การหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับคอนกรีตประสิทธิภาพสูง โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Optimization of High Performance Concrete Mixed Using the Application of Mathematical Modeling

นายกติกร ทวีชัยถาวร

นายสมเดช ทองทุม

นายสุรศักดิ์ สุขวิญญา

นายเปี่ยมศักดิ์ พ้องพงษ์ศรี

โครงงานวิศวกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2543

13429398

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ... 12 ส.ค. 2544
เลขทะเบียน วศ. 440388
เลขเรียกหนังสือ TA 439 .A528 2543
มหาวิทยาลัยนเรศวร

ใบรับรองโครงงานวิศวกรรมโยธา

หัวข้อโครงงานวิศวกรรมโยธา	: การหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับคอนกรีตประสิทธิภาพสูง โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์
ผู้ดำเนินงานวิจัย	: นายกติกร ทวีชัยถาวร รหัส 40361685
	นายสมเดช ทองทุม รหัส 40362055
	นายสุรศักดิ์ สุขวิญญา รหัส 40362097
	นายเปี่ยมศักดิ์ พ้องพงษ์ศรี รหัส 40362238
ที่ปรึกษาโครงงานวิศวกรรมโยธา	: อาจารย์รัฐภูมิ ปริชาตปรีชา
สาขาวิชา	: วิศวกรรมโยธา
ภาควิชา	: วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	: 2543

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้โครงงานวิศวกรรมโยธาฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา

คณะกรรมการสอบโครงงานวิศวกรรมโยธา

.....ประธานกรรมการ
(อาจารย์รัฐภูมิ ปริชาตปรีชา)

.....กรรมการ
(อาจารย์สมยศ เกียรติวนิชวิไล)

.....กรรมการ
(อาจารย์บุญพล มีไชโย)

.....หัวหน้าภาควิชา
(ผ.ศ.สมบัติ ชื่นชูกลิ่น)

หัวข้อโครงงานวิศวกรรมโยธา	: การหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับคอนกรีตประสิทธิภาพสูง โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์		
ผู้ดำเนินงาน	: นายกติกร	ทวีชัยถาวร	รหัส 40361685
	นายสมเดช	ทองทุม	รหัส 40362055
	นายสุรศักดิ์	สุขวิญญา	รหัส 40362097
	นายเปี่ยมศักดิ์	พ้องพงษ์ศรี	รหัส 40362238
ที่ปรึกษาโครงงานวิศวกรรมโยธา	: อาจารย์รัฐภูมิ ปริชาตปรีชา		
สาขาวิชา	: วิศวกรรมโยธา		
ภาควิชา	: วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์		
ปีการศึกษา	: 2543		

บทคัดย่อ

โครงงานนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีตที่มีประสิทธิภาพสูง โดยคำนึงถึงกำลังรับแรงอัด ค่าการยุบตัวและราคาต่ำเป็นสำคัญ ด้วยการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เข้ามาใช้ในการทำนายค่ากำลังอัดและค่าการยุบตัว และสร้างฐานข้อมูลสัดส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งมีค่ากระจายครอบคลุมการออกแบบโดยทั่วไป จำนวน 24,524 ชุดข้อมูล เพื่อใช้ในการหาสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่เหมาะสมที่สุดต่อไป

จากการทดลองผสมจริง ผลการทดสอบค่ากำลังอัดอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ ตามมาตรฐาน ว.ส.ท. (ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต) ส่วนค่าการยุบตัวจะให้ความแม่นยำในการทำนายที่กำลังอัดต่ำ ๆ เมื่อพิจารณาราคาสัดส่วนผสมโดยตรวจสอบกับการออกแบบด้วยวิธีมาตรฐานอเมริกัน (ACI 211.1-74) ราคาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่ได้มีราคาต่ำกว่าของวิธีมาตรฐานอเมริกัน (ACI 211.1-74) คิดเป็นร้อยละ 4-20 และมีแนวโน้มที่ต่ำลงเรื่อย ๆ เมื่อออกแบบที่กำลังอัดสูงขึ้น

Project Title	: Optimization of High Performance Concrete Mixed Using By Application Mathematic Modeling
Name	: Mr. Katikorn Thaweechaithaworn Code 40361685
	Mr. Somdet Thongthum Code 40362055
	Mr. Surasak Sukwinya Code 40362097
	Mr. Piamsak Pongpongsri Code 40362238
Project Advisor	: Mr.Rattapoohm Parichatprecha
Major	: Civil Engineering
Department	: Civil Engineering
Academic Year	: 2000

Abstract

This project is aimed to design for high performance concrete proportion and is especially considered in compressive strength, slump and the lowest costs. Using the mathematical model predict strength and slump. in addition it creates a database pattern from concrete mixed proportion which scatters for 24,524 general design to find the most suitable of concrete proportion.

From the actual experiment, the result of its compressive strength can be accepted according to The E.I.T. Standard. However, slump was predict precisely at the low strength. When considering concrete proportion from design with ACI 211.1-74 standard, from this study, it was found the price of concrete proportion received has 4 – 20 percentage lower than ACI 211.1-74 standard and tends to lower when design in higher strength.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เพราะได้รับความกรุณาจาก อาจารย์รัฐภูมิ ปริชาติปรีชา อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน ที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะ ตรวจแก้ไขโครงงานนี้ และยังให้ความอนุเคราะห์ทางด้านสถานที่ทำงานพร้อมทั้งอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ 1 ชุด จนโครงงานนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้เขียนรู้สึกสำนึกในความกรุณาและขอขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ อาจารย์สมยศ เกียรติวนิชวิไล , อาจารย์บุญพล มีไชโย , อาจารย์ภัคพงษ์ หอมเนียม และภาควิชาคอมพิวเตอร์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางแก้ไขปัญหาและเอื้อเฟื้ออุปกรณ์คอมพิวเตอร์ในการทำโครงงาน

ขอขอบคุณ ครูช่าง และแม่บ้าน ที่กรุณาอำนวยความสะดวกในการใช้สถานที่และอุปกรณ์ทั้งในและนอกเวลาราชการ ในการปฏิบัติงานโครงงาน

ขอขอบคุณ บริษัทคอนกรีตผสมเสร็จ CPAC และนายช่างวิฑูรย์ ศรเพชรพิสัย ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านของข้อมูลส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งช่วยให้ทำงานได้ง่ายขึ้นและสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ผู้ปกครองที่ให้ความอุปการะทางด้านการเงินและคอยให้กำลังใจเมื่อเกิดการติดขัดทางด้านการทำงานจนภาวะดังกล่าวผ่านพ้นไปได้ด้วยดี

กติกร ทวีชัยถาวร
สมเดช ทองทุม
สุรศักดิ์ สุขวิญญา
เปี่ยมศักดิ์ พ้องพงษ์ศรี

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ช
คำนิยามศัพท์	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตของโครงงาน	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.6 แผนการดำเนินงาน	4
1.7 งบประมาณของโครงงาน	5
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	6
2.1 ความเดิมและงานวิจัยที่ผ่านมา	6
2.2 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต	7
2.2.1 แบบจำลองทำนายกำลังอัดของคอนกรีต	7
2.2.2 แบบจำลองทำนายค่าการยุบตัวของคอนกรีต	9
2.2.3 พื้นที่ผิวจำเพาะของมวลรวม	13
2.3 Optimization of HPC Concrete Mixed.	14
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	15
3.1 วิธีการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีต	15
3.1.1 การเลือกแบบจำลองในการทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีต	15
3.1.2 การสุ่มสัดส่วนผสมคอนกรีต	19
3.1.3 การคำนวณกำลังอัดและราคา	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.4 การประมาณค่าการยุบตัว	23
3.2 การหาสัดส่วนผสมที่มีราคาต่ำที่สุด	26
3.2.1 ลำดับขั้นตอนการหาสัดส่วนผสมที่ราคาต่ำที่สุด	26
3.2.2 การทดลองทำตัวอย่าง	28
บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ	29
4.1 การเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองทำนายกำลังอัด	30
4.2 การเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองทำนายค่าการยุบตัว	31
4.3 การเปรียบเทียบราคาของส่วนผสม	32
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	34
5.1 ผลการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีต	34
5.2 การนำไปใช้งานจริง	35
5.3 ข้อเสนอแนะ	35
บรรณานุกรม	37
ภาคผนวก ก ข้อมูลและผลการทดสอบวัสดุส่วนผสม	38
ภาคผนวก ข ราคาเฉลี่ยวัสดุส่วนผสม	41
ภาคผนวก ค การประยุกต์ใช้โปรแกรม	43

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
บทที่ 1	
ตารางแผนการดำเนินงาน	1
บทที่ 3	
ตาราง 3.1 ข้อมูลเปรียบเทียบแบบจำลองทำนายกำลังอัด	16
ตาราง 3.2 ขอบเขตข้อมูลส่วนผสม	19
ตาราง 3.3 ตารางตัวอย่างผลการคำนวณกำลังอัดและราคา	21
ตาราง 3.4 ตารางตัวอย่างผลการคำนวณค่าการยุบตัว	24
ตาราง 3.5 สัดส่วนผสมของกำลังอัดที่เลือกทำตัวอย่าง	28
บทที่ 4	
ตาราง 4.1 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดและค่าการยุบตัวระหว่างค่าที่ทำนายเทียบค่าที่ทดสอบ	29
ตาราง 4.2 แสดงการเปรียบเทียบราคาและสัดส่วนผสมที่ได้จากการ Optimization กับการออกแบบโดยวิธีมาตรฐานอเมริกัน (ACI 211.1-74)	32
บทที่ 5	
ตาราง 5.1 แสดงความแตกต่างด้านราคาคิดเป็นร้อยละ	35
ภาคผนวก ก	
ตาราง ก.1 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของมวลรวมละเอียด	38
ตาราง ก.2 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของมวลรวมหยาบ	38
ตาราง ก.3 การทดสอบหาพื้นที่ผิวจำเพาะของมวลรวมละเอียด	39
ตาราง ก.4 การทดสอบหาพื้นที่ผิวจำเพาะของมวลรวมหยาบ	39
ตาราง ก.5 การทดสอบหาช่องว่างของมวลรวมผสม	40
ภาคผนวก ข	
ตาราง ข.1 ราคาวัสดุส่วนผสมตามร้านจำหน่ายวัสดุก่อสร้าง	41

สารบัญรูป

รูป	หน้า
บทที่ 2	
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวและปริมาณน้ำส่วนเกิน	10
บทที่ 3	
รูปที่ 3.1 แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองทำนายกำลังอัด	17
รูปที่ 3.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลองกับค่ากำลังอัดจากการทดสอบ	18
รูปที่ 3.3 แผนภาพระหว่างค่ากำลังอัดและราคาของส่วนผสม 24,524 ตัวอย่าง	22
รูปที่ 3.4 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการออกแบบสัดส่วนผสม	25
รูปที่ 3.5 แผนภูมิแสดงการใช้โปรแกรมค้นหาสัดส่วนผสม	27
บทที่ 4	
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ากำลังอัดที่ทำนายเทียบค่าที่ทดสอบจริง ในช่วง ± 15% ของค่ากำลังอัดที่ทำนาย	30
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าการยุบตัวที่ทำนายได้กับค่าที่ทดสอบจริงในช่วง ± 2.5 ซม.	31
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบราคาสัดส่วนผสมที่ได้จากการ Optimization กับ การออกแบบโดยวิธีมาตรฐานอเมริกัน (ACI 211.1-74)	33
ภาคผนวก ค	
รูปที่ ค.1 การเข้าถึงโปรแกรม Visual Basic	43
รูปที่ ค.2 การใช้ภาษาเขียนโปรแกรม	44
รูปที่ ค.3 แสดงส่วนประกอบการใช้โปรแกรมค้นหาสัดส่วนผสม	45

