

การเปรียบเทียบและประมาณกำลังรับแรงของคอนกรีตเมื่อใช้เศษคอนกรีตกับ  
หินมาเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ

THE ESTIMATING ULTIMATE STRENGTH OF CONCRETE USING RECYCLED  
AGGREGATE CONCRETE COMPARING WITH CONCRETE USING CRUSHED  
ROCK AS COARSE AGGREGATE

อัศรายุทธ สายสูง

ASSARAYUT SAISOONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-EN-M-093-120

การเปรียบเทียบและประมาณกำลังรับแรงของคอนกรีตเมื่อใช้เศษคอนกรีตกับ  
หินมาเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ

THE ESTIMATING ULTIMATE STRENGTH OF CONCRETE USING RECYCLED  
AGGREGATE CONCRETE COMPARING WITH CONCRETE USING CRUSHED  
ROCK AS COARSE AGGREGATE

อัศรายุทธ สายสูง

ASSARAYUT SAISOONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-EN-M-093-120

THE ESTIMATING ULTIMATE STRENGTH OF CONCRETE USING RECYCLED  
AGGREGATE CONCRETE COMPARING WITH CONCRETE USING CRUSHED  
ROCK AS COARSE AGGREGATE

ASSARAYUT SAISOONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2019  
KMITL-2019-EN-M-093-120

COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเปรียบเทียบและประมาณกำลังรับแรงของคอนกรีตเมื่อใช้เศษคอนกรีตกับหินมาเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ
นักศึกษา	นายอัศรายุทธ สายสูง
รหัสประจำตัว	60601124
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. อาทิตย์ เพชรศศิธร

### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการลดต้นทุนการก่อสร้างเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ ซึ่งงานวิจัยนี้เล็งเห็นถึงการนำวัสดุคอนกรีตที่ไม่ใช้งานแล้วมาทำเป็นวัสดุมวลรวมหยาบของคอนกรีต แต่ยังไม่พบงานวิจัยใดที่ศึกษาความสัมพันธ์ของกำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีตและสร้างสมการการประมาณอย่างง่ายเพื่อทำนายค่ากำลังรับแรงอัด, ค่ากำลังรับแรงดึงและค่าความหนาแน่น โดยมีสัดส่วนการแทนที่และค่ากำลังรับแรงอัดของเศษคอนกรีตเป็นตัวแปรอิสระ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาและเปรียบเทียบกำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตรีไซเคิล ที่มาจากคอนกรีตทรงกระบอกเป็นกรณีศึกษาโดยใช้เศษคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัด 280 , 380 และ 500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มาผสมกับมวลรวมหยาบหิน ในสัดส่วนต่างๆ เพื่อมาเปรียบเทียบกับวัสดุมวลรวมหยาบที่เป็นหินทั้งหมดนี้ถูกควบคุมด้วยขนาดคละในช่วง  $\frac{3}{4}$  นิ้ว ถึง  $1\frac{1}{2}$  นิ้ว และค่าสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์เดียวกันซึ่งออกแบบค่ากำลังอัดไว้ที่ 280 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 4 สัดส่วนคือ หินร้อยละ 75 : เศษคอนกรีตร้อยละ 25 , หินร้อยละ 50 : เศษคอนกรีตร้อยละ 50 , หินร้อยละ 25 : เศษคอนกรีตร้อยละ 75 และ หินร้อยละ 0 : เศษคอนกรีตร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก ในแต่ละสัดส่วนจะแบ่งการทดสอบเป็นกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงเป็น 10 ตัวอย่าง ดังนั้นจะได้ตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 120 ตัวอย่าง ซึ่งคอนกรีตจะถูกทดสอบที่อายุ 28 วัน จากทดสอบพบว่า การเพิ่มสัดส่วนของเศษคอนกรีตที่มีค่ากำลังรับแรงต่างกันในการใช้เป็นมวลรวมหยาบมีผลทำให้กำลังและค่าความหนาแน่นของคอนกรีตลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

Title	THE ESTIMATING ULTIMATE STRENGTH OF CONCRETE USING RECYCLED AGGREGATE CONCRETE COMPARING WITH CONCRETE USING CRUSHED ROCK AS COARSE AGGREGATE
Student	Mr.Assarayut Saisoong
Student ID	60601124
Degree	Master of Engineering
Program	Civil Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Asst.Prof. Dr. Arthit Petchsasithon

### ABSTRACT

At the present time, Construction cost can be considered as one of the most important factors. This research aims to use recycle concrete as coarse aggregate. Nevertheless, no research has investigated the relationship between compressive strength and tensile strength. And Create simple estimation equations to predict compressive strength, tensile strength and density of concrete recycle. With proportions and compressive strength of recycled coarse aggregate as independent variables. Therefore, this research will study and compare the compression strength and tensile strength of concrete by using recycled concrete as coarse aggregate from concrete with ultimate compressive strength of 240, 380 and 500 ksc. Aggregate in various ratios will be compared with concrete using crushed rock as normal aggregate under the conditions that all grain sizes are in the range from 3/4 to 1 1/2 inch. With designed ultimate compressive strength of 280 ksc. using constant water to cement ratio. The ratio of crushed rock : recycled concrete used in this research are 75:25, 50:50, 25:75 and 0:100. Ten samples for each proportion will be tested for compressive strength and tensile strength. Therefore 120 samples will be tested in total. It was found that the concrete strength and Density are significantly decreased when increasing the proportion of recycled concrete as coarse aggregate.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ ผศ.ดร. อาทิตย์ เพชรศศิธร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่คอยให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำเป็นอย่างดีมา โดยตลอดในช่วงการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ที่เป็นสถานที่ที่ให้ความรู้ และให้โอกาสได้ศึกษาตลอดหลักสูตร

ขอขอบคุณ บิดาและมารดาที่ส่งเสียค่าเล่าเรียนให้ได้ศึกษาและสนับสนุนเสมอมา

ขอขอบคุณ พี่เจี๊ยบ พี่สมบัติ พี่แหวน พี่แชมป์ อีฟ เพื่อนๆ CT 36 และน้อง ๆ CT 37 ที่คอย ช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทดลองในระหว่างทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

สุดท้ายต้องขอขอบคุณ นาย ภราดร มาลัยเกตุ, นาย วิทวัส ต้อยศ กลุ่มโปรเจคปริญาตรีที่ ช่วยกันทำงานและทำให้งานวิจัยสามารถต่อยอดมาเป็นวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดาซึ่ง เป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูบาอาจารย์ทุกท่านที่เคยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอด ประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

อัศรายุทธ สายสูง

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	1
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 ขงเสียจากการก่อสร้าง .....	5
2.2.1 อาคารที่อยู่อาศัย.....	5
2.2.2 อาคารที่ไม่เป็นที่อยู่อาศัย.....	6
2.3 ขงเสียจากการรื้อถอน.....	7
2.3.1 อาคารที่อยู่อาศัย.....	7
2.3.2 อาคารที่ไม่ใช่ที่อยู่อาศัย.....	8
2.4 วรรณกรรมปริทัศน์และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	9
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	29
3.1 การออกแบบการทดลอง.....	30
3.2 การออกแบบส่วนผสม.....	32
3.2.1 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต.....	32
3.3 การทดสอบและวิธีการผลิต.....	39
3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต.....	39
3.3.2 ขั้นตอนการผสมคอนกรีต.....	41
3.3.3 การทดสอบคุณสมบัติของส่วนผสมและคอนกรีต.....	42
3.4 การสร้างสมการทำนายกำลังรับแรงอัดและแรงดึง.....	44
3.5 สถิติที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลอง.....	45

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	48
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่นำมาใช้ผสมคอนกรีต.....	48
4.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงและความหนาแน่นที่อายุ 28 วัน.....	70
4.3 ผลของการสร้างสมการความสัมพันธ์เพื่อประมาณกำลังรับแรงและความหนาแน่น ของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน.....	73
4.4 ตรวจสอบการประมาณผลต่างๆด้วยข้อมูลทางสถิติ.....	77
4.4.1 การทดสอบความแม่นยำของแบบการประมาณ.....	82
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	83
5.1 สรุปผลวิจัย.....	83
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	85
5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงาน.....	85
เอกสารอ้างอิง.....	86
ภาคผนวก.....	88
ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงของคอนกรีตรีไซเคิล.....	89
ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นของคอนกรีตรีไซเคิล.....	92
ภาคผนวก ค. ภาพประกอบที่เกี่ยวข้อง.....	95
ภาคผนวก ง. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	104
ประวัติผู้เขียน.....	113

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ของเสียที่ประเมินได้จากการก่อสร้างอาคารที่อยู่อาศัย (บ้าน 2 ชั้น) 332 ตารางเมตร. ....	5
2.2 ของเสียที่ประเมินได้จากการก่อสร้างอาคารที่ไม่เป็นอยู่อาศัย (สถาบันการศึกษา).....	6
2.3 ของเสียที่ประเมินได้จากการรื้อถอนอาคารที่อยู่อาศัย (บ้าน 2 ชั้น) .....	7
2.4 ของเสียที่ประเมินได้จากการรื้อถอนอาคารที่ไม่ใช่อยู่อาศัย (สถาบันการศึกษา) 20,050 ตารางเมตร .....	8
2.5 ปริมาณของสิ่งเจือปนที่ยอมให้วัสดุรวม.....	18
2.6 เกณฑ์กำหนดอัตราส่วนขนาดผลของวัสดุ.....	19
2.7 ขนาดของหินเบอร์ต่างๆ.....	20
2.8 ค่ายุบตัวสำหรับงานก่อสร้างชนิดต่างๆ.....	21
3.1 ขอบเขตของข้อมูลที่นำมาใช้ในการทดลอง.....	31
3.2 ค่ายุบตัวสำหรับงานประเภทต่าง ๆ.....	36
3.3 ปริมาณน้ำผสมคอนกรีต.....	36
3.4 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคอนกรีตกับอัตราส่วนของน้ำ-ซีเมนต์.....	37
3.4 (ข) อัตราส่วนน้ำ - ซีเมนต์ที่ยอมให้สำหรับงานภายใต้สภาวะพิเศษ.....	37
3.5 ปริมาตรของหินต่อคอนกรีตหนึ่งหน่วยปริมาตร.....	38
3.6 น้ำหนักคอนกรีตสด.....	38
4.1 สรุปค่าคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่นำมาใช้ผสมคอนกรีต.....	48
4.2 ตารางหน่วยน้ำหนักของน้ำ.....	52
4.3 หาความจุของภาชนะ.....	52
4.4 ปริมาณส่วนผสมของคอนกรีตในแต่ละส่วนผสม.....	69
4.5 ผลการทดสอบกำลังของคอนกรีต .....	72
4.6 ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นของคอนกรีต .....	73
4.7 ค่ากำลังรับแรงที่ได้จากการทดลองและสมการประมาณ .....	75
4.8 ค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทดลองและสมการประมาณ .....	76
4.9 Coeficients ของกำลังรับแรงอัด .....	77
4.10 Coeficients ของกำลังรับแรงดึง.....	77
4.11 Coeficients ของความหนาแน่น.....	78
4.12 Residuals Statistics ของการประมาณกำลังรับแรงอัด.....	80
4.13 Residuals Statistics ของการประมาณกำลังรับแรงดึง.....	81
4.14 Residuals Statistics ของการประมาณค่าความหนาแน่น.....	81
4.15 Model Summary ของการประมาณกำลังรับแรงอัด.....	82
4.16 Model Summary ของการประมาณกำลังรับแรงดึง.....	82
4.17 Model Summary ของการประมาณค่าความหนาแน่น.....	82

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โมเดลความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณ.....	14
2.2 การผสมส่วนผสมคอนกรีต.....	16
2.3 สภาวะของวัสดุมวลรวม.....	20
2.4 การกองเก็บซีเมนต์ถุง.....	24
3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1.....	39
3.2 หินและเศษคอนกรีตที่ใช้เป็นมวลรวมหยาบ.....	40
3.3 โม่ผสมคอนกรีต.....	40
3.4.ก แบบหล่อทรงกระบอกขนาด $\varnothing$ 15 x 30 เซนติเมตร.....	41
3.4.ข แบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร.....	41
3.5 ความซ้ำซ้อนในการอธิบายตัวแปรตาม.....	45
3.6 กราฟแสดงการแจกแจงแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อน.....	46
3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมการการประมาณกับผลการทดลอง.....	47
4.1 ขวด Pycnometer.....	56
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับสัดส่วนการแทนที่.....	70
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงกับสัดส่วนการแทนที่.....	70
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับสัดส่วนการแทนที่.....	71
4.5 กราฟแสดงการแจกแจงแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจาก การประมาณกำลังรับแรงอัด.....	79
4.6 กราฟแสดงการแจกแจงแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจาก การประมาณกำลังรับแรงดึง.....	79
4.7 กราฟแสดงการแจกแจงแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจาก การประมาณค่าความหนาแน่น.....	80

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เศษคอนกรีตเป็นวัสดุที่ได้จากการรื้อถอนหรือทำลายถนนหรือโครงสร้างคอนกรีตเก่า ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว เศษคอนกรีตมักจะถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการถมที่ (Landfill) การแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์คอนกรีต (Concrete Products) นอกจากนี้ เศษคอนกรีตก็ยังสามารถนำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบ (Recycled Aggregate) ในคอนกรีตได้อีกด้วย

ในงานการรื้อถอนโครงสร้างอาคารบางครั้งต้องมีการทุบทำลายโครงสร้างอาคารเก่าทิ้งทำให้เกิดเป็นเศษคอนกรีต (Crushed Concrete) เป็นจำนวนมาก ปัจจุบันการนำเศษคอนกรีตไปใช้ประโยชน์หลักๆคือ การถมที่ (Landfill) และวัสดุถมที่ใช้ในการป้องกันการกัดเซาะตลิ่งของแม่น้ำ ส่วนมากมีการนำคอนกรีตเหล่านั้นไปใช้ในการถมที่ ซึ่งการนำเศษคอนกรีตมาถมที่อาจทำให้เกิดปัญหาการตอกเสาเข็มไม่ลงในภายหลังได้ ปัจจุบันมีการวิจัยในการนำเศษคอนกรีตมาใช้เป็นมวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) ในคอนกรีต เช่น นายศักดิ์ชัย วงษ์ชัย(2553) [2] “การวิจัยการนำเศษคอนกรีตมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมหยาบผสมคอนกรีตแทนหินย่อย”, เทอดศักดิ์ สายสุทธิ (2555) [4] “RCA จากส่วนที่เหลือของเสาเข็มคอนกรีต” เป็นต้น เนื่องจากการเป็นการช่วยลดขยะจากเศษคอนกรีต ซึ่งเป็นการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังช่วยลดการใช้หินใหม่ ลดการทำลายแหล่งหินที่จะนำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบ และปัญหาที่เกิดจากขบวนการผลิตมวลรวมหยาบโดยเฉพาะฝุ่นละอองและการทำลายธรรมชาติที่เกิดจากขบวนการโม่หิน ซึ่งโดยทั่วไปเศษคอนกรีตไม่มีต้นทุนทางด้านราคาต่ำสุด และอาจต้องเสียค่าใช้จ่ายในการนำไปทั้งด้วย ทำให้การใช้เศษคอนกรีตยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างได้อีกด้วย แต่ค่ากำลังของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลนั้นไม่สามารถทราบได้เลยเหมือนกับคอนกรีตธรรมดาทั่วไป ที่มีมาตรฐานรองรับค่ากำลังที่ใช้ในการออกแบบ จะไม่มีความน่าเชื่อถือเพียงพอว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลนั้น จะได้ค่ากำลังรับแรงประลัยที่เท่าใด

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ก็คือ เพื่อเปรียบเทียบและสร้างสมการประมาณกำลังรับแรงสูงสุดระหว่าง คอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตในค่ากำลังรับแรงที่ต่างกันและหินผสมกันในสัดส่วนต่าง ๆ มาเป็นวัสดุมวลรวมหยาบกับคอนกรีตธรรมดาที่ใช้หิน เป็นวัสดุมวลรวมหยาบ โดยทั้งหมดถูกควบคุมด้วยขนาดคละของมวลรวมหยาบ รวมทั้งค่า Water Cement Ratio และค่าการยุบตัว(Slump) และสร้างสมการการประมาณอย่างง่ายเพื่อทำนายค่ากำลังรับแรงอัด,ค่ากำลังรับแรงดึงและค่าความหนาแน่นของคอนกรีต เพื่อนำสมการไปใช้ในการประมาณกำลังของคอนกรีตเมื่อใช้เศษคอนกรีตรีไซเคิล (RCA) คัดกำลัง แทนที่หินในสัดส่วนต่างๆ

### 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

การทดสอบคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตผสมกับหินในสัดส่วนต่างๆมาเป็นวัสดุมวลรวมหยาบกับคอนกรีตธรรมดาที่ใช้หิน เป็นวัสดุมวลรวมหยาบนั้นจะพิจารณาควบคุมตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตดังต่อไปนี้

- 1.3.1 ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ Type 1
- 1.3.2 มวลรวมละเอียดที่ใช้เป็นทรายแม่น้ำ
- 1.3.3 หินที่ใช้มีขนาดอยู่ระหว่าง  $3/4$  นิ้ว และ  $1\ 1/2$  นิ้ว
- 1.3.4 แบบหล่อแท่งคอนกรีตตัวอย่างที่ใช้เป็นแบบหล่อรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. ความสูง 30 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C 192
- 1.3.5 แบบหล่อลูกคอนกรีตตัวอย่างที่ใช้เป็นแบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์ขนาด  $15 \times 15 \times 15$  ซม.
- 1.3.6 ใช้ค่าการยุบตัวที่ 8 ถึง 10 ซม. ในการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต
- 1.3.7 การทดสอบนี้เป็นผลการทดสอบเฉพาะในห้อง Laboratory
- 1.3.8 ในขั้นตอนการทดสอบรับแรงอัดของคอนกรีตนั้น จะเป็น Unconfined Compression Test คือเป็นทดสอบแรงอัด โดยใส่แรงเข้าไปเพียงแกนเดียว
- 1.3.9 ในขั้นตอนการทดสอบรับแรงดึงโดยวิธีการผ่าซีก (Splitting Tensile Test)
- 1.3.10 ในการทดสอบนั้นจะแบ่งสัดส่วนออกเป็น 4 สัดส่วน คือเศษคอนกรีตต่อหิน 0:100, 25:75, 50:50 และ 75:25 ในแต่ละสัดส่วนจะทำการทดสอบกำลังแรงอัดและกำลังแรงดึงทั้งหมด 10 ตัวอย่าง ทดสอบคอนกรีตที่อายุ 28 วัน โดยจะทำการทดสอบ 120 ตัวอย่าง แล้ว นำมาหาค่าเฉลี่ย ทำการออกแบบค่ากำลังอัดที่ 280 ksc อ้างอิงจาก water cement ratio ใน mixed design โดยใช้วัสดุมวลรวมหยาบจากหินย่อยจากเศษคอนกรีตที่มีกำลังอัด 280,380,500 ksc
- 1.3.11 เนื่องจากวัสดุมวลรวมรีไซเคิลมีอย่างจำกัด จึงทำการทดลองเพียง 120 ตัวอย่าง

#### 1.4 ขั้นตอนการศึกษา

- 1.4.1 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 สรุปลงงานวิจัยก่อนหน้านี้และนำมาวิเคราะห์เพื่อนำข้อมูลมาเปรียบเทียบและปรับปรุง
- 1.4.3 ออกแบบแผนการดำเนินงานวิจัยและขั้นตอนการวิจัย
- 1.4.4 ออกแบบสัดส่วนผสมของคอนกรีต
- 1.4.5 ดำเนินการทำชิ้นงานวิจัย
- 1.4.6 ดำเนินการวิจัยและนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์ เพื่อสร้างสมการการประมาณ
- 1.4.7 วิเคราะห์ค่าที่ศึกษาเพื่อนำมาใช้ในการสรุปลงงานวิจัย
- 1.4.8 สรุปลงการวิจัย

#### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.5.1 ทราบถึงความแตกต่างของค่ากำลังรับแรงอัดและกำลังแรงดึงของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตผสมกับหินในสัดส่วนต่างๆมาเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ กับคอนกรีตธรรมดาที่ใช้หินเป็นวัสดุมวลรวมหยาบที่ Water Cement Ratio ค่าการยุบตัว(Slump) เดียวกัน และขนาดคละในช่วงเดียวกัน

- 1.5.2 ทราบถึงความเป็นไปได้ในการนำคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตมาเป็นวัสดุมวลรวมหยาบไปใช้ โดยดูจากเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่ได้จากการเปรียบเทียบในข้อ 1.6.1 โดยดูความเหมาะสมของ โครงสร้างที่จะนำไปใช้
- 1.5.3 ทราบสมการการประมาณกำลังรับแรงและความหนาแน่นของคอนกรีตรีไซเคิล
- 1.5.4 ทราบค่าคุณสมบัติของมวลรวมรีไซเคิล
- 1.5.5 ทราบคุณสมบัติของคอนกรีตรีไซเคิล
- 1.5.6 สามารถนำเอาสมการการประมาณไปใช้เป็นตัวอย่างหรือต้นแบบเพื่อศึกษาและออกแบบคอนกรีตรีไซเคิลได้

## บทที่ 2

# การทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวสรุปการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องจากการศึกษาวารสารต่างประเทศ วิทยานิพนธ์ และตำราต่างประเทศ ซึ่งมีนักวิจัยได้แนะนำปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับมวลรวมรีไซเคิล คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี รูปร่าง และมาตรฐานการใช้งานต่างๆ ซึ่งจะได้แสดงรายละเอียด ในหัวข้อถัดไป

งานวิจัยในการนำเศษคอนกรีตมาใช้เป็นมวลรวมหยาบในคอนกรีตได้ถูกดำเนินการมาเป็นเวลาหลายปีแล้วทั้งในประเทศไทยและในต่างประเทศ ทั้งนี้เนื่องมาจากความต้องการในการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากเศษขยะในการรื้อถอนโครงสร้างและปัญหาสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะฝุ่นละออง และการทำลายธรรมชาติที่มีความอุดมสมบูรณ์ที่เกิดจากขบวนการม่หิน เนื่องจากว่าปริมาณของเสียจากการก่อสร้างและรื้อถอนในประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นทุก ๆ ปี เนื่องจากมีการก่อสร้างที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มมากขึ้นทุก ๆ ปี ในขณะที่หน่วยงานท้องถิ่น ไม่ได้ให้ความสำคัญในการจัดการกับของเสียจากการก่อสร้างและรื้อถอนเหล่านี้อย่างเหมาะสม ทำให้ ของเสียจากการก่อสร้างและรื้อถอนบางส่วนถูกนำไปแอบทิ้งอย่างผิดกฎหมายตามที่ว่าง มีบางส่วนที่เอกชนนำไปถมที่โดยไม่มีการแยกวัสดุอันตราย วัสดุที่ไม่ควรนำไปถมที่ และวัสดุที่สามารถนำไปรีไซเคิล ได้บางส่วนทิ้งรวมไปกับขยะมูลฝอยชุมชนเพื่อไปฝังกลบ ซึ่งจะทำให้อายุของหลุมฝังกลบลดลง ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและทำให้ใช้ทรัพยากรได้ไม่คุ้มค่า จึงมีงานวิจัยหนึ่งที่ได้มีการศึกษาปริมาณและองค์ประกอบของของเสียจากการก่อสร้างและรื้อถอนอาคารในกรุงเทพมหานคร ซึ่งได้ประเมินจาก 4 กิจกรรมคือ การก่อสร้างอาคารที่อยู่อาศัย การก่อสร้างอาคารที่ไม่ใช่ที่อยู่อาศัย การรื้อถอนอาคารที่อยู่อาศัย และการรื้อถอนอาคารที่ไม่ใช่ที่อยู่อาศัย เป็นต้น

## 2.2 ของเสียจากการก่อสร้าง

### 2.2.1 อาคารที่อยู่อาศัย

จากการคำนวณวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง นายอัตราการผลิตของเสียจากการก่อสร้างมีค่าอยู่ในช่วง 45.28-67.18 กก./ตร.ม. มีค่าเฉลี่ย 56.23 กก./ตร.ม. และมีองค์ประกอบหลักคือ คอนกรีต 74.9-79.4 % อิฐ 12.8-14.4 % เหล็ก 4.0-5.6 % กระเบื้องเซรามิก 2.2-3.0 % และกระเบื้องหลังคา 1.3-1.7% รายละเอียดแสดงในตารางที่ 2.1 และอาหารที่อยู่อาศัยได้รับอนุญาตให้ก่อสร้างในกรุงเทพมหานครปี 2548 มีพื้นที่ 1,675,675 ตร.ม. ดังนั้นของเสียจากการก่อสร้างอาคารที่อยู่อาศัยในกรุงเทพมหานครปี 2548 มีปริมาณประมาณ 94,223.20 ตัน

ตารางที่ 2.1 ของเสียที่ประเมินได้จากการก่อสร้างอาคารที่อยู่อาศัย (บ้าน 2 ชั้น) 332 ตารางเมตร ที่มา: อุษณีย์ อุยะเสถียร และ อัจฉรา อัครวิกุลชัย (พ.ศ.2550) [1]

ประเภทของวัสดุ	ค่าต่ำสุด		ค่าสูงสุด		ค่าเฉลี่ย	
	น้ำหนัก (กก.)	%	น้ำหนัก (กก.)	%	น้ำหนัก (กก.)	%
คอนกรีต	11,932.30	79.38	16,705.22	74.91	14,318.76	76.70
อิฐ	1,922.94	12.79	3,204.90	14.37	2,563.92	13.73
เหล็ก	601.71	4.00	1,242.16	5.57	921.93	4.94
กระเบื้องเซรามิก	338.42	2.25	676.84	3.03	507.63	2.72
กระเบื้องหลังคา	190.50	1.27	381.01	1.71	285.76	1.53
ยิปซัมบอร์ด	40.64	0.27	81.28	0.36	60.96	0.33
ไม้	5.89	0.04	11.79	0.05	8.84	0.05
รวม	15,032.40	100.00	22,303.20	100.00	18,667.80	100.00
อัตราการผลิตของเสีย (กก./ตร.ม.)	45.28		67.18		56.23	

## 2.2.2 อาคารที่ไม่เป็นที่อยู่อาศัย

จากการคำนวณวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างอาคาร นายอัครการผลิตของเสียจากการก่อสร้างมีค่าอยู่ในช่วง 27.75-33.17 กก./ตร.ม. มีค่าเฉลี่ย 30.47 กก./ตร.ม. และมีองค์ประกอบหลักคือ คอนกรีต 53.1-60.8 % เหล็ก 19.7-23.8% อิฐมวลเบา 10.0-13.9 % และไม้ 6.8-8.1 % รายละเอียดแสดงในตารางที่ 2.2 และอาหารที่ไม่ใช่อุบัติเหตุที่ได้รับอนุญาตให้ก่อสร้างในกรุงเทพมหานคร ปี 2548 มีพื้นที่ 1,135,161 ตร.ม. ดังนั้นของเสียจากการก่อสร้างอาคารที่ไม่ใช่ที่อยู่อาศัยในกรุงเทพมหานคร ปี 2548 มีปริมาณประมาณ 34,588.35 ตัน

**ตารางที่ 2.2** ของเสียที่ประเมินได้จากการก่อสร้างอาคารที่ไม่เป็นอยู่อาศัย (สถาบันการศึกษา)

20,050 ตารางเมตร ที่มา: อุษณีย์ อุยะเสถียร และ อัจฉรา อัครวุฒิจุลชัย (พ.ศ.2550)

ประเภทของวัสดุ	ค่าต่ำสุด		ค่าสูงสุด		ค่าเฉลี่ย	
	น้ำหนัก (กก.)	%	น้ำหนัก (กก.)	%	น้ำหนัก (กก.)	%
คอนกรีต	338,382.00	60.82	353,391.00	53.11	345,886.00	56.62
เหล็ก	109,398.00	19.66	158,583.00	23.83	133,990.00	21.94
อิฐมวลเบา	55,612.00	10.00	92,686.00	13.93	74,149.00	12.14
ไม้	45,013.00	8.09	45,026.00	6.77	45,020.00	7.37
หินแกรนิต	4,493.00	0.81	8,987.00	1.35	6.77	1.10
กระเบื้องเซรามิก	1,440.00	0.26	2,729.00	0.41	2,084.00	0.34
ยิบซั่มบอร์ด	987.00	0.18	1,975.00	0.30	1,481.00	0.24
กระเบื้องยาง	581.00	0.10	1,162.00	0.17	872.00	0.14
ไฟเบอร์ซีเมนต์และอลูมิเนียม	424.00	0.08	848.00	0.13	636.00	0.11
รวม	556,330	100	665,387	100	610,858	100
อัตราการผลิตของเสีย (กก./ตร.ม.)	27.75		33.17		30.47	

## 2.3 ของเสียจากการรื้อถอน

### 2.3.1 อาคารที่อยู่อาศัย

จากการคำนวณวัสดุหลักที่ใช้ในการก่อสร้างอาคาร นายอัคราการผลิตของเสียจากการรื้อถอน 984.66 กก./ตร.ม. มีองค์ประกอบหลักคือ คอนกรีต 73.0% อิฐ 19.6% เหล็ก 3.2% กระเบื้องเซรามิก 2.1% และกระเบื้องหลังคา 1.2% รายละเอียดแสดงในตารางที่ 2.3 สำหรับพื้นที่อาคารที่รื้อถอนในกรุงเทพมหานครไม่สามารถหาข้อมูลได้ จึงกำหนดให้พื้นที่ของอาคารที่อยู่อาศัยในกรุงเทพฯ ที่รื้อถอนมีค่า 10 % ของพื้นที่อาคารที่อยู่อาศัยที่ขออนุญาตก่อสร้าง เป็นค่าที่ใช้ในการประเมินในการศึกษานี้ ดังนั้นในปี 2548 จึงมีพื้นที่อาคารที่อยู่อาศัยที่ทำการรื้อถอน 167,567 ตร.ม. ซึ่งคำนวณของเสียจากการรื้อถอนได้ประมาณ 164,996.52 ตัน

ตารางที่ 2.3 ของเสียที่ประเมินได้จากการรื้อถอนอาคารที่อยู่อาศัย (บ้าน 2 ชั้น) ที่มา: อุษณีย์ อุยะเสถียร และ อัจฉรา อัครวุฒิกุลชัย (พ.ศ.2550)

ประเภทวัสดุ	น้ำหนัก (กก.)	%
คอนกรีต	238,645.90	73.01
อิฐ	64,098.00	19.61
เหล็ก	10,484.15	3.21
กระเบื้องเซรามิก	6,768.36	2.07
กระเบื้องหลังคา	3,810.10	1.17
ยิปซัมบอร์ด	2,709.33	0.83
ไม้	392.91	0.12
รวม	326,908.74	100.00
อัตรากาการผลิตของเสีย (กก./ตร.ม.)	984.66	

### 2.3.2 อาคารที่ไม่ใช่ที่อยู่อาศัย

จากการคำนวณวัสดุหลักที่ใช้ในการก่อสร้างอาคาร ได้อัตราการผลิตของเสียจากการรื้อถอน 1,803.94 กก./ตร.ม. มีองค์ประกอบหลักคือ คอนกรีต 88.6% อิฐมวลเบา 5.1% เหล็ก 4.9% และ หินแกรนิต 0.8% รายละเอียดแสดงในตารางที่ 2.4 สำหรับพื้นที่อาคารที่รื้อถอนในกรุงเทพมหานคร ไม่สามารถหาข้อมูลได้ จึงกำหนดให้พื้นที่ของอาคารที่ไม่ใช่ที่อยู่อาศัยในกรุงเทพมหานครที่รื้อถอนมี ค่า 10% ของพื้นที่อาคารที่ไม่ใช่ที่อยู่อาศัยที่ขออนุญาตก่อสร้าง เป็นค่าที่ใช้ในการประเมินในการศึกษาครั้งนี้ ดังนั้นในปี 2548 จึงมีพื้นที่อาคารที่ไม่ใช่ที่อยู่อาศัยที่ทำการรื้อถอน 113,516 ตร.ม. ซึ่งคำนวณของเสียจากการรื้อถอนได้ประมาณ 204,776.05 ตัน

**ตารางที่ 2.4** ของเสียที่ประเมินได้จากการรื้อถอนอาคารที่ไม่ใช่ที่อยู่อาศัย (สถาบันการศึกษา) 20,050 ตารางเมตร ที่มา: อุษณีย์ อุยะเสถียร และ อัจฉรา อัครวิกุลชัย (พ.ศ.2550)

ประเภทวัสดุ	น้ำหนัก (กก.)	%
คอนกรีต	32,032,427.00	88.56
อิฐมวลเบา	1,853,730.00	5.13
เหล็ก	1,767,919.00	4.89
หินแกรนิต	299,544.00	0.83
กระเบื้องเซรามิก	81,019.00	0.22
ยิปซัมบอร์ด	65,846.00	0.18
กระเบื้องยาง	38,695.00	0.11
ไฟเบอร์ซีเมนต์	20,827.00	0.06
ไม้และอลูมิเนียม	7,455.00	0.02
รวม	36,169,166.00	100.00
อัตราการผลิตของเสีย (กก./ตร.ม)	1,803.94	

จึงสรุปได้ว่าอัตราการผลิตของเสียจากการก่อสร้างอาคารที่อยู่อาศัยและอาคารที่ไม่ใช่ที่อยู่อาศัยที่ประเมินได้จากการศึกษานี้มีค่า 56.23 กิโลกรัมต่อตารางเมตร และ 30.47 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ สำหรับอัตราการผลิตของเสียทั้งหมดจากการรื้อถอนอาคารที่อยู่อาศัยและอาคารที่ไม่ใช่ที่อยู่อาศัยที่ ประเมินได้มีค่า 984.66 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ตามตารางที่ 2.3 และ 1,803.44 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ตามตารางที่ 2.4 ตามลำดับ ซึ่งที่สังเกตเห็นว่าจากตารางทั้ง 4 ตารางว่า มีปริมาณคอนกรีตจำนวนมากมายที่เป็นของเสีย ข้าพเจ้าจึงมีความคิดที่จะศึกษาการนำ เศษคอนกรีตเหล่านี้มาใช้เคลือบ และได้มีการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องดังนี้

## 2.4 วรรณกรรมปริทัศน์และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.4.1 การวิจัยการนำเศษคอนกรีตมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมหยาบผสมคอนกรีตแทนหินย้อย

นายศักดิ์ชัย วงษ์ชัย (2553) [2] การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้นำเศษคอนกรีต 2 ชนิดมาใช้ คือ ใช้เศษคอนกรีตที่มีความต้านแรงอัดทั่วไป กับเศษคอนกรีตที่ตัดเฉพาะความต้านแรงอัดไม่น้อยกว่า 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าความต้านแรงอัดที่ออกแบบให้เท่ากัน ว่าความต้านแรงอัดที่ ทดสอบออกมาได้จริงมีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการออกแบบ ส่วนผสมคอนกรีต ที่มีความต้านแรงอัด 150, 210, 240, 280 และ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมความสามารถของแท่งตัวอย่างคอนกรีต ที่ใช้เศษคอนกรีตเป็นมวลรวมหยาบ ว่าจะสามารถต้านแรงอัดตามที่กำหนดไว้หรือไม่ เพื่อประกอบการตัดสินใจในการเลือกความต้านแรงอัดที่ใช้เศษคอนกรีตเป็นมวลรวมหยาบในอนาคต จากการศึกษาวิจัยนำเศษคอนกรีตมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมหยาบผสมคอนกรีตแทนหินย้อย ผลของการทดสอบตามส่วนผสมในขนาดค่าความต้านแรงอัด ต่าง ๆ กัน การนำเศษคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดต่าง ๆ กันมาใช้ เป็นส่วนผสมแทนหินย้อยนั้น สามารถ สรุปผลสำเร็จของงานที่จะนำไปใช้งานได้จริงเป็น 2 ส่วน ดังนี้

