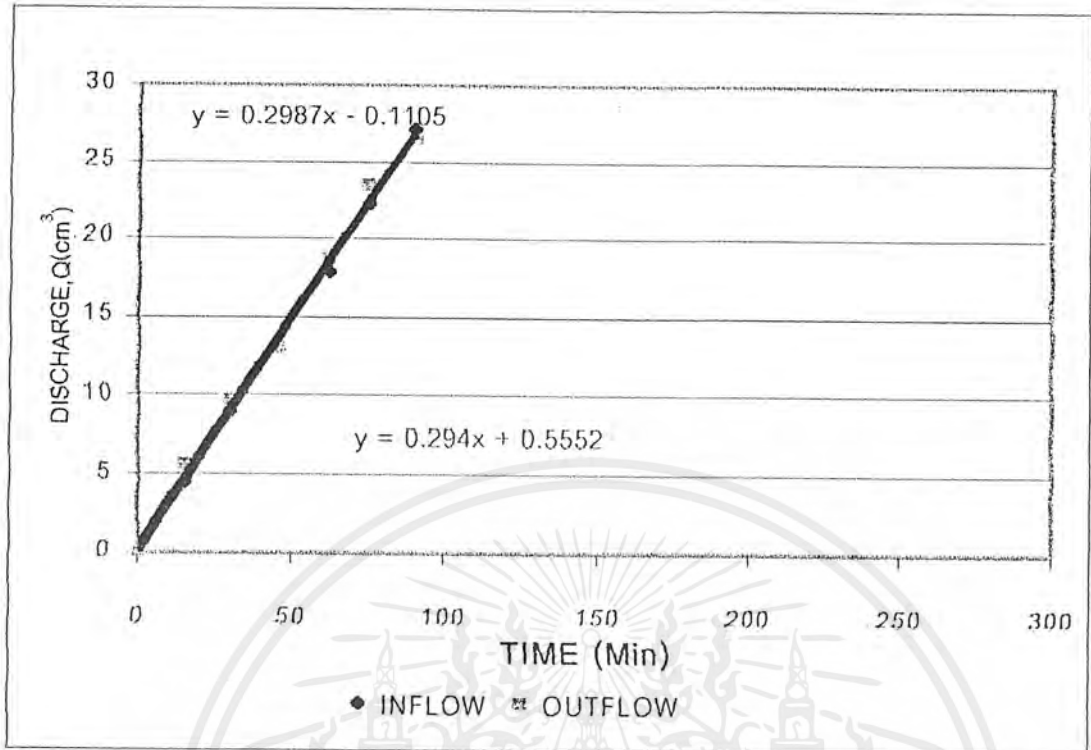
HYDRAULIC HEAD = $3.516 \text{ T/m}^2$					
GRADIENT		27.906			
OUTFLOW			INFLOW		
FLOW RATE	0.2701	$\text{cm}^3/\text{Min}$	FLOW RATE	0.2726	$\text{cm}^3/\text{Min}$
$K_{28}$	5.17E-06	$\text{cm/s}$	$K_{28}$	5.22E-06	$\text{cm/s}$
$K_{20}$	4.29E-06	$\text{cm/s}$	$K_{20}$	4.33E-06	$\text{cm/s}$
AVERAGE $K_{20}$	4.31E-06	$\text{cm/s}$			

รูปที่ ผ.ข.13 แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 3 วัน ของส่วนผสมที่ใช้น้ำรวมหยาบเป็นหิน Tuff F:C = 70:30



HYDRAULIC HEAD = 3.516 T/m <sup>2</sup>					
GRADIENT		27.906			
OUTFLOW			INFLOW		
FLOW RATE	0.278	cm <sup>3</sup> /Min	FLOW RATE	0.2805	cm <sup>3</sup> /Min
K <sub>28</sub>	5.32E-06	cm/s	K <sub>28</sub>	5.37E-06	cm/s
K <sub>20</sub>	4.42E-06	cm/s	K <sub>20</sub>	4.46E-06	cm/s
AVERAGE K <sub>20</sub>	4.44E-06	cm/s			