คำนิยามศัพท์

f_c'	คือ กำลังรับแรงอัดรูปทรงกระบอกที่เวลา 28 วัน,MPa
A	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่แปรผันตามอายุของคอนกรีตที่เวลา 28 วัน มีค่าเท่ากับ 176.2
B	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่แปรผันตามอายุของคอนกรีตที่เวลา 28 วัน มีค่าเท่ากับ 20.4
W	คือ ปริมาณน้ำ,กก. ต่อ 1 ลบ.ม. คอนกรีต
C	คือ ปริมาณซีเมนต์,กก. ต่อ 1 ลบ.ม. คอนกรีต
W/C	คือ อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อซีเมนต์
FA	คือ ปริมาณมวลรวมละเอียด,กก. ต่อ 1 ลบ.ม. คอนกรีต
CA	คือ ปริมาณมวลรวมหยาบ,กก. ต่อ 1 ลบ.ม. คอนกรีต
MG	คือ ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ
T	คือ อายุของคอนกรีต
C_{unit}	คือ ปริมาณแคลเซียมออกไซด์รวมของซีเมนต์และเถ้าลอย,กก. ต่อ 1 ลบ.ม. คอนกรีต
w/b	คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
γ	คือ อัตราส่วนของปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างในมวลรวมที่อัดแน่น
V_p	คือ ปริมาตรของเพสต์
V_v	คือ ปริมาตรของช่องว่างในมวลรวมอัดแน่น
V_{air}	คือ ปริมาตรของอากาศในส่วนผสมคอนกรีต 1 ลบ.ม.
V_w	คือ ปริมาตรของน้ำในส่วนผสมคอนกรีต 1 ลบ.ม.
V_c	คือ ปริมาตรของซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีต 1 ลบ.ม.
$f_c(t)$	คือ กำลังอัดของคอนกรีต ณ เวลาที่พิจารณา
Ø(t)	คือ อัตราส่วนการพัฒนากำลังอัด ณ เวลาที่พิจารณา
Ø(28)	คือ อัตราส่วนการพัฒนากำลังอัดที่ 28 วัน
p	คือ สัมประสิทธิ์ของปฏิกิริยาปอซโซลานิก
q	คือ สัมประสิทธิ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น
SiO_2	คือ ปริมาณซิลิคอนไดออกไซด์รวมในคอนกรีต
$(SiO_2)_{cement}$	คือ ปริมาณซิลิคอนไดออกไซด์ในซีเมนต์
$(SiO_2)_{fly\ ash}$	คือ ปริมาณซิลิคอนไดออกไซด์ในเถ้าลอย

$(CaO)_{cement}$	คือ ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในซีเมนต์
$(CaO)_{fly\ ash}$	คือ ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในเถ้าลอย
CaO	คือ ปริมาณแคลเซียมออกไซด์รวมในคอนกรีต
W_{cement}	คือ น้ำหนักของซีเมนต์,กก. ต่อ 1 ลบ.ม. คอนกรีต
$W_{fly\ ash}$	คือ น้ำหนักของเถ้าลอย,กก. ต่อ 1 ลบ.ม. คอนกรีต
r	คือ อัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าลอยในวัสดุประสานโดยน้ำหนัก
Slump	คือ ค่าการยุบตัว,ซม.
α	คือ ค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวกับปริมาณน้ำส่วนเกิน,ซม./กก.
W_{fr}	คือ ปริมาณน้ำส่วนเกินของคอนกรีตสด,กก.ต่อ 1 ลบ.ม. คอนกรีต
W_o	คือ ปริมาณน้ำน้อยที่สุดที่สามารถเอาชนะแรงเสียดทานของส่วนผสม,กก.ต่อ 1 ลบ.ม. คอนกรีต
W_u	คือ ปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีต,กก.ต่อ 1 ลบ.ม. คอนกรีต
W_{rp}	คือ ปริมาณน้ำส่วนที่ถูกกักไว้โดยวัสดุผง,กก.ต่อ 1 ลบ.ม. คอนกรีต
W'_{ra}	คือ ปริมาณน้ำส่วนที่ถูกกักไว้โดยมวลรวม,กก.ต่อ 1 ลบ.ม. คอนกรีต
β_{pi}	คือ สัมประสิทธิ์ของปริมาณน้ำส่วนที่ถูกกักไว้โดยวัสดุผง
W_{pi}	คือ ค่าน้ำหนักแห้งของวัสดุผง , กก.ต่อ 1 ลบ.ม.คอนกรีต
β_c	คือ สัมประสิทธิ์ของปริมาณน้ำส่วนที่ถูกกักไว้โดยซีเมนต์
β'_s	คือ สัมประสิทธิ์ของปริมาณน้ำที่ถูกกักไว้โดยผิวของมวลรวมละเอียด
β'_g	คือ สัมประสิทธิ์ของปริมาณน้ำที่ถูกกักไว้โดยผิวของมวลรวมหยาบ
W'_s, W'_g	คือ น้ำหนักในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งของมวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบตามลำดับ , กก.ต่อ 1 ลบ.ม.คอนกรีต
S_{eff}	คือ ค่าพื้นที่ผิวประสิทธิผลของอนุภาคของแข็ง , ซม.^{2} ต่อ 1 ลบ.ม.คอนกรีต
S_{tagg}	คือ ค่าพื้นที่ผิวของมวลรวมทั้งหมด , ซม.^{2} ต่อ 1 ลบ.ม.คอนกรีต
S_{pow}	คือ ค่าพื้นที่ผิวของวัสดุผงทั้งหมด ,ซม.^{2} ต่อ 1 ลบ.ม.คอนกรีต
η	คือ ค่าสัดส่วนผิวสัมผัสประสิทธิผล (Effective Contact Area Ratio)
S_s , S_g	คือ พื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area)ของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ ตามลำดับ, ซม.^{2}/กก.
S_c	คือ พื้นที่ผิวจำเพาะของซีเมนต์,ซม.^{2}/กก.
S_o	คือ พื้นที่ผิวจำเพาะของมวลรวมลักษณะทรงกลม , ซม.^{2}/กก.

D_{av}	คือ ค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคมวลรวม , ซม.
W_{av}	คือ ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักอนุภาคมวลรวม , กก.
D_i	คือ ค่าเฉลี่ยของขนาดตะแกรง , ซม.
M_i	คือ ค่าเฉลี่ยของร้อยละที่ค้างบนตะแกรง , %
V_{av}	คือ ค่าเฉลี่ยของปริมาตร , ซม.^{3}
ρ	คือ ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมในสภาวะแห้ง , กก./ซม.^{3}
Ψ_s , Ψ_g	คือ ปัจจัยความเป็นเหลี่ยมมุม (angularity factor) ของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ ตามลำดับ
S_{so} , S_{go}	คือ พื้นที่ผิวจำเพาะของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ ลักษณะทรงกลม (assumed spherical)
C_W	คือ ราคาต่อหน่วยของน้ำ (บาท/กก.)
C_C	คือ ราคาต่อหน่วยของซีเมนต์ (บาท/กก.)
C_{FA}	คือ ราคาต่อหน่วยของมวลรวมละเอียด (บาท/กก.)
C_{CA}	คือ ราคาต่อหน่วยของมวลรวมหยาบ (บาท/กก.)
ρ_C	คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์
ρ_W	คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำ
ρ_{FA}	คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด
ρ_{CA}	คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ
MPa	คือ เมกกะนิวตัน ต่อ ตารางเมตร
ksc	คือ กิโลกรัม ต่อ ตารางเซนติเมตร

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงงาน

ปัจจุบันคอนกรีตเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในการก่อสร้างเป็นจำนวนมาก เนื่องจากสามารถทำให้มีรูปร่างลักษณะและขนาดได้ตามต้องการ มีต้นทุนต่ำ การบำรุงรักษาทำได้ง่าย และมีความได้เปรียบหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างไม้หรือโครงสร้างเหล็ก แต่การจะผลิตและควบคุมคอนกรีตให้มีประสิทธิภาพสูงนั้นเป็นเรื่องที่ทำได้ยากในทางปฏิบัติ โดยทั่วไปในการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีต จะให้ความสำคัญต่อกำลังอัดและความสามารถในการเทได้เป็นหลัก แต่ไม่ได้คำนึงถึงความสำคัญทางด้านราคาของคอนกรีต ดังนั้นหากในการออกแบบมีการนำราคาของคอนกรีตมาพิจารณาร่วมกับคุณสมบัติอื่นที่ต้องการด้วยแล้ว ก็จะทำให้ได้คอนกรีตที่มีราคาต่ำ มีประสิทธิภาพตามต้องการ และเป็นการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์อย่างคุ้มค่าสูงสุด

ในการเปรียบเทียบราคาของคอนกรีตจะต้องใช้ข้อมูลสัดส่วนผสมจำนวนมาก โดยการที่จะทราบค่ากำลังอัดและค่าการยุบตัวนั้น จำเป็นต้องทำการทดลองผสมจริง แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถทดลองผสมจริงได้ทั้งหมด เนื่องจากจะสิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่ายจำนวนมาก จึงได้มีการนำแบบจำลองทำนายกำลังอัดและแบบจำลองทำนายค่าการยุบตัวของคอนกรีตมาช่วยในการทำนาย เพื่อลดขั้นตอนในการผสมจริง ดังนั้นโครงงานนี้จึงได้เสนอแนวทางในการหาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่เหมาะสม มีประสิทธิภาพสูง ราคาต่ำ โดยเลือกใช้แบบจำลองที่ดีที่สุดเป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ และทดสอบกำลังอัดจากสัดส่วนผสม เพื่อให้มีความมั่นใจมากขึ้นว่าคอนกรีตที่ใช้ มีกำลังอัดตามที่กำหนดและออกแบบไว้ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในการพัฒนาคุณภาพของคอนกรีตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1) เพื่อศึกษาหลักการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีตที่มีประสิทธิภาพสูง
2) หาแนวทางการออกแบบส่วนผสมที่มีประสิทธิภาพสูง โดยคำนึงถึงกำลังรับแรงอัด ค่าการยุบตัวและราคาต่ำเป็นสำคัญ
3) ฝึกการทำงานร่วมกันเป็นกลุ่ม

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาและประยุกต์ใช้งานทางด้านการก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก
2) เพื่อเป็นแนวทางและพัฒนาวิธีการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีตที่มีราคาต่ำ
3) เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนาและประยุกต์ใช้งานทางด้านการก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

1.4 ขอบเขตของโครงงาน

1) ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้าง ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.15)
2) มวลรวมที่ใช้ในการศึกษา ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินปูนย่อยที่ใช้ในการก่อสร้างทั่วไปจากแหล่งหินจังหวัดอุตรดิตถ์ มวลรวมละเอียดเป็นทรายแม่น้ำจากแหล่งทรายอำเภอบางระกำ จังหวัดพิษณุโลก ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.566)
3) กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทรงกระบอกที่ 28 วัน อยู่ในช่วง 200-500 กก./ซม.^{2}
4) มีค่าการยุบตัวอยู่ในช่วง 5-20 ซม.