(1) เศษคอนกรีตทั่วไปที่ไม่ได้คัดแยก ค่าความต้านแรงอัดสามารถใช้เป็นมวลรวมหยาบแทนหินย้อยได้แต่ต้องเป็นคอนกรีตที่มีความต้านแรงอัดไม่สูงมากนักคือไม่เกิน 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งสามารถใช้กับคอนกรีตที่ใช้ก่อสร้างบ้านพักอาศัย , รั้ว และถนนภายในอาคาร เป็นต้น

(2) เศษคอนกรีตที่ตัดเฉพาะที่มีความต้านทานแรงอัดไม่น้อยกว่า 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สามารถใช้เป็นมวลรวมหยาบแทนหินย้อย ในการผสมคอนกรีตได้ถึงความต้านแรงอัด 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งสามารถใช้กับคอนกรีตในงานก่อสร้างโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น อาคารสูง, ถนน, สะพาน และคอนกรีตอัดแรง เป็นต้น แต่ต้องมีการศึกษาวิจัยคุณสมบัติ ของคอนกรีตด้านอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio)

#### 2.4.2 การใช้เศษโฟมมาทำวัสดุผสมหยาบมวลเบาในงานคอนกรีต

สมบุรณ์ คงสมศักดิ์ศิริ (2549) [3] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปัญหาขยะโฟมที่ไม่สามารถย่อยสลายเองได้ตามธรรมชาติ โดยนำโฟมที่เหลือใช้มาย่อยให้ได้ขนาดตามต้องการ ผสมกับปูนซีเมนต์ขึ้นรูปเป็นวัสดุผสม โฟมซีเมนต์ ทั้งนี้จะคำนึงถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีตด้านเชิงกล แบ่งการทดสอบเป็น 2 ส่วน คือ การหาความเหมาะสมในการนำโฟมมาเป็นมวลรวมทดแทนหิน อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้ 0.4, 0.5, 0.6 สัดส่วนผสมซีเมนต์:ทราย:โฟม คือ 1:0.5:3, 1:0.5:4, 1:0.5:5 โดยปริมาตร ทำการ ทดสอบกำลังอัดมอร์ต้าที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ เลือกสัดส่วนผสมเพื่อทำคอนกรีต ใช้ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ คือ 0.7 อัตราส่วนซีเมนต์:ทราย:โฟม คือ 1:2.8:6.3, 1:2.2:5.3 โดยปริมาตร และทดสอบหาลำดับต้านทานแรงอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน จากการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่อัตราส่วนผสม 1:2.8:6.3 และ 1:2.2:5.3 โดยปริมาตร ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.7 พบว่าผลการ ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อัตราส่วน 1:2.2:5.3 โดยปริมาตร ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.7 อายุ การบ่มที่ 28 วัน ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดคือ 6.41 เมกะปาสคาล และผลการทดสอบกำลังดัดของ คอนกรีต มีค่าโมดูลัสการแตกหัก เท่ากับ 1.42 เมกะปาสคาล จากงานวิจัยครั้งนี้พบว่าสามารถ นำโฟมซีเมนต์ไปใช้ผสมคอนกรีตในงานโครงสร้างได้เนื่องจากมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้านการรับ กำลังและความเป็นไปได้ในการนำโฟมที่เหลือใช้หรือไม่ได้ใช้แล้วกลับมาใช้ประโยชน์อีกครั้งหนึ่ง

#### 2.4.3 RCA จากส่วนที่เหลือของเสาเข็มคอนกรีต

เทอดศักดิ์ สายสุทธิ (2555) [4] งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมด้วยมวลรวมหยาบคอนกรีตที่นำกลับมาใช้ใหม่ (RCA) หรือมวลรวมหยาบรีไซเคิลจากส่วนที่เหลือของเสาเข็มคอนกรีต คอนกรีต ใหม่ที่ได้นี้จะถูกเรียกว่า “คอนกรีตรีไซเคิล ” หลักการก็คือ โดยใช้ RCA แทนที่มวลรวมหยาบ ธรรมชาติ (NCA) ในอัตราส่วนร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนักตามลำดับเพื่อหาค่าการรับ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตปกติหรือคอนกรีตธรรมชาติ (NC) และคอนกรีตรีไซเคิล (RC) ตาม มาตรฐาน BS 1881 ซึ่งใช้แบบหล่อเหล็กรูปลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 เซนติเมตร จำนวน 180 ตัวอย่าง และเพื่อหาค่าการรับกำลังดัดประลัยของ NC และ RC ตามมาตรฐาน ASTM C78 ซึ่งใช้ แบบหล่อคานขนาด 15x15x60 เซนติเมตร จำนวน 180 ตัวอย่าง โดยใช้ค่ากำลังอัดประลัยที่ออกแบบไว้เท่ากับ 210, 280 และ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากนั้นทำการบ่มตัวอย่างในน้ำ ที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วันตามลำดับ รวมตัวอย่างทั้งสิ้นจำนวน 360 ตัวอย่าง จากการวิจัยพบว่า “ คอนกรีตรีไซเคิล สำหรับค่ากำลังอัดประลัยที่ออกแบบไว้เท่ากับ 210, 280 และ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรโดยใช้ RCA แทนที่ NCA ในอัตราส่วนร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 ตามลำดับ เมื่ออายุการบ่ม 28 วัน จะมีค่า กำลังอัดประลัยลดลงโดยเฉลี่ยร้อยละ 3.75, 17.02, 19.37 และ 30.40 ตามลำดับ และค่ากำลังดัดประลัยลดลงโดยเฉลี่ยร้อยละ 7.00, 16.54, 18.67, และ 32.48 ตามลำดับ ” หรือกล่าวโดยสรุปว่า “คอนกรีตรีไซเคิล จะมีค่ากำลังอัดประลัยและกำลังดัดประลัยลดลงโดยเฉลี่ยร้อยละ 30 และ 33 ตามลำดับเมื่ออายุการบ่ม 28 วัน” คอนกรีตรีไซเคิลจะมีความเหมาะสมกับการใช้งานลักษณะต่างๆ เช่น งานถนนภายในโครงการ งานพื้นทางเท้า งานโครงสร้างอาคารชั่วคราวหรือโครงสร้างอาคารที่พักอาศัย เป็นต้นในอนาคตน่าจะมีการวิจัยต่อยอดสำหรับคอนกรีตรีไซเคิลนี้เช่น การใช้เถ้าลอย เถ้าชีวมวล ซิลิกาฟูม กากแร่หรือสารเคมีผสมเพิ่ม เป็นต้น เพื่อเพิ่มค่ากำลังอัดประลัย ค่ากำลังดัดประลัย ค่าความคงทนและคุณสมบัติทางวิศวกรรม

อื่นๆ เพราะว่า RCA นอกจากจะช่วยลดความสูญเสียทาง เศรษฐกิจแล้ว ยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เป็นการพัฒนาการใช้วัสดุก่อสร้างอย่างคุ้มค่า ยั่งยืนและบูรณาการ เนื่องจากมวลรวมหยาบรีไซเคิล สามารถนำมาใช้แทนมวลรวมหยาบธรรมชาติได้และถ้าล่อยหรือถ้าชีวมวลก็เป็นวัสดุที่เหลือใช้จาก กระบวนการผลิต ที่สามารถนำมาใช้เพิ่มกำลังคอนกรีตได้ เช่นกัน

#### 2.4.4 การใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดเพื่อปรับปรุงกำลังอัด การซึมผ่านน้ำ และ ความต้านทาน คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า

รัฐพล สมณา และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2554) [5] บทความนี้มุ่งหวังที่จะนำเถ้าขานอ้อยซึ่งเป็นของที่เหลือทิ้งจากโรงงานผลิตน้ำตาลมา ใช้เป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านการรับกำลังอัด การซึมผ่านน้ำ และการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบที่ได้จากการย่อยเศษ คอนกรีตเก่า โดยออกแบบกำลังอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีต ควบคุมเท่ากับ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อย เศษคอนกรีตเก่าแทน หินปูนย่อยเพื่อผลิตคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการ ย่อยเศษคอนกรีตเก่า และใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบ จากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าในอัตราร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำการทดสอบหาค่ากำลังอัด ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ และค่าความลึกคลอไรด์แทรกซึมของคอนกรีต ผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนที่ดีที่สุดที่ใช้ การใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อย เศษคอนกรีตเก่าเพื่อให้ได้ทั้งกำลังอัดในช่วงอายุปลาย ความ ทึบน้ำ และความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ที่สูง คือร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยการใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถช่วยให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน น้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่ามีค่าต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน น้ำของคอนกรีตควบคุมประมาณ 2 ถึง 3 เท่า และต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษ คอนกรีตเก่าที่ไม่ใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดประมาณ 3 ถึง 5 เท่า นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่าให้สูงขึ้นได้อย่างชัดเจนโดยความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์จะสูงขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าขานอ้อยบดละเอียดที่เพิ่มขึ้น

#### 2.4.5 ผลกระทบจากการใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดต่อกำลังอัดและความทนทานของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต

ปกป้อง รัตนชู, กฤษฎา เปรมฤทัย, วีรชาติ ตั้งจิรภัทรและชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2558) [6] บทความนี้มุ่งศึกษาการนำเถ้าถ่านหินซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อำเภอมะแมะ จังหวัดลำปาง มาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต โดยหล่อคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.48 ควบคุมค่าการยุบตัวให้อยู่ระหว่าง 5 ถึง 10 ซม. ใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานจากนั้นแบ่ง คอนกรีตออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 คือคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ กลุ่มที่ 2 คือคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำและมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต และกลุ่มที่ 3 คือ คอนกรีตที่ใช้มวลรวม

ละเอียดและมวลรวมหายาจากเศษคอนกรีต ทำการทดสอบกำลังอัด ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต การแทรกซึมของไอออนคลอไรด์ และการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

ผลการทดสอบพบว่าการใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน สามารถช่วยพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตให้สูงขึ้น โดยเฉพาะคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหายาจากการย่อยเศษคอนกรีตสามารถพัฒนากำลังอัดให้มีค่าเทียบเท่าคอนกรีตควบคุมได้ที่อายุ 28 วัน เถ้าถ่านหินบดละเอียดสามารถช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตให้มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดประมาณ 2 เท่า และต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตควบคุมประมาณ 1.5 เท่า นอกจากนี้การใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดเป็นวัสดุประสานส่งผลให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมของไอออนคลอไรด์ดีขึ้นเห็นได้ชัด ผลการทดลองยังได้แนะนำอัตราส่วนเถ้าถ่านหินบดละเอียดที่เหมาะสมที่ให้คุณสมบัติที่ดีทั้งด้านกำลังอัด การที่บ้น้ำ และความต้านทานการแทรกซึมของไอออนคลอไรด์ของคอนกรีต คือร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่วนการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตมีค่าลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าถ่านหินบดละเอียดที่เพิ่มขึ้น

#### 2.4.6 การศึกษาคุณสมบัติของปูนฉาบที่ผสมมวลรวมละเอียดจากเศษคอนกรีตเก่า

สถิตพงษ์ วงศ์สง่า (2560) [7] คอนกรีตเป็นวัสดุโครงสร้างเมื่อชำรุดหรือต้องการเปลี่ยนลักษณะการใช้งานจะมีการรื้อถอน เศษคอนกรีตเก่าจากการรื้อถอนจะไม่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจและนำไปกำจัดทิ้ง งานวิจัยนี้จึงนำเศษคอนกรีตเก่ามาบดละเอียดแทนที่ทรายในมอร์ตาร์ปูนฉาบ โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาปริมาณของคอนกรีตเก่าแทนที่มวลรวมละเอียดในงานปูนฉาบ และศึกษาคุณสมบัติของมอร์ตาร์ปูนฉาบจากคอนกรีตเก่าบดละเอียดที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันแทนที่มวลรวมละเอียด โดยใช้คอนกรีตเก่าปรับปรุงคุณภาพด้วยการบดละเอียดให้มีขนาดเล็ก อนุภาคเฉลี่ย 0.149 - 0.297 มม. ขนาดกลาง อนุภาคเฉลี่ย 0.297 - 0.595 มม. และขนาดใหญ่ อนุภาคเฉลี่ย 0.595 - 1.190 มม. สำหรับแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และทำการทดสอบปริมาณความชื้น ความหนาแน่น ปริมาณอากาศ กำลังรับแรงอัดและการหดตัวแห้ง

ผลการศึกษา พบว่าการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเศษคอนกรีตเก่า มีผลทำให้มอร์ตาร์ปูนฉาบมีความต้องการน้ำ ปริมาณอากาศ และความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น และเมื่อแทนที่คอนกรีตเก่าบดละเอียดทุกขนาดอนุภาคในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้มอร์ตาร์ปูนฉาบมีการหดตัวน้อยลงและคอนกรีตเก่าบดละเอียดที่มีอนุภาคเล็ก (S) สามารถช่วยพัฒนากำลังอัดได้ดีที่สุด โดยมีอัตราการแทนที่มวลรวมละเอียดเท่ากับที่ร้อยละ 20 - 30 ซึ่งเมื่อเทียบกับมาตรฐานโดยอ้างอิงการใช้มาตรฐานปูนก่อ ASTM C270 จัดอยู่ในมาตรฐานปูนก่อประเภท S

#### 2.4.7 การศึกษาคุณสมบัติทั่วไปของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากคอนกรีตเก่าที่ถูกทำลายที่มีกำลังอัดแตกต่างกัน

**ประจักษ์ เข็มบุบผา (2548) [8]** มวลรวมหยาบจากการย่อยคอนกรีตเก่าที่ผ่านการทดสอบจากห้องทดสอบ ที่ออกแบบกำลังอัด 200, 400 และ  $600 \pm 10\%$  กก./ $\text{cm}^2$  ของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ แล้วคัดเอาเฉพาะส่วนที่ค้ำตะแกรง  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{8}$  นิ้ว ตะแกรงเบอร์ 4 มาผสมกันของแต่ละกำลังอัดของส่วนที่ค้ำตะแกรง และมวลรวมหยาบแต่ละกำลังอัดของคอนกรีต (200 + 400 + 600) มาผสมกันตามสัดส่วนที่ค้ำตะแกรงแล้วนำไปทดสอบคุณสมบัติและนำไปผสมคอนกรีตเพื่อทดสอบกำลังอัดและกำลังดึงที่อายุ 7, 14, 28 และ 56 วัน กำหนดค่ายุบตัว 8-10 ซม. ผลการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวมหยาบ พบว่าความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักต่ำกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติ สูตรอัตราการดูดซึมน้ำและความต้านทานการสึกกร่อนสูงกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติ เนื่องจากปริมาณการยึดเกาะของซีเมนต์เพสต์ติดกับผิวหิน การทดสอบกำลังอัดและกำลังดึง ถ้าใช้มวลรวมหยาบแทนที่ทั้งหมดและเพิ่มมวลรวมหยาบร้อยละ 25-50 ของน้ำหนักมวลรวมหยาบปกติ พบว่ากำลังอัดและกำลังดึงจะต่ำลงตามปริมาณการเพิ่มมวลรวมหยาบ ถ้าลดมวลรวมหยาบร้อยละ 25-50 และเพิ่มปูนซีเมนต์ร้อยละ 25-50 โดยน้ำหนักกำลังอัดและกำลังดึงมีค่าใกล้เคียงและสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ การเพิ่มปูนซีเมนต์จะทำให้ผลดีกว่าการลดมวลรวมหยาบแต่กำลังจะไม่สูงมาก เนื่องจากถูกจำกัดด้วยชนิดของมวลรวมหยาบและอัตราส่วนผสมที่ออกแบบไว้

#### 2.4.8 การศึกษากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตจากถนนเก่าเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ

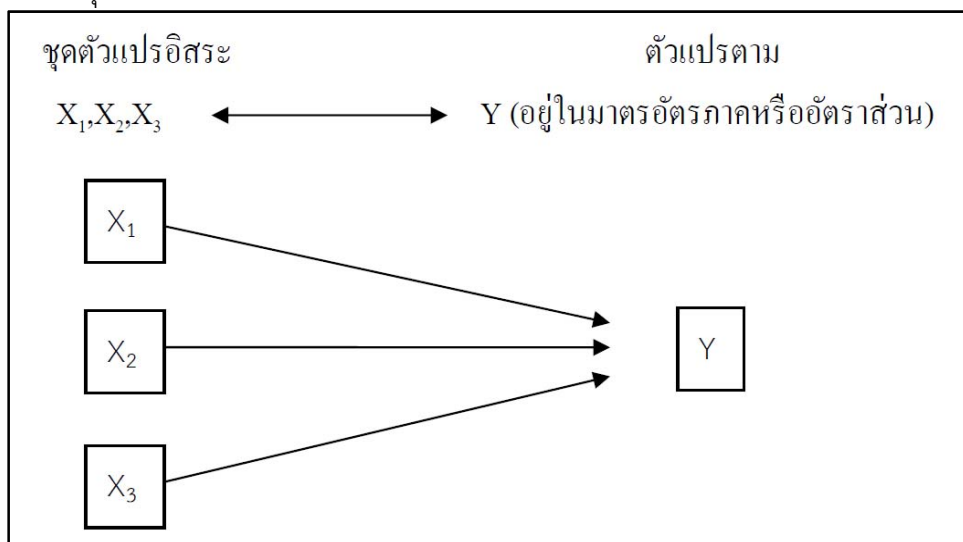
**พิเชฐ ชื่นเย็น (2547) [9]** ปัญหาพิเศษฉบับนี้เป็นการศึกษากำลังอัดประลัยของคอนกรีตด้วยการนำคอนกรีตจากถนนเก่ามาใช้แทนวัสดุมวลรวมหยาบ โดยนำผิวถนนคอนกรีตย่อยสลายให้มีขนาดเล็กกลง และทำการศึกษาผลกระทบของขนาดมวลรวมหยาบ โดยใช้ขนาดโตสุด 2 ขนาด คือ 2” และ 1” ที่อัตราส่วนผสม ปูนซีเมนต์ : ทราย : มวลรวมหยาบ เท่ากับ 1 : 2 : 4, 1 : 3 : 5 และ 1 : 2 : 3 ทั้งนี้ได้เปรียบเทียบกับมวลรวมหยาบปกติ โดยใช้ตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ เพื่อศึกษากำลังอัดประลัยของคอนกรีต ด้วยการหล่อและบ่มในอากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากถอดแบบแล้วนำไปบ่มในน้ำจนมีอายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังอัดประลัยของการใช้หินขนาด 1” ในการผสมคอนกรีต มีค่าสูงกว่าการใช้วัสดุคอนกรีตเก่าแทนมวลรวมหยาบ 8 - 39 เปอร์เซ็นต์ ในทุกอัตราส่วนผสม และค่ากำลังอัดประลัยของการใช้หินขนาด 2” ในการผสมคอนกรีต มีค่าสูงกว่าการใช้วัสดุคอนกรีตเก่าแทนมวลรวมหยาบ 16 - 31 เปอร์เซ็นต์ ในทุกอัตราส่วนผสม และที่อัตราส่วนผสม 1 : 2 : 3 ได้ค่ากำลังอัดประลัยสูงกว่าอัตราส่วนผสม 1 : 2 : 4 และ 1 : 3 : 5 ตามลำดับ

## 2.4.9 การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคาดคะเนหาสัดส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีตมวลเบาระบบ CLC

ณัฐวุฒิ เตงศิริธรรม (2558) [10] การผลิตคอนกรีตมวลเบาระบบ CLC ในอุตสาหกรรมมีต้นทุนที่สูง บริษัทรับเหมาขนาดเล็กรวมถึงประชาชนทั่วไปมักจะเลือกใช้คอนกรีตบล็อกหรืออิฐมอญที่มีราคาถูกกว่าในการก่อสร้างผนังดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC ด้วยการหาสัดส่วนที่เหมาะสมจากปัจจัยหลัก 3 อย่างอันได้แก่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ อยู่ในช่วง 0.4 ถึง 0.65 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์อยู่ในช่วง 1.0 ถึง 2.5 และปริมาณโฟมอยู่ในช่วง 30 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จากนั้นทำการทดลองและสร้างสมการทำนายหากำลังรับแรงอัดความหนาแน่นในสภาพแห้งและอัตราการดูดซึมน้ำ เพื่อวิเคราะห์และแก้ไขระบบสมการหาสัดส่วนที่เหมาะสม ภายใต้เงื่อนไขที่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมไทย มอก 2601-2556 และได้ราคาต่ำสุด ผลจากการศึกษาพบว่าสัดส่วนที่เหมาะสมในช่วงความหนาแน่น 500 - 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรคือ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.65 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1.18 และปริมาณโฟมเท่ากับ 53.4 2 เปอร์เซ็นต์ สัดส่วนที่เหมาะสมในช่วงความหนาแน่น 801 ถึง 1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรคืออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.65 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2.50 และปริมาณโฟมเท่ากับ 44.08% และสัดส่วนที่เหมาะสมในช่วงความหนาแน่น 1201 ถึง 1600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรคืออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.65 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2.5 และปริมาณโฟมเท่ากับ 35.41 เปอร์เซ็นต์

## 2.4.10 การทำนายผลการทดลองด้วยวิธีถดถอยพหุคูณ (Multiple regression Analysis)

สุวิมล ทิรกานันท์ (2553) [11] การวิเคราะห์ด้วยวิธีถดถอยพหุคูณ เป็นเทคนิคทางสถิติที่อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรมาสร้างสมการทำนาย โดยเมื่อทราบค่าตัวแปรอิสระก็สามารถทำนายตัวแปรตามได้ สำหรับในงานวิจัยพบว่าตัวแปรตามไม่ได้เป็นผลมาจากตัวแปรอิสระตัวใดตัวหนึ่งเท่านั้นแต่กลับมีความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระกลุ่มหนึ่ง ดังนั้นในการทำนายจึงนำผลของตัวแปรอิสระหลายตัวแปรหรือกลุ่มของตัวแปรที่มีความสัมพันธ์ต่อตัวแปรตามมารวมกันสร้างสมการทำนายเพื่อให้ได้ข้อสรุปที่มีความแม่นยำมากขึ้น



รูปที่ 2.1 โมเดลความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณ

ในการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณแบบเชิงเส้นจะช่วยให้สมการพยากรณ์ในรูปแบบคะแนนดิบ (บุญชม ศรีสะอาด. 2541 :153) [12]

$$Y = a_0 + \sum a_i x_i \quad (2.1)$$

เมื่อ	Y	คือ	ตัวแปรตาม
	$a_0$	คือ	ค่าคงที่
	$a_i$	คือ	สัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระ โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ตัวแปร
	$x_i$	คือ	ตัวแปรอิสระ โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ตัวแปร

Simon, M.J. et.al. (1997) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการหาส่วนผสมคอนกรีตที่เหมาะสมด้วยวิธีการถดถอยพหุคูณแบบเชิงเส้น โดยใช้ปัจจัย ปริมาณน้ำ ซีเมนต์ไมโครซิลิกา หิน ทรายและสารผสมเพิ่ม เพื่อทำนายค่าตัวแปรตามหรือกำลังรับแรงอัดที่อายุ 1 วัน สามารถเขียนสมการในรูปแบบคะแนนมาตรฐานได้ดังสมการที่ (2.2)

$$Y_1 = -45.22x_1 + 89.15x_2 - 3.81x_3 + 1972x_4 - 38.36x_5 + 87.19x_6$$

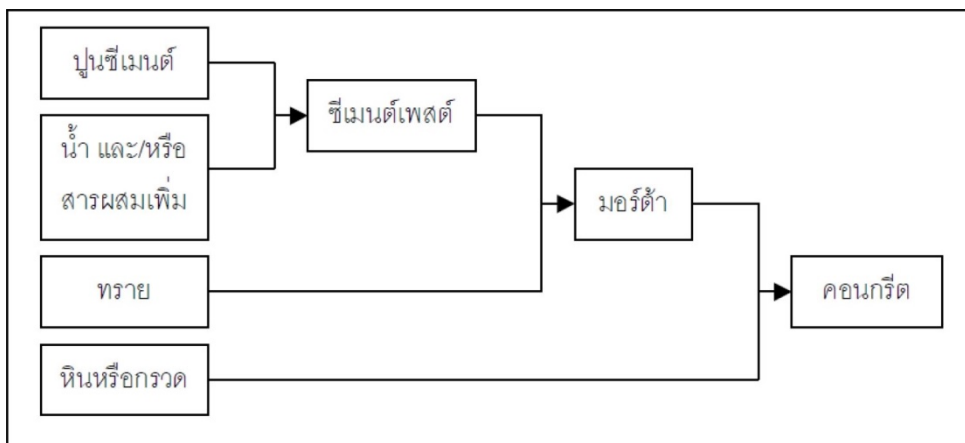
เมื่อ	X1	คือปริมาณน้ำ	(กิโลกรัม)
	X2	คือปริมาณปูนซีเมนต์	(กิโลกรัม)
	X3	คือปริมาณไมโครซิลิกา	(กิโลกรัม)
	X4	คือปริมาณสารผสมเพิ่ม	(ลิตร)
	X5	คือปริมาณหิน	(กิโลกรัม)
	X6	คือปริมาณทราย	(กิโลกรัม)

#### 2.4.11 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเรื่องคอนกรีต

##### 2.4.11.1 คอนกรีต

คอนกรีตได้จัดให้เป็นวัสดุที่ใช้สำหรับงานก่อสร้างอย่างแพร่หลายกันมานานหลายสิบ ปีแล้ว อันเป็นผลมาจากคุณลักษณะที่เด่น ๆ คือ คอนกรีตสามารถออกแบบหล่อหลอมเป็นโครงสร้าง หรือเป็นสิ่งก่อสร้างได้ทุกรูปลักษณะตามต้องการ คอนกรีตมีคุณสมบัติในการรับแรงอัดได้ดี และมี ความทนทานสูง ทั้งยังสามารถเลือกใช้ส่วนผสมให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ กัน เพื่อให้เหมาะ กันงานก่อสร้างแต่ละชนิดได้ นอกจากนี้คอนกรีตยังสามารถนำ มาใช้ร่วมกันวัสดุอื่น เช่น เหล็กจะสามารถเพิ่มขีดความสามารถในการรับแรงต่าง ๆ ได้ดียิ่งขึ้นกว่าเดิม

คอนกรีต เป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้จากการผสม ปูนซีเมนต์ หิน ทราย และน้ำ เข้าด้วยกัน ในขณะที่คอนกรีตยังเหลวอยู่ จะถูกเทลงในแบบหล่อเพื่อให้ได้รูปทรงตามที่ต้องการ เช่น เสา คาน พื้น ผนัง เป็นต้น เมื่อคอนกรีตเริ่มก่อตัว ซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้คอนกรีตจะแข็งตัวขึ้นเรื่อย ๆ สำหรับขั้นตอนการผสมคอนกรีต จะมีแสดงอยู่ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การผสมส่วนผสมคอนกรีต

#### 2.4.11.2 ประเภทของคอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้ในงานโครงสร้าง สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่

(1) คอนกรีตล้าวน เป็นคอนกรีตอย่างเดียวล้าวน ๆ ไม่มีวัสดุอื่นมาเสริม จะใช้กับโครงสร้างรับแรงอัด

(2) คอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นคอนกรีตที่มีเหล็กเสริมร่วมกับคอนกรีต โดยหล่ออยู่ใน เนื้อคอนกรีต ใช้กับโครงสร้างที่รับแรงดึง และแรงอัด

(3) คอนกรีตอัดแรง เป็นคอนกรีตที่อัดแรงก่อนใช้งาน โดยการดึงเหล็กที่ทน แรงดึงสูงให้ยืดออก และตัดเหล็ก ปล่อยให้เหล็กพยายามหดตัวกลับจากจุดที่ยืดเป็นการอัดแรงให้กัน คอนกรีตคอนกรีตอัดแรงสามารถรับแรงได้ดีกว่าเพราะใช้ประโยชน์จากหน้าตัดคอนกรีต ได้ดีกว่า คอนกรีตเสริมเหล็ก

#### 2.4.11.3 องค์ประกอบของคอนกรีต

คอนกรีต คือ วัสดุที่ได้จากผสมกันของปูนซีเมนต์ ทราย หิน น้ำ และสารผสมเพิ่ม ในอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณลักษณะตามที่ต้องการ หากจะพิจารณาคอนกรีตตามลักษณะเนื้อคอนกรีต จะสามารถแบ่งคอนกรีตออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ซีเมนต์เพสต์ (Cement paste) และวัสดุมวลรวม (Aggregate)

##### (1) ซีเมนต์เพสต์ (Cement paste)

- ส่วนประกอบ และหน้าที่ของซีเมนต์เพสต์

ซีเมนต์เพสต์ จะประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ น้ำ และอากาศ โดยทั่วไปในเนื้อ คอนกรีตจะมีปริมาณของซีเมนต์เพสต์ประมาณ 23 - 40 % โดยปริมาตร ในซีเมนต์เพสต์จะมี ปริมาตรของปูนซีเมนต์ 3 - 15 % น้ำ 14 - 21 % และปริมาตรของอากาศที่แทรกอยู่ในช่องว่าง ประมาณ 8 % หน้าที่หลักๆ ของซีเมนต์เพสต์ คือ เป็นตัวยึดวัสดุมวลรวมเข้าด้วยกัน

- คุณภาพของซีเมนต์เพสต์

คุณภาพของซีเมนต์ส่วนใหญ่ดูที่ กำลัง (Strength) เป็นหลัก กำลังของซีเมนต์เพสต์จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของน้ำ ต่อซีเมนต์ (Water/Cement ratio) โดยกฎ อัตราส่วนน้ำ ต่อ ซีเมนต์มาก (น้ำมากปูนน้อย) กำลังของซีเมนต์เพสต์ก็จะน้อย ในทางกลับกันถ้าอัตราส่วนน้ำต่อ ซีเมนต์น้อย (น้ำน้อย)

ปูนมาก) กำลังของซีเมนต์เพสต์จะมากตาม ฉะนั้น การควบคุมปริมาณน้ำที่ใช้ใน การผสมคอนกรีตจึง เป็นเรื่องสำคัญที่สุด การเพิ่มน้ำเพื่อให้คอนกรีตเหลวขึ้น ทำงานได้ง่ายขึ้น โดยไม่เพิ่มปูนซีเมนต์ด้วย จะทำ ให้คอนกรีตที่ได้มีคุณภาพต่ำกว่าที่ต้องการ

- ปฏิกริยาระหว่างน้ำและปูนซีเมนต์

เมื่อนำน้ำมาผสมกับปูนซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ที่เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ซึ่งจะทำให้ปูนซีเมนต์แปรสภาพจากเม็ดเล็กละเอียด เป็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายเจลลาติน (หรือวุ้น) ซึ่งจะค่อย ๆ แข็งตัวขึ้นตามลำดับ ทรายเท่าที่ยังมีน้ำเข้าทำปฏิกิริยาอยู่ นั่นคือ ปฏิกิริยาทาง เคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะเริ่มต้นตอนแรกและจะช้าลง ตามลำดับใน ตอนหลัง ดังนั้นปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยเพียงใด ขึ้นกับปริมาณน้ำที่มีอยู่ ในคอนกรีต นี้เอง ที่หลังจากที่เทคอนกรีตและถอดแบบแล้วต้องทำการบ่มคอนกรีตทันที จุดประสงค์ก็คือ เพื่อให้ มีน้ำเข้าทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ตลอดไม่ขาดตอน ผลลัพธ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน นอกจากจะทำให้ ซีเมนต์เพสต์แข็งตัวแล้ว ยังมีความร้อนที่ถูกปล่อยออกมาด้วย ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮ เดรชัน (Heat of Hydration) จะระบายผ่านออกมาทางเนื้อคอนกรีต แต่ถ้าหากมีความร้อนมากๆ จะ ทำให้คอนกรีตเสียกำลังไปและอาจทำ ให้คอนกรีตแตกร้าวได้ เนื่องจากแรงดันภายในคอนกรีต ฉะนั้น ในการเทคอนกรีตขนาดใหญ่หนาๆ (เช่น ฐานรากขนาดใหญ่) ความร้อนจะระบายออกไม่ทัน ซึ่ง สามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้สารผสมเพิ่ม เพื่อลดปริมาณความร้อนที่จะเกิดขึ้น

(2) วัสดุมวลรวม (Aggregates)

วัสดุมวลรวม คือ ส่วนผสมคอนกรีตที่ยึดเข้าไว้ด้วยกันด้วยซีเมนต์เพสต์ วัสดุมวล รวมนี้จะได้ จากธรรมชาติ เป็นแร่ธาตุเฉื่อยไม่มีปฏิกิริยา ที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ หินอ่อน หินกรวด และ ทรายหยาบ การเลือกใช้วัสดุมวลรวมมีส่วนสำคัญที่ช่วยให้คอนกรีตมีคุณภาพดี

- ประเภทของวัสดุมวลรวม

วัสดุมวลรวม สามารถแบ่งตามลักษณะขนาดได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. วัสดุมวลรวมละเอียด (Fine aggregate) หมายถึงวัสดุมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่า 4.5 มม. หรือเป็นเม็ดที่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ทั้งนี้จะต้องมีขนาดไม่เล็กกว่า 0.07 มม. วัสดุมวลรวมที่ เล็กกว่า 0.07 มม. เรียกว่า ฝุ่น (Silt หรือ Clay) วัสดุมวลรวมละเอียดที่ใช้กัน ทั่วไป คือ ทรายหยาบ

2. วัสดุมวลรวมหยาบ (Coarse aggregate) หมายถึง วัสดุมวลรวมที่มีขนาดตั้งแต่ 4.5 มม. ขึ้นไปหรือที่ไม่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 ซึ่งได้แก่ หินย่อย ,กรวด การเลือกใช้ วัสดุมวลรวมหยาบ อาจกำหนดขนาดเพื่อให้เหมาะสมกับโครงสร้างนั้น ๆ เช่น ขนาดใหญ่ที่สุดของ มวลรวมหยาบอาจเป็น 1 ใน 5 ของความหนาคานหรือ 1 ใน 3 ของความหนา ของแผงพื้น

- คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุมวลรวม

วัสดุมวลรวมเป็นองค์ประกอบหลักของคอนกรีต ดังนั้นคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมจึงมี ผลกระทบต่อคุณภาพของคอนกรีตโดยตรง คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุมวลรวมจะมี ดังต่อไปนี้

1. กำลัง (Strength) วัสดุมวลรวม ต้องมีความสามารถรับน้ำหนักกดได้ไม่น้อยกว่ากำลังที่ ต้องการของคอนกรีต โดยทั่วไปหินจะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตมาก กำลังรับแรงอัดของหิน มี ค่าประมาณ 700 ถึง 3,500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