รูปที่ ผ.ข.14 แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 3 วัน ของส่วนผสมที่ใช้น้ำรวมหยาบเป็นหิน Tm/F:C = 50:50



HYDRAULIC HEAD = $3.516 T/m^2$					
GRADIENT		27.906			
OUTFLOW			INFLOW		
FLOW RATE	0.294	cm <sup>3</sup> /Min	FLOW RATE	0.2987	cm <sup>3</sup> /Min
K <sub>28</sub>	5.63E-06	cm/s	K <sub>28</sub>	5.72E-06	cm/s
K <sub>20</sub>	4.67E-06	cm/s	K <sub>20</sub>	4.75E-06	cm/s
AVERAGE K <sub>20</sub>	4.71E-06	cm/s			

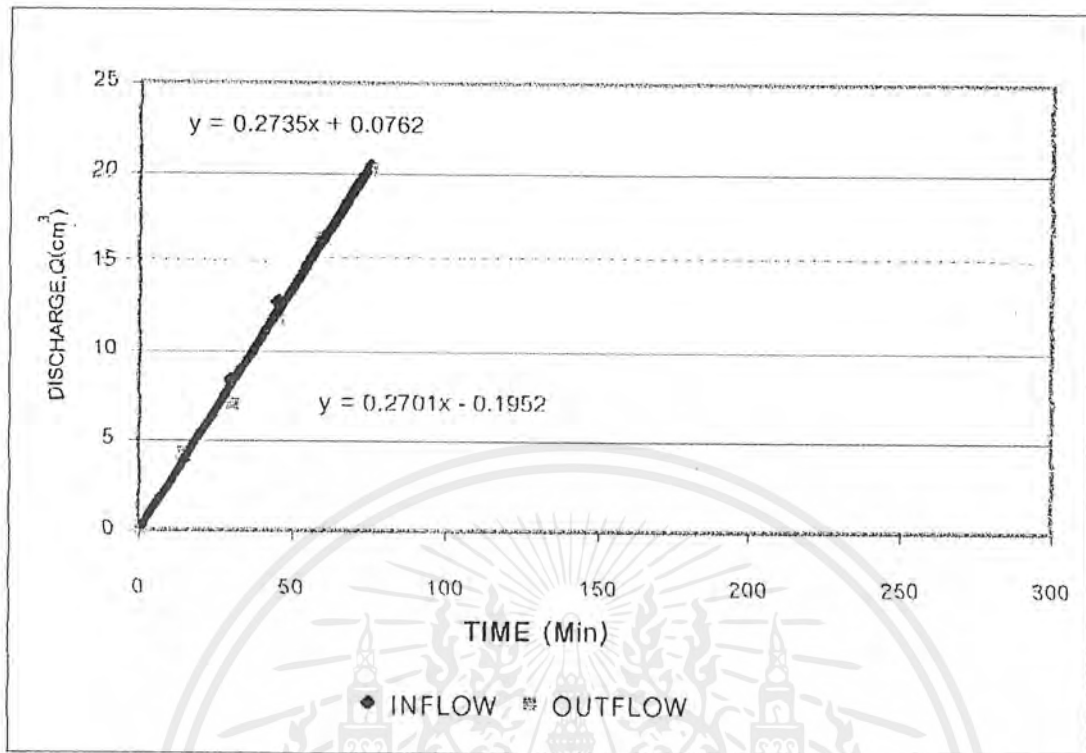
รูปที่ ผ.ข.15 แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 3 วัน ของส่วนผสมที่ส่วนผสมรวมหยาบเป็นหินTu๓๓ F:C = 10:90

ตารางที่ ผ.ข.11 แสดงผลการทดสอบที่ 7 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินปูน

High back pressure = 42.194 T/m<sup>2</sup> : Low back pressure = 21.097 T/m<sup>2</sup>