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1) วางแผนและรวบรวมข้อมูลเบื้องต้น
2) ศึกษาทฤษฎีและวิธีการหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด (Optimization)
3) ศึกษาแบบจำลองทำนายกำลังอัดประลัยและค่าการยุบตัวของคอนกรีต จากงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมา เพื่อนำมาใช้ทำนายกำลังอัดและค่าการยุบตัวของคอนกรีตตามสัดส่วนผสม
4) รวบรวมข้อมูลสัดส่วนผสมคอนกรีต ทำการตรวจสอบและเปรียบเทียบแบบจำลองทำนายกำลังอัดและค่าการยุบตัวของคอนกรีต เพื่อให้ได้แบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด
5) กำหนดขอบเขตส่วนผสมคอนกรีต สุ่มเลือกสัดส่วนผสมจากขอบเขตที่กำหนดไว้จำนวน 24,524 ตัวอย่าง โดยให้มีค่าการกระจายตัวครอบคลุมการออกแบบโดยทั่วไป และทำนายกำลังอัดด้วยแบบจำลองที่นำมาประยุกต์ใช้
6) สำรวจราคาเฉลี่ยของวัสดุผสมคอนกรีตในจังหวัดพิษณุโลก และคำนวณราคาของส่วนผสมที่ได้จากการสุ่มเลือก
7) สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและราคา จากนั้นทำการคัดเลือกส่วนผสมซึ่งมีราคาต่ำที่สุดสำหรับกำลังอัดตามที่ต้องการ
8) ทำการผสมและทดสอบตัวอย่างตามสัดส่วนผสมของกำลังอัดตามที่ต้องการ
9) สรุปผลการทดสอบ
10) วิเคราะห์ผลการทดสอบกำลังอัดและค่าการยุบตัวของคอนกรีต ที่ได้ตามการทดลองจริงกับค่าที่ได้จากการทำนาย รวมทั้งเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านราคากับการออกแบบโดยใช้มาตรฐานอเมริกัน (ACI 211.1-74)

1.6 แผนการดำเนินงาน

รายละเอียดของแผนงาน	สิงหาคม 2543	กันยายน 2543	ตุลาคม 2543	พฤศจิกายน 2543	ธันวาคม 2543	มกราคม 2544	กุมภาพันธ์ 2544	มีนาคม 2544
1. วางแผนและรวบรวมข้อมูลเบื้องต้น								
2. ศึกษาทฤษฎีและวิธีการ Optimization								
3. ศึกษาแบบจำลองทำนายกำลังอัดประลัย และค่าการยุบตัวของคอนกรีต								
4. รวบรวมข้อมูลสัดส่วนผสมคอนกรีตเพื่อตรวจสอบแบบจำลองทำนายกำลังอัดประลัย และค่าการยุบตัวที่เหมาะสม								
5. ทำการ Optimize ให้ได้สัดส่วนผสมคอนกรีตที่มีประสิทธิภาพสูง								
6. ทำการผสมตัวอย่างตามสัดส่วนที่ได้จากการ Optimize								
7. ทดสอบตัวอย่าง วิเคราะห์ และสรุปผล								
8. รวบรวมและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์								

1.7 งบประมาณของโครงงาน

1) ค่าวัสดุคอมพิวเตอร์	220	บาท
2) ค่าวัสดุสำนักงาน	650	บาท
3) ค่าวัสดุในการปฏิบัติงานทดสอบตัวอย่าง	885	บาท
4) ค่าจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์	1500	บาท
รวม	3255	บาท

หมายเหตุ ค่าใช้จ่ายถัวเฉลี่ยทุกรายการ

มหาวิทยาลัยนเรศวร

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 ความเดิมและงานวิจัยที่ผ่านมา

จากการศึกษาโครงงานเรื่องการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูง [1]ที่ผ่านมา ได้มีการสร้างแบบจำลองทำนายกำลังอัด ซึ่งกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตนั้นจะมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนของปริมาณน้ำต่อปริมาณวัสดุประสาน และจากแบบจำลองทำนายค่าการยุบตัวของคอนกรีตพบว่าค่าการยุบตัวจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำส่วนเกิน การทำนายกำลังรับแรงอัดจะอยู่ในเกณฑ์ $\pm$10% ส่วนการทำนายค่าการยุบตัวจะอยู่ในเกณฑ์ $\pm$3.0 ซม.

I-cheng Yeh [3] ได้ให้หลักการ Optimization Formulation of HPC Mix Design โดย Minimize (cost = $\sum$C.W) เมื่อ C คือราคาต่อหน่วย และ W คือน้ำหนัก(kg) ในคอนกรีต 1 ลบ.ม. ซึ่งจากสมการนี้สามารถที่จะนำไปหาสัดส่วนผสมประสิทธิภาพสูงและราคาต่ำได้ และ I-cheng Yeh [4] ได้ทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตพร้อมทั้งสร้างแบบจำลองและเปรียบเทียบหาแบบจำลองที่ดีที่สุด และใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์สร้างสมการความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดและปัจจัยต่าง ๆ แล้วทำการ Opitimize โดยการกำหนดขอบเขตของวัสดุผสมคอนกรีตแล้วใช้แบบจำลองทำนายค่ากำลังอัดและราคาจากสมการ Minimum Cost = C_W.W + C_C.C +C_{FA}.FA + C_{CA}.CA เมื่อ C_W,C_C,C_{FA},C_{CA} คือราคาต่อหน่วย(บาท) และ W,C,FA,CA คือน้ำหนักวัสดุผสมคอนกรีต(กก.) ในคอนกรีต 1 ลบ.ม.

นิพัทธ นิพัทธสัจก์ [5] ได้สร้างแบบจำลองเพื่อทำนายกำลังอัดที่ 28 วันในคอนกรีตผสมเถ้าลอย โดยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะมีความสัมพันธ์กับ ปริมาณแคลเซียมออกไซด์รวมในคอนกรีต,อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน,อัตราส่วนของปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างในมวลรวมที่อัดแน่นและยังได้ทำนายกำลังอัดที่อายุต่าง ๆ โดยแนวคิดจากอัตราการพัฒนากำลังในคอนกรีต ซึ่งมีผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานิกของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

ในส่วนของค่าการยุบตัว จากการศึกษาของ Phichai [6] พบว่าปริมาณน้ำส่วนเกินมีความสัมพันธ์กับค่าการยุบตัวของคอนกรีต ดังนั้น เมื่อมีปริมาณของเพสต์ต่อช่องว่างในมวลรวมอัดแน่น(γ) จะทำให้ผลของปริมาณน้ำส่วนเกินมีมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งมีสมการความสัมพันธ์เป็น

Slump = $\alpha \times (W_{fr} - W_o)$ เมื่อ Slump คือ ค่าการยุบตัว,ซม., α คือ ค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวกับปริมาณน้ำส่วนเกิน,ซม./กก., W_{fr}คือ ปริมาณน้ำส่วนเกินของคอนกรีต,กก. ต่อ 1 ลบ.ม.คอนกรีต, W_o คือ ปริมาณน้ำน้อยที่สุดที่สามารถเอาชนะแรงเสียดทานของส่วนผสม, กก. ต่อ 1 ลบ.ม.คอนกรีต

2.2 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตธรรมดาทั่วไปในปัจจุบันยังอาศัยวิธีการทดลองผสมเป็นหลัก ถึงแม้ว่าจะไม่ยุ่งยากแต่ก็เป็นการทำที่สิ้นเปลืองเวลาพอสมควรในการที่จะทำให้ได้คอนกรีตที่ดี ส่วนผสมคอนกรีตที่ดีจะใช้ปริมาณน้ำในส่วนผสมน้อยที่สุด โดยที่ความสามารถในการเทได้ต้องพอเพียงและเหมาะสมกับลักษณะการทำงานนั้น รวมทั้งต้องมีคุณสมบัติอื่น ๆ ตามที่ต้องการ เช่น ความทึบน้ำ ความคงทนและกำลังอัดก็ต้องได้ตามที่ต้องการ

2.2.1 แบบจำลองทำนายกำลังอัดของคอนกรีต (Strength Prediction Model)

กำลังอัดของคอนกรีตจะมีความผันแปรจากคุณภาพของวัสดุผสมคอนกรีต คือ ปูนซีเมนต์ น้ำ หิน ทราย และจะผันแปรเนื่องจากการควบคุมคุณภาพ ซึ่งกำลังอัดของคอนกรีตนั้นจะมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนของปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ การเลือกใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์นั้นจะขึ้นอยู่กับกำลังอัดของคอนกรีตที่ต้องการ

เอกพลและอิทธิพันธ์ [1] ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของคอนกรีต และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ดังสมการ

$$f_c' = \frac{A}{B^{w/c}} \qquad \text{---------- (1)}$$

จาก I-cheng Yeh [3] ได้พิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการทำนายกำลังรับแรงอัด ได้พบว่าปัจจัยที่ใช้ในแบบจำลองและให้ผลแม่นยำนั้นมาจาก 7 ปัจจัย ดังนี้

1) Water/Cement ratio (W/C)

2) Cement (C) , (kg/m^3)

3) Water (W) , (kg/m^3)

4) Fine Aggregate (FA) , (kg/m^3)

5) Coarse Aggregate (CA) , (kg/m^3)

6) Maximum Grain Size (MG) , (mm)

7) Age of Testing (T) , (days)

โดยจะมีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$f_c' = f_{MODEL}\,(W/C, C, W, FA, CA, MG, T)$$

และได้ใช้วิธีการทางสถิติสร้างแบบจำลอง ซึ่งสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$f_c' = 145.32 \times 0.185887^{W/C} \times 0.997669^{W} \times 1.000875^{C} \times 0.999677^{FA} \times 0.999785^{CA} \times 0.983425^{MG} \times 1.003236^{T} \quad \text{---------- (2)}$$

$$f_c' = 1857.5 \times W/C^{-1.666} \times W^{0.555} \times C^{-0.499} \times FA^{-0.322} \times CA^{-0.345} \times MG^{0.0055} \times T^{0.265} \quad \text{---------- (3)}$$

นิพัทธ นิพันธสัจก์[5] ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับปริมาณแคลเซียมออกไซด์รวมในคอนกรีต,อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและอัตราส่วนของปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างในมวลรวมที่อัดแน่น ดังสมการ

$$f_c' = [(16.45 \times (w/b)^{-1.26}) \times (\log C_{unit} - 1.8) - 10.91 \times \ln(w/b) + 3.96] \times (1.8931 \times e^{-0.53\gamma}) \quad \text{---------- (4)}$$

โดย $C_{unit} = [W_{fly\,ash} \times CaO_{fly\,ash} + W_{cement} \times CaO_{cement}]/100$

$$\gamma = \frac{V_p}{V_v}$$

$$V_p = V_c + V_w + V_{air}$$

CaO_{cement} = 64.73 % (by weight)

และการทำนายกำลังอัดที่อายุต่าง ๆ สามารถทำนายได้จาก

$$f_c(t) = \frac{\emptyset(t) \times f_c'}{\emptyset(28)} \quad \text{---------- (5)}$$

โดย $\emptyset(t) = p \times \log(t+1) + q$ ---------- (6)

$p = (0.2375 \times w/b + 0.1216) \times (SiO_2/CaO) + (-0.3325 \times w/b + 0.4165)$

when $[SiO_2/CaO] \leq 0.9$ ---------- (6a)

$$q = (-0.2395 \times w/b - 0.4828) \times (SiO_2/CaO) + (0.4335 \times w/b + 0.5808)$$

when $[SiO_2/CaO] \leq 0.9$ ---------- (6b)

$$p = (-0.0386) \times (SiO_2/CaO) + 0.2475 \times (w/b) + 0.3672$$

when $[SiO_2/CaO] > 0.9$ ---------- (6c)

$$q = (0.115) \times (SiO_2/CaO) - 0.832 \times (w/b) + 0.1685$$

when $[SiO_2/CaO] > 0.9$ ---------- (6d)

$$[SiO_2/CaO] = \frac{r \times (SiO_2)_{fly\ ash} + (1-r) \times (SiO_2)_{cement}}{r \times (CaO)_{fly\ ash} + (1-r) \times (CaO)_{cement}}$$