2. ความทนทานต่อการสึกหลอ (Abrasive resistance) หินที่นำมาผสม คอนกรีตในงาน ต้องทนทานต่อแรงกระแทกและเสียดสีมาก ๆ ได้โดยเฉพาะคอนกรีตที่ใช้ทำ พื้นหรือ ถนน ซึ่งต้องเผชิญการเสียดสีอยู่ตลอดเวลา

3. ความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature resistance) การ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวและหดตัว หากมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ บ่อย ๆ ซ้ำ ๆ ตลอดเวลา จะทำให้เกิดหน่วยแรงมากพอที่จะทำให้คอนกรีตแตกร้าวได้ วัสดุผสมจึง ควรทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดี คือ ไม่ขยายหรือหดตัวมากและทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลดลงบ่อย ๆ ซ้ำ ๆ ได้ดี

4. ความคงตัวต่อปฏิกิริยาเคมี วัสดุผสมรวมต้องไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมี กับปูนซีเมนต์

5. รูปร่าง และผิว (Particle shape and Surface texture) มีความสำคัญ ต่อการยึดเกาะกับซีเมนต์เพสต์ และ ความสามารถเทได้ของคอนกรีต ดังนั้น วัสดุที่ใช้ควรมีลักษณะเป็นแฉกเหลี่ยมคม และผิวหยาบเพื่อช่วยในการยึดเกาะและไม่ควรมีรูปร่างเป็นแผ่นแบนๆ หรือเป็นชิ้นยาวๆ เพราะจะทำให้เทได้ยาก ควรมีรูปร่างก้อนกลมหรือลูกบาศก์

6. ความสะอาด (Cleanliness) วัสดุผสมรวม ต้องสะอาดมีสารที่จะทำให้เกิดการเสื่อมคุณภาพต่อคอนกรีตน้อยที่สุดสารเหล่านี้ได้แก่ เปลือกหอย ชานอ้อย ถ่านหิน ถ่าน เศษไม้ เศษกระดาษ ก้อนหิน โคลนเลน ฝุ่นหรือผงละเอียด (Silt) ฝุ่นพลาสติก ไขไม้ เป็นต้น สิ่งดังกล่าวนี้ทำให้ความทนทานและแรงยึดเหนี่ยวลดลงบางครั้งทำให้คอนกรีตร้าว, มีกำลังต่ำ, แข็งตัวช้า ปริมาณสิ่งเจือปนที่จะเป็นอันตรายต่อคอนกรีตจะต้องมีไม่มากกว่าที่กำหนดไว้ใน ตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ปริมาณของสิ่งเจือปนที่ยอมให้วัสดุผสมรวม

สิ่งเจือปนในวัสดุผสม	เปอเซ็นต์ที่ยอมให้สูงสุดโดยน้ำหนัก	
	ในวัสดุผสมละเอียด	ในวัสดุผสมหยาบ
1. ดินเหนียว	1	1
2. ฝุ่นหรือผงละเอียดที่ผ่านตระแกรงมาตรฐาน เบอร์ 200		
2.1 คอนกรีตที่รับแรงเสียดสี	5	5
2.2 คอนกรีตทั่วไป	5	5
3. ถ่านหินหรือลิกไนท์		
3.1 สำหรับงานที่อวดผิวหน้า	0.5	0.5
3.2 คอนกรีตทั่วไป	1	1
4. วัสดุอ่อน (เช่น รากไม้, เศษไม้)	-	-

7. ความลดหลั่นของขนาด หรืออัตราส่วนขนาดคละ (Gradation) วัสดุมวล รวมทั้งที่ใช้ผสมทำคอนกรีตจะต้องมีความลดหลั่นของขนาดที่เหมาะสม ซึ่งจะช่วยให้เรียงตัวกันได้แน่น และมีช่องว่างน้อย ทำให้คอนกรีตมีกำลังมากขึ้น ทั้งยังช่วยให้ทำงานได้ง่าย เกณฑ์กำหนดส่วนคละ ของขนาดวัสดุมวลรวม มีแสดงไว้ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 เกณฑ์กำหนดอัตราส่วนขนาดคละของวัสดุ

ขนาดตะแกรง	เปอร์เซ็นต์สะสมที่ค้างอยู่บนตะแกรงขนาดต่างๆ				
	ทราย	ตั้งแต่เบอร์ 4 ถึง 3/4"	ตั้งแต่เบอร์ 4 ถึง 1"	ตั้งแต่เบอร์ 4 ถึง 1 1/2"	ตั้งแต่เบอร์ 4 ถึง 2"
2 นิ้ว			0	0	0-5
1.5 นิ้ว			0	0 - 5	-
1 นิ้ว		0	0-5	-	30-65
0.75 นิ้ว		0 - 10	-	30 - 65	-
0.5 นิ้ว		-	40-75	-	70-90
0.375 นิ้ว	0	45-80	-	70 - 90	-
เบอร์ 4	0-5	90-100	90 - 100	95 - 100	95 - 100
เบอร์ 6	0-20	95-100	95 - 100		
เบอร์ 16	15-50				
เบอร์ 30	40-75				
เบอร์ 50	70-90				
เบอร์ 100	90-98				

8. ความชื้นและการดูดซึม (Moisture and Absorption) ภายในก้อนของ วัสดุมวลรวม จะประกอบไปด้วย เนื้อและช่องว่าง ช่องว่างและเนื้อเหล่านี้จะเก็บดูดความชื้นในอากาศเข้าไว้ทำให้วัสดุอยู่ในสภาวะใดสภาวะหนึ่ง ในสี่สภาวะต่อไปนี้

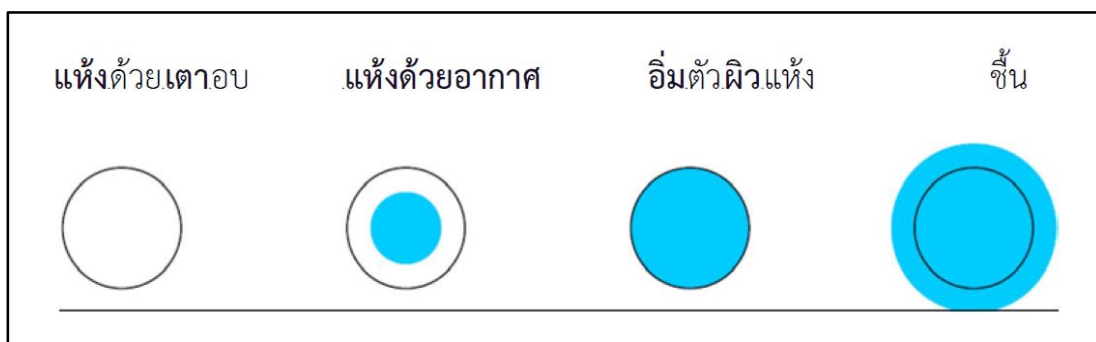
ก) แห้งด้วยเตาอบ คือ แห้งสนิทโดยตลอด ทำให้วัสดุสามารถดูดความชื้นได้เต็มที่

ข) แห้งด้วยอากาศ คือ แห้งที่ผิวแต่มีความชื้นอยู่ภายในช่องว่างข้างใน ทำให้วัสดุสามารถดูดความชื้นได้บ้าง

ค) อิ่มตัวผิวแห้ง คือมีความชื้นทั่วถึงตลอด สภาวะนี้ถือว่าดีที่สุดสำหรับใช้ ผสมคอนกรีต เพราะจะไม่ดูดหรือคายความชื้น

จ) ชื้นหรือเปียก คือ มีน้ำอยู่รอบผิววัสดุสภาพความชื้น และการดูดซึมของ วัสดุ จะมีผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้ผสม คอนกรีต หากวัสดุสามารถดูดความชื้นได้น้ำในคอนกรีตจะถูกดูด ไป ทำให้มี

ปริมาณน้ำที่เข้าทำ ปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์น้อยลง หรือถ้าวัสดุมีความชื้นมากเกินไป ปริมาณน้ำในคอนกรีตจะเพิ่มขึ้น เท่ากับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.3 สถานะของวัสดุมวลรวม

9. การพองตัว (Particle shape and Surface texture) ดังได้กล่าวแล้วว่า วัสดุมวลรวมเป็นตัวการสำคัญ ทำให้ต้องควบคุมส่วนผสม และอัตราส่วนปริมาณน้ำนอกจากนั้นแล้ว ความชื้นที่ผิวจะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างเม็ดทรายทำให้เม็ดทรายแยกตัวห่างออกจากกันปริมาตรจึงเพิ่มขึ้นหรือที่เรียกว่าทรายพองตัว (Bulking of Sand) ปริมาตรการพองตัวขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ของความชื้นและขนาดของวัสดุมวลรวม วัสดุมวลรวมที่ละเอียดกว่าจะพองตัวมากกว่าเมื่อความชื้นเท่ากัน สำหรับทรายละเอียดจะมีปริมาตรเพิ่มขึ้นถึง 40 % ทรายหยาบอาจเพิ่มขึ้นถึง 25 % ซึ่งทำให้หน่วยน้ำหนักของทรายละเอียดลดลง 25 % ทรายหยาบลดลง 15 % ตามลำดับ แต่เมื่อทรายอิมตัวปริมาตรจะคงที่

10. โมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) ค่าโมดูลัสความละเอียด (ค่า FM) นี้ เป็นเลขดัชนีที่เป็นปฏิภาคโดยประมาณกับขนาดเฉลี่ยของก้อนวัสดุในวัสดุมวลรวมที่กำหนด นั่นคือวัสดุมวลรวมยิ่งหยาบ ค่า FM ยิ่งสูงขึ้น สำหรับทรายที่ใช้ทำ คอนกรีต ควรมีค่า FM ระหว่าง 2.25-3.25 หินที่ใช้ผสมคอนกรีต ควรมีค่า FM ระหว่าง 5.5-7.5

11. ขนาดโตสุดของวัสดุมวลรวม (Maximum size of Aggregate) ขนาดโตสุดของวัสดุมวลรวมต้องอยู่ในเกณฑ์กำหนดมาตรฐาน และต้องไม่โตกว่า 1/5 ของด้านที่แคบสุดของ แบบหล่อ หรือไม่โตกว่า 3/4 ของระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมแต่ละเส้น หรือแต่ละมัด ทั้งทางตั้งและ ทางระดับ ขนาดของหินเบอร์ต่างๆ มีแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ขนาดของหินเบอร์ต่างๆ

หินเบอร์	ขนาด (มม.)	หินเบอร์	ขนาด (มม.)
0	หินฝุ่น,เศษหินย่อย	3	50 - 75
1	20 - 25	4	75 - 100
2	25-50	หินใหญ่พิเศษ	100 ขึ้นไป

#### 2.4.11.4 คุณสมบัติที่สำคัญของคอนกรีต

สำหรับการพิจารณาถึงคุณสมบัติของคอนกรีตที่สำคัญ ๆ ในที่นี้จะแยกพิจารณา คุณสมบัติของคอนกรีตใน 2 ลักษณะ คือ คอนกรีตในสภาพที่ยังเหลว และคอนกรีตในสภาพที่แข็งตัวแล้ว

1.คอนกรีตในสภาพที่ยังเหลว มีคุณสมบัติอยู่ 2 ประการที่ควรพิจารณา คือ

1) ความสามารถเทได้ (Workability) ความสามารถเทได้หรือความคล่องตัวในการเท คือผลรวมของพลังงานที่ต้องใช้เพื่อเอาชนะแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคส่วนผสมในคอนกรีตและแรงเสียดทานระหว่างคอนกรีตกับแบบหล่อและเหล็กเสริมคอนกรีต หากคอนกรีตมีความสามารถเทได้ดี คอนกรีตจะไหลได้เต็มแบบและหุ้มเหล็กเสริมได้ดี ทั้งยังสามารถทำให้แน่นได้โดยปราศจากการแยกตัว ปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อความสามารถเทได้ของคอนกรีต ได้แก่

- ปริมาณน้ำในส่วนผสม น้ำมากจะช่วยเพิ่มการหล่อลื่นให้คอนกรีต แต่เมื่อ คอนกรีตแข็งตัวแล้วจะมีช่องว่างในคอนกรีตมากทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง
- คุณสมบัติของปูนซีเมนต์และวัสดุผสมรวม
- ส่วนผสมของคอนกรีต ถ้าใช้ทรายมากจะมีความสามารถการเทได้มากขึ้นแต่กำลังจะลดลง
- สารผสมเพิ่ม

การทดสอบความสามารถเทได้ของคอนกรีตที่ใช้กันแพร่หลาย คือ การทดสอบหาค่ายุบตัว (Slump Test) ตัวอย่างค่ายุบตัวที่เหมาะสมกับงานก่อสร้างทั่ว ๆ ไปในประเทศไทยมีแสดงไว้ในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ค่ายุบตัวสำหรับงานก่อสร้างชนิดต่าง ๆ

ชนิดของงานก่อสร้าง	ค่ายุบตัว (ซม.)
ฐานราก	7.5 +/- 2.5
แผนพื้นคานผนังค.ส.ล.	10.0+/-2.5
เสา	10.0+/-2.5
ครีบ ค.ส.ล.และผนังบางๆ	10.0+/-2.5
ถนน สนามบิน	5.0 +/-2.5
งานที่ใช้คอนกรีตปั๊ม	10.0+/-2.5
เสาเข็มเจาะระบบแห้งหรือเสาเข็มขนาดเล็ก	10.0+/-2.5
งานเทคอนกรีตใต้น้ำ (Trimie)	มากกว่า15
เสาเข็มเจาะขนาดใหญ่	มากกว่า15
งานคอนกรีตที่มีเหล็กเสริมหนาแน่น	มากกว่า15

2) การอยู่ตัว (Soundness) การอยู่ตัวหรือความชื้นเหลวหมายถึงการที่คอนกรีตคงความสม่ำเสมอของเนื้อคอนกรีตตลอดช่วงเวลาที่ใช้หรือขนย้าย คอนกรีตที่มีการอยู่ตัวดีจะสามารถอัดแน่นในแบบหล่อได้ดีโดยไม่เกิดการแยกตัว (Segregation) และไม่เกิดการเยิ้ม (Bleeding) ในปัจจุบันยังไม่มีเครื่องมือวัดค่าการอยู่ตัวจะอาศัยการสังเกตเป็นหลัก

2. คอนกรีตในสภาพที่แข็งตัวแล้วคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วมีหลายประการ แต่ในที่นี้จะขอกล่าวถึงคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดคือ กำลังของคอนกรีต (Strength) กำลังของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ปัจจัยที่สำคัญมากอย่างหนึ่งคือ อัตราส่วนน้ำ-ซีเมนต์ (water-cement ratio [w/c]) ถ้าใช้น้ำผสมคอนกรีตมากกำลังของคอนกรีตจะน้อยการที่กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ นั้นเป็นผลมาจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับซีเมนต์ น้ำจึงมีความจำเป็นอย่างมากต่อกำลังของคอนกรีต ดังนั้น ในงานก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อผสมคอนกรีตจะต้องควบคุมปริมาณน้ำ ที่ใช้ผสมคอนกรีตให้ได้ตามที่ออกแบบส่วนผสมและเมื่อคอนกรีตเริ่มก่อตัวจะต้องคอยควบคุมให้ คอนกรีตสูญเสียน้ำน้อยที่สุด โดยปกติแล้วถือเอากำลังของคอนกรีตเมื่ออายุครบ 28 วัน เป็นมาตรฐานในการบอกกำลังของคอนกรีตและกำลังของคอนกรีตจะหาจากแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกหรือก้อนคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์

#### 2.4.11.5 ปูนซีเมนต์

##### 1. ลักษณะของปูนซีเมนต์

คำว่าปูนซีเมนต์เป็นคำเรียกสั้น ๆ ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ปูนซีเมนต์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากเผาส่วนผสมต่าง ๆ แล้วผสมกันเป็นเนื้อเดียวส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญของปูนซีเมนต์ คือ แคลเซียม และอลูมิเนียมซิลิเกต ปูนซีเมนต์เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาเคมี ที่เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (HYDRATION) ซึ่งจะ ทำให้ปูนแข็งตัว มีคุณสมบัติในการเป็นตัวประสานวัสดุมวลรวมเข้าด้วยกัน

##### 2. ประเภทของปูนซีเมนต์ แบ่งตาม มาตรฐาน มอก.

สมาคมทดสอบวัสดุอเมริกัน (ASTM) และสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของประเทศไทยได้แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 5 ประเภท คือ

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดาและใช้ในงานคอนกรีตตามปกติทั่วไปที่ไม่อยู่ในสภาวะอากาศรุนแรง ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราช้าง ตราที่พีไอสีแดง ตราพญานาคสีเขียว และตราเพชรเม็ดเดียว

2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทสอง คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตที่เกิดความร้อนต่ำและทนซัลเฟตได้ปานกลาง เช่น งานสร้างเขื่อนคอนกรีต กำแพงกันดินหนาๆ หล่อท่อคอนกรีตขนาดใหญ่ ตอม่อสะพาน เป็นต้น ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราพญานาคเจ็ดเศียร

3) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทสาม คือ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว (High-Early strength Portland Cement) หรือที่เรียกว่าซูเปอร์ซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังสูงในระยะแรก เนื้อปูนมีลักษณะเป็นผงละเอียดกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดาผลิตได้โดยการเปลี่ยนสัดส่วนส่วนผสม โดยการเติมสารอื่นและโดยการบดให้ละเอียดยิ่งขึ้นหรือโดยการเผาให้ดีขึ้น ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็วมีประโยชน์สำหรับทำคอนกรีตที่ต้องการความเร่งด่วนหรือในกรณีที่ต้องการรื้อแบบหล่อเร็ว ๆ เช่น เสาเข็มคอนกรีต ถนนพื้นและคานที่ต้องการจะใช้เร็ว เป็นต้น ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทนี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ตราเอราวิณ ตราพญานาคสีแดง ตรา สามเพชร

4) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทสี่ คือ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low-Heat Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำสุด ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ใช้กันมากในการก่อสร้างคอนกรีตหนา เช่น เขื่อน เป็นต้น เนื่องจากให้อุณหภูมิของคอนกรีตต่ำกว่า ปูนซีเมนต์ชนิดอื่น

5) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทห้า คือ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตได้สูง (Sulfate-Resistant Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์สำหรับใช้กันโครงสร้างที่อยู่ภายใต้สภาพที่มีการกระทำของซัลเฟตรุนแรง เช่น ในน้ำทะเลหรือในดินที่มีด่าง (Alkaline) สูง ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทนี้มีระยะเวลาการแข็งตัวช้ากว่าประเภทหนึ่งตัวอย่าง ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทนี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราปลาฉลาม

### 3. ประเภทของปูนซีเมนต์ ที่ไม่แบ่งตามมาตรฐาน มอก.

นอกจากปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ตามมาตรฐานมอก.ทั้ง 5 ประเภทข้างต้นแล้ว ยังมีปูนซีเมนต์ประเภทอื่นที่สำคัญอีก คือ

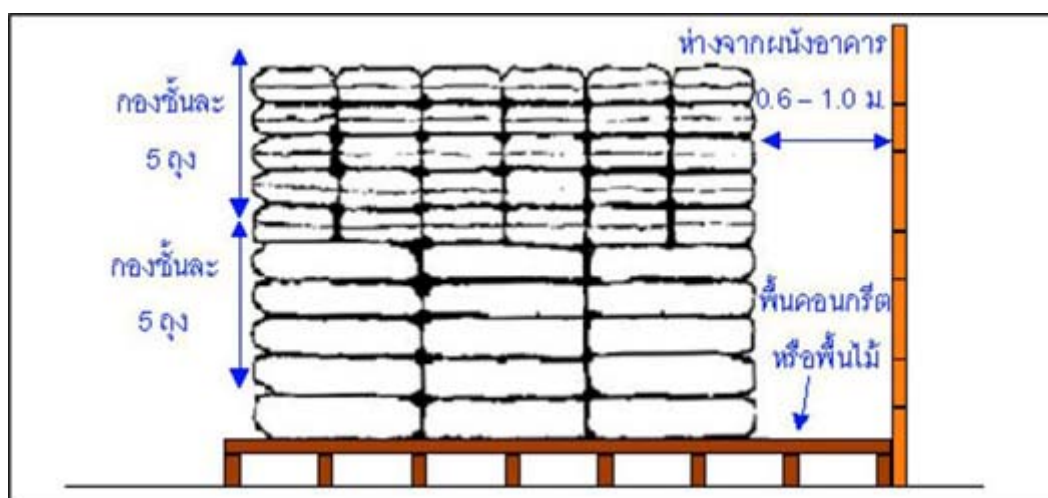
1) ปูนซีเมนต์ซัลเฟตสูง (Super-Sulfated Cement) คือ ปูนซีเมนต์ที่ได้จากการบดส่วนผสมของเม็ดตะกั่วรัตนเตาถลุง, แคลเซียมซัลเฟต และปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดาเข้าด้วยกัน มีคุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนของน้ำทะเล และพวกซัลเฟตได้ดี ทั้งยังทนทานต่อ กรด และน้ำมัน

2) ปูนซีเมนต์ซิลิกา (Cilica) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ทาง มอก. เรียก “ ปูนผสม ” ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ คือ ปูนซีเมนต์ที่ได้จากการบดเม็ดปูนของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดากับทรายประมาณ 25 - 30 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณเนื้อซีเมนต์จึงมากขึ้นและมีราคาถูก มีลักษณะแข็งตัวช้าไม่ยัดหรือหดตัวมากเหมาะกับการก่อสร้างที่ไม่ต้องการกำลังของคอนกรีตมาก ๆ ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราเสือ ตรางูเห่า และตรานกอินทรี เป็นต้น

### 4. การเก็บปูนซีเมนต์

การเก็บปูนซีเมนต์ไว้ใช้งานเป็นเรื่องที่ต้องให้ความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจาก ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่ถูกความชื้นจากอากาศหรือของที่อยู่ใกล้เคียงได้ง่าย เมื่อปูนซีเมนต์ได้สัมผัสกับความชื้นจะเกิดเป็นเม็ดและก้อนแข็ง ถ้าหากความชื้นมีเพียง 1 - 2 % ก็ไม่ถือว่าเกิดความเสียหายแต่อย่างใด แต่ถ้ามากไปกว่านี้จะให้ปูนซีเมนต์แข็งตัวช้าลงและกำลังก็จะลดลงด้วย และถ้าดูความชื้นเข้าไว้มากกว่า 5 % แล้วปูนซีเมนต์นั้นจะเป็นก้อนแข็งใช้งานไม่ได้วิธีเก็บปูนซีเมนต์ที่ดีที่สุด คือ เก็บไว้ในสถานที่

แห้งมีหลังคาและผนังปกคลุมมิดชิด โดยการเก็บควรเก็บไว้เป็นปริมาณมาก ๆ ในที่เก็บแห้งเดียวการกองเก็บปูนซีเมนต์ควรกองเก็บให้มีอากาศผ่านเข้าภายในกองได้น้อยที่สุดและต้อง ระวังอย่าให้ความชื้นหรือน้ำเข้าทางพื้นได้ ถ้าพื้นเป็นไม้ต้องยกพื้นไม้ให้อยู่พ้นระดับดินขึ้นไปไม่ต่ำกว่า 30 ซม. การวางถุงปูนซีเมนต์ควรวางเรียงเป็นชั้นๆ ที่นิยมทำกันคือวางตามยาวของถุง 5 ถุง แล้ววางตามขวาง 5 ถุง สลับกันการวางซ้อนกันไม่ควรให้สูงมากเกินไปกว่าที่จะหยิบมาใช้งานได้สะดวก แต่อย่าวางให้ชิดติดผนังหรือฝา เพราะปูนซีเมนต์อาจถูกความชื้นจากข้างนอกเข้ามาข้างในได้ ในกรณีจำเป็นต้องวางกองปูนซีเมนต์ไว้กลางแจ้ง ควรหาไม้มาทำเป็นพื้น(ยกพื้น) และต้องเตรียมผ้าใบ(ที่กันน้ำได้) เพื่อใช้คลุมกันความชื้นหรือเวลาฝนตกและในกรณีเช่นนี้ไม่ควรกองเก็บปูนซีเมนต์ ไว้นานๆควรสั่งมาแต่น้อยแล้วรีบใช้ให้หมดจะดีกว่า



รูปที่ 2.4 การกองเก็บซีเมนต์ถุง

#### 2.4.11.6 น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต (MIXING WATER)

##### 1) ลักษณะของน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต

น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตควรต้องสะอาดปราศจากสิ่งเจือปนเช่น กรด ต่าง น้ำมัน และสารอินทรีย์ อื่น ๆ มากจนเกินไปจนทำให้เป็นอันตรายต่อคอนกรีตและเหล็กเสริม ตามปกติแล้วน้ำประปา น้ำจืดตามธรรมชาติส่วนใหญ่ ซึ่งไม่มีส่วนผสมของน้ำทิ้งจากอาคารบ้านเรือนหรือจากโรงงานอุตสาหกรรม จัดได้ว่าเป็นน้ำที่มีคุณภาพดีพอที่จะใช้ผสมคอนกรีตได้ดี น้ำทะเลซึ่งมีเกลือของโซเดียม (NaCl) ละลายอยู่ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ (35,000 PPM.) แม้สามารถใช้ผสมคอนกรีตได้ แต่จะทำให้กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตลดลง 10 - 20 % แต่ถ้าน้ำมีเกลือของโซเดียมเกิน 5.0% จะทำให้กำลังคอนกรีตลดลง 3 % ดังนั้นไม่ควรนำน้ำทะเลมาผสมคอนกรีต ถ้าสามารถหาน้ำจืดใช้แทนได้ นอกจากนี้ยังไม่ควรใช้น้ำทะเลในงานคอนกรีตเสริมเหล็ก ทั้งนี้เพราะจะทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมและผุกร่อนเร็ว สำหรับงานก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในน้ำทะเลควรมีคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมอย่างน้อย 7 ซม.

2) หน้าที่ของน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต

น้ำทำหน้าที่หลายประการในการผสมคอนกรีตหน้าที่ที่สำคัญ ได้แก่

1) เคลือบวัสดุมวลรวม น้ำทำให้วัสดุมวลรวมเปียกเพื่อให้ปูนซีเมนต์เข้าเกาะได้ โดยรอบและจับยึดตัวกันได้

2) หล่อลื่นวัสดุมวลรวมทำให้เกิดความเหลว เมื่อคอนกรีตมีความเหลวสามารถเทได้กระทั่งเขย่าเข้ารูปแบบหล่อเป็นรูปต่าง ๆ ได้

3) ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับปูนซีเมนต์ น้ำเมื่อทำปฏิกิริยาเคมี(ปฏิกิริยาไฮเดรชัน) จะทำให้ผงซีเมนต์ติดอยู่กับวัสดุมวลรวมกลายเป็นวันช่วยประสานผิวระหว่างวัสดุผสมให้เกาะยึดตัวแน่นเมื่อแข็งตัว สารที่เจือปนอยู่ในน้ำซึ่งมีผลทำให้คุณภาพคอนกรีตเสียไป ได้แก่ พวกฝุ่น หรือผง (Silt) น้ำมัน กรด ต่าง เกลือต่าง ๆ และน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม หรือ บ้านเรือนต่างๆ เป็นต้น

#### 2.4.11.7 สารผสมเพิ่ม (ADMIXTURES)

สารผสมเพิ่มหมายถึงสารเคมีอื่น ๆ นอกเหนือไปจาก ปูนซีเมนต์ วัสดุมวลรวม และน้ำที่ใช้เติมลงในส่วนผสมของคอนกรีต ด้วยจุดประสงค์เพื่อปรับเปลี่ยนคุณสมบัติบางประการของคอนกรีต สารผสมเพิ่มจะให้ผลแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ที่ใช้, ขนาด, รูปร่าง และส่วนขนาดคละของวัสดุมวลรวม, น้ำและอุณหภูมิ ดังนั้น การใช้สารผสมเพิ่มจึงควรได้ทราบถึงข้อมูลตลอดจนข้อแนะนำในการใช้ของบริษัทผู้ผลิตโดยละเอียด นอกจากนี้สารผสมเพิ่มจะให้ผลดีต่อเมื่อใช้ในปริมาณที่เหมาะสม สารผสมเพิ่มที่นิยมใช้กันทั่วไป ได้แก่

1) สารเร่งการก่อตัว (Accelerators) สารเร่งการก่อตัวจะทำให้คอนกรีตก่อตัวและแข็งตัวเร็วขึ้นกว่าปกติ นอกจากนี้ผลพลอยได้ของการใช้สารเร่งการก่อตัว คือ จะทำให้คอนกรีตมีกำลังในระยะแรกสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา โดยทั่วไปแล้วสารเร่งการก่อตัวจะใช้เมื่อต้องการเร่งเวลาการถอดแบบหล่อ หรือเมื่อต้องการให้คอนกรีตรับแรงได้เร็วกว่าปกติ เช่น การทำเสาเข็มธรรมดาและเสา คอนกรีตอัดแรง ใช้อุดรูรั่วในเนื้อคอนกรีตสารที่นิยมใช้เป็นตัวเร่งการก่อตัวคือแคลเซียมคลอไรด์ และ โซเดียมซิลิเกต เป็นต้น

2) สารหน่วงการก่อตัว (Retarders) สารหน่วงการก่อตัว มีคุณสมบัติช่วยให้คอนกรีตก่อตัวช้ากว่าธรรมดา (เกินกว่า 1 1/2 ชั่วโมง) ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ ในกรณีที่ต้องเสียเวลาเคลื่อนย้ายคอนกรีตที่ผสมแล้วไปยังจุดเทที่อยู่ ไกล ๆ หรือในกรณีที่ต้องใช้เวลาในการเคลื่อนย้ายและการเทงาน ๆ ข้อเสียของการใช้สารหน่วงการก่อตัว คือจะทำให้กำลังคอนกรีตลดต่ำไปในช่วง 3 วันแรก แต่ผลพลอยได้คือช่วยลดปริมาณน้ำได้ประมาณ 5 - 15% ซึ่งเป็นผลทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงในระยะเวลาหลังและมีกำลังเท่ากับหรือสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาเมื่ออายุ 28 วัน สารชนิดนี้ได้แก่ แคลเซียม หรือยิบซัม ซึ่งบริษัทผู้ผลิต ปูนซีเมนต์ทั้งหลาย ก็ได้ใช้ปนอยู่แล้วในปูนซีเมนต์ที่ผลิต

3) สารลดปริมาณน้ำ (Water Reducing Admixture) สารลดปริมาณน้ำจะช่วยลดปริมาณน้ำที่ต้องใช้ในส่วนผสมคอนกรีตแต่ยังได้ความชื้นเหลวเทียบเท่ากับคอนกรีตธรรมดา เมื่อใช้น้ำในส่วนผสมคอนกรีตน้อยลง (อัตราส่วนน้ำต่อ ซีเมนต์น้อยลง) จะมีผลในการเพิ่มกำลังของคอนกรีตสารชนิดนี้เป็นสารอินทรีย์ ส่วนใหญ่ทำมาจากเกลือลิกโนซัลโฟนิค (Lignosulfonic Acid) หรือเกลือและสารประกอบของกรดไฮดรอกซีคาร์บอกซิลิก (Hydroxycarboxylic Acid) หรือสารประกอบโพลิเมอร์บางชนิด เช่น โพลิเมอร์ ไฮดรอกซีเลต (Hydroxylated Polymers)

4) สารป้องกันน้ำ (Waterproofing) สารป้องกันน้ำจะทำให้คอนกรีตที่บ่มน้ำกันน้ำไม่ให้น้ำซึมผ่านได้ สารป้องกันน้ำจะเข้าไปแทรกอุดรูเล็ก ๆ ในคอนกรีตทำให้คอนกรีตที่บ่มน้ำ ถ้าสามารถออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้พอดีและสามารถผสมคอนกรีตได้ตามที่ออกแบบ เมื่อนำคอนกรีตไปหล่อแล้วคอนกรีตจะแน่นทึบกันน้ำ แต่กรณีไม่สามารถทำได้ก็จำเป็นต้องใช้สารชนิดนี้ช่วย สารป้องกันน้ำมักจะใช้กับคอนกรีตที่ต้องการไม่ให้น้ำซึมผ่านได้ เช่น โครงสร้างที่กันน้ำ ห้องใต้ดิน อุโมงค์ สระน้ำ หลังคา พื้นห้องน้ำ เป็นต้น นอกจากนี้สารป้องกันน้ำยังนำมาใช้กับมอร์ต้า (ปูน ทราย น้ำ) ที่ใช้โบกกำแพงหรือเทพื้นกันน้ำให้ความชื้นซึมเข้าไปได้และป้องกันราขึ้นสารชนิดนี้เป็นพวกอัลคาไลน์ซิลิเกต (Alkaline Silicates) เช่น โซเดียมซิลิเกตหรืออลูมิเนียม และสังกะสีซัลเฟต (Zinc Sulphates)

5) สารกระจายกักฟองอากาศ (Air-Entraining Admixture) สารกระจายกักฟองอากาศจะช่วยให้เกิดฟองอากาศเล็ก ๆ มองด้วยตาเปล่าไม่เห็น แต่ปนอยู่ทั่วเนื้อคอนกรีตโดยฟองเหล่านี้จะไม่ทะลุถึงกันได้คอนกรีต 1 ลบ.ม. อาจมีฟองอากาศเล็ก ๆ นี้ประมาณ 3 - 6 % ของเนื้อคอนกรีตทั้งหมดโดยปริมาตร การที่ในเนื้อคอนกรีตมีฟองอากาศขนาดเล็กๆเหล่านี้จะช่วยทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทได้มากขึ้น แม้ว่าจะมีปริมาณน้ำน้อยก็ตามเพราะฟองอากาศเหล่านี้จะช่วยทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นแทนน้ำ นอกจากนี้ช่วยมิให้น้ำในคอนกรีตแข็งเป็นน้ำแข็งก่อนที่คอนกรีตจะก่อตัว ซึ่งเป็นประโยชน์ในการหล่อคอนกรีตในฤดูหนาวหรือในที่ที่มีอากาศหนาวเย็นมากสารกระจายกักฟองอากาศยังช่วยลดการแยกตัว, การสูญเสียน้ำ, ไม่รั่วซึมรวมทั้งเพิ่มความต้านทานซัลเฟตด้วย ข้อเสียของการใช้สารนี้ก็คือทำให้คอนกรีตมีกำลังต่ำลง เนื่องจากคอนกรีตมีรูพรุนมากและในการใช้เครื่องเขย่าคอนกรีตเพื่อทำให้คอนกรีตแน่นตัวต้องระวังให้มากกว่าเดิม เพราะถ้าเขย่ามากแล้วจะทำให้จำนวนฟองอากาศลดน้อยลงไปเกือบ 50 เปอร์เซ็นต์ สารกระจายกักฟองอากาศมีหลายชนิด อาจทำมาจาก ยางไม้ ไขมัน น้ำมัน สัตว์-พืช นอกจากการใช้สารเคมีกระจายกักฟองอากาศผสมในคอนกรีตแล้ว ปัจจุบันยังมีคอนกรีตกระจายกักฟองอากาศ ซึ่งผลิตขึ้นโดยใช้ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ชนิดกระจายกักฟองอากาศ (Air-Entraining Cement) ซึ่งให้คุณสมบัติเช่นเดียวกับกับการเติมสารดังกล่าวมาแล้ว