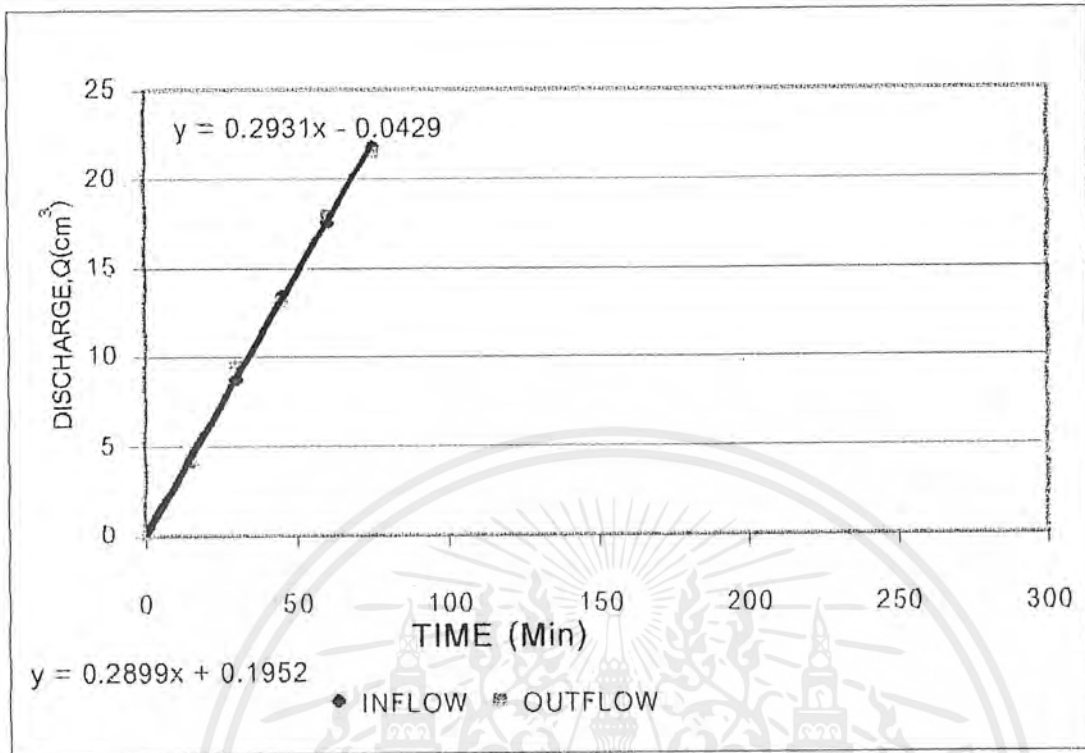
Cell pressure = 42.897 T/m<sup>2</sup>

ELAPSED TIME Min	INFLOW (cm <sup>3</sup> )		OUTFLOW (cm <sup>3</sup> )		INFLOW (cm <sup>3</sup> )		OUTFLOW (cm <sup>3</sup> )		INFLOW (cm <sup>3</sup> )		OUTFLOW (cm <sup>3</sup> )	
	RDG.	VOL.	RDG.	VOL.	RDG.	VOL.	RDG.	VOL.	RDG.	VOL.	RDG.	VOL.
0	10.80	0	34.50	0	10.20	0	36.00	0	11.00	0	36.20	0
15	14.80	4.00	30.20	4.30	14.40	4.20	31.70	4.30	16.30	5.30	30.60	5.60
30	19.20	8.40	27.50	7.00	18.90	8.70	26.50	9.50	20.20	9.20	27.00	9.20
45	23.60	12.80	22.70	11.80	23.60	13.40	22.90	13.10	25.90	14.90	22.60	13.60
60	27.20	16.40	18.20	16.30	27.80	17.60	18.00	18.00	29.60	18.60	17.00	19.20
75	31.20	20.40	14.30	20.20	32.00	21.80	14.50	21.50	34.10	23.10	13.30	22.90