$(SiO_2)_{cement} = 21.2\ \%$ (by weight)

2.2.2 แบบจำลองทำนายค่าการยุบตัวของคอนกรีต (Slump Prediction Model)

ในการทำนายค่าการยุบตัวจากปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมนั้น น้ำในส่วนผสมคอนกรีตบางส่วนจะถูกกักเก็บไว้โดยอนุภาคต่าง ๆ ในส่วนผสม ปริมาณน้ำที่หลงเหลือจากการเก็บกักของอนุภาคในส่วนผสมจะเรียกปริมาณน้ำในส่วนผสมนี้ว่า "ปริมาณน้ำส่วนเกิน" ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการเทได้ของคอนกรีต

โดยจากความสัมพันธ์เมื่อมีปริมาณน้ำส่วนเกินมากย่อมจะทำให้ความสามารถเทได้มีค่ามากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการมีน้ำบางส่วนมาช่วยในการหล่อลื่น และลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในแต่ละอนุภาค โดยจะเห็นได้จากรูปที่ 2.1 ซึ่งมีสมการความสัมพันธ์ดังสมการ

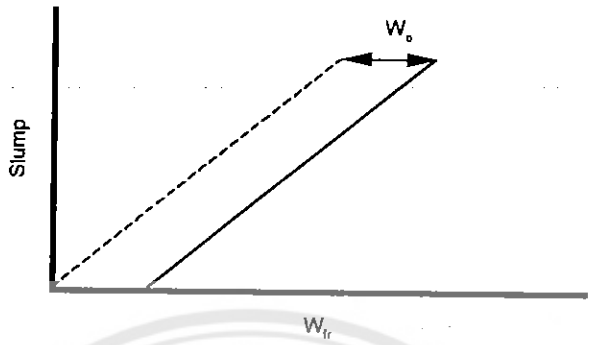
$$Slump = \alpha(W_{fr} - W_o) \quad \text{---------- (7)}$$

เมื่อ Slump คือ ค่าการยุบตัว , ซม.

α คือ ค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวกับปริมาณน้ำส่วนเกิน , ซม./กก.

W_{fr} คือ ปริมาณน้ำส่วนเกินของคอนกรีตสด , กก.ต่อ 1 ลบ.ม.คอนกรีต

W_o คือ ปริมาณน้ำน้อยที่สุดที่สามารถเอาชนะแรงเสียดทานของส่วนผสม,กก. ต่อ 1 ลบ.ม.คอนกรีต



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวและปริมาณน้ำส่วนเกิน

ค่า α จะเป็นส่วนที่แสดงผลของปริมาณน้ำส่วนเกินที่กระทบต่อค่าการยุบตัว ซึ่งจากการศึกษาของ Phichai [6] พบว่าเมื่อมีปริมาณของเพสต์ต่อช่องว่างในมวลรวมอัดแน่น (γ) จะทำให้ผลของปริมาณน้ำส่วนเกินมีมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\alpha = 3.573\gamma^4 - 21.34\gamma^3 + 46.74\gamma^2 - 43.916\gamma + 14.944 \quad \text{---------- (8)}$$

โดยที่ γ คือปริมาณของเพสต์ต่อช่องว่างในมวลรวมอัดแน่น ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$\gamma = \frac{V_p}{V_v} \quad \text{---------- (9)}$$

เมื่อ V_p คือ ปริมาตรของเพสต์

V_v คือ ปริมาตรของช่องว่างในมวลรวมอัดแน่น

ปริมาตรของเพสต์ (V_p) สามารถหาได้จาก

$$V_p = V_c + V_w + V_{air} \quad \text{---------- (10)}$$

เมื่อ V_c, V_w และ V_{air} คือปริมาตรของซีเมนต์ น้ำ และอากาศในส่วนผสมคอนกรีต 1 ลบ.ม.

ปริมาณน้ำที่ใส่ลงในส่วนผสมคอนกรีตนั้นจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือปริมาณน้ำส่วนแรกจะถูกกักไว้โดยมวลรวม ปริมาณน้ำส่วนที่สองจะถูกกักไว้โดยวัสดุผง และปริมาณน้ำส่วนสุดท้าย คือปริมาณน้ำส่วนเกิน เพราะฉะนั้นปริมาณน้ำส่วนเกินสามารถหาได้จาก

$$W_{fr} = W_u - W_{rp} - W'_{ra} \quad \text{---------- (11)}$$

เมื่อ W_{fr} คือ ปริมาณน้ำส่วนเกิน , กก. ต่อ 1 ลบ.ม.คอนกรีต

W_u คือ ปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีต , กก. ต่อ 1 ลบ.ม.คอนกรีต

W_{rp} คือ ปริมาณน้ำส่วนที่ถูกกักไว้โดยวัสดุผง , กก. ต่อ 1 ลบ.ม.คอนกรีต

W'_{ra} คือ ปริมาณน้ำส่วนที่ถูกกักไว้โดยมวลรวม , กก. ต่อ 1 ลบ.ม.คอนกรีต

ปริมาณน้ำส่วนที่ถูกกักไว้โดยวัสดุผงนั้นจะมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของวัสดุผง วัสดุผงที่มีพื้นที่ผิวมากจะทำให้สามารถกักปริมาณน้ำไว้ได้มาก ซึ่งหาได้จาก

$$W_{rp} = \sum \beta_{pi} . W_{pi} \quad \text{---------- (12)}$$

เมื่อ β_{pi} คือ สัมประสิทธิ์ของปริมาณน้ำส่วนที่ถูกกักไว้โดยวัสดุผง

W_{pi} คือ ค่าน้ำหนักแห้งของวัสดุผง , กก.ต่อ 1 ลบ.ม.คอนกรีต

ในโครงงานนี้วัสดุผงจะมีเฉพาะ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังนั้นปริมาณน้ำส่วนที่ถูกกักไว้โดยวัสดุผงสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$W_{rp} = \beta_c . W_c \quad \text{---------- (13)}$$

เมื่อ β_c คือ สัมประสิทธิ์ของปริมาณน้ำส่วนที่ถูกกักไว้โดยซีเมนต์ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 0.23

W_c คือ ค่าน้ำหนักแห้งของซีเมนต์ , กก.ต่อ 1 ลบ.ม.คอนกรีต

ปริมาณน้ำที่ถูกกักไว้ในมวลรวมก็มีลักษณะคล้ายกับปริมาณน้ำส่วนที่ถูกกักไว้โดยวัสดุผง คือมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของมวลรวม ซึ่งหาได้จาก

$$W'_{ra} = \beta'_s W'_s + \beta'_g W'_g \quad \text{---------- (14)}$$

เมื่อ β'_s คือ สัมประสิทธิ์ของปริมาณน้ำที่ถูกกักไว้โดยผิวของมวลรวมละเอียด

β'_g คือ สัมประสิทธิ์ของปริมาณน้ำที่ถูกกักไว้โดยผิวของมวลรวมหยาบ

W'_s, W'_g คือ น้ำหนักในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งของมวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบ ตามลำดับ , กก.ต่อ 1 ลบ.ม.คอนกรีต

ซึ่งจากการศึกษาของ Phichai[6] ค่าสัมประสิทธิ์ของปริมาณน้ำที่ถูกกักไว้โดยผิวของมวลรวมละเอียดจะมีค่า 2.5% สำหรับชนิดทรายแม่น้ำ และสำหรับมวลรวมหยาบค่าสัมประสิทธิ์ของปริมาณน้ำที่ถูกกักไว้โดยผิวของมวลรวมนั้นจะไม่นำมาคิด เพราะพื้นที่ผิวของมวลรวมหยาบจะมีค่าประมาณ 5% ของพื้นที่ผิวมวลรวมละเอียด ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของปริมาณน้ำที่ถูกกักไว้โดยผิวของมวลรวมหยาบจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับมวลรวมละเอียดและซีเมนต์

สำหรับสัดส่วนผสมที่มีปริมาณน้ำส่วนเกินอยู่น้อยจนทำให้ไม่มีค่าการยุบตัวนั้นอาจเกิดจากปริมาณน้ำส่วนเกินมีน้อยจนไม่สามารถหล่อลื่นและเอาชนะแรงเสียดทานได้ ดังนั้นค่า W_o คือค่าที่กราฟตัดแกน X หรือปริมาณน้ำส่วนเกินที่เริ่มมีค่าการยุบตัว ซึ่งค่า W_o จะมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของอนุภาคส่วนผสมด้วย เพราะถ้าอนุภาคมีพื้นที่ผิวมากก็จะทำให้ความเสียดทานมากด้วย ดังความสัมพันธ์

$$W_o = 8\times10^{-5} (S_{eff})^{0.7626} \quad \text{----------} \quad (15)$$

เมื่อ S_{eff} คือ ค่าพื้นที่ผิวประสิทธิผลของอนุภาคของแข็ง , ซม.^{2} ต่อ 1 ลบ.ม.คอนกรีต ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$S_{eff} = S_{tagg} + \eta(S_{pow}) \quad \text{----------} \quad (16)$$

เมื่อ S_{tagg} คือ ค่าพื้นที่ผิวของมวลรวมทั้งหมด , ซม.^{2} ต่อ 1 ลบ.ม.คอนกรีต

S_{pow} คือ ค่าพื้นที่ผิวของวัสดุผงทั้งหมด ,ซม.^{2} ต่อ 1 ลบ.ม.คอนกรีต

η คือ ค่าสัดส่วนผิวสัมผัสประสิทธิผล (Effective Contact Area Ratio)

โดย $S_{tagg} = S_s W'_s + S_g W'_g$ ---------- (17)

$S_{pow} = S_c W_c$ ---------- (18)

เมื่อ S_s , S_g คือ พื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area)ของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ ตามลำดับ , ซม.^{2}/กก.

S_c คือ พื้นที่ผิวจำเพาะของซีเมนต์ มีค่าเท่ากับ 3122000 ซม.^{2}/กก.

W'_s, W'_g, W_c คือ น้ำหนักในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งของมวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบและซีเมนต์ ตามลำดับ , กก.ต่อ 1 ลบ.ม.คอนกรีต

และ $\eta = 0.026\, e^{(-3\times10^{-5})(S_{tagg})}$

ซึ่งค่า η จะทำการลดค่าพื้นที่ผิวของวัสดุผง เนื่องจากเมื่อวัสดุผงอยู่รวมกับมวลรวมในการผสมจะทำการจับตัวกับมวลรวมหรือจับตัวกันเอง ทำให้มีการสูญเสียพื้นที่ผิวไปบางส่วน ดังนั้นจึงต้องมีการลดค่าพื้นที่ผิวของวัสดุผงลง

เมื่อมวลรวมมีพื้นที่ผิวมากก็จะทำให้วัสดุผงไปเกาะติดจำนวนมาก พื้นที่ผิวของวัสดุผงก็จะลดลงมากด้วย เพราะฉะนั้นค่า η ก็จะมีค่าน้อยเมื่อมวลรวมมีพื้นที่ผิวมาก

2.2.3 พื้นที่ผิวจำเพาะของมวลรวม (The Specific Surface Area of Aggregate)

ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของมวลรวมที่มีลักษณะรูปร่างทรงกลมสามารถหาได้จากสมการ

$$S_o = \frac{\Pi D^2_{av}}{W_{av}} \quad \text{---------- (19)}$$

เมื่อ S_o คือ พื้นที่ผิวจำเพาะของมวลรวมลักษณะทรงกลม , ซม.^{2}/กก.