#### 2.4.11.8 ความรู้เรื่องการบ่มคอนกรีต

การบ่มหรือการบำรุงคอนกรีต (Curing) เป็นการควบคุมและป้องกันไม่ให้น้ำที่เหลือ จากการทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ระเหยออกมาจากคอนกรีตที่เทลงแบบหล่อและแข็งตัวแล้วเร็วเกินไป เพื่อให้คอนกรีตมีคุณสมบัติในการรับแรงและความทนทานตามความต้องการหลังจากเทคอนกรีตและทิ้งไว้จนผิวหน้าคอนกรีตหมาดแข็งปราศจากรอยแล้วจะต้องทำการบ่มทันทีด้วยวิธีที่ถูกต้อง โดยปกคลุมผิวไม่ให้ถูกแดดหรือลมร้อน และไม่ให้อุณหภูมิหรือสะเก็ดหินโดยเฉพาะในระยะ 24 ชั่วโมงแรก ทั้งนี้เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดีและมีคุณสมบัติตามต้องการ อีกทั้งเป็นการป้องกันการ สูญเสียน้ำจากคอนกรีตที่เทใหม่ๆ มิฉะนั้นคอนกรีตจะเกิดการหดตัวเร็ว ทำให้เกิดแรงดึงที่ผิวที่กำลังจะแห้ง เป็นผลให้เกิดรอยร้าวที่ผิวคอนกรีต ช่วงระยะเวลาที่ป้องกันและรักษาความชื้นนี้ไว้ภายหลัง จากเทคอนกรีตลงแบบหล่อแล้ว เรียกว่าระยะเวลาของการบ่มคอนกรีต (Curing period)

กำลังของคอนกรีตจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ トラบเท่าที่ซึ่งมีความชื้นให้ซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำได้ต่อไปอีก กำลังของคอนกรีตจะเพิ่มสูงขึ้นรวดเร็วในระยะแรกและค่อยๆต่ำลงในเวลาต่อมา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความชื้นและอุณหภูมิที่พอเหมาะ หลังจากบ่มในอากาศแห้งแล้วบ่มขึ้นต่อกำลังของคอนกรีตจะเพิ่มสูงขึ้นอีกแต่คอนกรีตจะให้กำลังสูงสุดหากบ่มขึ้นตลอดเวลา ซึ่งสภาพของงานก่อสร้าง

จริงไม่อาจบ่มขึ้นตลอดเวลาาน ๆ ได้ เพราะมีข้อจำกัดในเรื่องระยะเวลาก่อสร้างและค่าใช้จ่าย ฉะนั้น จึงควรทำการบ่มขึ้นให้ต่อเนื่องกันตั้งแต่ต้น ประมาณ 7-14 วัน เพื่อให้คอนกรีตมีกำลังประมาณ 70% ของกำลังอัดที่ต้องการ อุณหภูมิสำหรับบ่มคอนกรีต

อุณหภูมิที่ใช้บ่มคอนกรีตสำหรับคอนกรีตทั่ว ๆ ไป ควรอยู่ระหว่าง 15-39 องศาเซลเซียส สำหรับงานคอนกรีตหนาควรใช้อุณหภูมิให้ต่ำลง เพราะปฏิกิริยาของน้ำกับซีเมนต์นั้นให้ความร้อน ออกมามากอยู่แล้ว อย่างไรก็ตามไม่ควรบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียสเพราะ คอนกรีตจะแข็งตัวช้ามาก เมื่อบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิสูงมากและอากาศแห้งจะทำให้ น้ำระเหย ออก จากคอนกรีตอย่างรวดเร็ว กำลังของคอนกรีตที่ได้จะต่ำและอาจเกิดรอยแตกเร็วได้ง่าย

#### 2.4.11.9 กำลังของคอนกรีต

1. กำลังอัดของคอนกรีต โดยทั่วไปการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กใช้กำลังอัดของคอนกรีต เป็นเกณฑ์ในการออกแบบ โดยสมมุติฐานว่าคอนกรีตรับแรงอัดเป็นหลักโดยไม่สามารถรับแรงดึง ดังนั้นการออกแบบโครงสร้างคอนกรีต จึงต้องมีการควบคุมคุณภาพของคอนกรีตในเรื่องของการรับ แรง นอกจากนี้การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต เป็นสิ่งที่กระทำได้ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับ การ ทดสอบอื่น ๆ ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่นิยมใช้กัน คือ ตัวอย่างรูปลูกบาศก์ และรูปทรงกระบอก ซึ่งให้ตัวอย่างรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนกระทั่งตัวอย่างคอนกรีตวิบัติ โดยทั่วไปจะใช้เวลาประมาณ 2 ถึง 4 นาที ต่อตัวอย่าง กำลังอัดที่คอนกรีตรับได้อยู่ในช่วง 100 ถึง 400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สำหรับคอนกรีตกำลังธรรมดาหรือมีค่ามากกว่า 1,000 กิโลกรัมต่อ ตารางเซนติเมตรในกรณีที่เป็นคอนกรีตกำลังสูงมาก

การตัดสินใจเลือกขนาดกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้งาน ไม่ได้ขึ้นอยู่กับ การรับกำลังอัดของ คอนกรีตแต่เพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ อีกด้วย เช่น ราคา ขนาดของคอนกรีต น้ำหนัก ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เมื่อเป็นคอนกรีตขนาดใหญ่ตำแหน่งที่ก่อสร้างและวัสดุที่ใช้ ทำคอนกรีตในท้องถิ่น เช่น ไม่ควรเลือกคอนกรีตกำลังสูงกว่า 300 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ใน บริเวณป่าเขาหรือที่ทุรกันดารเนื่องจากขาดหินที่มีคุณภาพดี การเลือกกรวดที่สามารถหาได้ในพื้นที่ จะทำให้ราคาคอนกรีตถูกลง แต่ทั้งนี้ต้องดูเรื่องกำลังอัดซึ่งอาจลดลงได้ การใช้กำลังอัดของคอนกรีตที่ สูงกว่า 500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในเสาของอาคารสูงเพื่อลดขนาดหน้าตัดและทำให้มีพื้นที่ใช้ สอยมากขึ้นแต่ราคาต่อลูกบาศก์เมตรของคอนกรีตและค่าใช้จ่ายในการควบคุมคุณภาพในการทำงาน ของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้น การก่อสร้างเขื่อนกั้นน้ำต้องการกำลังของคอนกรีตไม่สูงมากนักในช่วง 150 ถึง 200 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แต่ต้องการได้คอนกรีตที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักเพียงพอที่จะ ต้านทานแรงดันด้านข้างของน้ำที่กระทำต่อตัวเขื่อน โดยคอนกรีตดังกล่าวมีความร้อนจากปฏิกิริยาไฮ เดรชันไม่สูงจนเกินค่าที่กำหนดไว้ นอกจากนี้การทำงานคอนกรีตที่ขาดการควบคุมคุณภาพที่ดีควร กำหนดกำลังอัดให้ต่ำไว้ประมาณ 100 ถึง 150 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นต้น

2. กำลังดึงของคอนกรีต คอนกรีตรับแรงดึงได้ต่ำมากและเป็นวัสดุเปราะ ดังนั้นในการ ออกแบบคอนกรีตจึงไม่นิยมออกแบบให้คอนกรีตรับแรงดึง แต่มีงานบางประเภท เช่น งานพื้นถนนที่ กำหนดให้คอนกรีตรับแรงดึงในรูปของโมดูลัสแตกร้า (Modulus of Rupture) โดยทั่วไปแรงดึงของ คอนกรีตมีค่าประมาณร้อยละ 10 ของแรงอัด ดังนั้น ในการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก จึง สมมุติให้คอนกรีตรับแรงดึงไม่ได้เลยและให้เหล็กรับแรงดึงทั้งหมด การทดสอบแรงดึงของคอนกรีตมี

อยู่ 2 วิธี ได้แก่ วิธีโดยตรงและวิธีโดยอ้อม วิธีทดสอบโดยตรง คือการดึงตัวอย่างคอนกรีตให้ขาดออกจากกัน แต่การยึดจับตัวอย่างคอนกรีตเพื่อดึงทำได้ยากมาก จึงต้องทำการดัดแปลงอุปกรณ์ในการจับชิ้นตัวอย่างคอนกรีตให้สามารถรับแรงดึงโดยตรง นอกจากนี้ถ้าดึงคอนกรีตไม่ตรงแนวศูนย์กลางจริง ๆ จะมีแรงบิดหรือโมเมนต์เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยทำให้คอนกรีตแตกหรือหักด้วยแรงอื่นไม่ใช่แรงดึงโดยตรง ดังนั้นผลการทดสอบแรงดึงโดยตรงของคอนกรีตจากอุปกรณ์ที่ดัดแปลงขึ้นจึงมีผลไม่แน่นอนและยากต่อการทดสอบ

การทดสอบแรงดึงของคอนกรีตโดยวิธีอ้อมเป็นที่นิยมใช้กันมาก เพราะทำได้ง่าย สะดวก และให้ผลการทดสอบที่น่าพอใจ การทดสอบแรงดึงโดยวิธีดัด ( Bending ) หรือเรียกว่าการทดสอบค่าโมดูลัสแตกร้าว และการทดสอบแรงดึงโดยวิธีผ่าซีก ( Splitting Tensile Test ) เป็นการทดสอบแรงดึงของคอนกรีตโดยวิธีอ้อมที่นิยมกันมาก และพบว่าค่าแรงดึงที่ได้จากการทดสอบด้วยแรงดัดหรือโมดูลัสแตกร้าวมีค่าสูงกว่าแรงดึงที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีการผ่าซีก

### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงาน

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตโดยวิธีของ ACI ขั้นตอนการดำเนินงานวิธีการทดสอบหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในการออกแบบปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตตามมาตรฐานASTM



### 3.1 การออกแบบการทดลอง

ในการทดลองจะใช้วิธีฟูลแฟกทอเรียล (Full Factorial Design) ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบการทดลองที่จะต้องทำให้ครบทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่าของทุกปัจจัย และจะต้องวิเคราะห์ผลกระทบต่ตัวแปรตามทุกกรณี การออกแบบฟูลแฟกทอเรียลมีประโยชน์หลายประการ ได้แก่ ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาของปัจจัยที่จะก่อให้เกิดข้อสรุปที่ผิดพลาดได้ เนื่องจากการออกแบบการทดลองที่มีประสิทธิภาพมากกว่าการทดลองที่ละปัจจัย และทำให้สามารถประมาณผลของปัจจัยหนึ่งที่ระดับต่าง ๆ ของปัจจัยอื่น รวมทั้งทำให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลตลอดเงื่อนไขของการทดลองได้

เพื่อให้ได้สมการที่สามารถจำลองเหตุการณ์จริงได้ จึงออกแบบการทดลองโดยใช้ 2 ปัจจัยหลัก อันได้แก่ ค่ากำลังของเศษคอนกรีต 3 ค่ากำลัง ( 280,380 และ 500 ksc ) อัตราส่วนการแทนที่ของมวลรวม 4 ระดับ ( 25,50,75 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ) การทดสอบความแข็งแรง 2 การทดสอบ ( แรงอัดและแรงดึง ) ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ทำการผสมจนครบทุกปัจจัยทั้งหมด  $3 \times 4 \times 2$  หรือเท่ากับ 24 การทดลอง แต่ละการทดลองจะแบ่งเป็น 5 ตัวอย่าง มีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาด  $\phi 15 \times 30$  เซนติเมตร และ ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด  $15 \times 15 \times 15$  เซนติเมตร รวมทั้งสิ้นเท่ากับ 120 ตัวอย่าง จากนั้นจะนำผลที่ได้มาสร้างแบบจำลองต่อไป



## 3.2 การออกแบบส่วนผสม

ในการศึกษานี้ จะใช้วิธีการออกแบบส่วนผสมโดยน้ำหนัก โดยวิธีของ ACI ซึ่งจะเป็นการหาอัตราส่วนผสมจากค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต (คมสัน มาลีสี และ สิริวัฒน์ ไชยชนะ) (2555) [13]

### 3.2.1 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต (Concrete Mixed Design) ACI (211.1-77)

#### (1) ขอบเขต

วิธีและหลักการคำนวณส่วนผสมคอนกรีตที่จะได้กล่าวถึงต่อไปนี้ จะใช้กับคอนกรีตปกติทั่วไปที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคารและใช้กำหนดให้คอนกรีตมีความสามารถในการทำงานได้เหมาะสมกับสภาพการเทหรือหล่อในที่ (Cast - in place construction)

อย่างไรก็ตามถือว่าเป็นเพียงการประมาณ อัตราส่วนในชั้นแรกเท่านั้น จำเป็นต้องมีการตรวจสอบผลของอัตราส่วนนี้จากห้องทดลองปฏิบัติการหรือในสนาม และมีการปรับปรุงตาม ความจำเป็นและเหมาะสมกับคุณสมบัติตามต้องการ

#### (2) กล่าวนำ

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่าคอนกรีตนั้น คือวัสดุผสมซึ่งมีวัสดุที่เป็นหลักอยู่ 3 ชนิด คือ ซีเมนต์มวลรวมละเอียด (หยาบและละเอียด) และน้ำ นอกจากนี้ยังอาจมีสิ่งอื่นเพิ่มเติมเข้ามาอีกได้แล้วแต่ความต้องการ อาจจะเป็นสารกระจายฟองอากาศหรือสารผสมเพิ่ม (Admixtures) ต่าง ๆ

สำหรับการเลือกอัตราส่วนผสมคอนกรีตให้เหมาะสมนั้น มีข้อควรระวังอยู่ 2 ข้อ ที่มีความสำคัญเท่า ๆ กัน ข้อแรกคือการประหยัดวัสดุที่สมเหตุสมผล อีกข้อหนึ่งคือความต้องการในความสามารถที่จะรับแรง ความสามารถในการทำงาน ตลอดจนความคงทน เป็นต้น

#### (3) ความสัมพันธ์ขั้นมูลฐาน

จากที่ได้กล่าวนำไปแล้ว ว่าการเลือกอัตราส่วนผสมคอนกรีตให้เหมาะสมนั้น ข้อที่ควรคำนึงอีกประการนอกจากความประหยัดแล้ว ก็คือความสามารถในการทำงาน กำลัง ความคงทน สิ่งต่าง ๆ เหล่านี้มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันพอสรุปได้ย่อย ๆ ดังนี้

ความสามารถในการทำงาน (Workability) คำนี้ดูเหมือนจะให้คำจำกัดความลง ไปอย่างแน่ชัดไม่ได้ โดยทั่วไปเรามุ่งถึงคอนกรีตที่สามารถจะทำได้ง่ายสำหรับการผสม การขนส่ง การเทลงในแบบหล่อ การอัดแน่น การตกแต่ง ตลอดจนความแข็งแรงของคอนกรีต

ความชื้นเหนียว (Consistency) กล่าวง่าย ๆ ก็คือ ความเหลวหรือความเปียกของ คอนกรีตสดนั่นเอง ความเหลวหรือความเปียกนี้ สามารถตรวจสอบได้จากการยุบตัว (Slump) คอนกรีตที่มีความยุบตัวสูงก็จะมี ความเหลวมาก ความเหลวในที่นี้ไม่เกี่ยวกับคุณสมบัติความสามารถในการทำงานของคอนกรีต ในการเลือกอัตราส่วนผสมคอนกรีตนั้น ปริมาณน้ำที่จะใช้เป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ

ความแข็งแรง (Strength) กำลังความแข็งแรงของคอนกรีตนั้นว่าเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างยิ่ง ในสถานะทั่วไปกำลังของคอนกรีตคำนวณจากปริมาณน้ำสุทธิตี่ใช้เทียบกับซีเมนต์หนึ่ง หน่วยปริมาณน้ำสุทธิตี่ว่านี้ไม่รวมถึงน้ำที่ถูกซึมเข้าไปในมวลรวมคละ อย่างไรก็ตามกำลังของ คอนกรีตที่ได้จากอัตราส่วนของน้ำกับซีเมนต์จำนวนหนึ่งนี้อาจจะแตกต่างกันไปเนื่องจากขนาดของมวลรวมคละ รูปทรงของมวลรวม ความแกร่งของมวลรวม หรือการใช้ซีเมนต์ต่างชนิดกันตลอดจนกระทั่งปริมาณอากาศและการใช้สารผสมเพิ่ม

ความคงทน (Durability) คอนกรีตที่ดีต้องมีความสามารถในการคงทนต่อสภาวะ แวดล้อมต่าง ๆ ในขณะที่อยู่ในสถานะกำลังใช้งาน อาจจะเป็นอากาศหนาวจัด ร้อนจัด ฝนตก แดดออกหรือผลจากสารเคมี ซึ่งสิ่งต่างเหล่านี้ควรมีการใช้สารผสมเพิ่ม เพื่อให้คอนกรีตเกิดความคงทนภายใต้สภาวะดังกล่าว ให้กำหนดค่า water-cement ratio ต่ำ ๆ อาจมีส่วนช่วยยืดอายุคอนกรีตให้คงทนขึ้นได้มาก

ความหนาแน่น (Density) คอนกรีตบางชนิดอาจมีความจำเป็นที่ต้องใช้คุณสมบัติ จากน้ำหนักของตัวมันเองดังนั้น การเลือกใช้วัสดุหรือความหนาแน่นก็ควรจะให้เป็นที่ต้องการ

#### (4) ข้อมูลพื้นฐาน

ในการคำนวณอัตราส่วนผสมคอนกรีต จำเป็นต้องทราบข้อมูลพื้นฐานบางอย่างจากวัสดุที่นำมาเป็นส่วนผสม ดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์ขนาดของมวลรวมหยาบและละเอียดด้วยตะแกรง
2. ค่าหน่วยน้ำหนักของมวลรวมหยาบ
3. ค่า Bulk specific gravities และค่าอัตราการดูดซึมของมวลรวมคละ
4. ปริมาณน้ำที่ต้องการใช้สำหรับการผสมคอนกรีต
5. ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกับอัตราส่วนน้ำกับซีเมนต์

อย่างไรก็ตาม ข้อมูลดังกล่าวอาจกำหนดได้จากตารางคำนวณเช่นข้อมูลที่ 4 และ 5 อาจดูได้จากตารางที่กำหนดไว้ให้หรือข้อมูลที่ 3 อาจไม่จำเป็นต้องทราบเลยก็สามารถจะหาอัตราส่วนผสมของคอนกรีตได้เช่นกัน

#### (5) ขั้นตอนการคำนวณ

ขั้นตอนสำหรับการเลือกอัตราส่วนผสมคอนกรีต ในที่นี้ควรกระทำไปตามลำดับขั้นตอนที่กำหนด สิ่งแรกก็คือต้องทราบความต้องการหรือคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุที่จะใช้ ซึ่งมีดังนี้

1. อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงสุด
2. ปริมาณซีเมนต์น้อยสุด
3. ปริมาณอากาศ
4. ค่ายุบตัว
5. ขนาดโตสุดของมวลรวมคละ
6. กำลังคอนกรีต

7. อาจมีความต้องการอื่น ๆ อีกนอกเหนือจากการคำนวณ เช่น สารผสมเพิ่ม และซีเมนต์ชนิดพิเศษ เหล่านี้เป็นต้น

ข้อมูลสำหรับความจำเป็นเบื้องต้นเหล่านี้ มีหลักและวิธีการปฏิบัติตามขั้นตอนต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่ายุบตัว : หากค่ายุบตัวไม่ได้กำหนดไว้ในความต้องการของงาน อาจใช้ตารางที่ 1 ช่วยในการคำนวณได้ ค่ายุบตัวต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ในตารางนี้ เป็นค่ายุบตัวสำหรับการเทคอนกรีตที่ใช้เครื่องจักรสั่นสะเทือนให้คอนกรีตแน่น และเป็นส่วนผสมที่ความชื้นเหนียว เหมาะสมแก่สภาพงานอย่างยิ่ง

ขั้นตอนที่ 2 การกำหนดขนาดโตสุดของมวลรวม : มวลรวมคละที่มีขนาดเรียง ประกอบด้วยขนาดใหญ่ที่มีจำนวนมาก ย่อมเกิดช่องว่างน้อยกว่ามวลรวมคละที่มีขนาดเรียงเม็ดเล็ก ๆ ทั้งนี้เพราะเมื่อคิดปริมาณคอนกรีตต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรแล้ว มวลรวมคละที่มีขนาดใหญ่ต้องใช้เนื้อปูนหรือมอร์ต้า น้อยกว่า อย่างไรก็ตามมีข้อกำหนดไว้ว่าขนาดของมวลรวมใหญ่สุดไม่ควรเกิน 1/5 เท่า ของขนาดโครงสร้างที่แคบที่สุด หรือ 1/3 เท่าของความหนาพื้น หรือ 3/4 เท่าของระยะต่ำสุดของเหล็กเสริมที่อยู่ในแนวเดียวกัน

ขั้นตอนที่ 3 การกำหนดปริมาณน้ำผสมและปริมาณอากาศ : ปริมาณน้ำที่ใช้ผสม คอนกรีตในหนึ่งหน่วยปริมาตรที่จะทำให้เกิดค่ายุบตัวตามกำหนดในขั้นตอนแรกนั้น ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดโตสุด รูปทรงและขนาดเรียงของมวลรวมคละ และนอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับปริมาณฟองอากาศอีกด้วย ในตารางที่ 2 เป็นตารางที่ช่วยในการประมาณการของจำนวนน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตสำหรับมวลรวมคละขนาดต่าง ๆ ทั้งที่เป็นคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตกักฟองอากาศ เนื่องจากขนาดและรูปร่างของมวลรวมที่อาจวัดได้ไม่แน่นอน อาจทำให้ค่าในตารางที่วัดให้ไว้ผิดพลาดไปบ้างเล็กน้อย แต่ก็คิดว่าจะยังคงถูกต้องเพียงพอสำหรับการประมาณขั้นแรกนี้ และจำนวนน้ำที่แตกต่างกัน จากความที่น่าจะเป็นจริงเพียงเล็กน้อยนี้ไม่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของคอนกรีตเลย ทั้งนี้เพราะยังมีปัจจัยอื่น ๆ อีกมากมายนักที่เกี่ยวข้อง

ขั้นตอนที่ 4 การเลือกอัตราส่วนน้ำซีเมนต์ (WCR) : ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ ต้องการในการผสมคอนกรีตนั้น มิใช่เพียงเพื่อให้คอนกรีตเกิดกำลังตามต้องการนั้น แต่ยังเพื่อช่วยให้เกิดความคงทนและความสามารถที่จะตกแต่งได้อีกด้วย จะเห็นว่าค่า WCR เดียวกันนี้อาจจะทำให้ คอนกรีตมีกำลังแตกต่างกันได้ ถ้าใช้มวลรวมคละหรือประเภทของซีเมนต์ที่แตกต่างกัน สิ่งเหล่านี้ควรจะได้ ก่อให้เกิดการปรับปรุงหรือแก้ไขค่า WCR ให้สอดคล้องกันกับวัสดุที่นำมาใช้จริง ๆ สำหรับงานคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยต้องการให้กำลังคอนกรีตเกิดที่ระดับต่าง ๆ นั้น จะดูได้จากตารางที่ 3.3 (ก) ค่าในตารางเป็นค่าโดยประมาณของ WCR และกำลังคอนกรีตที่ระดับต่าง ๆ คิดจากคอนกรีตที่ได้รับการบ่มอย่างดีในห้องปฏิบัติการครบรอบ 28 วัน ซึ่งจากข้อความนี้แน่นอน เมื่อต้องการจะเลือกใช้ค่า WCR ในการทำงานจริง ๆ ควรเลือกใช้ค่า WCR ของกำลังคอนกรีตที่สูงกว่าความต้องการไว้บ้าง ทั้งนี้เพื่อไม่ให้ค่ากำลังเฉลี่ยในงานจริงต่ำกว่ากำหนด

สำหรับสภาวะพิเศษ (Severe Condition) ค่า WCR ควรจะต่ำเป็นพิเศษเพื่อที่จะให้ได้กำลังของคอนกรีตตามต้องการ ซึ่งถ้าเป็นสภาวะเช่นนี้ให้ดูตารางที่ 3.3 (ข)

ขั้นตอนที่ 5 การคำนวณปริมาณซีเมนต์ : ปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการในหนึ่งหน่วยปริมาตรนั้นขึ้นอยู่กับค่าที่ได้ในขั้นตอนที่ 3 และ 4 ที่ผ่านมา โดยที่จำนวนซีเมนต์นี้เท่ากับ

$$\text{ปริมาณซีเมนต์} = \text{จำนวนน้ำที่ใช้} / WCR \quad (3.1)$$

ขั้นตอนที่ 6 การประมาณปริมาณมวลรวมหยาบ : ปริมาณมวลรวมหยาบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีต หาได้จากตารางที่ 4 คูณด้วยค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง (Dry unit weight) ของมวลรวมซึ่งมีหน่วยเป็น กก./ลบ.ม. จะเห็นว่าสำหรับคอนกรีตที่มีความสามารถในการทำงานที่เท่ากันนั้น ปริมาณของมวลรวมหยาบขึ้นอยู่กับขนาดของมวลรวมหยาบและค่า Fineness modulus ของมวลรวมละเอียดเท่านั้น

ขั้นตอนที่ 7 การประมาณปริมาณมวลรวมละเอียด : การประมาณปริมาณมวลรวมละเอียดนั้นสามารถกระทำ ได้สองวิธีคือ วิธีน้ำหนัก (The weight method) หรือวิธีปริมาตร (The absolute volume Method)

วิธีน้ำหนักเริ่มต้นจากน้ำหนักของคอนกรีตจะต้องถูกสมมติขึ้นก่อน โดยอาจประมาณเอาจากประสบการณ์ จากนั้นน้ำหนักของมวลรวมละเอียดที่ต้องการก็จะหาได้ง่ายจากการเอาน้ำหนักคอนกรีตสดหักออกจากน้ำหนักของวัสดุผสมต่าง ๆ แต่อย่างไรก็ตาม อาจใช้ตารางที่ 3.5 ช่วยในการประมาณน้ำหนักของคอนกรีตก็ได้ที่ใกล้เคียงขึ้น

สำหรับน้ำหนักคอนกรีตสด ถ้าต้องการคำนวณให้ค่าถูกต้องจริง ๆ จะหาได้จะสมการข้างล่างนี้

$$U_M = 10 G_a (100 - A) + C_m (1 - G_a / G_c) - W_m (G_a - 1) \quad (3.2)$$

โดยที่

$U_M$  = น้ำหนักคอนกรีตสด, กก./ลบ.ม.

$G_a$  = ความถ่วงจำเพาะเฉลี่ยของมวลรวมละเอียด (หยาบ+ละเอียด)

$G_c$  = ความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ (ทั่วไปเท่ากับ 2,400 กก. /ลบ.)

$A$  = ปริมาณอากาศ, %

$W_m$  = ปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับผสมคอนกรีต, กก. /ลบ.

$C_m$  = ปริมาณซีเมนต์, กก./ลบ.

ตารางที่ 3.2 ค่ายุบตัวสำหรับงานประเภทต่าง ๆ

ประเภทงาน	ค่ายุบตัว, ซม	
	สูงสุด*	ต่ำสุด
ฐานราก ค.ส.ล.	5	2
ฐานรากคอนกรีตลึ้น,เคของ และผนังกันดิน	6	2
คานและกำแพง ค.ส.ล.	10	2
เสา ค.ส.ล.	10	2
แผ่นพื้นและถนน	6	2
คอนกรีตขนาดใหญ่	6	2

\*อาจเพิ่มค่ายุบตัวไปอีก 3 ซม. หากใช้กรรมวิธีอื่นทำให้คอนกรีตแน่นนอกจากวิธีตามปกติ

ตารางที่ 3.3 ปริมาณน้ำผสมคอนกรีต

ค่ายุบตัวของคอนกรีต ซม.	ปริมาณน้ำ, กก./ลบ.ม. สำหรับคอนกรีตที่มีมวลรวมคละขนาดโตสุด เป็น มม.							
	10	12.5	20	25	40	50	70	150
<b>คอนกรีตธรรมดา</b>								
3 ถึง 5	205	200	185	180	150	155	145	125
8 ถึง 10	225	215	200	195	175	175	160	140
15 ถึง 18	240	230	210	205	185	185	170	-
ปริมาณอากาศที่เกิด ในคอนกรีตธรรมดา,%	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
<b>คอนกรีตกระจายกักฟองอากาศ</b>								
3 ถึง 5	180	175	165	150	145	140	135	120
8 ถึง 10	200	190	180	175	160	153	150	135
15 ถึง 18	215	205	190	185	170	165	160	-
ปริมาณอากาศที่ควร ให้มี,%	8	7	6	5	4.5	4	3.5	3

ตารางที่ 3.4 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคอนกรีตกับอัตราส่วนของน้ำ-ซีเมนต์

กำลังอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน ( กก./ตร.ซม. )	อัตราส่วนน้ำ-ซีเมนต์โดยน้ำหนัก	
	คอนกรีตธรรมดา	คอนกรีตกระจายฟองอากาศ
450	0.38	-
400	0.43	-
350	0.48	0.4
300	0.55	0.48
250	0.62	0.55
200	0.7	0.61
150	0.8	0.71

\*กำลังคอนกรีตคิดจากตัวอย่างทรงกระบอกขนาด  $\phi$  15 x 30 ซม. ป่มขึ้นจนได้อายุ 28 วัน ที่อุณหภูมิ  $23 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$  ถ้าเทียบกับตัวอย่างลูกบาศก์ค่าจะสูงกว่าประมาณ 20%

ตารางที่ 3.4 (ข) อัตราส่วนน้ำ - ซีเมนต์ที่ยอมให้สำหรับงานภายใต้สภาวะพิเศษ

ชนิดของโครงสร้าง	โครงสร้างที่เปียกชื้นตลอดเวลา หรือทนต่ออากาศหนาว	คอนกรีตสัมผัสน้ำทะเลหรือ ซัลเฟต
ชิ้นส่วนเล็กๆ อาทิ ราว, ขอบกัน, บัวหรือหน้าต่างที่ มีระยะหุ้มต่ำกว่า 3 ซม.	0.45	0.40*
โครงสร้างทั่วไป	0.5	0.45*

\*ควรใช้คอนกรีตชนิดสารกระจายฟองอากาศ

ตารางที่ 3.5 ปริมาตรของหินต่อคอนกรีตหนึ่งหน่วยปริมาตร

หินขนาดโตสุด (มม.)	ปริมาตรของหินต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของทรายที่มี ค่าแห่งความละเอียดต่างกัน			
	2.40	2.50	2.80	3.00
10	0.30	0.48	0.45	0.48
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
20	0.66	0.66	0.62	0.60
25	0.71	0.68	0.68	0.65
40	0.76	0.74	0.72	0.70
50	0.78	0.78	0.74	0.72
70	0.81	0.79	0.77	0.75
150	0.87	0.85	0.83	0.81

ค่าแห่งความละเอียดของทราย = ผลรวมของสัดส่วนสะสมที่ค้างบนตะแกรงขนาด 0.149, 0.297, 0.593, 1.78, 2.38 และ 4.76 มม.