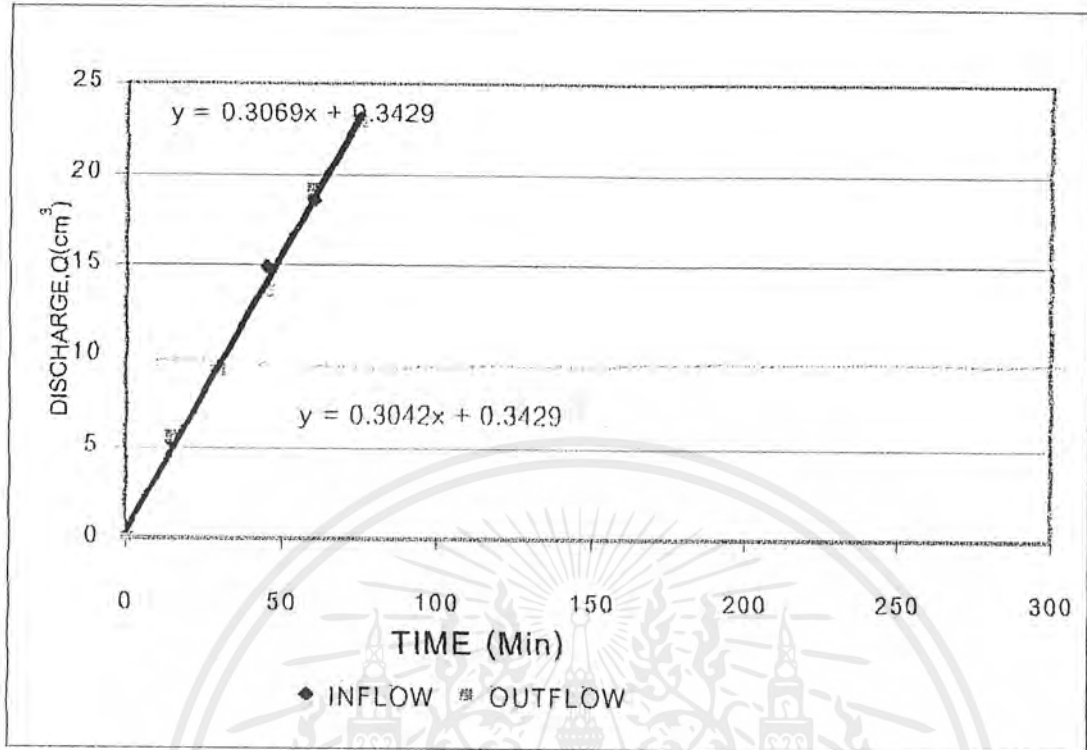
HYDRAULIC HEAD = $21.097 T/m^2$					
GRADIENT		167.437			
OUTFLOW			INFLOW		
FLOW RATE	0.2701	cm <sup>3</sup> /Min	FLOW RATE	0.2735	cm <sup>3</sup> /Min
$K_{2s}$	8.62E-07	cm/s	$K_{2s}$	8.73E-07	cm/s
$K_{20}$	7.16E-07	cm/s	$K_{20}$	7.25E-07	cm/s
AVERAGE $K_{20}$	7.20E-07	cm/s			

รูปที่ ผ.ข.16 แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 7 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหายาเป็นหินปูน F:C = 70:30



HYDRAULIC HEAD = 21.097 T/m <sup>2</sup>					
GRADIENT		167.437			
OUTFLOW			INFLOW		
FLOW RATE	0.2955	cm <sup>3</sup> /Min	FLOW RATE	0.2931	cm <sup>3</sup> /Min
K <sub>28</sub>	9.43E-07	cm/s	K <sub>28</sub>	9.36E-07	cm/s
K <sub>20</sub>	7.83E-07	cm/s	K <sub>20</sub>	7.77E-07	cm/s
AVERAGE K <sub>20</sub>	7.80E-07	cm/s			

รูปที่ พ.ข.17 แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 7 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินปูน F:C = 50:50