D_{av} คือ ค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคมวลรวม , ซม.

W_{av} คือ ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักอนุภาคมวลรวม , กก.

โดยค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคมวลรวม(D_{av}) และค่าเฉลี่ยของน้ำหนักอนุภาคมวลรวม(W) สามารถคำนวณได้จาก

$$D_{av} = \frac{\sum D_i M_i}{\sum M_i} \quad \text{---------- (20)}$$

$$V_{av} = \frac{\Pi D^3_{av}}{6} \quad \text{---------- (21)}$$

$$W_{av} = \rho V_{av} \quad \text{---------- (22)}$$

เมื่อ D_i คือ ค่าเฉลี่ยของขนาดตะแกรง , ซม.

M_i คือ ค่าเฉลี่ยของร้อยละที่ค้างบนตะแกรง , %

V_{av} คือ ค่าเฉลี่ยของปริมาตรมวลรวม , ซม.^{3}

ρ คือ ความหนาแน่นของมวลรวม, กก./ซม.^{3}

และ $S_s = \Psi_s \times S_{so}$ ---------- (23)

$S_g = \Psi_g \times S_{go}$ ---------- (24)

เมื่อ Ψ_s , Ψ_g คือ ปัจจัยความเป็นเหลี่ยมมุม (angularity factor) ของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ ตามลำดับ

S_{so} , S_{go} คือ พื้นที่ผิวจำเพาะของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ ลักษณะทรงกลม (assumed spherical)

โดยค่าปัจจัยความเป็นเหลี่ยมมุม (angularity factor , Ψ) ของมวลรวมหยาบเป็นหินปูนย่อยจะมีค่า 1.41 และสำหรับมวลรวมละเอียดเป็นทรายแม่น้ำจะมีค่าเท่ากับ 1.24

2.3 Optimization of HPC Concrete Mixed.

การออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีตในปัจจุบันนอกจากจะต้องควบคุมกำลังอัดของคอนกรีต (Strength) ให้มีค่าความสามารถในการทำงานได้ (workability) ตามต้องการ แล้วยังต้องให้ความสำคัญและคำนึงถึงความประหยัดด้วย ซึ่งราคาจะเป็นประเด็นหลักที่ต้องพิจารณา โดยมีตัวแปรในการคิดราคา คือ C , W , FA และ CA ดังนั้น สามารถหาราคาได้จากสมการ

$$\text{Minimize Cost} = \text{Minimize}(C_W.W + C_C.C + C_{FA}.FA + C_{CA}.CA) \quad \text{----------} \quad (25)$$

เมื่อ C_W คือ ราคาต่อหน่วยของน้ำ (บาท/กก.)

C_C คือ ราคาต่อหน่วยของซีเมนต์ (บาท/กก.)

C_{FA} คือ ราคาต่อหน่วยของมวลรวมละเอียด (บาท/กก.)

C_{CA} คือ ราคาต่อหน่วยของมวลรวมหยาบ (บาท/กก.)

เพื่อให้ได้สัดส่วนผสมที่ครอบคลุมสำหรับการนำไปใช้งานได้จริง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการกำหนดค่าขอบเขตของตัวแปร

$$W_{min} \leq W \leq W_{max}$$

$$C_{min} \leq C \leq C_{max}$$

$$FA_{min} \leq FA \leq FA_{max}$$

$$CA_{min} \leq CA \leq CA_{max}$$

โดยที่

$$FA = \rho_{FA}\left(1000 - \frac{C}{\rho_C} - \frac{W}{\rho_W} - \frac{CA}{\rho_{CA}}\right) \quad \text{----------} \quad (26)$$

เมื่อ ρ_C , ρ_W , ρ_{FA} และ ρ_{CA} คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ น้ำ มวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบ ตามลำดับ

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงาน

ขั้นตอนและวิธีของการดำเนินงานเพื่อให้ได้มาซึ่งสัดส่วนผสมคอนกรีตที่มีประสิทธิภาพและราคาต่ำ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน

- ส่วนที่ 1 การสร้างฐานข้อมูลในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์
- ส่วนที่ 2 เป็นการประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป (Microsoft Excel) ช่วยในการค้นหาสัดส่วนผสมที่มีประสิทธิภาพ ตามต้องการและมีราคาต่ำที่สุด

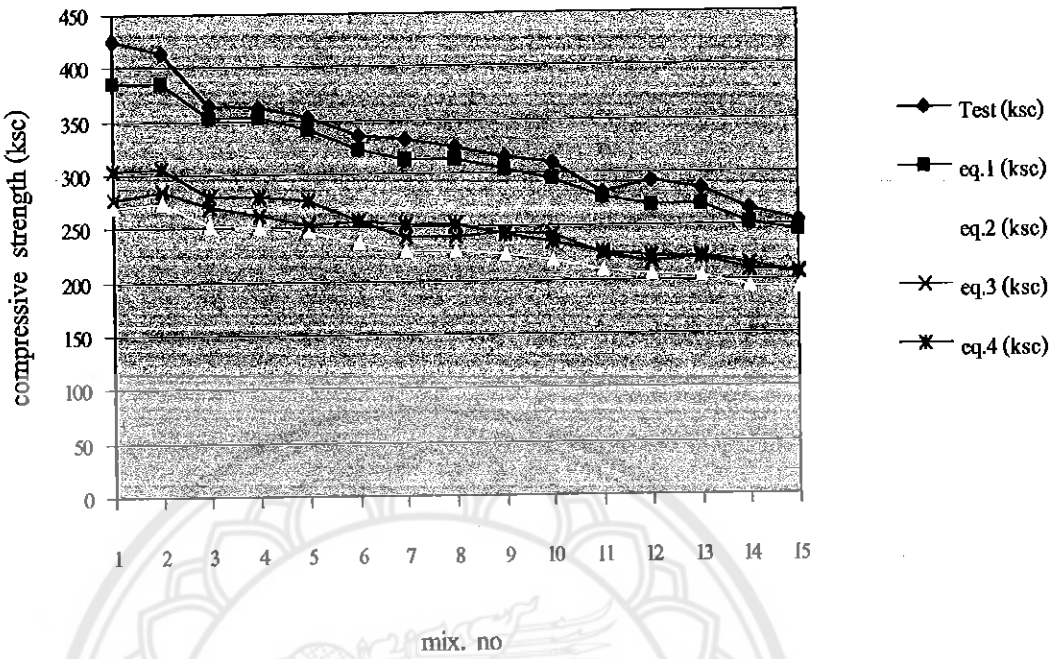
3.1 วิธีการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีต

3.1.1 การเลือกแบบจำลองในการทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีต

เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ดีที่สุด จึงนำข้อมูลสัดส่วนผสมที่ได้ทดสอบจาก บริษัทคอนกรีตผสมเสร็จ CPAC มาทำการทดสอบแบบจำลองทำนายกำลังอัดที่มีอยู่ และเปรียบเทียบค่ากำลังอัดที่ได้จากแบบจำลองกับค่ากำลังอัดที่ได้จากการทดสอบ ดังแสดงใน ตาราง 3.1

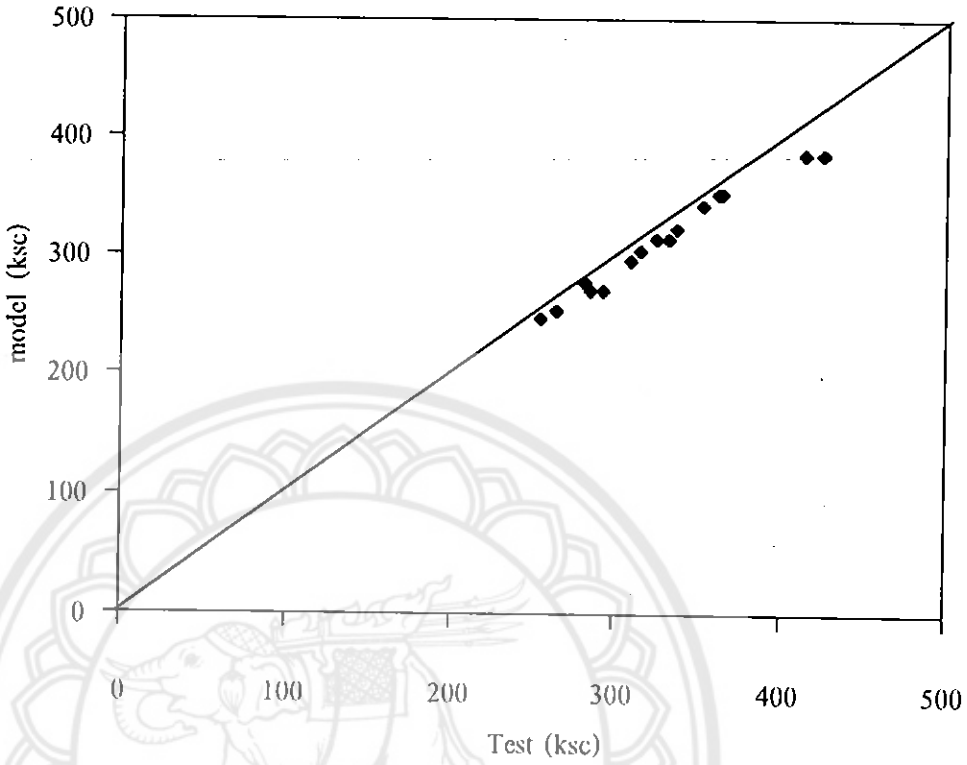
ตาราง 3.1 ข้อมูลเปรียบเทียบแบบจำลองทำนายกำลังอัด

W/C	C (kg/m^3)	W (kg/m^3)	CA (kg/m^3)	FA (kg/m^3)	Test (ksc)	eq.1 (ksc)	eq.2 (ksc)	eq.3 (ksc)	eq.4 (ksc)
0.51	375	190	1150	800	425	386	269	278	303
0.51	350	180	1120	780	415	386	273	284	306
0.54	350	190	1120	780	365	352	253	269	279
0.54	350	190	1150	800	363	352	250	262	279
0.55	325	180	1150	800	352	342	246	253	275
0.57	350	200	1120	780	337	322	235	256	256
0.58	325	190	1150	800	333	312	229	241	252
0.58	325	190	1150	800	325	312	229	241	252
0.59	350	205	1120	780	315	303	225	246	243
0.60	350	210	1120	780	310	294	218	243	235
0.62	325	200	1150	800	281	277	209	224	227
0.63	300	190	1160	810	292	269	205	216	222
0.63	325	205	1150	800	286	269	203	222	220
0.65	325	210	1150	800	265	253	194	215	209
0.66	285	190	1160	810	255	245	192	205	206



รูปที่ 3.1 แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองทำนายกำลังอัด

จากรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าเมื่อนำผลกำลังอัดจากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับแบบจำลอง พบว่าแบบจำลองทำนายกำลังอัดของสมการ (1) สามารถทำนายกำลังอัดได้ใกล้เคียงกับค่ากำลังอัดจากการทดสอบ ส่วนแบบจำลองของสมการ (2) , (3) และ (4) มีค่าผิดพลาดค่อนข้างสูง ดังนั้นแบบจำลองทำนายกำลังอัดของสมการที่ (1) จึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการทำนายกำลังอัด และสามารถแสดงการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลองของสมการที่ (1) กับค่ากำลังอัดจากการทดสอบได้ดังรูป 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลองกับค่ากำลังอัดจากการทดสอบ

3.1.2 การสุ่มสัดส่วนผสมคอนกรีต

เพื่อให้ได้ส่วนผสมที่มีค่ากำลังอัดครอบคลุมสำหรับการนำไปใช้งานโดยทั่วไป ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดขอบเขตหรือกำหนดค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของส่วนผสม ดังแสดงในตาราง 3.2

ตาราง 3.2 ขอบเขตข้อมูลส่วนผสม

Variable	Minimum	Maximum
Water / Cement ratio	0.35	0.9
Water (kg/m^3)	180	230
Cement (kg/m^3)	200	500
Coarse Aggregate (kg/m^3)	900	1150
Fine Aggregate (kg/m^3)	500	950
Maximum Grain Size	3/4" (19.05 mm)	
Age of Testing	28 days	

จากขอบเขตส่วนผสมที่ได้กำหนดไว้แล้ว จึงได้ทำการสุ่มข้อมูลโดยการเปลี่ยนน้ำหนักซีเมนต์ทุกๆ 1 กก., เปลี่ยนปริมาณน้ำทุกๆ 5 กก. ส่วนมวลรวมหยาบจะสุ่มโดยมีค่าระหว่าง 30-50 กก. ตามความเหมาะสม และน้ำหนักของมวลรวมละเอียดจะสามารถหาได้จากสมการ

$$FA = \rho_{FA}\left(1000 - \frac{C}{\rho_C} - \frac{W}{\rho_W} - \frac{CA}{\rho_{CA}}\right) \quad \text{----------} \quad (27)$$

โดยจำนวนข้อมูลส่วนผสมทั้งหมดที่ได้มามีจำนวน 24,524 ตัวอย่าง

ส่วนของรายละเอียดการหาค่าความถ่วงจำเพาะ (ρ) ของมวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบ ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.