ตารางที่ 3.6 น้ำหนักคอนกรีตสด

ขนาดโตสุดของหินที่ใช้ (มม.)	น้ำหนักคอนกรีตสด (กก. /ม. <sup>3</sup> )	
	คอนกรีตธรรมดา	คอนกรีตกระจายฟองอากาศ
10	2285	2180
12.5	2318	2235
20	2355	2280
25	2375	2315
40	2420	2355
50	2445	2375
70	2485	2400
150	2506	2435

สำหรับวิธีปริมาตรเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการหาปริมาตรของมวลรวมละเอียดที่ได้ค่าแน่นอน ซึ่งย่อมเกี่ยวข้องกับปริมาตรส่วนผสมต่าง ๆ ที่อยู่ในคอนกรีต ในที่นี้คือน้ำ, อากาศ, ซีเมนต์และมวลรวมหยาบ นำปริมาตรเหล่านี้ไปหักออกจากปริมาตรของคอนกรีตก็จะได้ปริมาตรของมวลรวมละเอียด ปริมาตรของวัสดุต่าง ๆ ที่อยู่ในคอนกรีตอาจหาได้โดยเอาน้ำหนักหารด้วยความหนาแน่นของตัวมันเอง

ขั้นตอนที่ 8 การปรับค่าสำหรับความชื้นในมวลรวมคละ : ปริมาณของมวลรวม คละที่ได้จากการชั่งน้ำหนักนั้น จะต้องอยู่ในขอบข่ายของความชื้นที่ยอมให้ได้ในมวลรวมคละ โดยทั่วไปมวลรวมคละจะต้องมีความชื้น โดยจะมีเปอร์เซ็นต์ของน้ำที่ถูกซึบเคลือบผิวอยู่ ดังนั้นปริมาณน้ำที่จะใส่เข้าไปผสมจะต้องลดลงตามจำนวนของความชื้นในมวลรวมคละ

### 3.3 การทดสอบและวิธีการผลิต

วิธีการผลิต การทดสอบ อุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการทดสอบ ขั้นตอนการทดสอบ รวมถึงวิธีการบันทึกผลการ ทดสอบ ที่จะนำมาใช้ในการปฏิบัติงานโครงการ

#### 3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต

##### 3.3.1.1 วัสดุที่ใช้ มีดังนี้

- 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งใช้สำหรับงานโครงสร้างทั่วไป แสดงในรูปที่ 3.1
- 2) น้ำ ต้องเป็นน้ำที่สะอาด ปราศจากสิ่งเจือปนใด ๆ โดยทั่วไปจะใช้น้ำประปาในการผสม
- 3) มวลรวมละเอียดที่ใช้ เป็นทรายแม่น้ำ
- 4) มวลรวมหยาบที่ใช้ เป็นหินและเศษคอนกรีตที่มีขนาดอยู่ระหว่าง  $\frac{3}{4}$  นิ้ว และ 1  $\frac{1}{2}$  นิ้ว แสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



รูปที่ 3.2 หินและเศษคอนกรีตที่ใช้เป็นมวลรวมหายาบ

### 3.3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ มีดังนี้

- 1) โม่ผสมคอนกรีต
- 2) เครื่องชั่ง
- 3) แบบหล่อทรงกระบอกขนาด  $\phi$  15 x 30 เซนติเมตร และ ทรงลูกบาศก์ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร
- 4) ถังสำหรับตวงน้ำ



รูปที่ 3.3 โม่ผสมคอนกรีต



รูปที่ 3.4.ก แบบหล่อทรงกระบอกขนาด  $\varnothing 15 \times 30$  เซนติเมตร



รูปที่ 3.4.ข แบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด  $15 \times 15 \times 15$  เซนติเมตร

### 3.3.2 ขั้นตอนการผสมคอนกรีต

- 1) เตรียมส่วนผสมตามสัดส่วนที่ออกแบบไว้
- 2) เทปูนซีเมนต์และมวลรวมหยาบ จากนั้นค่อยเติมน้ำจนส่วนผสมเข้ากันดี
- 3) เทมวลรวมหยาบลงในไม้ จนให้ส่วนผสมทั้งหมดเข้ากันดี
- 4) ทำการทดสอบค่ายุบตัว
- 5) ทำการเทส่วนผสมลงในแบบหล่อ
- 6) แกะแบบหล่อเมื่อคอนกรีตมีอายุได้ 1 วัน
- 7) นำตัวอย่างคอนกรีตที่ได้ไปบ่มในบ่อ รोजนครบ 28 วัน เพื่อทำการทดสอบในขั้นตอนต่อไป

### 3.3.3 การทดสอบคุณสมบัติของส่วนผสมและคอนกรีต

#### 3.3.3.1 การทดสอบหาส่วนขนาดละเอียดและมวลรวมหยาบ (Text for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates) ASTM : c 136 – 93

##### (1) วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบหาขนาดของมวลรวมละเอียดโดยใช้ตะแกรงมาตรฐานสำหรับหาค่าพิกัดความละเอียด (Fineness modulus) ซึ่งเป็นดัชนีที่เป็นปฏิกิริยาโดยประมาณกับขนาดเฉลี่ยของ อนุภาคในมวลรวมที่กำหนดให้ นั่นคือมวลรวมยิ่งหยาบค่าพิกัดความละเอียดก็ยิ่งสูงขึ้น

#### 3.3.3.2 การทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของมวลรวม (Test for Unit Weight and Voids in Aggregate) ASTM: c 29M - 91a

##### (1) วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบหาน้ำหนักของมวลรวมต่อหน่วยปริมาตร ทั้งในสภาพที่อัดตัวแน่น และหลวม ตัวไม่ว่าจะเป็นทราย หิน หรือมวลรวมผสมก็ตาม ทั้งนี้เพื่อนำไปเป็นส่วนหนึ่งของการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

#### 3.3.3.3 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด (Test for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate) ASTM: c 128-93

##### (1) วัตถุประสงค์

เพื่อหาความถ่วงจำเพาะและอัตราการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด เช่น ทราย ทรายหยาบ สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง นอกจากนี้หินหรือกรวดที่มีขนาดเล็กไม่เกิน 3/4” ก็สามารถ ใช้วิธีนี้ทดสอบได้เช่นกัน

#### 3.3.3.4 การหาความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ (Test for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregates) ASTM : C12793

##### (1) วัตถุประสงค์

เพื่อหาความถ่วงจำเพาะและอัตราการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบเพื่อประโยชน์ในการออกแบบอัตราส่วนผสมของคอนกรีต วิธีนี้เรียกว่า Suspension Method

### 3.3.3.5 การความแกร่งของมวลรวมหยาบ (Test for Resistance to degradation of Coarse Aggregate By Abrasion and impact in Los Angeles Machine) ASTM: c 131 - 89

#### (1) วัตถุประสงค์

เพื่อหาความแกร่งของวัสดุมวลรวมหยาบ (หิน) ที่มีขนาดต่ำกว่า 1 1/2“ โดยใช้เครื่องมือทดสอบ Los Angeles Machine โดยมีแบบการจัดขนาดคละตามมาตรฐานมวลรวมหยาบที่มีความแกร่ง จะต้องมีการเปอร์เซ็นต์สึกกร่อนไม่เกิน 50

### 3.3.3.6 การทดสอบหาปริมาณความชื้นในมวลรวม (Test for Total Moisture Content of Aggregate by Drying) ASTM: c 566 - 89

#### (1) วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบหาอัตราของความชื้นทั้งหมดที่มีอยู่ในมวลรวม โดยการทำให้มวลรวมแห้งด้วยการเผา ซึ่งจะทำให้ได้น้ำหนักที่แท้จริงของมวลรวมสำหรับซึ่งผสมคอนกรีต

### 3.3.3.7 การทดสอบหาค่ายุบตัวของคอนกรีตสด (Test for Slump of Fresh Concrete) ASTM: c 143 - 90a

#### (1) วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบหาความสามารถในการไหลและในการเทลงแบบของคอนกรีตสด ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตนั้น หากมากหรือน้อยเกินไป จะมีผลต่อการเทและจึ้เขย่าให้แน่น อาจเป็นเหตุให้คอนกรีตเสียกำลังเมื่อแข็งตัวเต็มที่

### 3.3.3.8 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (Text for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimen) ASTM: c 39 - 93a

#### (1) วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่าง ๆ กัน โดยการใส่แรงอัดโดยตรงกับแบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอกตามมาตรฐาน ASTM

### 3.3.3.9 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต (Test for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens) ASTM: C496 - 90

#### (1) วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบหาลังรับแรงดึงของคอนกรีต จากการทดสอบที่กระทำทางอ้อม คือการทดสอบการปริแตกของแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอก เนื่องจากการทดสอบโดยตรงกระทำได้ยาก ซึ่งโดยทั่วไปกำลังปริแตกจะอยู่ภายในช่วง 5 - 12 % สูงกว่ากำลังรับแรงดึงโดยตรง

### 3.4 การสร้างสมการทำนายกำลังรับแรงอัดและแรงดึง

#### 3.4.1 การสร้างสมการความสัมพันธ์สำหรับค่าความต้านทานแรงอัดและแรงดึงโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์

##### (1) วัตถุประสงค์

เพื่อสร้างสมการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ข้อมูลและตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ Function Approximation โดยใช้วิธีในการประมาณจากกราฟความสัมพันธ์เช่น Linear Least-Squares Approximation , Quadratic Least-Squares Approximation และ Cubic Least-Squares Approximation, Multiple Regression เป็นต้น โดยกำหนดตัวแปรอิสระทั้งหมด 3 ตัวแปร ประกอบด้วย สัดส่วนการแทนที่ (P) , ค่ากำลังของ RCA (S) และค่ากำลังอัด(Sc) ที่ใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังรับแรงดึง และในส่วนของตัวแปรตามหรือผลลัพธ์ ได้แก่ กำลังอัดที่อายุ 28 วัน (Compressive Strength) , กำลังดึงที่อายุ 28 วัน (Tensile Strength) และ ความหนาแน่นของคอนกรีต (Density)

$$C \text{ (Compressive Strength)} = a_0 + a_1 (P) + a_2 (S) \quad (3.19)$$

$$T \text{ (Tensile Strength)} = a_0 + a_1 (P) + a_2 (S) \quad (3.20)$$

$$D \text{ (Density)} = a_0 + a_1 (P) + a_2 (S) \quad (3.21)$$

โดยที่

$$C = \text{ค่ากำลังรับแรงอัด (ksc)}$$

$$T = \text{ค่ากำลังรับแรงดึง (ksc)}$$

$$D = \text{ค่าความหนาแน่นของคอนกรีต (ksc)}$$

$$P = \text{สัดส่วนการแทนที่ (\%)}$$

$$S = \text{ค่ากำลังอัดของ RCA (ksc)}$$

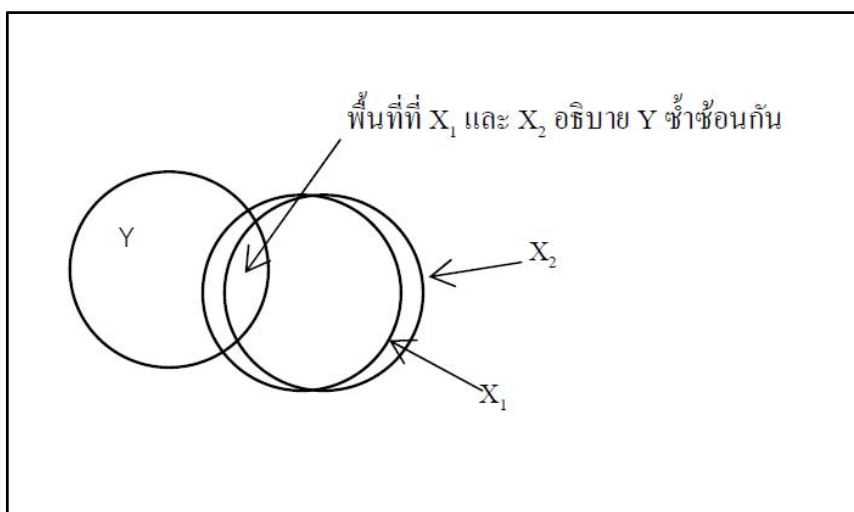
โดยจะใช้โปรแกรม SPSS , Microsoft Excell ในการวิเคราะห์หาค่าคงที่  $a_0$ ,  $a_1$  และ  $a_2$

และทำการตรวจสอบความแม่นยำในค่าทางสถิติต่อไป

### 3.5 สถิติที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลอง

การทดสอบแบบการประมาณกำลังรับแรงอัด, ค่ากำลังรับแรงดึงและความหนาแน่น ในรูปสมการเส้นตรงหลายตัวแปร จะมีข้อตกลงเบื้องต้นในการวิเคราะห์ดังนี้

- 1) ตัวแปรอิสระจะต้องไม่มีความสัมพันธ์กันเอง (Multicollinearity) เมื่อเกิดความสัมพันธ์กันเองจะทำให้บางตัวไม่สามารถเข้าสู่สมการได้ เมื่อชุดตัวแปรอิสระนั้นมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันสูงมากจะมีผลทำให้ตัวแปรอิสระแสดงผลต่อตัวแปรตามผิดไปจากที่ควรจะเป็น ลักษณะการเกิดตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กันเอง อธิบายได้ตามรูปที่ 3.9 ดังนี้



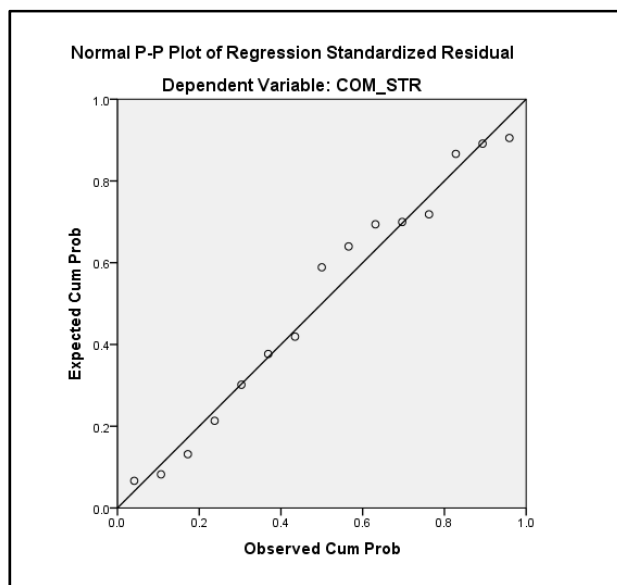
รูปที่ 3.5 ความซ้ำซ้อนในการอธิบายตัวแปรตาม

การตรวจสอบตัวแปรอิสระต้องไม่มีความสัมพันธ์กันเอง ( Multicollinearity) จะใช้ค่า Variance inflation factor (VIF) หรือค่า Tolerance หรือค่า Eigen value ตัวใดตัวหนึ่งก็ได้โดยมีเกณฑ์การตรวจสอบดังนี้

Variance inflation factor (VIF) < 10	แสดงว่าไม่เกิด Multicollinearity
Tolerance > 0.2	แสดงว่าไม่เกิด Multicollinearity
Eigen value $\leq 10$	แสดงว่าไม่เกิด Multicollinearity

- 2) ในการวิเคราะห์แบบการประมาณที่มีตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป จะต้องทำการทดสอบว่าจะสามารถใช้ตัวแปรอิสระที่คัดเลือกเข้าสมการมาทำนายตัวแปรตามได้หรือไม่ วิธีการทดสอบจะใช้ค่าระดับนัยยะสำคัญที่ 0.05 แต่ในการประมาณนี้จะยอมใช้ค่าระดับนัยสำคัญที่ 0.10 ได้เนื่องจากจำนวนข้อมูลมีอย่างจำกัด ถ้าค่า t มีค่าสูงอย่างมีนัยสำคัญ (หรือค่า Sig. มีค่าน้อยหรือเท่ากับระดับนัยสำคัญที่กำหนด) แสดงว่าสามารถนำตัวแปรอิสระมาใช้ทำนายผลของตัวแปรตามได้

- 3) ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการประมาณ (Error or Residual) จะต้องมีการแจกแจงแบบปกติ ตรวจสอบได้โดยใช้ Normal Probability Plot ซึ่งเป็นคำสั่งในโปรแกรม SPSS วงกลมแสดงถึงค่า Probability ของข้อมูล ส่วนเส้นตรงที่ลากทแยงเป็นแนวเส้นแสดงการแจกแจงแบบปกติ จุดวงกลมมีการเรียงตัวใกล้เส้นตรงจะถือว่ามีแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงการแจกแจงแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อน

- 4) ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการประมาณ (Error or Residual) จะต้องมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ ตรวจสอบโดยดูผลของ Residuals Statistic ต้องเท่ากับศูนย์ การทดสอบความแม่นยำของแบบการประมาณนั้น จะมีวิธีดังนี้
- 1) สัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of Determination :  $R^2$ ) เป็นค่าที่อธิบายว่าสมการที่ใช้ประมาณถ้ามีความสามารถอธิบายความผันผวน (variation) ของตัวแปรตามได้มากน้อยเพียงใด หรือตัวแปรอิสระในแบบจำลองอธิบายตัวแปรตามได้มากน้อยเพียงใด มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ยิ่งค่า  $R^2$  ใกล้เคียง 1 แสดงว่าสามารถทำนายค่าตัวแปรตามได้แม่นยำมากยิ่งขึ้นการคำนวณค่า  $R^2$  จะคำนวณตามสมการที่ 3.22 ดังนี้ (สถิตย์พงษ์ วงศ์สง่า, 2555) [14]

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (E_{\text{Prediction},i} - \bar{E}_{\text{Prediction},i})(E_{\text{Measured},i} - \bar{E}_{\text{Measured},i})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N (E_{\text{Prediction},i} - \bar{E}_{\text{Prediction},i})^2][\sum_{i=1}^N (E_{\text{Measured},i} - \bar{E}_{\text{Measured},i})^2]}} \times 100$$

เมื่อ

$E_{\text{Prediction},i}$  คือ ข้อมูลที่ได้จากการประมาณโดยใช้แบบการประมาณตำแหน่งที่  $i$

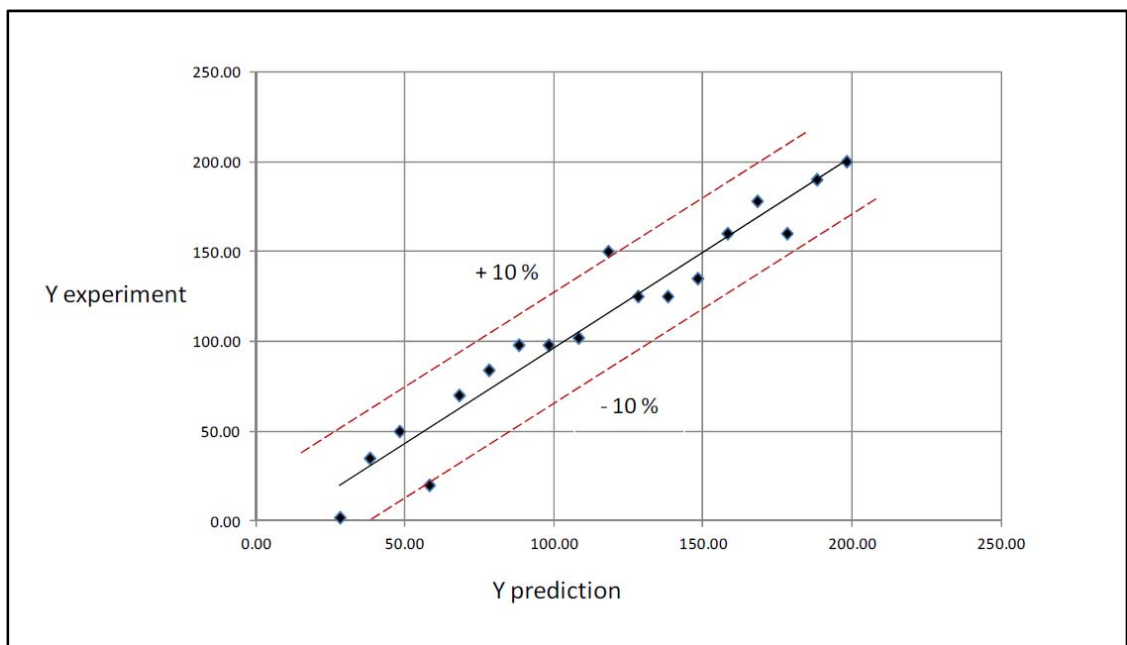
$\bar{E}_{\text{Prediction},i}$  คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการประมาณโดยใช้แบบการประมาณตำแหน่งที่  $i$

$E_{\text{Measured},i}$  คือ ข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือตำแหน่งที่  $i$

$\bar{E}_{\text{Measured},i}$  คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือ

$N$  คือ จำนวนชุดข้อมูล

- 2) ทำการตรวจสอบโดยการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลของสมการที่ได้จากการประมาณกับค่าที่ได้จากการทดลองว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงหรือไม่ ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมการการประมาณกับผลการทดลอง

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่นำมาใช้ผสมคอนกรีต

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลจากการทดลอง ซึ่งแต่ละการทดลองนั้นได้กล่าววิธีการทดลองไว้แล้วในบทที่ 3 และมีการนำข้อมูลต่างๆที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ เพื่อที่จะแปรผลข้อมูลในบทนี้ ซึ่งจากผลการทดลองคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ พบว่า ทรายที่ใช้มีค่า Modulus ความละเอียดอยู่ที่ 2.571 และมีค่าอัตราการดูดซึมน้ำอยู่ที่ 1.695% ซึ่งเป็นทรายแม่น้ำ

ส่วนวัสดุที่เป็นมวลรวมหยาบนั้น แบ่งออกเป็น 4 type โดยจะมีหลักการกำหนดชื่อดังนี้

1. Type CR (Crushed Rock , หิน )
2. Type RCA-280 ( เศษคอนกรีตคัดมาจากกำลังอัด 280 ksc )
3. Type RCA-380 ( เศษคอนกรีตคัดมาจากกำลังอัด 380 ksc )
4. Type RCA-500 ( เศษคอนกรีตคัดมาจากกำลังอัด 500 ksc )

สามารถสรุปเป็นตารางได้ดัง ตารางที่ 4.1 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 สรุปค่าคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่นำมาใช้ผสมคอนกรีต

ชนิด	ความถ่วงจำเพาะ	อัตราการดูดซึมน้ำ (%)	หน่วยน้ำหนัก (kg/m <sup>3</sup> )
Type CR	2.985	0.905	1559.76
Type RCA-280	2.284	3.644	1283.904
Type RCA-380	2.312	3.125	1310.342
Type RCA-500	2.288	2.994	1333.151

#### 4.1.1 การทดสอบหาส่วนขนาดของคละของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ

(Test for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates) ASTM : C 136 – 93

เพื่อทดสอบหาขนาดของมวลรวมคละ โดยใช้ตะแกรงมาตรฐานสำหรับหาค่าพิกัดความละเอียด (Fineness Modulus) ซึ่งเป็นดัชนีที่เป็นปฎิภาคโดยประมาณกับขนาดเฉลี่ยของอนุภาคในมวลรวมที่กำหนดให้ นั่นคือมวลรวมยิ่งหยาบค่าพิกัดความละเอียดก็ยิ่งสูงขึ้น

#### ผลการทดสอบหาค่าความละเอียดของทราย

PROJECT : Civil Engineering

SAMPLE TYPE : Sand

DESCRIPTION : ทำเพื่อหาค่า Fineness Modulus ของทราย

TEST DATE : 29/1/61

DRY WEIGHT OF ORIGINAL SAMPLE : 500 gm.  
ครั้งที่ 1

Sieve No.	Sieve Opening (mm.)	WT. Sieve (gm.)	WT. Sieve + Sample (gm.)	WT. Sample Retained (gm.)	Percent Retained	Cumulative Percent Retained	Percent finer or Passing
1 1/2"							
1"							
3/4 "							
1/2"							
3/8"							
No. 4	9.5	471.75	477.41	5.66	1.132	1.132	98.868
No. 8	2.36	693.82	722.78	28.96	5.792	6.924	93.076
No. 16	1.18	661.06	728.81	67.75	13.55	20.474	79.526
No. 30	0.6	604.52	741.53	137.01	27.402	47.876	52.124
No. 50	0.3	548.27	720.85	172.58	34.516	82.392	17.608
No. 100	0.15	517.42	586.32	68.9	13.78	96.172	3.828
PAN		482.6	501.74	19.14	3.828	-	-
			Σ	500	100	254.97	

FINENESS MODULUS = TOTAL OF CUMULATIVE PERCENT RETAINED/100 = 2.550

PROJECT : Civil Engineering

SAMPLE TYPE : Sand

DESCRIPTION : ทำเพื่อหาค่า Fineness Modulus ของทราย

TESTED BY : 29/1/61

DRY WEIGHT OF ORIGINAL SAMPLE : 500 gm.

ครั้งที่ 2

Sieve No.	Sieve Opening (mm.)	WT. Sieve (gm.)	WT. Sieve + Sample (gm.)	WT. Sample Retained (gm.)	Percent Retained	Cumulative Percent Retained	Percent finer or Passing
1 1/2"							
1"							
3/4 "							
1/2"							
3/8"							
No. 4	9.5	471.75	475.2	4.09	0.818	0.818	99.182
No. 8	2.36	693.82	719.6	25.78	5.156	5.974	94.026
No. 16	1.18	661.06	735.7	74.64	14.928	20.902	79.098
No. 30	0.6	604.52	737.9	133.38	26.676	47.578	52.422
No. 50	0.3	548.27	727.97	179.7	35.94	83.518	16.482
No. 100	0.15	517.42	591.41	73.99	14.798	98.316	1.684
PAN		482.6	491.02	8.42	31.684	-	-
				$\Sigma = 500$	$\Sigma = 100$	$\Sigma = 257.106$	

FINENESS MODULUS = TOTAL OF CUMULATIVE PERCENT RETAINED/100 = 2.571

PROJECT : Civil Engineering

SAMPLE TYPE : Sand

DESCRIPTION : ทำเพื่อหาค่า Fineness Modulus ของทราย

TEST DATE : 29/1/61

DRY WEIGHT OF ORIGINAL SAMPLE : 500 gm.

ครั้งที่ 3

Sieve No.	Sieve Opening (mm.)	WT. Sieve (gm.)	WT. Sieve + Sample (gm.)	WT. Sample Retained (gm.)	Percent Retained	Cumulative Percent Retained	Percent finer or Passing
1 1/2"							
1"							
3/4 "							
1/2"							
3/8"							
No. 4	9.5	471.75	473.26	1.51	0.302	0.302	99.698
No. 8	2.36	693.82	720.18	26.36	5.272	5.574	94.426
No. 16	1.18	661.06	727.89	66.83	13.366	18.94	81.06
No. 30	0.6	604.52	750.43	145.91	29.182	48.122	51.878
No. 50	0.3	548.27	740.68	192.41	38.482	86.604	13.396
No. 100	0.15	517.42	582.94	65.52	13.104	99.708	0.292
PAN		482.6	484.06	1.46	0.292	-	-
			Σ	500	100	259.25	

FINENESS MODULUS = TOTAL OF CUMULATIVE PERCENT RETAINED/100 = 2.592

ดังนั้น จะได้ว่าค่าเฉลี่ยของ Fineness modulus =  $\frac{2.569+2.573+2.571}{3} = 2.571$

#### 4.1.2 การทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของมวลรวม

(Test for Unit Weight and Voids in Aggregate) ASTM : C29M – 91a

เพื่อทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของมวลรวมต่อหน่วยปริมาตร ทั้งในสภาพที่อัดตัวแน่นและหลวมตัว ไม่ว่าจะป็นทราย หิน หรือมวลรวมผสมก็ตาม ทั้งนี้เพื่อนำไปเป็นส่วนหนึ่งของการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

PROJECT : Civil Engineering

DESCRIPTION : เพื่อหาค่าการทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของมวลรวม

TEST DATE : 31/1/61

#### ตารางที่ 4.2 ตารางหน่วยน้ำหนักของน้ำ

อุณหภูมิ		กก./ลบ.ม.	ปอนด์/ลบ.ฟ.
°F	°C		
60	15.6	999.01	62.366
65	18.3	998.53	62.336
70	21.1	997.97	62.301
73.4	23	997.53	32.274
75	23.9	997.32	62.261
80	26.7	996.6	62.216
85	29.4	995.8	62.166

#### ตารางที่ 4.3 หาคความจุของภาชนะ

Water Temperature, °C	19.5
Water Unit Weight, (kg/m <sup>3</sup> )	998.29
Wt. Container + Water, kg	22.732
Wt. Container, kg	8.188
Wt. Water, kg	14.544
Vol. Container, m <sup>3</sup>	0.0146

PROJECT : Civil Engineering SAMPLE TYPE : CR  
 DESCRIPTION : เพื่อหาค่าการทดสอบหาหน่วยหนักของมวลรวม  
 TEST DATE : 31/1/61

Trial No.	1	2
Volume of Container, m <sup>3</sup>	0.0146	0.0146
Wt. of Sample + Container, kg	30.91	31.011
Wt. of Container, kg	8.188	8.188
Wt. of Sample, kg	22.722	22.823
Unit weight, (kg/m <sup>3</sup> )	1556.30137	1563.2192
Average Unit weight, (kg/m <sup>3</sup> )	1559.760	
Void Content, %	49.17144034	48.94550581
Average Void Content, %	49.05847307	

PROJECT : Civil Engineering SAMPLE TYPE : RCA - 280  
 DESCRIPTION : เพื่อหาค่าการทดสอบหาหน่วยหนักของมวลรวม  
 TEST DATE : 31/1/61

Trial No.	1	2
Volume of Container, m <sup>3</sup>	0.0146	0.0146
Wt. of Sample + Container, kg	26.936	26.93
Wt. of Container, kg	8.188	8.188
Wt. of Sample, kg	18.748	18.742
Unit weight, (kg/m <sup>3</sup> )	1284.109589	1283.6986
Average Unit weight, (kg/m <sup>3</sup> )	1283.904	
Void Content, %	48.34673003	48.36326084
Average Void Content, %	48.35499543	

PROJECT : Civil Engineering SAMPLE TYPE : RCA - 380  
 DESCRIPTION : เพื่อหาค่าการทดสอบหาหน่วยหนักของมวลรวม  
 TEST DATE : 31/1/61

Trial No.	1	2
Volume of Container, m <sup>3</sup>	0.0146	0.0146
Wt. of Sample + Container, kg	27.328	27.31
Wt. of Container, kg	8.188	8.188
Wt. of Sample, kg	19.14	19.122
Unit weight, (kg/m <sup>3</sup> )	1310.958904	1309.7260
Average Unit weight, (kg/m <sup>3</sup> )	1310.342	
Void Content, %	47.28787816	47.33745069
Average Void Content, %	47.31266442	

PROJECT : Civil Engineering SAMPLE TYPE : RCA - 500  
 DESCRIPTION : เพื่อหาค่าการทดสอบหาหน่วยหนักของมวลรวม  
 TEST DATE : 31/1/61

Trial No.	1	2
Volume of Container, m <sup>3</sup>	0.0146	0.0146
Wt. of Sample + Container, kg	27.624	27.68
Wt. of Container, kg	8.188	8.188
Wt. of Sample, kg	19.436	19.492
Unit weight, (kg/m <sup>3</sup> )	1331.232877	1335.0685
Average Unit weight, (kg/m <sup>3</sup> )	1333.151	
Void Content, %	45.68808314	45.53159686
Average Void Content, %	45.60984	

#### 4.1.3 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะและการดูดซึ่มของมวลรวมละเอียด

(Test for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate) ASTM : C 128 – 93

เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะและอัตราการดูดซึ่มของมวลรวมละเอียด เช่น ทรายภายใต้สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง นอกจากนี้หินหรือกรวดที่มีขนาดเล็กไม่เกิน  $\frac{3}{4}$  ก็สามารถใช้นี้ทดสอบได้เช่นกัน

ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของทราย

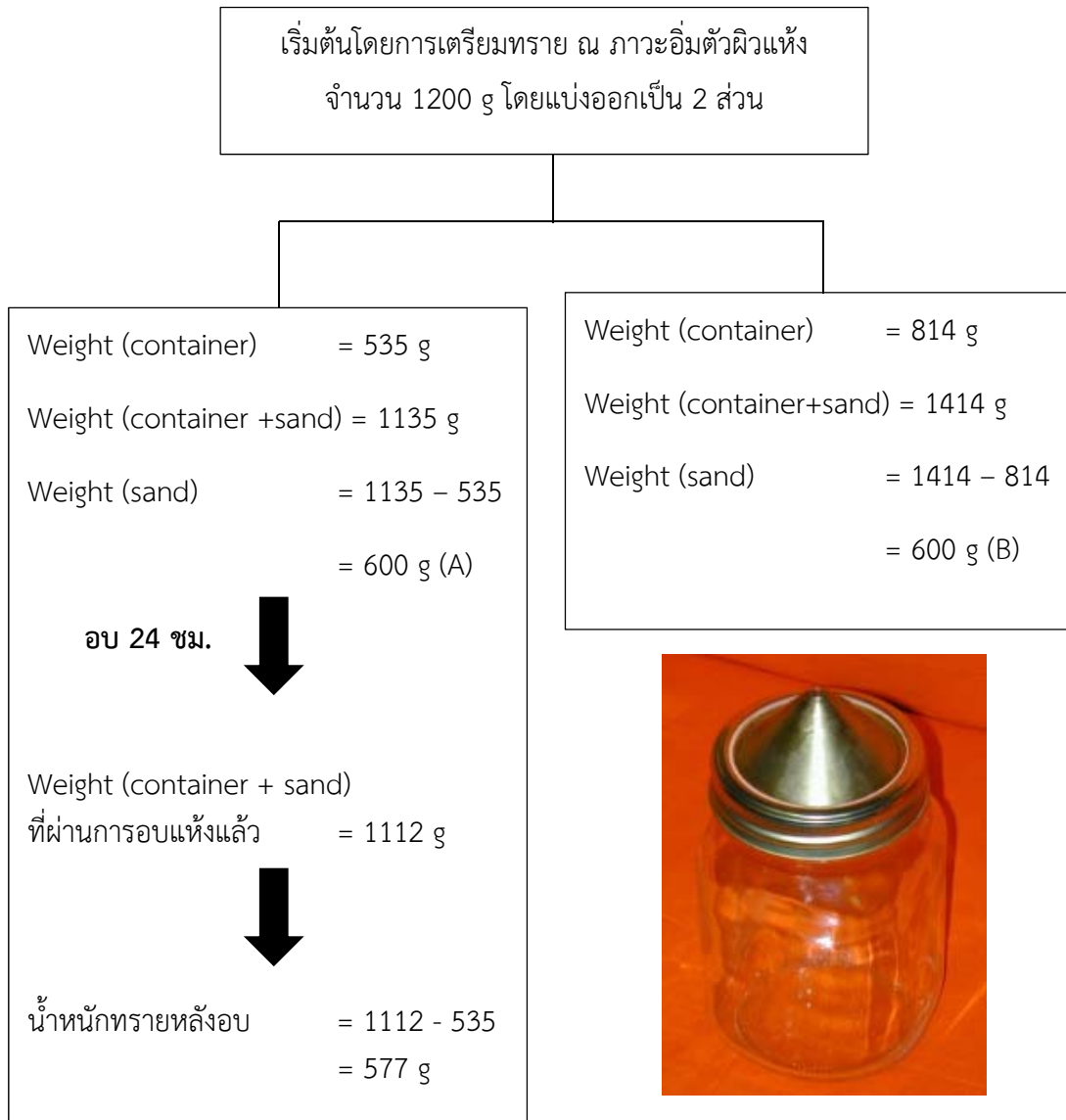
PROJECT : Civil Engineering

SAMPLE TYPE : Sand

DESCRIPTION : ทำเพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึ่มของทราย

TEST DATE : 29/1/61

Determination No.	A
Wt. Sand (Sat.Surf.Dry) (B), gm	600
Wt. Flask + Sand (Sat.Surf.Dry) + Water ( $W_c$ ), gm	1945
Wt. Bowl, gm	535
Wt. Bowl + Dry sand, gm	1112
Wt. Dry sand (A), gm	577
Wt. Flask + Water (W), gm	1595
Bulk Specific Gravity, $A/(B + W - W_c)$	2.308
Bulk Specific Gravity, (Sat.Surf.Dry), $B/(B + W - W_c)$	2.400
Apparent Specific Gravity, $A/(W + A - W_c)$	2.542
Percent Absorption (%), $(B - A) \times 100/A$	3.986



รูปที่ 4.1 ขวด Pycnometer

Weight of pycnometer + น้ำเต็มปากขวด (  $W_c$  ) = 1595 g

นำทราย (B) 800 g มาใส่ในขวด pycnometer แล้วใส่น้ำ

จนเต็มปากขวด แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก (  $W$  ) = 1945 g

ความถ่วงจำเพาะ (เมื่อวัตถุแห้งสนิท)	$= \frac{A}{W_c+B-W} = \frac{590}{1595+600-1945} = 2.36$
--	--

ความถ่วงจำเพาะ (ภายใต้วัตถุสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง)	$= \frac{A}{W_c+B-W} = \frac{600}{1595+600-1945} = 2.40$
--	--

อัตราการดูดซึม	$= \frac{B-A}{A} \times 100 \% = \frac{600-577}{577} \times 100 = 3.986 \%$
----------------	---

#### 4.1.4 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ

(Test for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate) ASTM : C 127 – 93

เพื่อหาความถ่วงจำเพาะและอัตราการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ เพื่อประโยชน์ในการออกแบบอัตราส่วนผสมของคอนกรีต วิธีนี้เรียกว่า Suspension Method

PROJECT : Civil Engineering SAMPLE TYPE : Crushed Rock  
 DESCRIPTION : ทำเพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ  
 TEST DATE : 30/1/61

Determination No.	A
Container No.	1
Wt. Container + Sat.Surf.Dry Aggregate, gm	5435
Wt. Container + Dry Aggregate, gm	5390
Wt. Container, gm	420
Wt. Sat.Surf.Dry Aggregate, gm	5015
Wt. Dry Aggregate, gm	4970
Wt. Sat. Aggregate in Water (C), gm	3350
Bulk Specific Gravity, (Oven Dry Basic), $A/(B - C)$	2.985
Bulk Specific Gravity, (Sat.Surf.Dry Basic), $B/(B - C)$	3.012
Apparent Specific Gravity, $A/(A - C)$	3.068
Percent Absorption (%), $[(B - A)/A] \times 100$	0.905

$$\text{ความถ่วงจำเพาะของมวลรวม} = \frac{A}{B-C} = \frac{4970}{5015-3350} = 2.985$$

(ขณะวัสดุมีความชื้นอากาศ)

$$\text{ความถ่วงจำเพาะของมวลรวม} = \frac{B}{B-C} = \frac{5435}{5015-3350} = 3.012$$

(ภายใต้วัตุสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง)

$$\text{ความถ่วงจำเพาะของมวลรวม} = \frac{A}{A-C} = \frac{4970}{4970-3350} = 3.068$$

(เมื่อวัตุแห้งสนิท)

$$\text{อัตราการดูดซึมน้ำ} = \frac{B-A}{A} \times 100 \% = \frac{5015-4970}{4970} \times 100 = 0.905 \%$$

PROJECT : Civil Engineering SAMPLE TYPE : RCA - 280  
 DESCRIPTION : ทำเพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึ่มของมวลรวมหายาบ  
 TEST DATE : 30/1/61