HYDRAULIC HEAD = 21.097 T/m <sup>2</sup>					
GRADIENT		167.437			
OUTFLOW			INFLOW		
FLOW RATE	0.3057	cm <sup>3</sup> /Min	FLOW RATE	0.3069	cm <sup>3</sup> /Min
K <sub>28</sub>	9.76E-07	cm/s	K <sub>28</sub>	9.80E-07	cm/s
K <sub>20</sub>	8.10E-07	cm/s	K <sub>20</sub>	8.13E-07	cm/s
AVERAGE K <sub>20</sub>	8.11E-07	cm/s			

รูปที่ ๑๘.๑๘ แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 7 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินปูน F:C = 10:90

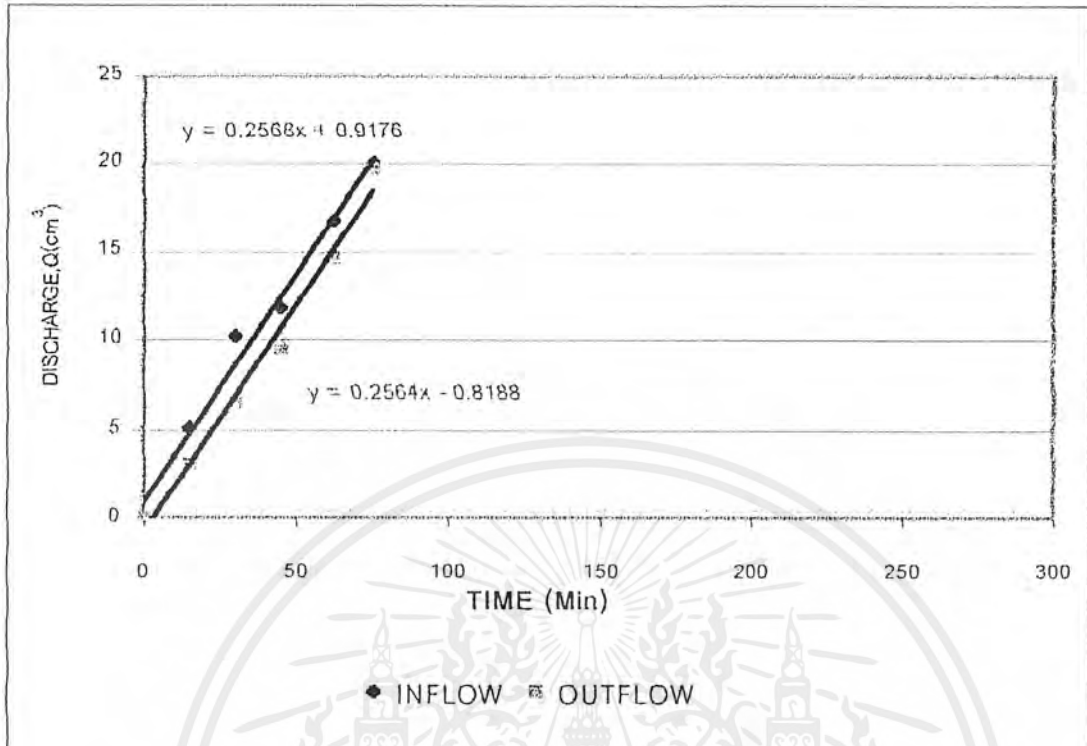
ตารางที่ ผ.ข.12 แสดงผลการทดสอบที่ 7 วัน ของส่วนผสมที่ 1 ซึ่งมีรวมหยาบเป็นหิน TmT

High back pressure = 42.194 T/m<sup>2</sup> : Low back pressure = 21.097 T/m<sup>2</sup>