3.1.3 การคำนวณกำลังอัดและราคา

การคำนวณค่ากำลังอัด (strength) จะสามารถคำนวณได้จากสมการ (28) ดังนี้

$$f_c' = \frac{176.2}{20.4^{W/C}} \times \frac{100}{9.81} \quad \text{---------- (28)}$$

โดยที่ f_c' คือ กำลังรับแรงอัดรูปทรงกระบอก , ksc

W/C คือ อัตราส่วนปริมาณน้ำต่อซีเมนต์

ส่วนในด้านของราคานั้น จากการสำรวจข้อมูลราคาวัสดุส่วนผสมคอนกรีต ตามร้านจำหน่ายวัสดุก่อสร้างในตัวเมืองจังหวัดพิษณุโลก ผลการเก็บข้อมูลทำให้ทราบว่าราคาวัสดุค่อนข้างไม่คงที่ โดยปูนซีเมนต์จะมีการเปลี่ยนแปลงราคาตามท้องตลาด ราคาของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดค่อนข้างจะมีราคาคงที่ จะแปรผันไปบ้างตามระยะทางของการขนส่ง โดยราคาเฉลี่ยของวัสดุส่วนผสมต่าง ๆ มีค่าดังนี้

ปูนซีเมนต์ (C)	=	2.587 บาท/กก.
น้ำ (W)	=	0.005 บาท/กก.
มวลรวมหยาบ (CA)	=	0.097 บาท/กก.
มวลรวมละเอียด (FA)	=	0.0333 บาท/กก.

ดังนั้น การคำนวณราคาของแต่ละชุดข้อมูล สามารถคำนวณได้จากสมการ (29) ดังนี้

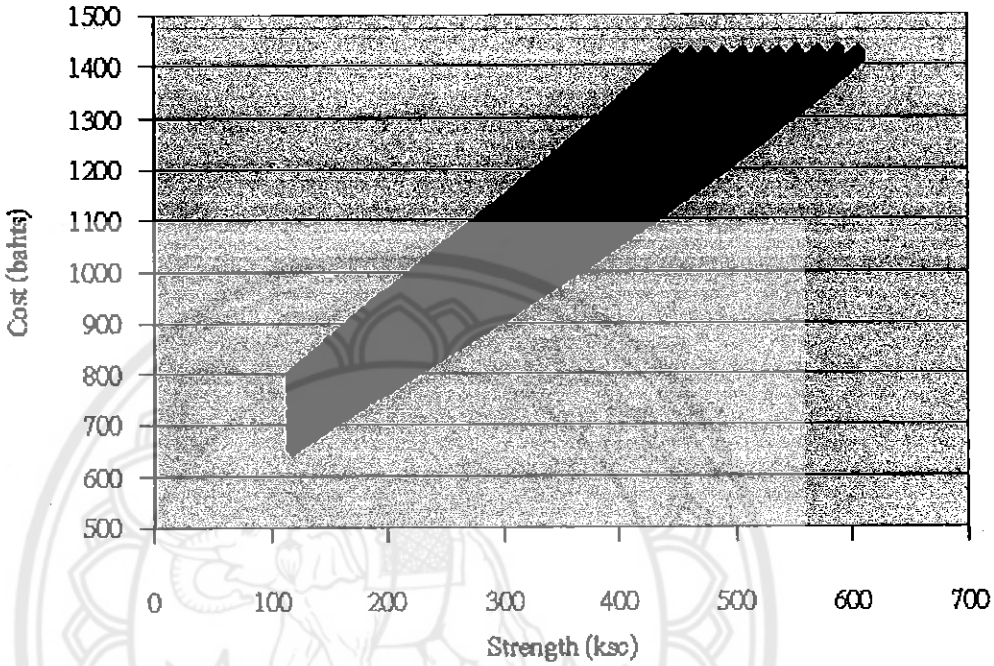
$$\text{ราคา (Cost)} = 2.587C + 0.005W + 0.097CA + 0.0333FA \quad \text{---------- (29)}$$

ตาราง 3.3 ตารางตัวอย่างผลการคำนวณกำลังอัดและราคา

W/C	Cement(C) (kg/m^3)	Water(W) (kg/m^3)	coarse aggregate(CA) (kg/m^3)	fine aggregate(FA) (kg/m^3)	Strength (ksc)	Cost (bahts)
0.577	364	210	1150	633.7	315	1076.9
0.577	364	210	1110	672.7	315	1074.3
0.577	364	210	1070	711.6	315	1071.7
0.577	364	210	1030	750.6	315	1069.1
0.577	364	210	990	789.5	315	1066.5
0.577	364	210	950	828.5	315	1063.9
0.577	364	210	900	877.2	315	1060.7
0.577	355	205	1150	654.1	315	1054.3
0.577	355	205	1110	693.1	315	1051.7
0.577	355	205	1070	732.0	315	1049.1
0.577	355	205	1030	771.0	315	1046.5
0.577	355	205	990	809.9	315	1043.9
0.577	355	205	950	848.9	315	1041.3
0.577	355	205	900	897.6	315	1038.0

ส่วนของรายละเอียดการคำนวณหาราคาเฉลี่ยของวัสดุส่วนผสม ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข.

จากค่ากำลังอัดและราคาของส่วนผสมคอนกรีตทั้งหมด สามารถนำมาสร้างแผนภาพระหว่างค่ากำลังอัดและราคาได้ ดังนี้



รูปที่ 3.3 แผนภาพระหว่างค่ากำลังอัดและราคาของส่วนผสม 24,524 **ตัวอย่าง**

3.1.4 การประมาณค่าการยุบตัว

การคำนวณค่าการยุบตัวของคอนกรีต สามารถประมาณค่าได้จากสมการ ดังนี้

$$\text{Slump} = \alpha(W_{fr} - W_o)$$

เมื่อ $$\alpha = 3.573\gamma^4 - 21.34\gamma^3 + 46.74\gamma^2 - 43.916\gamma + 14.944$$

$$\gamma = \frac{V_p}{V_v}$$

โดยที่ $$V_p = \frac{C}{\rho_C} + \frac{W + V_{air}}{\rho_W}, \quad V_{air} = 1\% \text{ โดยปริมาตร}$$

V_v = 0.221 ลบ.ม.

และปริมาณน้ำส่วนเกินจะสามารถคำนวณหาได้จาก

$$W_{fr} = W_u - W_{rp} - W'_{ra}$$

W_u = ปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีต 1 ลบ.ม. (w)

$$W_{rp} = \beta_c \cdot W_c$$

$$= 0.23\, W_c$$

$$W'_{ra} = \beta'_s W'_s$$

$$= 0.025\, W'_s$$

ในส่วนขั้นตอนของการหาปริมาณน้ำน้อยที่สุดที่สามารถเอาชนะแรงเสียดทานของส่วนผสม (W_o) สามารถคำนวณได้จาก

$$W_o = 8\times10^{-5}\,(S_{eff})^{1.7626}$$

โดยที่ $$S_{eff} = S_{tagg} + \eta(S_{pow})$$

$$= 36216.72\times W'_s + 2499.86\times W'_g$$

$$S_{pow} = S_c \cdot W_c$$

$$= 3122000\, W_c$$

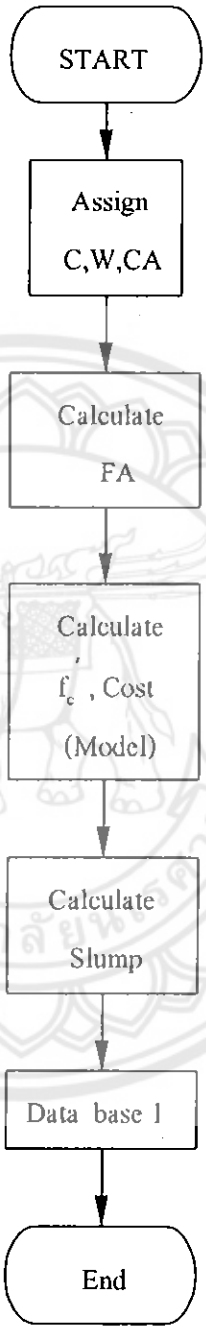
$$\eta = 0.026\, e^{(-3\times10^{-8})(S_{tagg})}$$

ตาราง 3.4 ตารางตัวอย่างผลการคำนวณค่าการยุบตัว

W/C	Cement (C) (kg/m^3)	Water (W) (kg/m^3)	Coarse Aggregate (CA) (kg/m^3)	Fine Aggregate (FA) (kg/m^3)	Strength (ksc)	Cost (bahts)	Slump (cm)
0.668	277	185	1150	770.5	240	836.7	7.74
0.668	277	185	1120	799.7	240	832.8	7.53
0.668	277	185	1090	828.9	240	858.3	7.32
0.668	277	185	1060	858.2	240	856.4	7.11
0.668	277	185	1030	887.4	240	854.4	6.89
0.668	277	185	1000	916.6	240	852.5	6.68
0.668	277	185	966	949.7	240	850.7	6.44
0.542	332	180	1150	738.1	350	997.5	6.67
0.542	332	180	1100	786.8	350	994.3	6.23
0.542	332	180	1050	835.5	350	991.0	5.78
0.542	332	180	1000	884.2	350	987.8	5.34
0.542	332	180	950	932.9	350	984.5	4.89
0.542	332	180	933	949.4	350	983.4	4.73
0.498	381	190	1150	672.2	400	1122.1	9.42
0.498	381	190	1120	701.4	400	1120.1	9.07
0.498	381	190	1090	730.6	400	1118.2	8.71
0.498	381	190	1060	759.8	400	1116.2	8.36
0.498	381	190	1030	789.0	400	1114.3	8.00
0.498	381	190	1000	818.3	400	1112.3	7.63
0.498	381	190	970	847.5	400	1110.4	7.27
0.498	381	190	940	876.7	400	1108.4	6.90
0.498	381	190	900	915.6	400	1105.8	6.41