Determination No.	A
Container No.	2
Wt. Container + Sat.Surf.Dry Aggregate, gm	5710
Wt. Container + Dry Aggregate, gm	5530
Wt. Container, gm	590
Wt. Sat.Surf.Dry Aggregate, gm	5120
Wt. Dry Aggregate, gm	4940
Wt. Sat. Aggregate in Water (C), gm	2957
Bulk Specific Gravity, (Oven Dry Basic), $A/(B - C)$	2.284
Bulk Specific Gravity, (Sat.Surf.Dry Basic), $B/(B - C)$	2.367
Apparent Specific Gravity, $A/(A - C)$	2.491
Percent Absorption (%), $[(B - A)/A] \times 100$	3.644

$$\text{ความถ่วงจำเพาะของมวลรวม} = \frac{A}{B-C} = \frac{4940}{5120-2957} = 2.284$$

(ขณะวัสดุมีความชื้นอากาศ)

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ} = \frac{B}{B-C} = \frac{5120}{5120-2957} = 2.367$$

(ภายใต้วัสดุสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง)

$$\text{ความถ่วงจำเพาะของมวลรวม} = \frac{A}{A-C} = \frac{4940}{4940-2957} = 2.491$$

(เมื่อวัสดุแห้งสนิท)

$$\text{อัตราการดูดซึ่ม} = \frac{B-A}{A} \times 100 \% = \frac{5120-4940}{4940} \times 100 = 3.644 \%$$

PROJECT : Civil Engineering SAMPLE TYPE : RCA - 380  
 DESCRIPTION : ทำเพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึ่มของมวลรวมหายาบ  
 TEST DATE : 30/1/61

Determination No.	A
Container No.	3
Wt. Container + Sat.Surf.Dry Aggregate, gm	5730
Wt. Container + Dry Aggregate, gm	5575
Wt. Container, gm	615
Wt. Sat.Surf.Dry Aggregate, gm	5115
Wt. Dry Aggregate, gm	4960
Wt. Sat. Aggregate in Water (C), gm	2970
Bulk Specific Gravity, (Oven Dry Basic), $A/(B - C)$	2.312
Bulk Specific Gravity, (Sat.Surf.Dry Basic), $B/(B - C)$	2.385
Apparent Specific Gravity, $A/(A - C)$	2.492
Percent Absorption (%), $[(B - A)/A] \times 100$	3.125

$$\text{ความถ่วงจำเพาะของมวลรวม} = \frac{A}{B-C} = \frac{4960}{5115-2970} = 2.312$$

(ขณะวัสดุมีความชื้นอากาศ)

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ} = \frac{B}{B-C} = \frac{5115}{5115-2970} = 2.385$$

(ภายใต้วัสดุสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง)

$$\text{ความถ่วงจำเพาะของมวลรวม} = \frac{A}{A-C} = \frac{4960}{4960-2970} = 2.492$$

(เมื่อวัสดุแห้งสนิท)

$$\text{อัตราการดูดซึ่ม} = \frac{B-A}{A} \times 100 \% = \frac{5115-4960}{4960} \times 100 = 3.125 \%$$

PROJECT : Civil Engineering SAMPLE TYPE : RCA - 500  
 DESCRIPTION : ทำเพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึ่มของมวลรวมหายาบ  
 TEST DATE : 30/1/61

Determination No.	A
Container No.	4
Wt. Container + Sat.Surf.Dry Aggregate, gm	5740
Wt. Container + Dry Aggregate, gm	5590
Wt. Container, gm	580
Wt. Sat.Surf.Dry Aggregate, gm	5160
Wt. Dry Aggregate, gm	5010
Wt. Sat. Aggregate in Water (C), gm	2970
Bulk Specific Gravity, (Oven Dry Basic), $A/(B - C)$	2.288
Bulk Specific Gravity, (Sat.Surf.Dry Basic), $B/(B - C)$	2.356
Apparent Specific Gravity, $A/(A - C)$	2.456
Percent Absorption (%), $[(B - A)/A] \times 100$	2.994

$$\text{ความถ่วงจำเพาะของมวลรวม} = \frac{A}{B-C} = \frac{5010}{5160-2970} = 2.288$$

(ขณะวัสดุมีความชื้นอากาศ)

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ} = \frac{B}{B-C} = \frac{5160}{5160-2970} = 2.356$$

(ภายใต้วัสดุสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง)

$$\text{ความถ่วงจำเพาะของมวลรวม} = \frac{A}{A-C} = \frac{5010}{5010-2970} = 2.456$$

(เมื่อวัสดุแห้งสนิท)

$$\text{อัตราการดูดซึ่ม} = \frac{B-A}{A} \times 100 \% = \frac{5160-5010}{5010} \times 100 = 2.994 \%$$

#### 4.1.5 การทดสอบความแกร่งของมวลรวมหยาบ

(Test for Resistance to degradation of Coarse of Aggregate By Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine) ASTM : C 131 – 89

เพื่อหาความแกร่งของวัสดุมวลรวมหยาบ (หิน) ที่มีขนาดต่ำกว่า 1 1/2” โดยใช้เครื่องมือทดสอบ Los Angeles Machine โดยมีแบบการจัดขนาดคละตามมาตรฐานมวลรวมหยาบที่มีความแกร่ง จะต้องมีการเปอร์เซ็นต์สึกกร่อนไม่เกิน 50

PROJECT : Civil Engineering

SAMPLE TYPE : CR

DESCRIPTION : เพื่อหาค่าปริมาณความชื้นในมวลรวม

TEST DATE : 31/1/61

Sieve No. Passing	Sieve No. Retained	Wt. Retained (gm)	Wt. Used (gm)
3 "	2 1/2 "		
2 1/2 "	2 "		
2 "	1 1/2 "		
1 1/2 "	1 "		
1 "	3/4 "		
3/4 "	1/2 "	1000	2500
1/2 "	3/8 "	1035	2500
3/8 "	1/4 "	1160	
1/4 "	No. 4	425	
No. 4	No. 8	425	
Total Wt. (gm)		4045	5000

Percentage of Wear =  $((A-B) / A) \times 100 = 19.1 \%$

PROJECT : Civil Engineering

SAMPLE TYPE : RCA - 280

DESCRIPTION : เพื่อหาค่าปริมาณความชื้นในมวลรวม

TEST DATE : 31/1/61

Sieve No. Passing	Sieve No. Retained	Wt. Retained (gm)	Wt. Used (gm)
3 "	2 1/2 "		
2 1/2 "	2 "		
2 "	1 1/2 "		
1 1/2 "	1 "	40	1250
1 "	3/4 "	220	1250
3/4 "	1/2 "	760	1250
1/2 "	3/8 "	540	1250
3/8 "	1/4 "	565	
1/4 "	No. 4	245	
No. 4	No. 8	570	
Total Wt. (gm)		2940	5000

Percentage of Wear =  $((A-B) / A) \times 100 = 41.2 \%$

PROJECT : Civil Engineering

SAMPLE TYPE : RCA - 380

DESCRIPTION : เพื่อหาค่าปริมาณความชื้นในมวลรวม

TEST DATE : 31/1/61

Sieve No. Passing	Sieve No. Retained	Wt. Retained (gm)	Wt. Used (gm)
3 "	2 1/2 "		
2 1/2 "	2 "		
2 "	1 1/2 "		
1 1/2 "	1 "	85	1250
1 "	3/4 "	310	1250
3/4 "	1/2 "	660	1250
1/2 "	3/8 "	475	1250
3/8 "	1/4 "	605	
1/4 "	No. 4	285	
No. 4	No. 8	565	
Total Wt. (gm)		2985	5000

Percentage of Wear =  $((A-B) / A) \times 100 = 40.3 \%$

PROJECT : Civil Engineering

SAMPLE TYPE : RCA - 500

DESCRIPTION : เพื่อหาค่าปริมาณความชื้นในมวลรวม

TEST DATE : 31/1/61

Sieve No. Passing	Sieve No. Retained	Wt. Retained (gm)	Wt. Used (gm)
3 "	2 1/2 "		
2 1/2 "	2 "		
2 "	1 1/2 "		
1 1/2 "	1 "	25	1250
1 "	3/4 "	305	1250
3/4 "	1/2 "	720	1250
1/2 "	3/8 "	515	1250
3/8 "	1/4 "	625	
1/4 "	No. 4	315	
No. 4	No. 8	560	
Total Wt. (gm)		3065	5000

Percentage of Wear =  $((A-B) / A) \times 100 = 38.7 \%$

#### 4.1.6 ผลการทดสอบหาปริมาณความชื้นในมวลรวม

(Test for Total Moisture Content of Aggregate by Drying ) ASTM : C 566 – 89

เพื่อทดสอบหาอัตราของความชื้นทั้งหมดที่มีอยู่ในมวลรวม โดยการทำให้มวลรวมแห้งด้วยการเผา ซึ่งจะทำให้ได้น้ำหนักที่แท้จริงของมวลรวมสำหรับซึ่งผสมคอนกรีต

PROJECT : Civil Engineering SAMPLE TYPE : SAND  
 DESCRIPTION : เพื่อหาค่าปริมาณความชื้นในมวลรวม  
 TEST DATE : 31/1/61

Trial No.	1	2
Wt. of Sample Before Drying (kg.)	1.000	1.000
Wt. of Sample After Drying (kg.)	0.996	0.997
Moisture Content ; , %	0.402	0.301
Average Moisture Content, %	<b>0.351</b>	

PROJECT : Civil Engineering SAMPLE TYPE : CR  
 DESCRIPTION : เพื่อหาค่าปริมาณความชื้นในมวลรวม  
 TEST DATE : 31/1/61

Trial No.	1	2
Wt. of Sample Before Drying (kg.)	2.000	2.000
Wt. of Sample After Drying (kg.)	1.996	1.997
Moisture Content ; , %	0.200	0.150
Average Moisture Content, %	<b>0.175</b>	

PROJECT : Civil Engineering SAMPLE TYPE : RCA - 280  
 DESCRIPTION : เพื่อหาค่าปริมาณความชื้นในมวลรวม  
 TEST DATE : 31/1/61

Trial No.	1	2
Wt. of Sample Before Drying (kg.)	2.000	2.000
Wt. of Sample After Drying (kg.)	1.975	1.985
Moisture Content ; , %	1.266	0.756
Average Moisture Content, %	<b>1.011</b>	

PROJECT : Civil Engineering SAMPLE TYPE : RCA - 380  
 DESCRIPTION : เพื่อหาค่าปริมาณความชื้นในมวลรวม  
 TEST DATE : 31/1/61

Trial No.	1	2
Wt. of Sample Before Drying (kg.)	2.000	2.000
Wt. of Sample After Drying (kg.)	1.985	1.980
Moisture Content ; , %	0.756	1.010
Average Moisture Content, %	0.883	

PROJECT : Civil Engineering SAMPLE TYPE : RCA - 500  
 DESCRIPTION : เพื่อหาค่าปริมาณความชื้นในมวลรวม  
 TEST DATE : 31/1/61

Trial No.	1	2
Wt. of Sample Before Drying (kg.)	2.000	2.000
Wt. of Sample After Drying (kg.)	1.975	1.985
Moisture Content ; , %	1.266	0.756
Average Moisture Content, %	1.011	

## 4.2 ขั้นตอนในการคำนวณปริมาณส่วนผสมคอนกรีต

### 4.2.1 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต (Concrete Mixed Design) ตาม ACI (211.1-77)

#### 4.2.1.1 ตัวอย่างการออกแบบส่วนผสม RCA – 280

- Type CR (Crushed Rock , หิน ) 100 : Type RCA - 28 ( เศษคอนกรีตคัดมาจากกำลังอัด 280 ksc ) 0
  - ต้องการกำลังอัดคอนกรีต = 280 กก./ซม.<sup>2</sup>
  - ค่าการยุบตัวที่อยู่ระหว่าง = 8 - 10 ซม.
  - มวลรวมหยาบมีขนาดโตสุด = 40 มม.
  - หน่วยน้ำหนักแห้งของมวลรวมหยาบ Type CR = 1559.76 กก. /ม.<sup>3</sup>
  - หน่วยน้ำหนักแห้งของมวลรวมหยาบ Type RCA – 280 = 1283.904 กก. /ม.<sup>3</sup>
  - มวลรวมละเอียดที่มีค่า F.M. = 2.571

ขั้นตอนที่ 1 : ต้องการค่าการยุบตัวที่อยู่ระหว่าง 8 - 10 ซม.

ขั้นตอนที่ 2 : มวลรวมหยาบที่นำมาใช้มีขนาดโตสุด 40 มม.

ขั้นตอนที่ 3 : จากตารางที่ 2 ในบทที่ 3 คอนกรีตธรรมดา ค่าการยุบตัวที่อยู่ระหว่าง 8 -10 ซม. และ มวลรวมหยาบที่นำมาใช้มีขนาดโตสุด 40 มม. จะได้ปริมาณน้ำที่ใช้เท่ากับ 175 กก./ม<sup>3</sup>

ขั้นตอนที่ 4 : จากตารางที่ 3(ก.) ในบทที่ 3 คอนกรีตธรรมดา กำลังรับแรงอัด = 280 ksc

$$\text{อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (WCR)} = 0.55 + (300-280) \times \frac{(300-250)}{(0.62-0.55)} = 0.578$$

ขั้นตอนที่ 5 : ปริมาณของซีเมนต์ที่ได้ =  $175/0.578 = 302.768$  กก./ม<sup>3</sup>

ขั้นตอนที่ 6 : ปริมาณมวลรวมหยาบ หาได้จากตารางที่ 4 ในบทที่ 3 สำหรับมวลรวม

ละเอียด ที่มี ค่า F.M. = 2.571 และ มวลรวมหยาบมีขนาดโตสุด 40 มม.

จะได้ปริมาตรของหินต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีต

$$= 0.74 + (2.571-2.50) \times \frac{(0.72-0.74)}{(2.80-2.50)} = 0.735$$

ดังนั้น น้ำหนักมวลรวมหยาบแห้ง =  $0.735 \times 1559.76 = 1146.424$  กก.

ขั้นตอนที่ 7 : ปริมาณของ มวลรวมหยาบ มวลรวมละเอียด น้ำ และซีเมนต์

$$\text{น้ำหนักของคอนกรีตสด} = 2420.00 \quad \text{กก.}$$

$$\text{น้ำหนักของมวลรวมหยาบ (CR)} = 1146.424 \quad \text{กก.}$$

$$\text{น้ำหนักของน้ำ} = 175.00 \quad \text{กก.}$$

$$\text{น้ำหนักของซีเมนต์} = 302.77 \quad \text{กก.}$$

$$\text{จะได้น้ำหนักของทราย} = 2420-1146.424-175-302.77 = 795.81\text{กก.}$$

คำนวณปริมาณของ มวลรวมหยาบ มวลรวมละเอียด น้ำ และซีเมนต์ ที่ต้องใช้ใน

การผสมทำก้อนคอนกรีต 10 ก้อน และทำผิวไว้ 13 ก้อน อย่างละ 6.5 ก้อน

$$\text{ปริมาตรของก้อนคอนกรีต} = \frac{\pi}{4}(0.15)^2 \times 0.30 \times 6.5 = 0.039 \text{ ม.}^3$$

$$\text{ปริมาตรของก้อนคอนกรีต} = (0.15)^3 \times 6.5 = 0.022 \text{ ม.}^3$$

$$\text{ปริมาตรของก้อนคอนกรีตรวม} = 0.039 + 0.022 = 0.061 \text{ ม.}^3$$

$$\text{ปริมาณมวลรวมหยาบ (CR)} = 1146.424 \times 0.061 \times 1.00 = 69.93 \text{ กก.}$$

$$\text{ปริมาณมวลรวมหยาบ (RCA)} = 943.674 \times 0.061 \times 0 = 0 \text{ กก.}$$

$$\text{ปริมาณน้ำ} = 175 \times 0.061 = 10.68$$

$$\text{กก. ปริมาณซีเมนต์} = 302.768 \times 0.061 = 18.47 \text{ กก.}$$

$$\text{ปริมาณทราย} = 795.806 \times 0.061 = 48.54 \text{ กก.}$$

ขั้นตอนที่ 8 : การปรับแก้ปริมาณมวลรวม และปริมาณน้ำ เนื่องจากความชื้นในมวลรวม

$$\% \text{ อัตราการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ (CR)} = 0.905\%$$

$$\% \text{ ความชื้นของมวลรวมหยาบ (CR) ขณะนำมาใช้} = 0.175\%$$

$$\% \text{ อัตราการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ(RCA-280)} = 3.644\%$$

$$\% \text{ ความชื้นของมวลรวมหยาบ (RCA-280) ขณะนำมาใช้} = 1.011\%$$

$$\% \text{ ความชื้นของมวลรวมละเอียดที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง} = 1.695\%$$

% ความชื้นของมวลรวมละเอียดขณะให้นำมาใช้ = 0.351%

การปรับแก้

- 1) ปริมาณมวลรวมหยาบ (CR) =  $69.93 \times 1.00175 = 70.054$  กก.
- 2) ปริมาณมวลรวมหยาบ (RCA-280) =  $0 \times 1.01011 = 0$  กก.
- 3) ปริมาณทราย =  $48.54 \times 1.00351 = 48.72$  กก.
- 4) ปริมาณน้ำ  

$$= 10.68 - \left(\frac{0.905-0.175}{100}\right)(69.93) - \left(\frac{3.644-1.011}{100}\right)(0) - \left(\frac{1.695-0.372}{100}\right)(48.72) = 12.950$$
 กก.

น้ำหนักของวัสดุผสมครั้งสุดท้าย สำหรับใช้ในการผสมจริง คือ

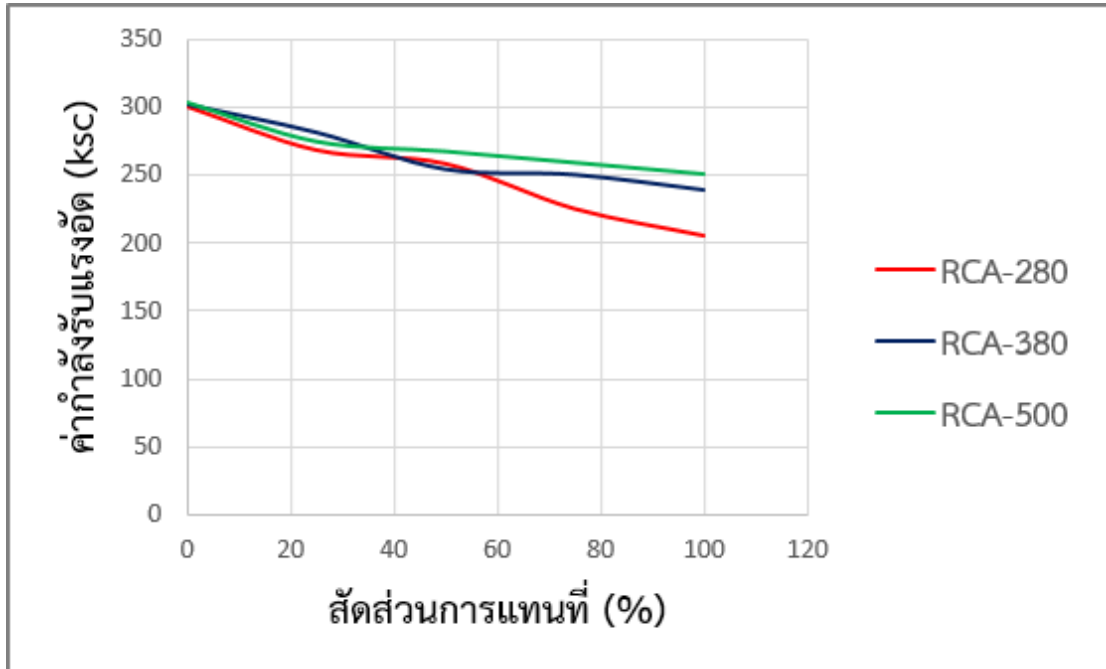
มวลรวมหยาบ	70.054 กก.
มวลรวมหยาบรีไซเคิล RCA-280	0 กก.
ทราย	48.72 กก.
ซีเมนต์	18.47 กก.
น้ำ	12.950 กก.

ตารางที่ 4.4 ปริมาณส่วนผสมของคอนกรีตในแต่ละส่วนผสม

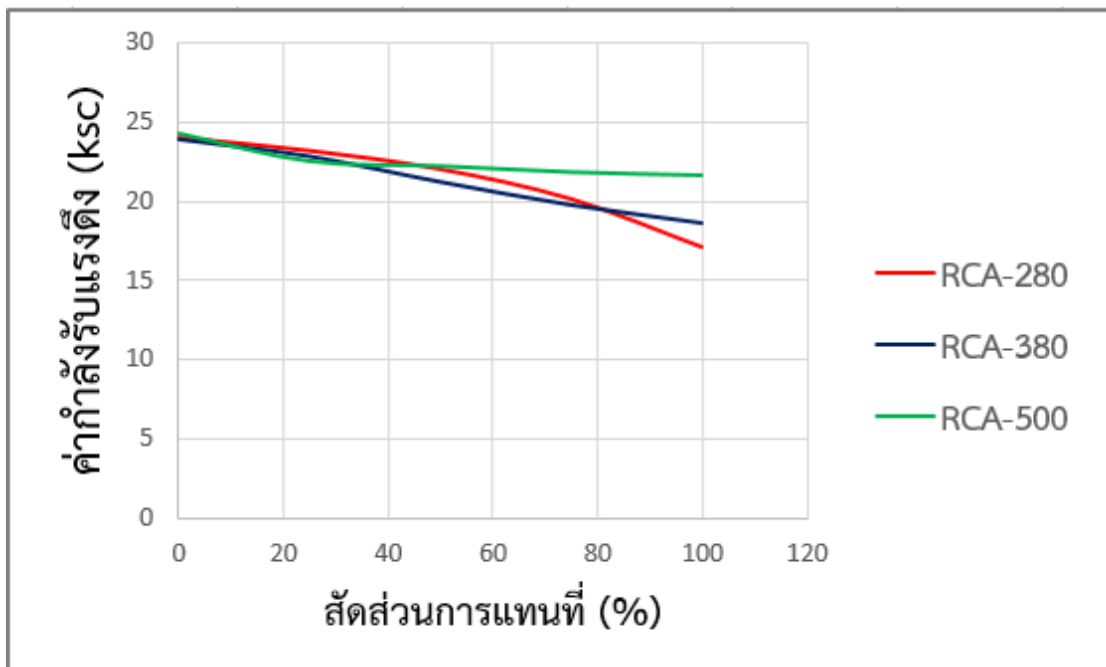
Mix Name	Cement (kg)	Water (kg)	RCA (kg)	CR (kg)	Sand (kg)
M280/0.00	18.469	12.95	-	70.054	48.715
M280/0.25	18.469	13.314	14.536	52.541	51.818
M280/0.50	18.469	13.677	29.073	35.027	54.920
M280/0.75	18.469	14.041	43.609	17.514	58.023
M280/1.00	18.469	14.405	58.146	-	61.126
M380/0.00	18.469	12.95	-	70.054	48.715
M380/0.25	18.469	13.253	14.817	52.541	51.520
M380/0.50	18.469	13.557	29.634	35.027	54.326
M380/0.75	18.469	13.86	44.451	17.514	57.131
M380/1.00	18.469	14.163	59.268	-	59.937
M500/0.00	18.469	12.95	-	70.054	48.715
M500/0.25	18.469	13.211	15.094	52.541	51.264
M500/0.50	18.469	13.472	30.188	35.027	53.813
M500/0.75	18.469	13.733	45.282	17.514	56.361
M500/1.00	18.469	13.994	60.376	-	58.910

## 4.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงและความหนาแน่นที่อายุ 28 วัน

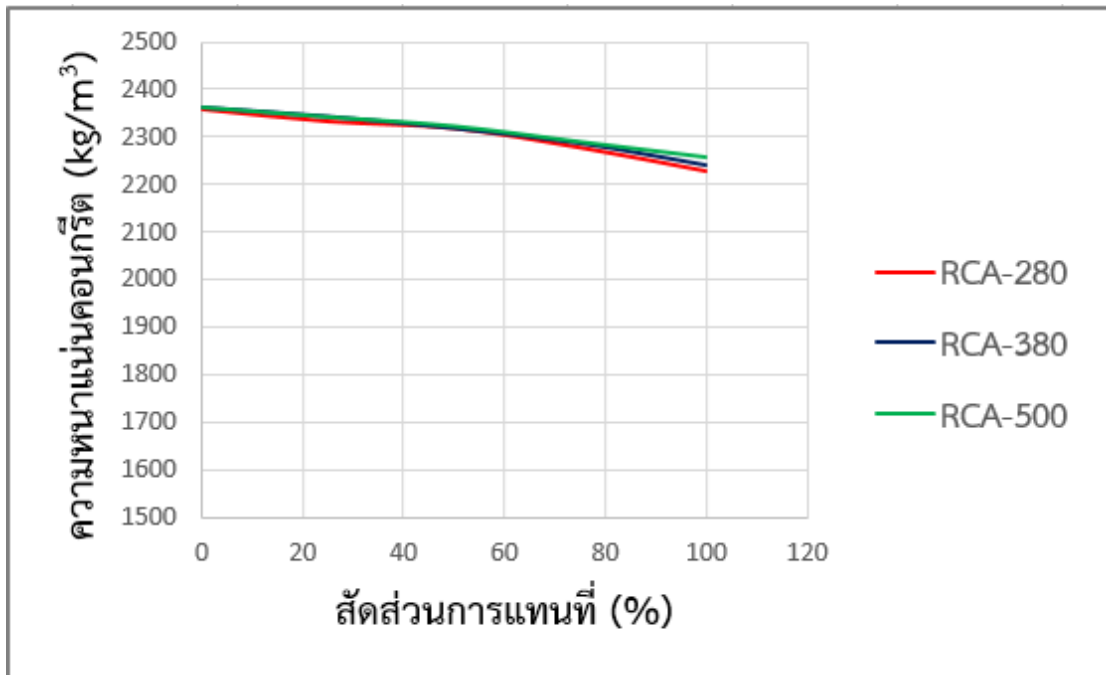
เมื่อนำผลการทดสอบกำลังรับแรงที่อายุ 28 วัน และความหนาแน่นมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบกับ ค่ากำลังของ RCA , สัดส่วนการแทนที่ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 – 4.4



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับสัดส่วนการแทนที่



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงกับสัดส่วนการแทนที่



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับสัดส่วนการแทนที่

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบกำลังของคอนกรีต

Sample Name	Age (days)	Compressive & Tensile Strength (ksc)
C280/0.00	28	301.304
C280/0.25	28	269.163
C280/0.50	28	259.157
C280/0.75	28	225.918
C280/1.00	28	206.143
C380/0.00	28	302.710
C380/0.25	28	282.118
C380/0.50	28	254.908
C380/0.75	28	250.940
C380/1.00	28	239.690
C500/0.00	28	304.281
C500/0.25	28	275.389
C500/0.50	28	268.082
C500/0.75	28	259.736
C500/1.00	28	251.364
T280/0.00	28	24.061
T280/0.25	28	23.219
T280/0.50	28	22.049
T280/0.75	28	20.164
T280/1.00	28	17.120
T380/0.00	28	23.863
T380/0.25	28	22.810
T380/0.50	28	21.215
T380/0.75	28	19.783
T380/1.00	28	18.654
T500/0.00	28	24.241
T500/0.25	28	22.560
T500/0.50	28	22.270
T500/0.75	28	21.895
T500/1.00	28	21.705

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นของคอนกรีต

Sample Name	Age (days)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
M280/0.00	28	2358.388
M280/0.25	28	2333.355
M280/0.50	28	2318.944
M280/0.75	28	2278.650
M280/1.00	28	2229.239
M380/0.00	28	2360.870
M380/0.25	28	2341.863
M380/0.50	28	2317.576
M380/0.75	28	2286.577
M380/1.00	28	2241.072
M500/0.00	28	2360.979
M500/0.25	28	2340.992
M500/0.50	28	2322.113
M500/0.75	28	2289.706
M500/1.00	28	2258.255

#### 4.3 ผลของการสร้างสมการความสัมพันธ์เพื่อประมาณกำลังรับแรงและความหนาแน่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยวิธี Regression รูปแบบเชิงเส้น (Linear Regression) และ ไม่เชิงเส้น(Non-Linear Regression) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปแบบของข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์ว่าตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามในลักษณะใด เจ้าการวิเคราะห์แบบจำลอง เมื่อกำหนดให้ สัดส่วนการแทนที่และค่ากำลังของ RCA ตัวแปรอิสระ จากนั้นกำหนดค่ากำลังรับแรงอัด,ดึงและความหนาแน่นเป็นตัวแปรตาม พบว่าความสัมพันธ์อยู่ในรูปแบบสมการพหุนามกำลังสอง แต่เนื่องจากการใช้สมการพหุนามกำลังสองในชุดข้อมูลนี้ทำให้ค่าความน่าเชื่อถือลดลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ความสัมพันธ์ในรูปแบบเชิงเส้น โดยรูปแบบของสมการสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.1) – (4.3)

$$C \text{ (Compressive Strength)} = a_0 + a_1 (P) + a_2 (S) \quad (4.1)$$

$$T \text{ (Tensile Strength)} = a_0 + a_1 (P) + a_2 (S) \quad (4.2)$$

$$D \text{ (Density)} = a_0 + a_1 (P) + a_2 (S) \quad (4.3)$$

จากนั้นนำข้อมูลส่วนผสม ค่ากำลังของ RCA ผลทดสอบกำลังรับแรงและค่าความหนาแน่นป้อนเข้าสู่โปรแกรม spss และโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่าง ๆ โดย

ใช้วิธี multiple regression เมื่อเมื่อทำการวิเคราะห์จะได้รูปแบบสมการของความสัมพันธ์ประมาณค่าต่าง ๆ แสดงได้ดังสมการที่ (4.4) – (4.6)

$$C \text{ (Compressive Strength)} = 263.910 - 0.683(P) + 0.087(S) \quad (4.4)$$

$$T \text{ (Tensile Strength)} = 21.921 - 0.048(P) + 0.006(S) \quad (4.5)$$

$$D \text{ (Density)} = 2348.192 - 1.153(P) + 0.048(S) \quad (4.6)$$

เมื่อ

C = ค่ากำลังรับแรงอัด (ksc)

T = ค่ากำลังรับแรงดึง (ksc)

D = ค่าความหนาแน่นของคอนกรีต (ksc)

P = สัดส่วนการแทนที่ (%)

S = ค่ากำลังอัดของ RCA (ksc)

เมื่อได้รูปแบบสมการของความสัมพันธ์การประมาณค่ากำลังรับแรงและความหนาแน่น โดยใช้วิธี Regression แล้วในการทดสอบประสิทธิภาพการประมาณค่าต่าง ๆ ทำได้โดยการแทนค่าปัจจัยต่าง ๆ ลงในสมการที่ได้และนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 4.7 ค่ากำลังรับแรงที่ได้จากการทดลองและสมการประมาณ

Sample Name	Experimental (ksc)	Estimation (ksc)
C280/0.00	301.304	288.270
C280/0.25	269.163	271.195
C280/0.50	259.157	254.120
C280/0.75	225.918	237.045
C280/1.00	206.143	219.970
C380/0.00	302.710	296.970
C380/0.25	282.118	279.895
C380/0.50	254.908	262.820
C380/0.75	250.940	245.745
C380/1.00	239.690	228.670
C500/0.00	304.281	307.410
C500/0.25	275.389	290.335
C500/0.50	268.082	273.260
C500/0.75	259.736	256.185
C500/1.00	251.364	239.110
T280/0.00	24.061	23.601
T280/0.25	23.219	24.801
T280/0.50	22.049	26.001
T280/0.75	20.164	27.201
T280/1.00	17.120	28.401
T380/0.00	23.863	24.201
T380/0.25	22.810	25.401
T380/0.50	21.215	26.601
T380/0.75	19.783	27.801
T380/1.00	18.654	29.001
T500/0.00	24.241	24.921
T500/0.25	22.560	26.121
T500/0.50	22.270	27.321
T500/0.75	21.895	28.521
T500/1.00	21.705	29.721

ตารางที่ 4.8 ค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทดลองและสมการประมาณ

Sample Name	Experimental (kg/m <sup>3</sup> )	Estimation (kg/m <sup>3</sup> )
M280/0.00	2358.388	2361.632
M280/0.25	2333.355	2332.807
M280/0.50	2318.944	2303.982
M280/0.75	2278.650	2275.157
M280/1.00	2229.239	2246.332
M380/0.00	2360.870	2366.432
M380/0.25	2341.863	2337.607
M380/0.50	2317.576	2308.782
M380/0.75	2286.577	2279.957
M380/1.00	2241.072	2251.132
M500/0.00	2360.979	2372.192
M500/0.25	2340.992	2343.367
M500/0.50	2322.113	2314.542
M500/0.75	2289.706	2285.717
M500/1.00	2258.255	2256.892

#### 4.4 ตรวจสอบการประมาณผลต่าง ๆ ด้วยข้อมูลทางสถิติ

##### 1) ตรวจสอบการประมาณผลต่าง ๆ ด้วยข้อมูลทางสถิติ

- 1) ตัวแปรอิสระต้องไม่มีความสัมพันธ์กันเอง ( Multicollinearity) การตรวจสอบจะใช้ค่า Variance inflation factor (VIF) หรือค่า Tolerance หรือค่า Eigen value ตัวใดตัวหนึ่งก็ได้โดยมีเกณฑ์การตรวจสอบดังนี้

Variance inflation factor (VIF) < 10	แสดงว่าไม่เกิด Multicollinearity
Tolerance > 0.2	แสดงว่าไม่เกิด Multicollinearity
Eigen value $\leq$ 10	แสดงว่าไม่เกิด Multicollinearity

ตารางที่ 4.9 Coefficients ของกำลังรับแรงอัด

Coefficients <sup>a</sup>								
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
1	(Constant)	263.910	11.898		22.181	0.000		
	PROPORTION	-0.683	0.073	-0.898	-9.408	0.000	1.000	1.000
	RCA_STR	0.087	0.029	0.291	3.048	0.010	1.000	1.000

a. Dependent Variable : COM\_STR

จากตาราง 4.9 ค่า VIF เท่ากับ 1.000 ซึ่งน้อยกว่า 10 และค่า Tolerance เท่ากับ 1.000 ซึ่งมากกว่า 0.200 แสดงว่าตัวแปรอิสระของการประมาณกำลังรับแรงอัดไม่มีความสัมพันธ์กันเอง (ไม่เกิด Multicollinearity)

ตารางที่ 4.10 Coefficients ของกำลังรับแรงดึง

Coefficients <sup>a</sup>								
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
1	(Constant)	21.921	1.125		19.482	0.000		
	PROPORTION	-0.048	0.007	-0.866	-7.014	0.000	1.000	1.000
	RCA_STR	0.006	0.003	0.260	2.102	0.057	1.000	1.000

a. Dependent Variable : TEN\_STR

จากตาราง 4.10 ค่า VIF เท่ากับ 1.000 ซึ่งน้อยกว่า 10 และค่า Tolerance เท่ากับ 1.000 ซึ่งมากกว่า 0.200 แสดงว่าตัวแปรอิสระของการประมาณกำลังรับแรงดึงไม่มีความสัมพันธ์กันเอง (ไม่เกิด Multicollinearity)