Cell pressure = 42.897 T/m<sup>2</sup>

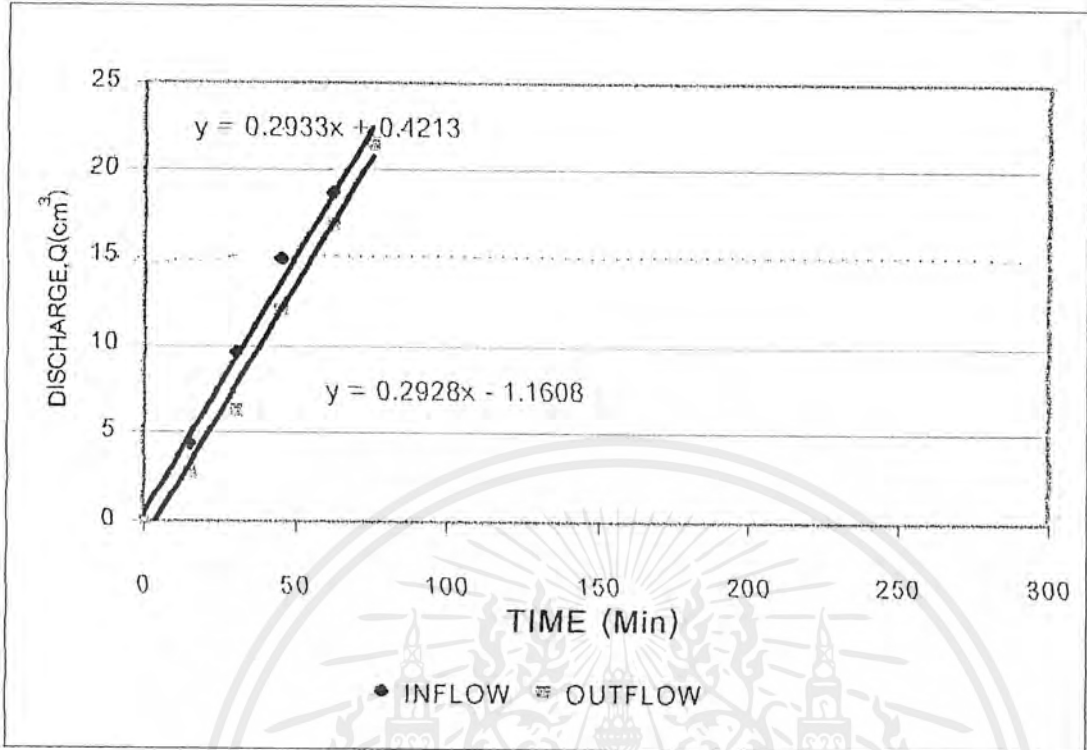
ELAPSED TIME Min	INFLOW (cm <sup>3</sup> )		OUTFLOW (cm <sup>3</sup> )		INFLOW (cm <sup>3</sup> )		OUTFLOW (cm <sup>3</sup> )		INFLOW (cm <sup>3</sup> )		OUTFLOW (cm <sup>3</sup> )	
	RDG.	VOL.	RDG.	VOL.	RDG.	VOL.	RDG.	VOL.	RDG.	VOL.	RDG.	VOL.
0	10.00	0	37.00	0	8.50	0	37.00	0	10.00	0	37.00	0
15	15.10	5.10	34.00	3.00	12.90	4.40	34.20	2.80	14.20	4.20	34.00	3.00
30	20.20	10.20	30.50	6.50	18.10	9.60	30.70	6.30	19.10	9.10	29.60	7.40
45	21.80	11.80	27.50	9.50	23.40	14.90	25.00	12.00	25.20	15.20	22.90	14.10
60	26.70	16.70	22.40	14.60	27.20	18.70	20.10	16.90	30.10	20.10	18.30	18.70
75	30.00	20.00	17.30	19.70	30.00	21.50	15.50	21.50	33.20	23.20	14.60	22.40