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์

สำหรับส่วนที่ 1 การสร้างฐานข้อมูลในการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีตนั้น สามารถสรุปเป็นขั้นตอนในการออกแบบได้ดังนี้



รูปที่ 3.4 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการออกแบบสัดส่วนผสม

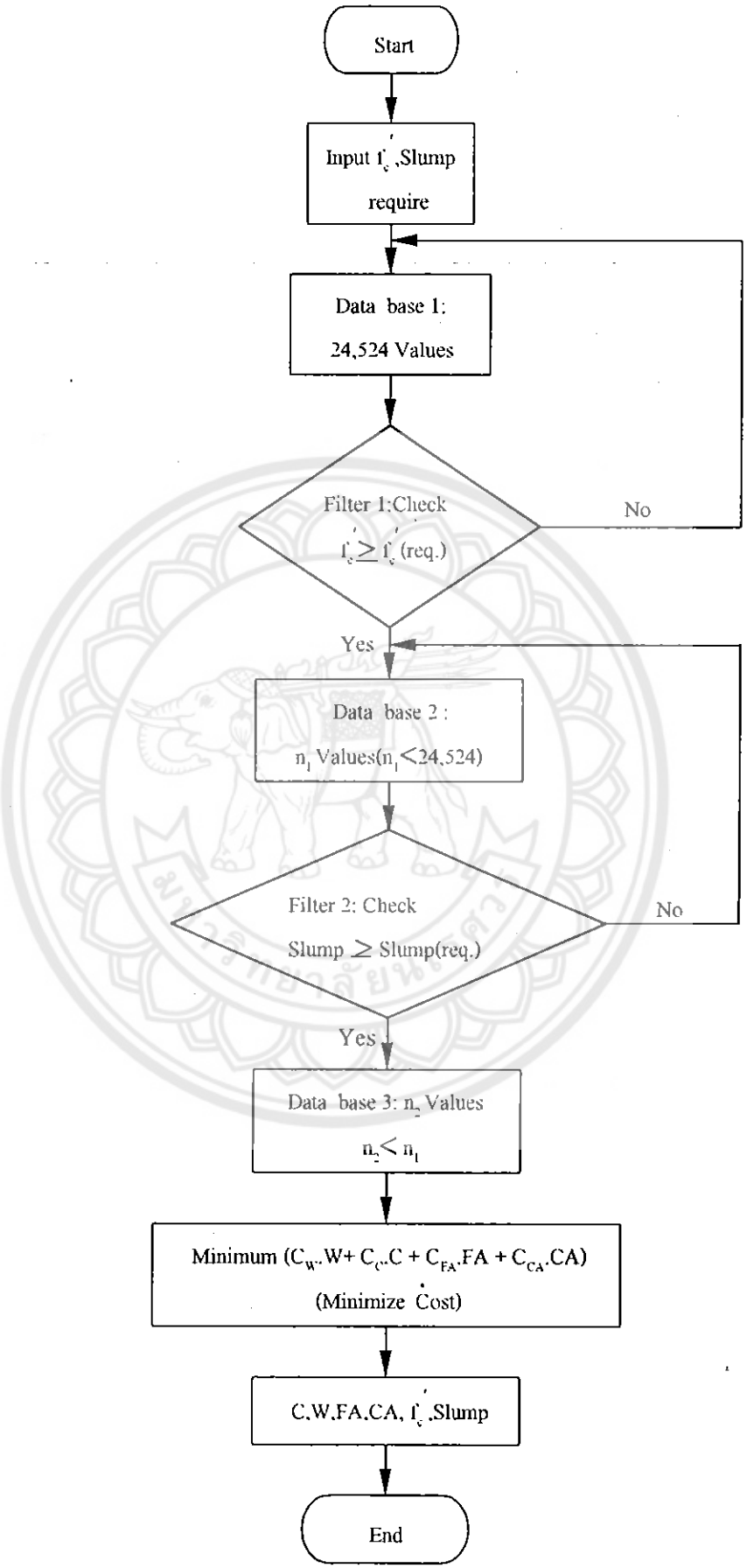
AA 00388
TA
439
.A528
2547

3.2 การหาสัดส่วนผสมที่มีราคาต่ำที่สุด

เนื่องจากข้อมูลสัดส่วนผสมมีจำนวนมาก การที่จะค้นหาสัดส่วนผสมที่ต้องการนั้นทำได้ยาก ดังนั้นจึงได้มีการสร้างโปรแกรมในการค้นหาและเลือกสัดส่วนผสมราคาต่ำที่สุด โดยมีค่ากำลังอัดและค่าการยุบตัวตามต้องการ

3.2.1 ลำดับขั้นตอนการหาสัดส่วนผสมที่ราคาต่ำที่สุด

จากฐานข้อมูลสัดส่วนผสมจำนวนมากซึ่งจะมีข้อมูลของกำลังอัด ราคา และค่าการยุบตัวเรียงกันอย่างไม่เป็นระบบ ดังนั้นจึงต้องมีการสร้างโปรแกรมในการค้นหาข้อมูลจากฐานข้อมูลที่มีอยู่ (Data base) โดยมีหลักการทำงาน คือ เริ่มจากการป้อนค่ากำลังอัดและกำหนดค่าการยุบตัวตามต้องการ โดยโปรแกรมจะทำการค้นหาจากฐานข้อมูลจำนวน 24,524 ข้อมูล แล้วทำการเปรียบเทียบหาค่ากำลังอัดที่มากกว่าหรือเท่ากับค่ากำลังอัดที่ต้องการ (filter 1) เพื่อเป็นฐานข้อมูล 2 ซึ่งจำนวนชุดข้อมูลน้อยกว่าจำนวนชุดข้อมูลในฐานข้อมูลแรก ต่อจากนั้นก็ทำการเปรียบเทียบหาค่าการยุบตัวที่มากกว่าหรือเท่ากับที่กำหนด (filter 2) เพื่อเป็นฐานข้อมูล 3 ซึ่งจะมีจำนวนชุดข้อมูลน้อยกว่าจำนวนข้อมูลในฐานข้อมูลที่ 2 แล้วทำการเลือกสัดส่วนผสมที่มีราคาต่ำที่สุดจากฐานข้อมูลสุดท้าย จากนั้นแสดงผลของสัดส่วนผสมที่ได้พร้อมทั้งค่ากำลังอัดและค่าการยุบตัว



รูปที่ 3.5 แผนภูมิแสดงการใช้โปรแกรมค้นหาสัดส่วนผสม

3.2.2 การทดลองทำตัวอย่าง

เพื่อทดสอบประสิทธิภาพสัดส่วนผสมคอนกรีตที่ได้จากการออกแบบ จึงได้มีการทดลองทำตัวอย่าง โดยมีหลักเกณฑ์ของการเลือกกำลังอัดในการทำตัวอย่างให้ครอบคลุมค่ากำลังอัดที่นิยมใช้ในการออกแบบ ส่วนค่าการยุบตัวนั้นจะยึดเอาค่าการยุบตัวที่สามารถทำงานได้ ซึ่งสามารถที่จะแสดงสัดส่วนผสมได้ดังนี้

ตาราง 3.5 สัดส่วนผสมของกำลังอัดที่เลือกทำตัวอย่าง

Strength (ksc)	W/C	C (kg)	W (kg)	CA (kg)	FA (kg)	Cost (bahts)	Slump (cm)
200	0.729	247	180	1150	808.3	780.0	5.05
250	0.655	275	180	1000	931.2	841.9	5.07
300	0.593	303	180	958	949.5	910.8	5.03
350	0.542	332	180	1000	884.2	987.8	5.34
400	0.498	361	180	1050	812.1	1065.2	5.26
500	0.424	436	185	1150	639.3	1245.6	5.02

หมายเหตุ : สัดส่วนผสมอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง

บทที่ 4

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการนำข้อมูลสัดส่วนผสมคอนกรีตตามกำลังอัดที่เลือกไว้มาทดลองผสมจริง โดยพิจารณาค่ากำลังอัดที่ 200,250,300,350,400และ500 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ ซึ่งค่าการยุบตัวได้มาจาก Model ในสมการที่ (7) คือ Slump = $\alpha(W_{tr} - W_o)$ และทำการทดสอบกำลังอัดที่ระยะเวลา 7 วัน จากนั้นแปลงจากค่ากำลังอัดที่ 7 วันเป็น 28 วัน โดยใช้ Model ตามสมการที่ (5) คือ

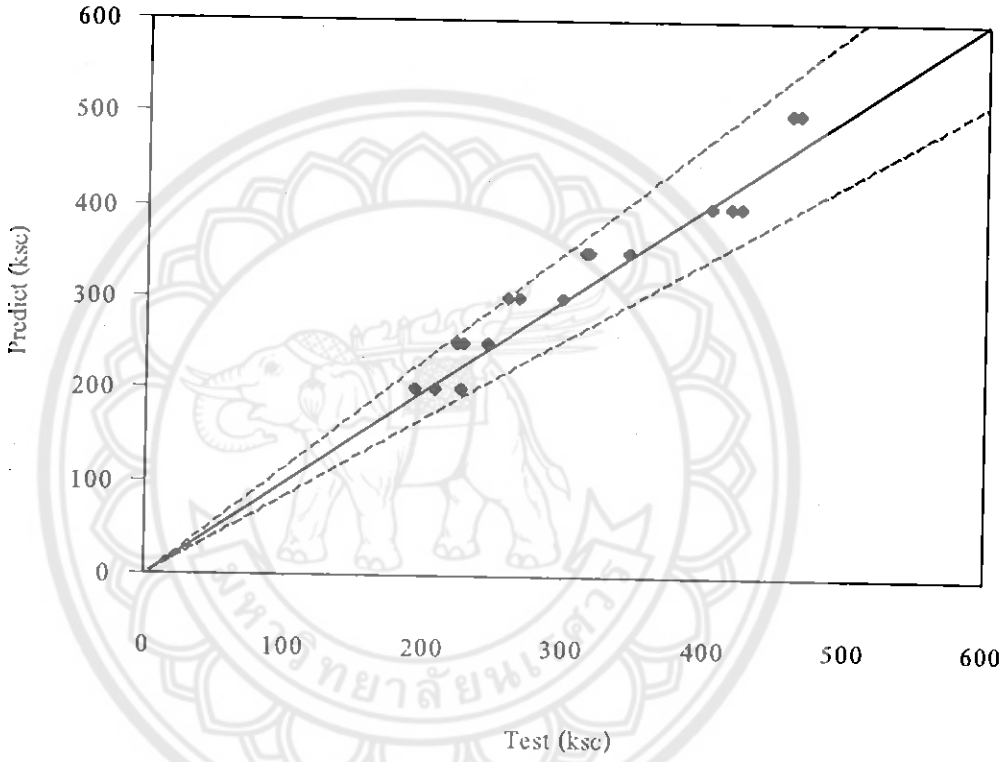
$f_c(t) = \dfrac{\emptyset(t) \times f_c'}{\emptyset(28)}$ ได้ผลดังตาราง 4.1

ตาราง 4.1 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดและค่าการยุบตัวระหว่างค่าที่ทำนายเทียบค่าที่ทดสอบ

ค่าจากการคาดคะเน		ค่าที่ได้จากการทดสอบ									
f_c'	ค่าการยุบตัว	$f_c(7)$, (กก./ซม.^{2})			f_c', (กก./ซม.^{2})				ค่าการยุบตัว (ซม.)		
(กก./ซม.^{2})	(ซม.)	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	Average	No.1	No.2	Average
200	5.05	147.2	160.5	137.7	206	225	193	208	3.0	3.5	3.25
250	5.07	161.7	174.0	159.1	226	244	223	231	4.0	4.0	4.00
300	5.03	190.6	184.6	213.0	267	258	298	275	2.5	3.0	2.75
350	5.34	246.3	226.3	223.8	345	317	313	325	3.0	2.5	2.75
400	5.23	303.3	288.5	298.2	425	404	417	415	2.5	2.5	2.50
500	5.02	328.6	333.0	329.0	460	466	461	462	2.0	2.0	2.00