ตารางที่ 4.11 Coefficients ของความหนาแน่น

Coefficients <sup>a</sup>								
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
1	(Constant)	2348.192	11.015		213.176	0.000		
	PROPORTION	-1.153	0.067	-0.975	-17.150	0.000	1.000	1.000
	RCA_STR	0.048	0.026	0.104	1.829	0.092	1.000	1.000

a. Dependent Variable : DENSITY

จากตาราง 4.11 ค่า VIF เท่ากับ 1.000 ซึ่งน้อยกว่า 10 และค่า Tolerance เท่ากับ 1.000 ซึ่งมากกว่า 0.200 แสดงว่าตัวแปรอิสระของการประมาณค่าความหนาแน่นไม่มีความสัมพันธ์กันเอง (ไม่เกิด Multicollinearity)

2) ทำการทดสอบว่าจะสามารถใช้ตัวแปรอิสระที่คัดเลือกเข้าสมการมาทำนายตัวแปรตามได้หรือไม่ วิธีการทดสอบจะใช้ค่าระดับนัยยะสำคัญที่ 0.05 แต่ในการประมาณนี้จะยอมใช้ค่าระดับนัยสำคัญที่ 0.10 ได้เนื่องจากจำนวนข้อมูลมีอย่างจำกัด ถ้าค่า t มีค่าสูงอย่างมีนัยสำคัญ(หรือค่า Sig. มีค่าน้อยหรือเท่ากับระดับนัยสำคัญที่กำหนด) แสดงว่าสามารถนำตัวแปรอิสระมาใช้ทำนายผลของตัวแปรตามได้

- สำหรับผลของการประมาณกำลังรับแรงอัด

จากตาราง 4.4 พบว่าค่า Sig. มีค่าเท่ากับ 0.000 และ 0.010 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยยะสำคัญที่ 0.10 แสดงว่าสามารถนำตัวแปรอิสระทุกตัวมาใช้ประมาณผลของกำลังรับแรงอัดได้

- สำหรับผลของการประมาณกำลังรับแรงดึง

จากตาราง 4.4 พบว่าค่า Sig. มีค่าเท่ากับ 0.000 และ 0.057 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยยะสำคัญที่ 0.10 แสดงว่าสามารถนำตัวแปรอิสระทุกตัวมาใช้ประมาณผลของกำลังรับแรงดึงได้

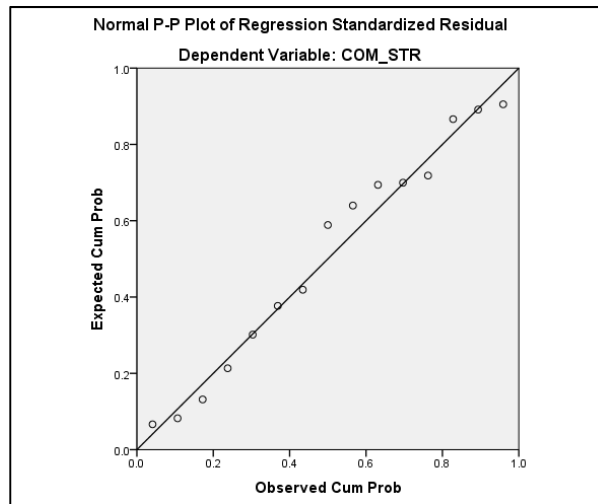
- สำหรับผลของการประมาณค่าความหนาแน่น

จากตาราง 4.4 พบว่าค่า Sig. มีค่าเท่ากับ 0.000 และ 0.092 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยยะสำคัญที่ 0.10 แสดงว่าสามารถนำตัวแปรอิสระทุกตัวมาใช้ประมาณผลของความหนาแน่นได้

3) ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการประมาณ (Error or Residual) จะต้องมีการแจกแจงแบบปกติ ตรวจสอบได้โดยใช้ Normal Probability Plot ซึ่งเป็นคำสั่งในโปรแกรม SPSS วงกลมแสดงถึงค่า Probability ของข้อมูล ส่วนเส้นตรงที่ลากทแยงเป็นแนวเส้น

แสดงการแจกแจงแบบปกติ จุดวงกลมมีการเรียงตัวใกล้เคียงเส้นตรงจะถือว่าการแจกแจงแบบปกติ

- สำหรับผลของการประมาณกำลังรับแรงอัด

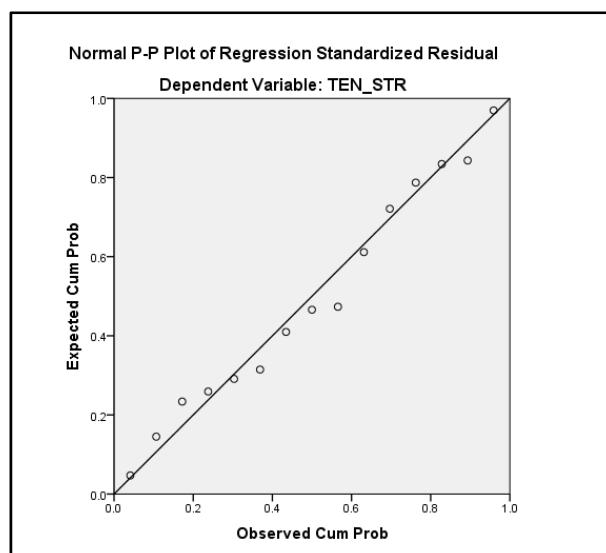


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการแจกแจงแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจาก

การประมาณกำลังรับแรงอัด

รูปที่ 4.5 จุดวงกลมมีการเรียงตัวใกล้เคียงเส้นตรง ดังนั้นจึงถือว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากการประมาณกำลังรับแรงอัดมีการแจกแจงแบบปกติ

- สำหรับผลของการประมาณกำลังรับแรงดึง

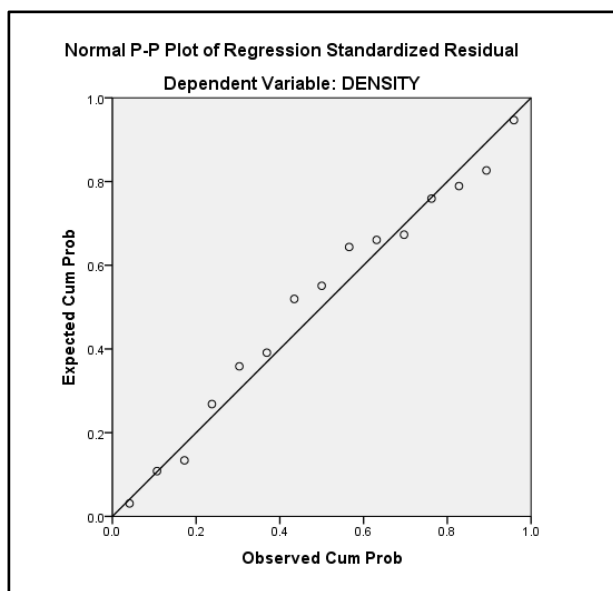


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการแจกแจงแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจาก

การประมาณกำลังรับแรงดึง

รูปที่ 4.6 จุดวงกลมมีการเรียงตัวใกล้เคียงเส้นตรง ดังนั้นจึงถือว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากการประมาณกำลังรับแรงดิ่งมีการแจกแจงแบบปกติ

- สำหรับผลของการประมาณค่าความหนาแน่น



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการแจกแจงแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจาก

การประมาณค่าความหนาแน่น

รูปที่ 4.7 จุดวงกลมมีการเรียงตัวใกล้เคียงเส้นตรง ดังนั้นจึงถือว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากการประมาณค่าความหนาแน่น มีการแจกแจงแบบปกติ

- ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการประมาณ (Error or Residual) จะต้องมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ตรวจสอบโดยดูผลของ Residuals Statistic ต้องเท่ากับศูนย์

ตารางที่ 4.12 Residuals Statistics ของการประมาณกำลังรับแรงอัด

Residuals Statistics <sup>a</sup>					
	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	219.9634	307.4035	263.3935	26.27540	15
Residual	-14.93912	13.03795	0.00000	9.20434	15
Std. Predicted Value	-1.653	1.675	0.000	1.000	15
Std. Residual	-1.503	1.311	0.000	0.926	15

a. Dependent Variable : COM\_STR

จากตารางที่ 4.12 พบว่าค่า Residual หรือค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการประมาณกำลังรับแรงอัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0

ตารางที่ 4.13 Residuals Statistics ของการประมาณกำลังรับแรงดึง

Residuals Statistics <sup>a</sup>					
	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	18.6941	24.7582	21.7072	1.83987	15
Residual	-1.57453	1.76284	0.00000	0.87045	15
Std. Predicted Value	-1.638	1.658	0.000	1.000	15
Std. Residual	-1.675	1.875	0.000	0.926	15

a. Dependent Variable : TEN\_STR

จากตารางที่ 4.13 พบว่าค่า Residual หรือค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการประมาณกำลังรับแรงดึงมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0

ตารางที่ 4.14 Residuals Statistics ของการประมาณค่าความหนาแน่น

Residuals Statistics <sup>a</sup>					
	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	2246.4424	2372.3572	2309.2387	42.42825	15
Residual	-17.20317	14.86091	0.00000	8.52148	15
Std. Predicted Value	-1.480	1.488	0.000	1.000	15
Std. Residual	-1.869	1.615	0.000	0.926	15

a. Dependent Variable : DENSITY

จากตารางที่ 4.13 พบว่าค่า Residual หรือค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการประมาณค่าความหนาแน่นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0

#### 4.4.1 การทดสอบความแม่นยำของแบบการประมาณ

- 1) ความแม่นยำของแบบการประมาณค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน

ตารางที่ 4.15 Model Summary ของการประมาณกำลังรับแรงอัด

Model Summary <sup>b</sup>				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	0.944 <sup>a</sup>	0.891	0.872	9.94182
a. Predictors : (Constant),PROPORTION,RCA_STR				
a. Dependent Variable : COM_STR				

จากตารางที่ 4.14 จะเห็นว่าค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.891 แสดงว่าแบบการประมาณสามารถประมาณค่าตัวแปรตามหรือค่ากำลังรับแรงอัดได้แม่นยำเท่ากับ 89.1 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการประมาณเท่ากับ 9.94

- 2) ความแม่นยำของแบบการประมาณค่ากำลังรับแรงดึงที่อายุ 28 วัน

ตารางที่ 4.16 Model Summary ของการประมาณกำลังรับแรงดึง

Model Summary <sup>b</sup>				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	0.904 <sup>a</sup>	0.817	0.787	0.94019
a. Predictors : (Constant),PROPORTION,RCA_STR				
a. Dependent Variable : TEN_STR				

จากตารางที่ 4.15 จะเห็นว่าค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.817 แสดงว่าแบบการประมาณสามารถประมาณค่าตัวแปรตามหรือค่ากำลังรับแรงอัดได้แม่นยำเท่ากับ 81.7 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการประมาณเท่ากับ 0.94

- 3) ความแม่นยำของแบบการประมาณค่าความหนาแน่นที่อายุ 28 วัน

ตารางที่ 4.17 Model Summary ของการประมาณค่าความหนาแน่น

Model Summary <sup>b</sup>				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	0.980 <sup>a</sup>	0.961	0.955	9.20425
a. Predictors : (Constant),PROPORTION,RCA_STR				
a. Dependent Variable : DENSITY				

จากตารางที่ 4.16 จะเห็นว่าค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.961 แสดงว่าแบบการประมาณสามารถประมาณค่าตัวแปรตามหรือค่ากำลังรับแรงอัดได้แม่นยำเท่ากับ 96.1 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการประมาณเท่ากับ 9.20

หลังจากพิจารณาข้อตกลงเบื้องต้นในการวิเคราะห์และความแม่นยำของแบบจำลองด้วยวิธี Linear Regression Analysis พบว่าปัจจัยของคอนกรีตรีไซเคิล ได้แก่ สัดส่วนการแทนที่ และ ค่ากำลังของ RCA สามารถที่จะประมาณค่ากำลังรับแรงอัด ค่ากำลังรับแรงดึงและค่าความหนาแน่นได้

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลวิจัย

จากผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตมาเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ เพื่อมาศึกษาเปรียบเทียบกำลังอัดและกำลังรับแรงดัดกับในกรณีของหินย้อยที่อายุของคอนกรีต 28 วัน ที่มวลรวมหยาบที่นำมาใช้จะมาจากเศษคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดแตกต่างกันในช่วง 280, 380 และ 500 ksc. เมื่อนำมาเปรียบเทียบเป็นมวลรวมหยาบในการผสมคอนกรีตกำลังอัดที่ออกแบบไว้ที่ 280 ksc. ในอัตราส่วนการแทนที่หินด้วยมวลรวมรีไซเคิลร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 จะได้ผลสรุปของคุณสมบัติมวลรวมและคอนกรีตรีไซเคิลดังนี้

(1) จากผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตมาเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ เพื่อมาศึกษาเปรียบเทียบกำลังอัดและกำลังรับแรงดัดกับในกรณีของหินย้อยที่อายุของคอนกรีต 28 วัน ที่มวลรวมหยาบที่นำมาใช้จะมาจากเศษคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดแตกต่างกันในช่วง 280, 380 และ 500 ksc. เมื่อนำมาเปรียบเทียบเป็นมวลรวมหยาบในการผสมคอนกรีตกำลังอัดที่ออกแบบไว้ที่ 280 ksc. ใน

จากผลการทดสอบคุณสมบัติและการทดสอบคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิล (CR, RCA – 280,380และ500 ksc) แทนที่มวลรวมธรรมชาตินั้น จะเห็นได้ว่า

อัตราการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบมีค่าเท่ากับ 0.905, 3.644, 3.125 และ 2.994 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่ามวลรวมรีไซเคิลนั้นมีค่ามากกว่ามวลรวมธรรมชาติพอสมควรและยิ่งค่ากำลังของมวลรวมธรรมชาติเพิ่มขึ้น อัตราการดูดซึมน้ำจะลดลง

ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบมีค่าเท่ากับ 2.985, 2.284, 2.312 และ 2.288 ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมรีไซเคิลมีค่าน้อยกว่ามวลรวมธรรมชาติและ มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 3 ค่ากำลังของมวลรวมรีไซเคิล

หน่วยน้ำหนักของรวมหยาบมีค่าเท่ากับ 1559.76, 1283.904, 1310.342 และ 1333.151 kg/m<sup>3</sup> ตามลำดับจะเห็นว่าค่าหน่วยน้ำหนักของมวลรวมรีไซเคิลนั้นค่าน้อยกว่ามวลรวมธรรมชาติและยิ่งค่ากำลังของมวลรวมธรรมชาติเพิ่มขึ้น หน่วยน้ำหนักจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยแต่ก็ยังน้อยกว่ามวลรวมธรรมชาติ

ค่าความแกร่งของรวมหยาบมีค่าเท่ากับ 19.1, 41.2, 40.3 และ 38.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าความแกร่งของมวลรวมรีไซเคิลนั้นมีค่าน้อยกว่ามวลรวมธรรมชาติอยู่มาก ซึ่งค่าความแกร่งของมวลรวมรีไซเคิลทั้ง 3 ค่ากำลังนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

(2) จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดและแรงดึงของคอนกรีตที่ 28 วันพบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ ร้อยละการลดลงของกำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดึงและค่าความหนาแน่นของคอนกรีตที่สัดส่วนการ แทนที่ 100 เปอร์เซ็นต์ และที่อายุ 28 วัน

คอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลชนิด RCA-280 เท่ากับ 31.583, 28.843 และ 5.476 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

คอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลชนิด RCA-380 เท่ากับ 20.819, 21.828 และ 4.974 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

คอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลชนิด RCA-500 เท่ากับ 17.391, 10.460 และ 4.246 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

จากกราฟความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงของคอนกรีตกับอัตราส่วนการแทนที่นั้น จะเห็นได้ว่าค่ากำลังของ RCA ที่ใช้แทนที่นั้นมีผลต่อกำลังรับแรงของคอนกรีตน้อยในอัตราส่วนการแทนที่ต่ำ แต่จะมีผลเพิ่มมากขึ้นในอัตราส่วนการแทนที่ที่สูงขึ้นตามที่ปรากฏในกราฟความสัมพันธ์

จากกราฟความสัมพันธ์ของค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตกับอัตราส่วนการแทนที่นั้น จะเห็นได้ว่าค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตนั้นมีค่าที่ต่ำเมื่อเทียบความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงของคอนกรีต อาจเกิดเนื่องจากปริมาณซีเมนต์พิเศษที่ยึดเกาะในมวลรวมรีไซเคิล ที่มีอยู่ปริมาณไม่สม่ำเสมอในแต่ละก้อน

การทดลองมีปัจจัยที่ทำให้การทดลองอาจเกิดความคลาดเคลื่อนของข้อมูลผลการทดลอง ได้อย่างเช่นความชื้นในมวลรวม ซึ่งมวลรวมในแต่ละกระสอบอาจมีค่าต่างกันซึ่งอาจเกิดความคลาดเคลื่อนในการทดลองได้ อีกปัจจัยคือ ความไม่แน่นอนของมวลรวมรีไซเคิล เนื่องจากในแต่ละก้อนของมวลรวมรีไซเคิล นั้นมีปริมาณซีเมนต์พิเศษไม่เท่ากัน ซึ่งปัจจัยทั้งสองอาจส่งผลกระทบต่อ การทดลองได้

(3) เมื่อนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ด้วยวิธี Regression สำหรับใช้พัฒนาแบบการ ประมาณค่ากำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงและค่าความหนาแน่นที่อายุ 28 วัน ในรูปแบบฟังก์ชัน เส้นตรงหลายตัวแปร เมื่อทำการวิเคราะห์หาค่าคงที่ด้วยวิธี Multiple Linear Regression จะได้รูปแบบของแบบการประมาณที่เหมาะสมในการนำมาใช้งานดังสมการที่ 1-3

$$C \text{ (Compressive Strength)} = 263.910 - 0.683(P) + 0.087(S) \quad (5.1)$$

$$T \text{ (Tensile Strength)} = 21.921 - 0.048(P) + 0.006(S) \quad (5.2)$$

$$D \text{ (Density)} = 2348.192 - 1.153(P) + 0.048(S) \quad (5.3)$$

เมื่อ	C	= ค่ากำลังรับแรงอัด (ksc)
	T	= ค่ากำลังรับแรงดึง (ksc)
	D	= ค่าความหนาแน่นของคอนกรีต (ksc)
	P	= สัดส่วนการแทนที่ (%)
	S	= ค่ากำลังอัดของ RCA (ksc)

จากการทดสอบแบบการประมาณที่ใช้วิธี Multiple Linear Regression ตามข้อตกลงเบื้องต้นในการวิเคราะห์ พบว่าทุกสมการสามารถนำมาใช้ประมาณค่าคุณสมบัติของคอนกรีตไร้เหล็กได้ โดยค่าความแม่นยำของสมการแต่ละสมการ ได้แก่ สมการประมาณกำลังรับแรงอัด ค่าความแม่นยำเท่ากับ 89.1 เปอร์เซ็นต์ สมการประมาณกำลังรับแรงดึง ค่าความแม่นยำเท่ากับ 81.7 เปอร์เซ็นต์ สมการประมาณกำลังรับแรงอัด ค่าความแม่นยำเท่ากับ 96.1 เปอร์เซ็นต์

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

(1) สมการการประมาณนี้เป็นเพียงสมการประมาณเบื้องต้น อาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่ไม่มากนักน้อย เพื่อสามารถนำไปใช้ประมาณได้อย่างแม่นยำ ควรมาการศึกษาขนาดการวิจัยที่มีขนาดการวิจัยใหญ่ขึ้นมากกว่านี้ เนื่องจากวิจัยนี้ถูกจำกัดด้วยข้อจำกัดทางวัสดุและกำลังของผู้ทำการวิจัยนี้

(2) สมการการประมาณนี้สร้างขึ้นเพื่อใช้ขอบเขตการวิจัยนี้เท่านั้น เพื่อสามารถนำสมการไปใช้ได้ครอบคลุม ควรมีการศึกษาในกรณีที่มีเงื่อนไขที่มากขึ้น ตัวแปรอิสระที่มากขึ้น

(3) เศษคอนกรีตที่ใช้ควรเครื่องจักรที่มีความเหมาะสมทำการบดและคัดขนาดอย่างเหมาะสม เพื่อให้ได้มวลรวมที่มีมาตรฐานและมีความแข็งแรงอย่างสม่ำเสมอ

## 5.3 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงาน

(1) ในการทดลองหาความชื้นในมวลรวม ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นในมวลรวมได้ง่าย เนื่องจากความชื้นภายนอกเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา จึงมีปัญหาในการหาที่จัดเก็บ และต้องเพิ่มความระมัดระวังในเกี่ยวกับความชื้นในการทดลอง

(2) เนื่องจากเศษคอนกรีตที่ได้จากกระย่อยสลายคอนกรีตที่ใช้แล้ว มีซีเมนต์เพสต์เกาะอยู่มากน้อยคละกั้นไป อาจเป็นส่วนที่ทำให้กำลังของคอนกรีตใหม่มีค่าลดลงและมีความไม่แน่นอนอยู่ในมวลรวม

(3) ผลที่ได้จากการทดลองนี้ ในทุกกรณี เป็นการทดลองเฉพาะกลุ่มตัวอย่าง ในระดับปฏิบัติการ อาจส่งผลต่อความน่าเชื่อถือ ด้วยเหตุผลนี้จึงควรทำการทดสอบขนาดใหญ่

## เอกสารอ้างอิง

- [1.] อุษณีย์ อุยะเสถียร และ อัจฉรา อัครวรกิจกุลชัย. 2550. “การประเมินปริมาณและองค์ประกอบของของเสียจากการก่อสร้างและรื้อถอนอาคารในกรุงเทพมหานคร”, คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. นครปฐม .
- [2.] ศักดิ์ชัย วงษ์ชัย, 2553 “การวิจัยการนำเศษคอนกรีตมาใช้เป็นวัสดุผสมรวมหยาบผสมคอนกรีตแทนหินย่อย.”
- [3.] สมบูรณ์ คงสมศักดิ์ศิริ. 2549 “การใช้เศษโฟมมาทำวัสดุผสมหยาบมวลเบาในงานคอนกรีต”.
- [4.] เทอดศักดิ์ สายสุทธิ. 2555 “RCA จากส่วนที่เหลือของเสาเข็มคอนกรีต”.
- [5.] รัฐพล สมณา และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2554 “การใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดเพื่อปรับปรุงกำลังอัด การซึมผ่านน้ำ และ ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า”.
- [6.] ปกป้อง รัตนชู, กฤษฏา เปรมฤทัย, วีรชาติ ตั้งจิรภัทรและชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2558 “ผลกระทบจากการใช้เถ้าถ่านหินบดละเอียดต่อกำลังอัดและความทนทานของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต”.
- [7.] นายสฤติพงษ์ วงศ์สง่า. 2560 “การศึกษาคุณสมบัติของปูนฉาบที่ผสมมวลรวมละเอียดจากเศษคอนกรีตเก่า”, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา.
- [8.] ประจักษ์ เข้มบุบผา. 2548 “การศึกษาคุณสมบัติทั่วไปของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากคอนกรีตเก่าที่ถูกทำลายที่มีกำลังอัดแตกต่างกัน”, สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี.
- [9.] พิเชฐ ชื่นเย็น. 2547 “การศึกษากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตจากถนนเก่าเป็นวัสดุผสมรวมหยาบ”, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [10.] ญัฐวดี เต่งศิริธรรม. 2558. “การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคาดคะเนหาสัดส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีตมวลเบาในระบบ CLC.”, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมโยธา, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [11.] สุวิมล ทิรภานันท์. 2553. “การทำนายผลการทดลองด้วยวิธีถดถอยพหุคูณ (Multiple regression Analysis)”, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- [12.] บุญชม ศรีสะอาด. 2541. “วิธีการทางสถิติสำหรับการวิจัย”, สุริยาสาสน. กรุงเทพฯ.
- [13.] ผศ.ดร. คมสัน มาลีสี, รศ. สิริวัฒน์ ไชยชนะ. 2555 “ปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี (ปรับปรุงใหม่) Concrete Testing Laboratory.”, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมโยธา, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

- [14.] สถิตพงษ์ วงศ์สง่า, 2555 “การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของแก็กกันตายละเอียดในงานคอนกรีต. วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่ 35 (ฉบับที่ 2)
- [15.] C. Thomas, J. Setién, J.A. Polanco. 2016. “**Structural recycled aggregate concrete made with precast wastes.**” Constr. Build. Mater. 114.
- [16.] C. Thomas, J. Setién, J.A. Polanco, P. Alaejos, M. Sánchez de Juan. (2013) “**Durability of recycled aggregate concrete.**” Constr. Build. Mater. 40 (0).
- [17.] Asso. Dr. Uma Seeboonruang, Asst. Dr. Arthit Petchsasithon. 2559 “**Advanced Mathematics For Civil Engineering**”, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมโยธา, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [18.] สุรศักดิ์ ภูสันติพงษ์, 2545 “**การศึกษาคอนกรีตที่ถูกทำลายมาใช้ทดแทนมวลรวมในคอนกรีต**” .
- [19.] Khaldoun Rahal, 2017 “**Shear strength of recycled aggregates concrete.**”, Procedia Engineering.
- [20.] Suvash Chandra Paul, 2017 “**Data on optimum recycle aggregate content in production of new structural concrete**”, Data in Brief, 15.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.  
ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรง  
ของคอนกรีตรีไซเคิล

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน

ลำดับที่	ชื่อตัวอย่าง	แรงกดสูงสุด (กิโลนิวตัน)					กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)					เฉลี่ย
		ตัวอย่างที่					ตัวอย่างที่					
		6	7	8	9	10	6	7	8	9	10	
1	C280/0.00	662.670	659.060	660.086	668.386	675.068	300.224	298.589	299.054	302.814	305.841	301.304
2	C280/0.25	616.621	611.828	564.543	593.331	584.222	279.362	277.190	255.768	268.810	264.683	269.163
3	C280/0.50	596.533	597.951	501.964	581.369	582.300	270.261	270.903	227.416	263.391	263.812	259.157
4	C280/0.75	422.585	513.831	491.480	492.081	497.240	191.453	232.792	222.666	222.938	225.276	219.025
5	C280/1.00	447.110	493.334	443.300	437.549	453.749	202.564	223.506	200.838	198.233	205.572	206.143
6	C380/0.00	654.092	676.538	668.525	667.325	674.302	296.338	306.507	302.877	302.333	305.494	302.710
7	C380/0.25	625.608	618.901	624.364	626.539	618.118	283.433	280.395	282.870	283.855	280.040	282.118
8	C380/0.50	546.282	557.305	656.744	575.810	568.093	247.494	252.488	297.539	260.872	257.376	263.154
9	C380/0.75	570.964	547.830	534.215	596.198	547.230	258.677	248.196	242.027	270.109	247.924	253.387
10	C380/1.00	527.846	541.940	545.829	498.336	531.326	239.142	245.527	247.289	225.772	240.719	239.690
11	C500/0.00	671.092	667.577	668.378	676.799	674.276	304.040	302.447	302.810	306.625	305.482	304.281
12	C500/0.25	594.271	618.979	614.655	610.801	600.552	269.236	280.430	278.471	276.725	272.082	275.389
13	C500/0.50	582.378	586.571	599.221	608.487	581.960	263.848	265.747	271.479	275.677	263.658	268.082
14	C500/0.75	570.050	586.354	577.054	578.514	554.512	258.263	265.649	261.436	262.097	251.223	259.734
15	C500/1.00	552.398	555.060	556.835	561.263	548.561	250.265	251.471	252.275	254.282	248.527	251.364

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงที่อายุ 28 วัน

ลำดับ ที่	ชื่อตัวอย่าง	แรงกดสูงสุด (กิโลนิวตัน)					กำลังรับแรงดึง (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)					เฉลี่ย
		ตัวอย่างที่					ตัวอย่างที่					
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
1	C280/0.00	161.740	165.490	160.690	182.500	163.810	23.325	23.865	23.173	26.319	23.623	24.061
2	C280/0.25	172.660	150.700	156.110	162.510	163.050	24.899	21.733	22.513	23.436	23.514	23.219
3	C280/0.50	155.470	163.040	156.680	146.020	143.270	22.420	23.512	22.595	21.058	20.661	22.049
4	C280/0.75	162.860	122.170	123.590	145.410	145.090	23.486	17.618	17.823	20.970	20.924	20.164
5	C280/1.00	144.470	110.580	113.040	105.220	120.250	20.834	15.947	16.302	15.174	17.341	17.120
6	C380/0.00	173.970	156.850	164.320	170.660	161.560	25.088	22.620	23.697	24.611	23.299	23.863
7	C380/0.25	157.170	140.920	160.920	167.110	164.750	22.666	20.322	23.206	24.099	23.759	22.810
8	C380/0.50	144.470	147.210	142.070	150.480	151.340	20.834	21.229	20.488	21.701	21.825	21.215
9	C380/0.75	135.340	136.630	120.980	133.960	142.780	19.518	19.704	17.447	19.319	20.590	19.315
10	C380/1.00	135.350	116.970	139.990	125.100	166.460	19.519	16.868	20.188	18.041	24.005	19.724
11	C500/0.00	191.860	145.900	172.220	170.510	159.970	27.668	21.040	24.836	24.589	23.069	24.241
12	C500/0.25	155.500	164.710	152.340	153.350	156.270	22.425	23.753	21.969	22.115	22.536	22.560
13	C500/0.50	147.640	153.980	165.690	153.060	151.760	21.291	22.206	23.894	22.073	21.885	22.270
14	C500/0.75	151.170	158.840	139.510	153.850	155.760	21.800	22.906	20.119	22.187	22.462	21.895
15	C500/1.00	150.960	153.630	145.200	154.860	147.900	21.770	22.155	20.939	22.333	21.329	21.705

ภาคผนวก ข.  
ผลการทดสอบค่าความหนาแน่น  
ของคอนกรีตรีไซเคิล

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบค่าน้ำหนักที่อายุ 28 วัน

ลำดับที่	ชื่อตัวอย่าง	น้ำหนัก (กิโลกรัม)									
		ตัวอย่างที่									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	M280/0.00	12.541	12.420	12.452	12.445	12.604	7.951	7.985	7.978	7.987	8.001
2	M280/0.25	12.522	12.365	12.459	12.493	12.468	7.965	7.965	7.890	7.957	7.906
3	M280/0.50	12.301	12.375	12.303	12.383	12.398	7.849	7.873	7.869	7.874	7.865
4	M280/0.75	12.057	12.392	12.044	12.204	12.058	7.715	7.764	7.734	7.681	7.626
5	M280/1.00	11.813	11.738	11.897	11.766	11.765	7.476	7.519	7.495	7.485	7.477
6	M380/0.00	12.555	12.344	12.463	12.487	12.504	7.994	8.087	7.997	7.908	8.005
7	M380/0.25	12.415	12.437	12.553	12.437	12.406	7.996	8.029	8.031	7.924	7.922
8	M380/0.50	12.351	12.311	12.322	12.298	12.397	7.858	7.829	7.803	7.854	7.833
9	M380/0.75	12.167	12.206	12.903	12.256	12.047	7.745	7.753	7.686	7.714	7.784
10	M380/1.00	11.968	11.909	11.717	11.843	11.725	7.605	7.635	7.534	7.647	7.504
11	M500/0.00	12.556	12.393	12.402	12.487	12.544	7.997	8.087	7.998	7.902	8.011
12	M500/0.25	12.379	12.465	12.452	12.391	12.289	7.827	7.889	7.798	7.859	7.988
13	M500/0.50	12.207	12.282	12.315	12.242	12.246	7.820	7.813	7.764	7.858	7.790
14	M500/0.75	12.052	12.184	12.058	12.510	12.171	7.849	7.842	7.858	7.894	7.791
15	M500/1.00	11.929	11.991	11.933	11.922	11.860	7.682	7.649	7.656	7.684	7.669

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นที่อายุ 28 วัน

ลำดับ ที่	ชื่อตัวอย่าง	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)										เฉลี่ย
		ตัวอย่างที่										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	M280/0.00	2360.105	2362.395	2344.889	2361.630	2363.273	2363.757	2358.118	2348.197	2366.545	2354.967	2358.388
2	M280/0.25	2256.036	2320.782	2352.476	2339.339	2337.773	2352.264	2331.954	2322.322	2365.541	2355.062	2333.355
3	M280/0.50	2293.506	2318.788	2332.353	2353.000	2338.611	2317.929	2317.318	2308.420	2309.887	2299.632	2318.944
4	M280/0.75	2278.136	2283.809	2271.837	2290.564	2291.244	2278.357	2285.285	2279.394	2268.291	2259.581	2278.650
5	M280/1.00	2246.938	2243.936	2240.374	2241.816	2226.631	2207.752	2220.500	2220.839	2220.763	2222.841	2229.239
6	M380/0.00	2372.232	2324.551	2358.734	2367.235	2374.409	2368.619	2380.253	2366.395	2332.253	2364.024	2360.870
7	M380/0.25	2345.727	2345.967	2332.702	2316.542	2340.120	2361.366	2386.919	2363.771	2309.160	2316.349	2341.863
8	M380/0.50	2324.349	2326.077	2320.408	2333.735	2324.460	2336.109	2312.048	2296.689	2296.365	2305.519	2317.576
9	M380/0.75	2298.920	2294.745	2428.230	2292.669	2289.154	2264.496	2289.604	2269.767	2281.078	2298.759	2300.742
10	M380/1.00	2261.270	2231.471	2228.678	2237.652	2233.929	2245.947	2262.247	2235.277	2250.847	2223.407	2241.072
11	M500/0.00	2348.893	2357.259	2374.830	2363.276	2354.379	2345.970	2388.240	2361.957	2349.190	2365.796	2360.979
12	M500/0.25	2390.514	2416.192	2319.561	2325.662	2333.582	2304.137	2329.742	2310.596	2320.882	2359.056	2340.992
13	M500/0.50	2329.659	2312.875	2330.724	2328.538	2325.416	2324.786	2322.835	2312.918	2317.507	2315.868	2322.113
14	M500/0.75	2286.358	2273.276	2272.211	2301.732	2284.371	2287.355	2292.882	2297.636	2308.111	2293.131	2289.706
15	M500/1.00	2253.901	2265.615	2247.154	2262.383	2253.621	2261.149	2251.386	2260.958	2261.638	2264.747	2258.255

ภาคผนวก ค.