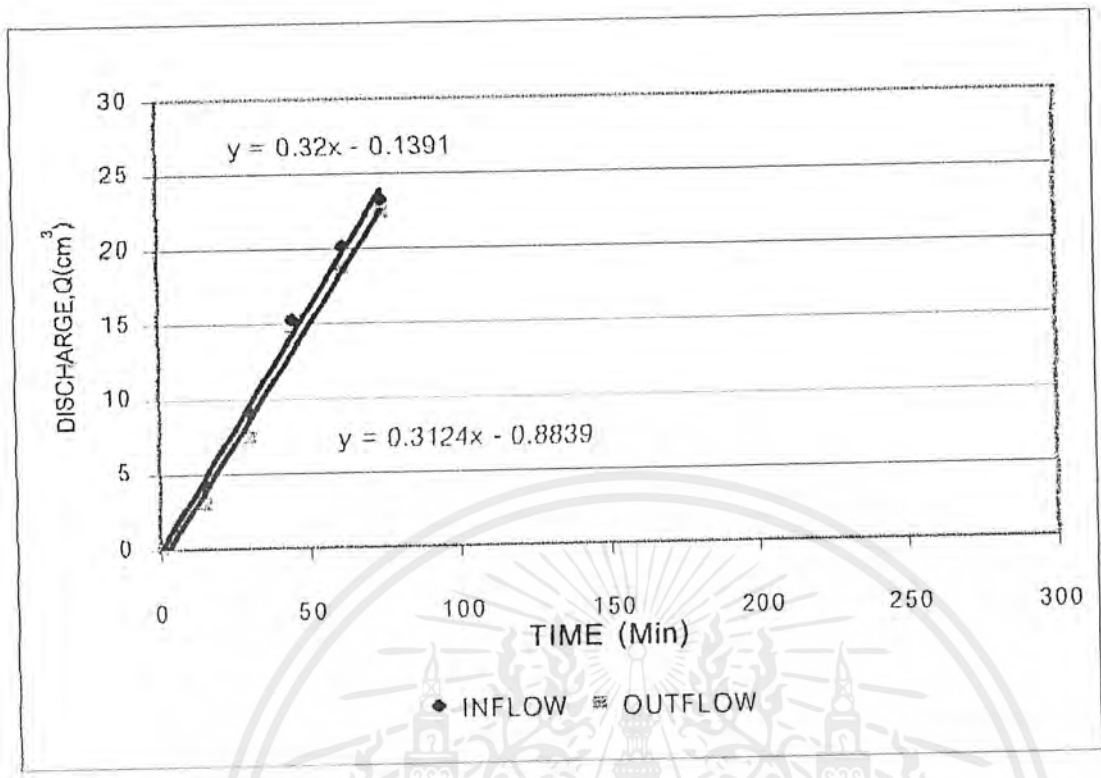
HYDRAULIC HEAD = 21.097 T/m <sup>2</sup>					
GRADIENT		167.437			
OUTFLOW			INFLOW		
FLOW RATE	0.2564	cm <sup>3</sup> /Min	FLOW RATE	0.2568	cm <sup>3</sup> /Min
K <sub>28</sub>	8.18E-07	cm/s	K <sub>28</sub>	8.20E-07	cm/s
K <sub>20</sub>	6.79E-07	cm/s	K <sub>20</sub>	6.80E-07	cm/s
AVERAGE K <sub>20</sub>	6.80E-07	cm/s			

รูปที่ ผ.ข.19 แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 7 วัน ของส่วนผสมที่ไข่มวลรวมหยาบเป็นหิน TmG F:C 70:30



HYDRAULIC HEAD = 21.097 T/m <sup>2</sup>					
GRADIENT		167.437			
OUTFLOW			INFLOW		
FLOW RATE	0.2928	cm <sup>3</sup> /Min	FLOW RATE	0.2933	cm <sup>3</sup> /Min
K <sub>28</sub>	9.35E-07	cm/s	K <sub>28</sub>	9.36E-07	cm/s
K <sub>20</sub>	7.76E-07	cm/s	K <sub>20</sub>	7.77E-07	cm/s
AVERAGE K <sub>20</sub>	7.76E-07	cm/s			

รูปที่ ผ.ข.20 แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 7 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหิน Tuff F:C 50:50