ภาพประกอบที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ ค.1 เก็บรวบรวมเศษคอนกรีตแบ่งตามค่ากำลัง



รูปที่ ค.2 การบดเศษคอนกรีต



รูปที่ ค.3 เศษคอนกรีตที่ผ่านการบด



รูปที่ ค.4 เศษคอนกรีตที่ผ่านการบดและการคัดขนาด



รูปที่ ค.5 การคัดขนาดของเศษคอนกรีต



รูปที่ ค.6 การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของมวลรวม



รูปที่ ค.7 การทดสอบหาส่วนคละของมวลรวม



รูปที่ ค.8 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวม



รูปที่ ค.9 การตรวจสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต



รูปที่ ค.10 ตัวอย่างบางส่วนของตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเสร็จแล้ว



รูปที่ ค.11 การวัดขนาดตัวอย่างคอนกรีต



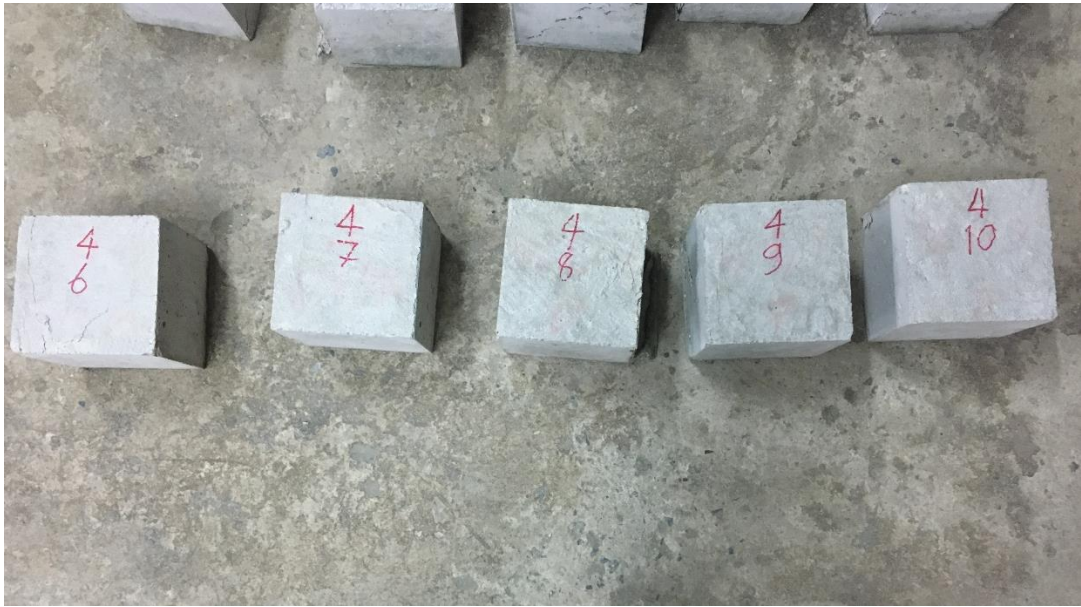
รูปที่ ค.12 การชั่งน้ำหนักตัวอย่างคอนกรีต



รูปที่ ค.13 การทดสอบกำลังรับแรงอัด



รูปที่ ค.14 การทดสอบกำลังรับแรงดึง



รูปที่ ค.15 ตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการทดสอบการรับแรงอัด



รูปที่ ค.16 ตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการทดสอบการรับแรงดึง

ภาคผนวก ง.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



## การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23

เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ

## วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ ๒๓

Proceeding of the 23<sup>rd</sup> National Convention on Civil Engineering

# NCCE-23



ภายใต้หัวข้อการประชุม

## วิศวกรรมโยธายุคใหม่กับการรับใช้สังคม

SMART Civil Engineering and Social Enterprise

18-20 กรกฎาคม 2561

ณ โรงแรมนายร้อยพระจุลจอมเกล้า  
อำเภอเมือง จังหวัดนครนายก

จัดโดย

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย  
ในพระบรมราชูปถัมภ์

กองวิชาวิศวกรรมโยธา  
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม  
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ





## CERTIFICATE OF PARTICIPATION

Recognizes & Certifies that

**Mr. ASSARAYUT SAISOONG**

has presented a paper titled

**The estimating ultimate strength of concrete using recycle aggregate concrete  
comparing with concrete using crushed rock as coarse aggregate**

*at the 23<sup>d</sup> National Convention on Civil Engineering held between 18<sup>th</sup> – 20<sup>th</sup> July 2018  
at Chulachomklao Royal Military Academy*

( Associate Professor Anek Siripanichgorn )  
Chairperson of Civil Engineering Committee,  
The Engineering Institute of Thailand  
Under H.M. The King's Patronage

Colonel

( Assistant Professor Dr. Chuan Chuntavan )  
Director of Civil Engineering Department,  
Academic Division,  
Chulachomklao Royal Military Academy

Acting Major

( Associate Professor Dr. Ittiporn Sirisawat )  
Head of Civil and  
Environmental Engineering Department,  
Srinakharinwirot University

## การเปรียบเทียบและประมาณกำลังรับแรงของคอนกรีต เมื่อใช้เศษคอนกรีตกับหินมาเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ

### The estimating ultimate strength of concrete using recycled aggregate concrete comparing with concrete using crushed rock as coarse aggregate

อัครายุทธ สายสูง<sup>1</sup> อาทิตย์ เพชรศิริ<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

\*Corresponding author; E-mail address: assarayut.autt@gmail.com

#### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการลดต้นทุนการก่อสร้างเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ ซึ่งงานวิจัยนี้เล็งเห็นถึงการนำวัสดุคอนกรีตที่ไม่ใช้งานแล้วมาทำเป็นวัสดุมวลรวมหยาบของคอนกรีต แต่ยังไม่พบงานวิจัยใดที่ศึกษาความสัมพันธ์ของกำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีตดังกล่าว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาและเปรียบเทียบกำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตรีไซเคิล ที่มาจากคอนกรีตทรงกระบอกเป็นกรณีศึกษาโดยใช้เศษคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัด 280 , 380 และ 500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มาผสมกับมวลรวมหยาบหิน ในสัดส่วนต่างๆ เพื่อมาเปรียบเทียบกับวัสดุมวลรวมหยาบที่เป็นหินทั้งหมดนี้ถูกควบคุมด้วยขนาดตะแกรง 3/4 นิ้ว ถึง 1 1/2 นิ้ว และค่าสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์เดียวกันซึ่งออกแบบค่ากำลังอัดไว้ที่ 280 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 4 สัดส่วน คือ หินร้อยละ 75 : เศษคอนกรีตร้อยละ 25 , หินร้อยละ 50 : เศษคอนกรีตร้อยละ 50 , หินร้อยละ 25 : เศษคอนกรีตร้อยละ 75 และ หินร้อยละ 0 : เศษคอนกรีตร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก ในแต่ละสัดส่วนจะแบ่งการทดสอบเป็นกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงเป็น 10 ตัวอย่าง ดังนั้นจะได้ตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 120 ตัวอย่าง ซึ่งคอนกรีตจะถูกทดสอบที่อายุ 28 วัน จากทดสอบพบว่า การเพิ่มสัดส่วนของเศษคอนกรีตที่มีค่ากำลังรับแรงต่างกันในการใช้เป็นมวลรวมหยาบมีผลทำให้กำลังและค่าความหนาแน่นของคอนกรีตลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: เศษคอนกรีตรีไซเคิล

#### Abstract

At the present time, Construction cost can be considered as one of the most important factor. This research aims to use recycle concrete as coarse aggregate. Nevertheless, no research has investigated the relationship between compressive strength and tensile strength. Therefore, this research will study and compare the compression strength and tensile strength of concrete by using recycled concrete as coarse aggregate from

concrete with ultimate compressive strength of 240, 380 and 500 ksc. Aggregate in various ratios will be compared with concrete using crushed rock as normal aggregate under the conditions that all grain sizes are in the range from 3/4 to 1 1/2 inch. With designed ultimate compressive strength of 280 ksc. using constant water to cement ratio. The ratio of crushed rock : recycled concrete used in this research are 75:25, 50:50, 25:75 and 0:100. Ten samples for each proportion will be tested for compressive strength and tensile strength. Therefore 120 samples will be tested in total. It was found that the concrete strength and Density are significantly decreased when increasing the proportion of recycled concrete as coarse aggregate.

Keywords: Recycle concrete

#### 1. คำนำ

ในงานการรื้อถอนโครงสร้างอาคารบางครั้งต้องมีการทุบทำลายโครงสร้างอาคารเก่าทิ้งทำให้เกิดเป็นเศษคอนกรีต (Crushed Concrete) เป็นจำนวนมาก ปัจจุบันได้มีการนำเศษคอนกรีตไปใช้ประโยชน์หลักๆคือ ใช้ในการถมที่ (Landfill) และเป็นวัสดุถมที่ใช้ในการป้องกันการกัดเซาะตลิ่งของแม่น้ำ ส่วนมากมีการนำคอนกรีตเหล่านั้นไปใช้ในการถมที่ ซึ่งการนำเศษคอนกรีตหักมาถมที่อาจทำให้เกิดปัญหาการตอกเสาเข็มไม่ลงในภายหลังได้ ปัจจุบันได้มีการวิจัยในการนำเศษคอนกรีตมาใช้เป็นมวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) ในคอนกรีต เนื่องจากการเป็นการช่วยลดขยะจากเศษคอนกรีต ซึ่งเป็นการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังช่วยลดการใช้หินใหม่ ลดการทำลายแหล่งหินที่ และปัญหาที่เกิดจากขบวนการผลิตมวลรวมหยาบโดยเฉพาะฝุ่นละออง และการทำลายธรรมชาติที่เกิดจากขบวนการไม่หิน ซึ่งโดยทั่วไปเศษคอนกรีตไม่มีต้นทุนทางด้าน ราคาวัสดุ และอาจต้องเสียค่าใช้จ่ายในการนำไปทิ้งด้วย ทำให้การใช้เศษคอนกรีตยังสามารถลด ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างได้อีกด้วย แต่ในปัจจุบันยังในประเทศไทยยังไม่มีข้อมูลรองรับที่มากเพียงพอ และยังไม่มีการยอมรับในการใช้งานทางด้านการใช้รับกำลัง การศึกษาวิจัยจึงมุ่งเน้นเพื่อศึกษา

คุณสมบัติในการใช้งานมวลรวมรีไซเคิล และสมการประมาณค่ากำลังรับแรงและค่าความหนาแน่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิล

## 2. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวสรุปการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องจากการศึกษาวารสารต่างประเทศ วิทยานิพนธ์ และตำราต่างประเทศ ซึ่งมีนักวิจัยได้แนะนำปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับมวลรวมรีไซเคิล คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี รูปร่าง และมาตรฐานการใช้งานต่างๆ ซึ่งจะได้แสดงรายละเอียด ในหัวข้อถัดไป

### 2.2 วรรณกรรมปริทัศน์

#### 2.2.1 มวลรวมหยาบจากส่วนที่เหลือของเสาเข็มคอนกรีต

**เทอดศักดิ์ สายสุทธิ (2555)** งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมด้วยมวลรวมหยาบคอนกรีตที่นำกลับมาใช้ใหม่ (RCA) หรือมวลรวมหยาบรีไซเคิลจากส่วนที่เหลือของเสาเข็มคอนกรีต หลักการก็คือ โดยใช้ RCA แทนที่มวลรวมหยาบ ธรรมชาติ (NCA) ในอัตราส่วนร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนักตามลำดับเพื่อหาค่าการรับกำลังอัด ประสิทธิภาพการรับกำลังดัดประลัยของคอนกรีตปกติหรือคอนกรีตธรรมชาติ (NC) และคอนกรีตรีไซเคิล (RC) โดยใช้ค่ากำลังอัดประลัยที่ออกแบบไว้เท่ากับ 210, 280 และ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

#### 2.2.2 ผลกระทบจากการใช้เสาคอนกรีตที่เหลือต่อกำลังอัดและความทนทานของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต

**ปกป้อง รัตนชูและคณะ (2558)** การนำเสาคอนกรีตซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตไฟฟ้ามาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต โดยหล่อคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.48 ควบคุมค่าการยุบตัวให้อยู่ระหว่าง 5 ถึง 10 ซม. ใช้เสาคอนกรีตที่เหลือแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานจากนั้นแบ่งคอนกรีตออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 คือคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ กลุ่มที่ 2 คือคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำและมวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีต และกลุ่มที่ 3 คือคอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีต ทำการทดสอบกำลังอัด ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต การแทรกซึมของไอออนคลอไรด์ และการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

#### 2.2.3 โครงสร้างคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลด้วยของเสียจากคอนกรีตสำเร็จรูป

**Carlos Thomas และคณะ (2559)** งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของมวลรวมหยาบคอนกรีตที่นำกลับมาใช้ใหม่ (RCA) และคอนกรีตที่ผสมด้วยมวลรวมหยาบคอนกรีต หรือมวลรวมหยาบรีไซเคิลจากส่วนที่เหลือใช้ของคอนกรีตสำเร็จรูป ศึกษาส่วนผสมที่แตกต่างกันของโครงสร้างคอนกรีตโดยใช้ระดับการแทนที่ที่แตกต่างกันของมวลรวมหยาบของมวลรวมรีไซเคิลที่มาจากโรงงานสำเร็จรูป 4 สัดส่วน

การแทนที่ 20, 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ CR และพูดถึงคอนกรีตที่ทำจากมวลรวมรีไซเคิล 20 % จะมีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีเยี่ยมเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตอ้างอิงจาก Annex 15 ของ EHE-08

## 3. วิธีการทดลอง

การทดลองจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 4 สัดส่วน คือ หินร้อยละ 75 : เศษคอนกรีตร้อยละ 25 , หินร้อยละ 50 : เศษคอนกรีตร้อยละ 50 , หินร้อยละ 25 : เศษคอนกรีตร้อยละ 75 และ หินร้อยละ 0 : เศษคอนกรีตร้อยละ 100 โดยน้ำหนักของมวลรวมธรรมชาติและมวลรวมรีไซเคิล ซึ่งมวลรวมรีไซเคิลนั้นจะได้จาก ชั้นส่วนลูกคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบและคัดคุณภาพตามค่ากำลังดัดนี้ 280,380 และ 500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (Ksc) จากนั้นจะถูกย่อยและควบคุมด้วยขนาดคละ 0.75 นิ้ว ถึง 1 1/2 นิ้ว

### 3.1 ออกแบบการทดลอง.

ในการทดลองจะใช้วิธีฟูลแฟกทอเรียล (Full Factorial Design) ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบการทดลองที่จะต้องทำให้ครบทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่าของทุกปัจจัย และจะต้องวิเคราะห์ผลกระทบต่อตัวแปรตามทุกกรณี เพื่อให้ได้สมการที่สามารถจำลองเหตุการณ์จริงได้ จึงออกแบบการทดลองโดยใช้ 2 ปัจจัยหลัก อันได้แก่ ค่ากำลังของเศษคอนกรีต 3 ค่ากำลัง ( 280,380 และ 500 ksc ) อัตราส่วนการแทนที่ของมวลรวม 4 ระดับ ( 25,50,75 และ 100 ร้อยละโดยน้ำหนัก ) การทดสอบความแข็งแรง 2 การทดสอบ ( แรงอัดและแรงดึง ) ดังแสดงในตารางที่ 1 ทำการผสมจนครบทุกปัจจัยทั้งหมด 3 x 4 x 2 หรือเท่ากับ 24 การทดลอง แต่ละการทดลองจะแบ่งเป็น 5 ตัวอย่าง มีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาด  $\phi$  15 x 30 เซนติเมตร และ ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร รวมทั้งสิ้นเท่ากับ 120 ตัวอย่าง จากนั้นจะนำผลที่ได้มาสร้างแบบจำลองต่อไป

#### ตารางที่ 1 ขอบเขตของข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ			
	ค่ากำลังของ RCA			
ค่ากำลังของ RCA	280	380	500	
สัดส่วนการแทนที่ด้วย RCA (ร้อยละ)	25	50	75	100
การทดสอบคอนกรีต	อัด			ดึง

ตารางที่ 1 ขอบเขตของการวิจัยในการออกแบบการทดลอง

### 3.2 การออกแบบส่วนผสม

ในการศึกษานี้ จะใช้วิธีการออกแบบส่วนผสมโดยน้ำหนัก โดยวิธีของ ACI ซึ่งจะเป็นการหาอัตราส่วนผสมจากค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต โดยจะออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ค่าความต้านทานแรงอัด 280 ksc ค่าการยุบตัว 8-10 เซนติเมตร ขนาดมวลรวมโตสุด 40 มิลลิเมตร

ตารางที่ 2 สัดส่วนส่วนผสมต่อลูกบาศก์เมตร

ชนิด	RCA-280				
สัดส่วน (ร้อยละ)	0	25	50	75	100
ซีเมนต์ (kg)	302.77	302.77	302.77	302.77	302.77
น้ำ (kg)	175	175	175	175	175
ทราย (kg)	795.81	846.50	897.18	947.87	998.56
หิน (kg)	1146.42	859.82	573.21	286.61	-
RCA (kg)	-	286.61	573.21	859.82	1146.42
ชนิด	RCA-380				
สัดส่วน (ร้อยละ)	0	25	50	75	100
ซีเมนต์ (kg)	302.77	302.77	302.77	302.77	302.77
น้ำ (kg)	175	175	175	175	175
ทราย (kg)	795.81	841.64	887.47	933.30	979.13
หิน (kg)	1146.42	859.82	573.21	286.61	-
RCA (kg)	-	286.61	573.21	859.82	1146.42
ชนิด	RCA-500				
สัดส่วน (ร้อยละ)	0	25	50	75	100
ซีเมนต์ (kg)	302.77	302.77	302.77	302.77	302.77
น้ำ (kg)	175	175	175	175	175
ทราย (kg)	795.81	837.45	879.09	920.73	962.37
หิน (kg)	1146.42	859.82	573.21	286.61	-
RCA (kg)	-	286.61	573.21	859.82	1146.42

ตารางที่ 2 ค่าสัดส่วนของการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้มวลรวมแต่ละชนิด

### 3.3 ทดสอบคุณสมบัติวัสดุและคอนกรีต

#### 3.3.1 การทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของมวลรวม

เพื่อทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของมวลรวมต่อหน่วยปริมาตร ทั้งในสภาพที่อัดตัวแน่น และหลวมตัวไม่ว่าจะเป็นทราย หิน หรือมวลรวมผสมก็ตาม ทั้งนี้เพื่อนำไปเป็นส่วนหนึ่งของการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

#### 3.3.2 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวม

##### ละเอียดและมวลรวมหยาบ

เพื่อหาความถ่วงจำเพาะและอัตราการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบเพื่อประโยชน์ในการออกแบบอัตราส่วนผสมของคอนกรีต วิธีนี้เรียกว่า Suspension Method

#### 3.3.3 การทดสอบหาความแข็งแรงของมวลรวมหยาบ

เพื่อหาความแข็งแรงของวัสดุมวลรวมหยาบ (หิน) ที่มีขนาดต่ำกว่า 1 1/2" โดยใช้เครื่องมือทดสอบ Los Angeles Machine โดยมีแบบการจัดขนาดคละตามมาตรฐานมวลรวมหยาบที่มีความแข็งแรง จะต้องมีย้อยละสึกกร่อนไม่เกิน 50

#### 3.3.4 การทดสอบหาปริมาณความชื้นในมวลรวม

เพื่อทดสอบหาอัตราของความชื้นทั้งหมดที่มีอยู่ในมวลรวม โดยการทำให้มวลรวมแห้งด้วยการเผา ซึ่งจะทำให้ได้น้ำหนักที่แท้จริงของมวลรวมสำหรับชั่งผสมคอนกรีต

#### 3.3.5 การทดสอบกำลังรับแรงของคอนกรีต

เพื่อทดสอบกำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีต โดยการใส่แรงอัดโดยตรงกับแบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอกตามมาตรฐาน ASTM โดยแรงดึงจะเป็นการทดสอบที่กระทำทางอ้อม คือการทดสอบการปริแตกของแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอก เนื่องจากการทดสอบโดยตรงกระทำได้ยาก ซึ่งโดยทั่วไปกำลังปริแตกจะอยู่ในช่วงร้อยละ 5 - 12 สูงกว่ากำลังรับแรงดึงโดยตรง

### 3.4 การเปรียบเทียบผลข้อมูลและสร้างสมการเปรียบเทียบ

เพื่อสร้างสมการการประมาณข้อมูลของ ค่ากำลัง, หน่วยน้ำหนัก และอัตราส่วนการแทนที่ของมวลรวม และค่าความแม่นยำ จะได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลและค่าค่าที่ต่างๆ โดยโปรแกรม SPSS โดยวิธี Multiple Regression และตรวจสอบข้อมูลทางสถิติต่อไป

## 4. ผลการทดลอง

### 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม

ผลการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวมที่ใช้เป็นวัสดุมวลรวมหยาบทั้ง 4 ชนิด แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของมวลรวม

ชนิด	CR	RCA-280	RCA-380	RCA-500
ความถ่วงจำเพาะ	2.985	2.284	2.312	2.288
อัตราการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	0.905	3.644	3.125	2.994
หน่วยน้ำหนัก (kg/m <sup>3</sup> )	1559.76	1283.90	1310.34	1333.15
ความแกร่ง (ร้อยละ)	19.1	40.3	38.7	41.2
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	0.175	1.011	0.88	1.011

ตารางที่ 3 ค่าคุณสมบัติของมวลรวมแต่ละชนิดที่ได้จากการทดสอบ

### 4.2 ผลการทดสอบของคอนกรีต

ผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ โดยมีการทดสอบ กำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดึง และการหาค่าหน่วยน้ำหนัก ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมแต่ละชนิด แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบคอนกรีต

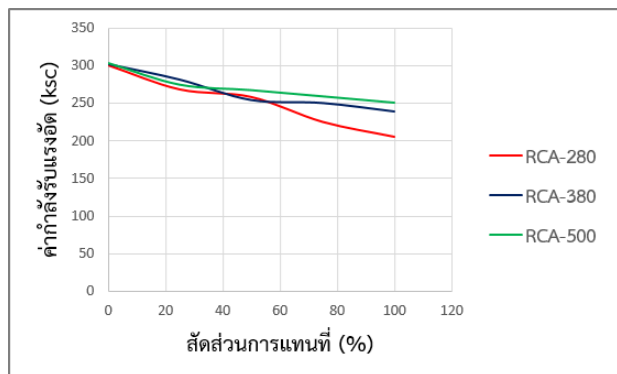
ชนิด	RCA-280				
สัดส่วน(ร้อยละ)	0	25	50	75	100
หน่วยน้ำหนัก (kg/m <sup>3</sup> )	2358.39	2333.35	2318.94	2278.65	2229.24
กำลังรับแรงอัด (ksc)	301.304	269.163	259.157	225.918	206.143
กำลังรับแรงดึง (ksc)	24.061	23.219	22.049	20.164	17.120

ชนิด	RCA-380				
สัดส่วน(ร้อยละ)	0	25	50	75	100
หน่วยน้ำหนัก (kg/m <sup>3</sup> )	2360.87	2341.86	2317.58	2286.58	2241.07
กำลังรับแรงอัด (ksc)	302.710	282.118	254.908	250.940	239.690
กำลังรับแรงดึง (ksc)	23.863	22.810	21.215	19.783	18.654
ชนิด	RCA-500				
สัดส่วน(ร้อยละ)	0	25	50	75	100
หน่วยน้ำหนัก (kg/m <sup>3</sup> )	2360.98	2340.99	2322.11	2289.71	2258.26
กำลังรับแรงอัด (ksc)	304.281	275.389	268.082	259.736	251.364
กำลังรับแรงดึง (ksc)	24.241	22.560	22.270	21.895	21.705

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต

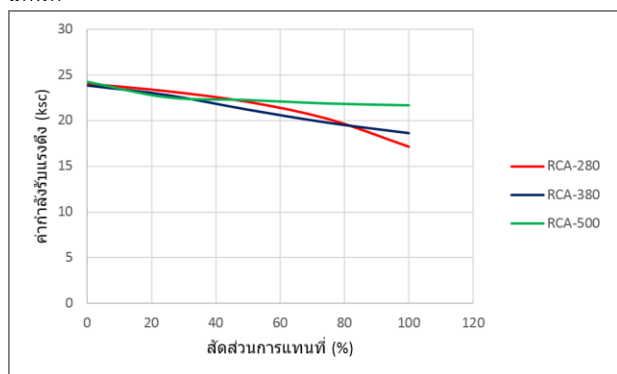
4.3 กราฟความสัมพันธ์

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรง , ค่าหน่วยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับสัดส่วนการแทนที่ของคอนกรีตรีไซเคิลแต่ละชนิด แสดงในรูปที่ 1-3



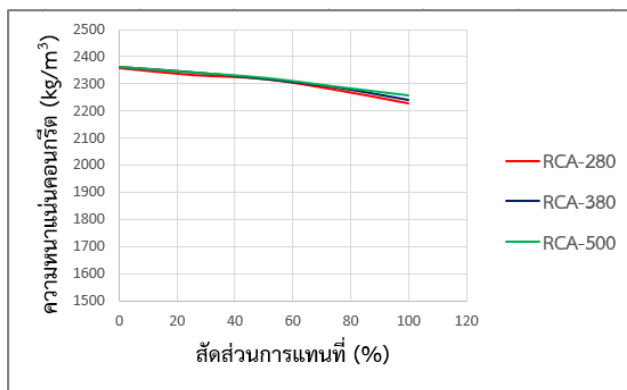
รูปที่ 1 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดและสัดส่วนการแทนที่

รูปที่ 1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังรับแรงอัดและสัดส่วนการแทนที่



รูปที่ 2 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงดึงและสัดส่วนการแทนที่

รูปที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงดึงและสัดส่วนการแทนที่



รูปที่ 3 กราฟเปรียบเทียบค่าหน่วยน้ำหนักและสัดส่วนการแทนที่

รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นและสัดส่วนการแทนที่

ตารางที่ 7 เปอร์เซนต์ร้อยละการความแตกต่างคุณสมบัติของคอนกรีตรีไซเคิล

ชนิด	RCA-280				
สัดส่วน (ร้อยละ)	0	25	50	75	100
หน่วยน้ำหนัก (ร้อยละ)	0	1.061	1.672	3.381	5.476
กำลังรับแรงอัด (ร้อยละ)	0	10.668	13.988	25.020	31.583
กำลังรับแรงดึง (ร้อยละ)	0	3.500	8.361	16.196	28.849
ชนิด	RCA-380				
สัดส่วน (ร้อยละ)	0	25	50	75	100
หน่วยน้ำหนัก (ร้อยละ)	0	0.701	1.730	3.045	4.974
กำลังรับแรงอัด (ร้อยละ)	0	6.802	15.791	17.102	20.819
กำลังรับแรงดึง (ร้อยละ)	0	4.410	11.094	17.099	21.828
ชนิด	RCA-500				
สัดส่วน (ร้อยละ)	0	25	50	75	100
หน่วยน้ำหนัก (ร้อยละ)	0	0.738	1.538	2.912	4.246
กำลังรับแรงอัด (ร้อยละ)	0	9.495	11.897	14.639	17.391
กำลังรับแรงดึง (ร้อยละ)	0	6.935	8.130	9.677	10.460

ตารางที่ 7 เปอร์เซนต์ร้อยละการความแตกต่างคุณสมบัติของคอนกรีตรีไซเคิลเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติ

4.4 สมการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ข้อมูล

สมการการประมาณข้อมูลของ ค่ากำลัง,หน่วยน้ำหนัก และอัตราส่วนการแทนที่ของมวลรวม และค่าความแม่นยำ จะได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลและค่าที่ต่างๆโดยโปรแกรม SPSS โดยวิธี Multiple Regression และตรวจสอบข้อมูลทางสถิติต่อไป แสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สมการการประมาณสำหรับค่ากำลังออกแบบ 280 ksc

แรงอัด	$C = 263.910 - 0.683(P) + 0.087(S)$
	$R^2 = 0.891$
แรงดึง	$T = 21.921 - 0.048(P) + 0.006(S)$
	$R^2 = 0.817$
หน่วยน้ำหนัก	$U = 2348.192 - 1.153(P) + 0.048(S)$
	$R^2 = 0.961$

ตารางที่ 5 สมการการประมาณที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลตัวแปรต่าง ๆ และค่าความแม่นยำของสมการแต่ละสมการ

โดยที่

$C$  = ค่ากำลังรับแรงอัด (ksc)

$T$  = ค่ากำลังรับแรงดึง (ksc)

$U$  = หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ( $\text{kg/m}^3$ )

$P$  = สัดส่วนการแทนที่ของมวลรวม (ร้อยละ)

$S$  = ค่ากำลังรับแรงอัดของ RCA (ksc)

$R^2$  = ค่าความแม่นยำของสมการ

## 5. บทสรุป

จากผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตมาเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ เพื่อมาศึกษาเปรียบเทียบกำลังอัดและกำลังรับแรงดึงกับในกรณีของหินย่อยที่อายุของคอนกรีต 28 วัน ที่มวลรวมหยาบที่นำมาใช้จะมาจากเศษคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดแตกต่างกันในช่วง 280, 380 และ 500 ksc. เมื่อได้นำมาย่อย เป็นมวลรวมหยาบในการผสมคอนกรีตกำลังอัดที่ออกแบบไว้ที่ 280 ksc. ในอัตราส่วนการแทนที่หินด้วยมวลรวมรีไซเคิลร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 จะได้ผลสรุปของคุณสมบัติมวลรวมและคอนกรีตรีไซเคิลดังนี้

จากผลการทดสอบคุณสมบัติและการทดสอบคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลแทนที่มวลรวมธรรมชาตินั้น จะเห็นได้ว่า

อัตราการดูดซึมน้ำของมวลรวมรีไซเคิลนั้นมีค่ามากกว่ามวลรวมธรรมชาติพอสมควรและยิ่งค่ากำลังของมวลรวมธรรมชาติเพิ่มขึ้น อัตราการดูดซึมน้ำจะลดลง

ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมรีไซเคิลมีค่าน้อยกว่ามวลรวมธรรมชาติและมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 3 ค่ากำลังของมวลรวมรีไซเคิล

หน่วยน้ำหนักของมวลรวมรีไซเคิลมีค่าน้อยกว่ามวลรวมธรรมชาติและยิ่งค่ากำลังของมวลรวมธรรมชาติเพิ่มขึ้น หน่วยน้ำหนักจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยแต่ก็ยังน้อยกว่ามวลรวมธรรมชาติ

ค่าความแกร่งของมวลรวมรีไซเคิลมีค่าน้อยกว่ามวลรวมธรรมชาติอยู่มาก ซึ่งค่าความแกร่งของมวลรวมรีไซเคิลทั้ง 3 ค่ากำลังนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

การทดลองมีปัจจัยที่ทำให้การทดลองอาจเกิดความคลาดเคลื่อนของข้อมูลผลการทดลองได้อย่างเช่นความชื้นในมวลรวม ซึ่งมวลรวมในแต่ละกระสอบอาจมีค่าต่างกันซึ่งอาจเกิดความคลาดเคลื่อนในการทดลองได้ อีกปัจจัยคือ ความไม่แน่นอนของมวลรวมรีไซเคิล เนื่องจาก

ในแต่ละก้อนของมวลรวมรีไซเคิล นั้นมีปริมาณซีเมนต์เพสต์ไม่เท่ากัน ซึ่งปัจจัยทั้งสองอาจส่งผลกระทบต่อผลการทดลองได้

จากกราฟ ความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงของคอนกรีตกับอัตราส่วนการแทนที่นั้น จะเห็นได้ว่าค่ากำลังของ RCA ที่ใช้แทนที่นั้นมีผลต่อกำลังรับแรงของคอนกรีตน้อยในอัตราส่วนการแทนที่ต่ำ แต่จะมีผลเพิ่มมากขึ้นในอัตราส่วนการแทนที่ที่สูงขึ้นตามที่ปรากฏในกราฟความสัมพันธ์

ค่าเปอร์เซ็นต์ร้อยละการลดลงของกำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดึง และค่าความหนาแน่นของคอนกรีตที่สัดส่วนการแทนที่ 100 เปอร์เซ็นต์ และที่อายุ 28 วัน

คอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลชนิด RCA-280 เท่ากับ 31.583, 28.843 และ 5.476 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

คอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลชนิด RCA-380 เท่ากับ 20.819, 21.828 และ 4.974 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

คอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลชนิด RCA-500 เท่ากับ 17.391, 10.460 และ 4.246 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

ค่าความแม่นยำของสมการแต่ละสมการ ได้แก่ สมการประมาณกำลังรับแรงอัด ค่าความแม่นยำเท่ากับ 89.1 เปอร์เซ็นต์ สมการประมาณกำลังรับแรงดึง ค่าความแม่นยำเท่ากับ 81.7 เปอร์เซ็นต์ สมการประมาณกำลังรับแรงอัด ค่าความแม่นยำเท่ากับ 96.1 เปอร์เซ็นต์

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ อาทิตย์ เพชรศศิธร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่คอยให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำเป็นอย่างดีมาโดยตลอดในช่วงการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เป็นสถานที่ให้ความรู้ และให้โอกาสได้ศึกษาตลอดหลักสูตร

ขอขอบคุณ นาย ภราดร มาลัยเกตู, นาย วิวัฒน์ ต้อยศ กลุ่มโปรเจกต์ปริญญาตรีที่ช่วยกันทำงานและทำให้งานวิจัยสามารถทยอยออกมาเป็นวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้

สุดท้ายผู้เขียนขอขอบคุณครอบครัวและญาติพี่น้องของผู้เขียนที่คอยให้การสนับสนุนและช่วยเหลือส่งเสริมจนทำให้บทความนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

## เอกสารอ้างอิง

- [1] เทอดศักดิ์ สายสุทธิ, มวลรวมหยาบจากส่วนที่เหลือของเสาเข็มคอนกรีต, 2555,
- [2] ปกป้อง รัตนชู, กฤษฎา เปรมฤทัย, วีระชาติ ตั้งจิรภัทรและชัย จาตุรพิทักษ์กุล, ผลกระทบจากการใช้เถาถ่านหินบดละเอียดต่อกำลังอัดและความทนทานของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีต, 2558,
- [3] ศักดิ์ชัย วงษ์ชัย, การวิจัยการนำเศษคอนกรีตมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมหยาบผสมคอนกรีตแทนหินย่อย, 2553,

- [4] C. Thomas, J. Setién, J.A. Polanco, P. Alaejos, M. Sánchez de Juan, Durability of recycled aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.* 114 (0) (2016) 536 - 546.
- [5] C. Thomas, J. Setién, J.A. Polanco, Structural recycled aggregate concrete made with precast wastes , *Constr. Build. Mater.* 40 (0) (2013) 1054–1065.
- [6] ณัฐวุฒิ เต่งศิริธรรม, การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคาดคะเนหาสัดส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีตมวลเบาระบบ CLC, 2558,
- [7] Khaldoun Rahal, Shear strength of recycled aggregates concrete, *Procedia Engineering*, 210, (2017), 105-108
- [8] Suvash Chandra Paul, Data on optimum recycle aggregate content in production of new structural concrete, *Data in Brief*, 15, (2017), 987-992
- [9] Ashraf M.Wagih, Hossam Z.El-Karmoty, MagdaEbid, Samir H.Okba, Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete, *HBRC Journal*, 9, (2013), 193-200

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายอัศรายุทธ สายสูง
วัน เดือน ปีเกิด	23 เมษายน 2538 ที่น่าน
ที่อยู่	170 หมู่ 2 ตำบล นาปัง อำเภอกู่เพียง จังหวัดน่าน 55000
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2559	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา (เกียรตินิยมอันดับ 1) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานวิจัย	อัศรายุทธ สายสูง และ อาทิตย์ เพชรศศิธร, “การเปรียบเทียบและประมาณกำลังรับแรงของคอนกรีตเมื่อใช้เศษคอนกรีตกับหินมาเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ”, บทความประชุมวิชาการ โยธาแห่งชาติครั้งที่ 23, 2561