HYDRAULIC HEAD = 21.097 T/m <sup>2</sup>					
GRADIENT		167.437			
OUTFLOW			INFLOW		
FLOW RATE	0.3124	cm <sup>3</sup> /Min	FLOW RATE	0.3200	cm <sup>3</sup> /Min
K <sub>28</sub>	9.97E-07	cm/s	K <sub>28</sub>	1.02E-06	cm/s
K <sub>20</sub>	8.28E-07	cm/s	K <sub>20</sub>	8.48E-07	cm/s
AVERAGE K <sub>20</sub>	8.38E-07	cm/s			

รูปที่ ผ.ข.21 แสดงกราฟผลการทดสอบที่ 7 วัน ของส่วนผสมที่ใช้มวลรวมหายาเป็นหิน Tm C 10:90

ผลการทดสอบ Abrasion Test

ตารางที่ ผ.ข.13 แสดงผลการทดสอบ Abrasion Test (Los Angeles Test)

Test No.	ชนิดของหิน	น้ำหนักตัวอย่างก่อนทดสอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังทดสอบ (g)	% การสึกกร่อน (%)
1	หินปูน	5,004	3,764	24.78
	หิน Tuft	5,004	4,025	19.56
2	หินปูน	5,005	3,771	24.65
	หิน Tuft	5,002	4,032	19.38



## บรรณานุกรม

- ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด
- วินิต ช่อวิเชียร, 2539. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ : ม.ท.ป.
- วรากร ไม้เรียง, จิรพัฒน์ ไชยศิริ, ประทีป คงเดือน, 2525. ปฏิวัติศาสตร์ ทฤษฎีและปฏิบัติการ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : ม.ท.ป.
- เทอดศักดิ์ บุญยจจร, ธนู หาญพัฒนาพานิชย์, ชาลิต จันทรัตน์, สมศักดิ์ รุจาจรัสวงศ์, และ Sterenberg, J., 2542. การศึกษาและออกแบบโครงการเขื่อนคลองท่าด่านอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. เอกสารประกอบการบรรยายพิเศษเรื่อง การศึกษาและออกแบบโครงการเขื่อนคลองท่าด่านอันเนื่องมาจากพระราชดำริ, วิทยาลัยการชลประทาน ปากเกร็ด.
- ธันวา คาราสีน, 2541. การประยุกต์ใช้เด้าลอยลิกไนต์เพื่อเป็นส่วนผสมสำหรับอัดฉีดในมวลหิน . ปริญญาานิพนธ์ปริญญาโท ศึกษานานาชาติ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- มณฑิธร กังสทิเทียม, 2539. กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ : ม.ท.ป.
- ศิริวัฒน์ ไชยชนะ, 2538. ปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ไระมวลศิลป์.
- Aoyama, S., 1996. Conventional and modern outline of concrete gravity dam. Dam Seminar In Rid, Thailand
- Capp, J. P., and Spencer, J. D., 1970. Fly Ash Utilization. A Summary of Applications and Technology : 1-15
- Chonggang, S., 1991. Roller Compacted Concrete Dams in China. International Water Power & Dam Construction, November : 45-49
- Hansen, K. D., 1994. Built in the USA-RCC Dams of the 1990's. International Water Power & Dam Construction, April : 24-32
- Hollingworth, F., Hooper, D. J., and Geringer, J. J., 1989. Roller Compacted Concrete Arched Dams. Water Power and Dam Construction, November : 39-34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Laa, G. G., 1992. Roller Compacted Concrete Dams in Spain. Water Power & Dam Construction, September : 34-38
- Penchan Kuptawanich.,1977. Engineering Properties of Permian Limestone in Thailand. Asian Institute of Technology.
- Schrader, E. K., 1985. Roller Compacted Concrete. Advance Dam Engineering : 569-577
- Sikes, P. G., and Kolbeck, H. J., 1973. Disposal And Uses of Power Plant Ash In Urban Area. Journal of The Power Division, 98 : 219-233



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้