4.1 การเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองทำนายกำลังอัด

จากการนำผลค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบ มาเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดที่ได้ทำนายไว้ โดยผลการเปรียบเทียบแสดงไว้ในรูปที่ 4.1

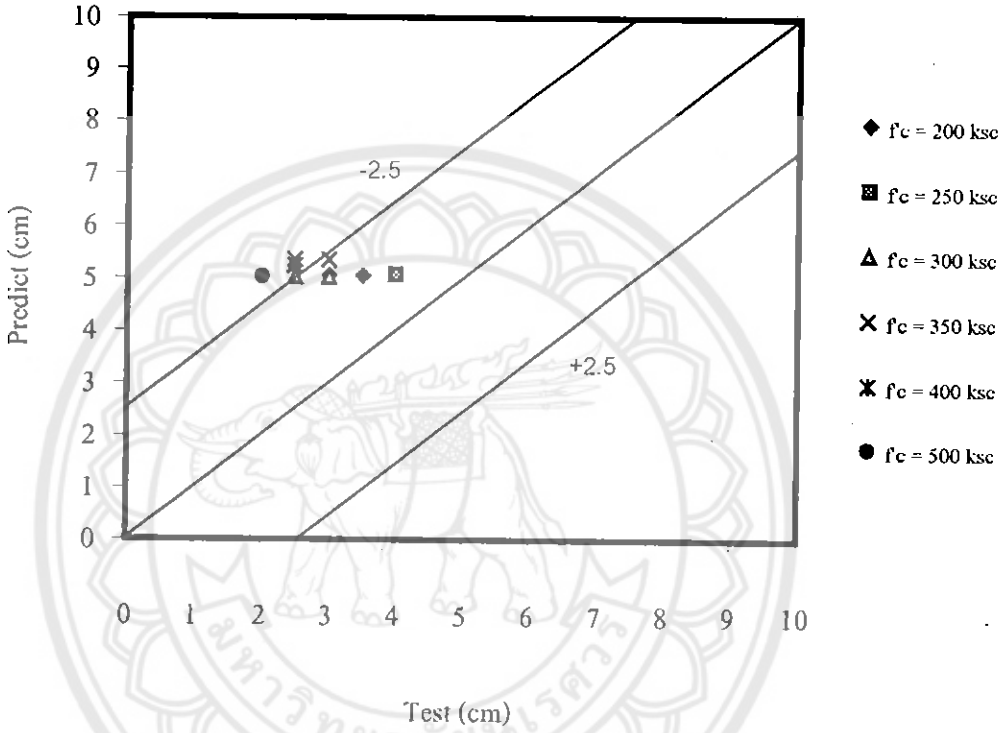


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ากำลังอัดที่ทำนายเทียบค่าทดสอบจริงในช่วง ±15% ของค่ากำลังอัดที่ทำนาย

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดที่ทำนายได้มีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังอัดที่ทดสอบและอยู่ในช่วงที่กำหนดตามมาตรฐาน ว.ส.ท. (ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต) โดยผลการทดสอบค่ากำลังอัดของแต่ละก้อนต้องไม่ต่ำกว่าร้อยละ 85 ของค่ากำลังอัดที่กำหนด ซึ่งก็มีความถูกต้องในระดับหนึ่ง แม้จะมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างแต่ก็อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

4.2 การเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองทำนายค่าการยุบตัว

ส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าการยุบตัว เมื่อนำข้อมูลผลค่าการยุบตัวจากการทดสอบจริง มาเปรียบเทียบกับค่าการยุบตัวที่ได้ทำนายไว้ ก็ได้แสดงผลในกราฟ



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าการยุบตัวที่ทำนายได้กับค่าที่ทดสอบจริงในช่วง ± 2.5 ซม.

จะเห็นว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบจริงนั้น มีความคลาดเคลื่อนจากค่าการยุบตัวที่ได้ทำนายไว้บ้าง โดยมีแนวโน้มให้ค่าการยุบตัวต่ำกว่าการยุบตัวจริงจากการทดสอบ โดยที่แบบจำลองทำนายค่าการยุบตัวจะให้ความแม่นยำกับการทำนายที่ค่ากำลังอัดต่ำ ๆ แต่ที่กำลังอัด 500 กก./ซม.^{2} จะมีความคลาดเคลื่อนเกินกว่าที่กำหนดตามมาตรฐาน ว.ส.ท. (ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต) โดยค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการยุบตัวที่ 5-15 ซม. ยอมให้มีความคลาดเคลื่อนได้ ±2.5 ซม.

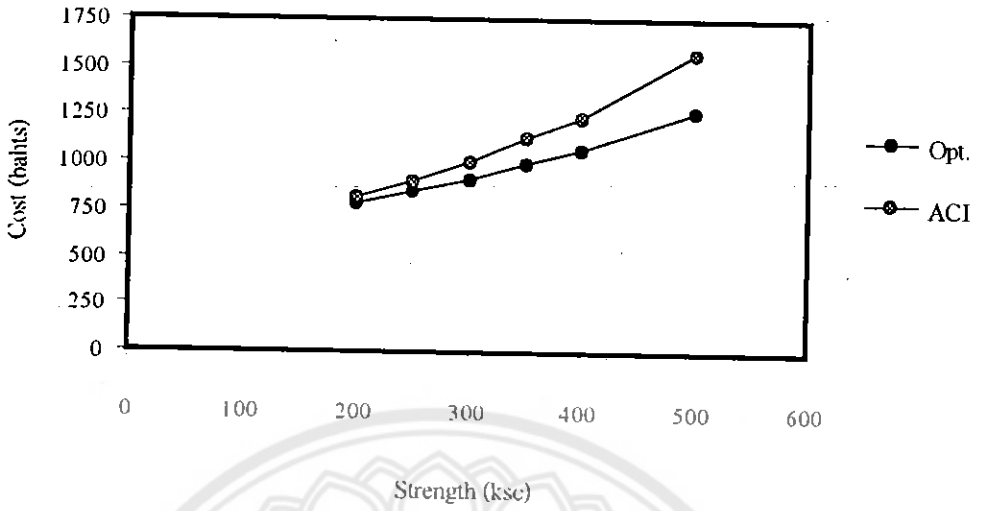
4.3 การเปรียบเทียบราคาของสัดส่วนผสม

จากการนำราคาสัดส่วนผสมที่ได้จากการ Optimization มาเปรียบเทียบกับราคาสัดส่วนผสมที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีมาตรฐานอเมริกัน (ACI 211.1-74) ได้ให้ผลดังตาราง 4.2

ตาราง 4.2 แสดงการเปรียบเทียบราคาและสัดส่วนผสมที่ได้จากการ Optimization กับการออกแบบโดยวิธีมาตรฐานอเมริกัน (ACI 211.1-74)

f_c' (ksc)	W/C		C (kg)		W (kg)		CA (kg)		FA (kg)		Cost (bahts)	
	Opt.	ACI	Opt.	ACI	Opt.	ACI	Opt.	ACI	Opt.	ACI	Opt.	ACI
200	0.729	0.700	247	265	180	185	1150	976	808.3	926	780	813.5
250	0.655	0.620	275	299	180	185	1000	976	931.2	897	841.9	900.5
300	0.593	0.550	303	337	180	185	958	976	949.5	865	910.8	997.7
350	0.542	0.480	332	386	180	185	1000	976	884.2	822	987.8	1123
400	0.498	0.430	361	431	180	185	1050	976	872.1	785	1065	1238
500	0.424	0.330	436	561	185	185	1150	976	639.3	675	1263	1571

จากตาราง 4.2 จะเห็นได้ว่าน้ำหนักของซีเมนต์ที่ได้จากการ Optimization จะต่ำกว่าที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีมาตรฐานอเมริกัน (ACI 211.1-74) โดยเมื่อดูจากราคาวัสดุส่วนผสมจะพบว่าซีเมนต์มีราคาเฉลี่ยสูงกว่าวัสดุส่วนผสมอื่นมาก จึงเป็นตัวแปรหลักที่ทำให้สัดส่วนผสมที่ได้จากการ Optimization มีราคาต่ำกว่าการออกแบบโดยวิธีมาตรฐานอเมริกัน (ACI 211.1-74)



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบราคาสัดส่วนผสมที่ได้จากการ Optimization กับการออกแบบโดยวิธีมาตรฐานอเมริกัน (ACI 211.1-74)

จากกราฟ 4.3 จะเห็นได้ว่าราคาสัดส่วนผสมที่ได้จากการ Optimization จะมีราคาที่ต่ำกว่าการออกแบบด้วยวิธีมาตรฐานอเมริกัน (ACI 211.1-74) โดยค่ากำลังอัดที่สูงขึ้นจะมีแนวโน้มของราคาสัดส่วนผสมที่ได้จากการ Optimization ต่ำกว่า การออกแบบโดยวิธีมาตรฐานอเมริกัน (ACI 211.1-74) มากขึ้น

ซึ่งจากผลที่ได้ดังกล่าวทำให้เชื่อมั่นได้ว่า สัดส่วนผสมที่ได้จากการ Optimization สามารถจะนำไปใช้ได้จริงโดยมีประสิทธิภาพตามต้องการและยังมีราคาต่ำอีกด้วย

แต่อย่างไรก็ตามการออกแบบสัดส่วนผสมนั้น ทำโดยการลองผิดลองถูกเป็นผลให้มีสัดส่วนผสมจำนวนมาก และคุณสมบัติที่ใช้ทำนายยังน้อยเกินไป ยังมีคุณสมบัติอื่นอีกที่ควรพิจารณา เช่น ขนาดโตสุดของหิน ปริมาณอากาศในคอนกรีต เป็นต้น

บทที่ 5
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

จากโครงงานนี้ ผลที่เห็นได้เด่นชัด คือ สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ออกแบบได้นั้น มีราคาต่ำกว่าการออกแบบโดยวิธีมาตรฐานอเมริกัน (ACI 211.1-74) และยังมีคุณสมบัติด้านกำลังและมีค่าการยุบตัวตามต้องการ ซึ่งสัดส่วนผสมที่ได้นั้นเป็นสัดส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตประสิทธิภาพสูง (Optimization of High Performance Concrete Mixed) โดยที่คำนึงถึงค่ากำลังอัดความสามารถในการทำงานได้ และราคาประหยัด

5.1 ผลการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีต

- ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติสัดส่วนผสมคอนกรีตเป็นที่น่าพอใจ เมื่อตรวจสอบด้วยการทดลองผสมจริง โดยเฉพาะการทำนายกำลังอัด ค่อนข้างแม่นยำคือ อยู่ในเกณฑ์ ±15 % ซึ่งเป็นช่วงที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน ว.ส.ท. (ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต) ส่วนการทำนายค่าการยุบตัวก็ให้ผลเป็นที่น่าพอใจเช่นกัน แต่จะมีความคลาดเคลื่อนสูงกว่า โดยจะให้ความแม่นยำต่อการทำนายค่าการยุบตัวที่ค่ากำลังอัดต่ำๆ

- ผลการวิเคราะห์ราคาสัดส่วนผสมคอนกรีตเป็นที่น่าพอใจ เมื่อตรวจสอบกับการออกแบบโดยวิธีมาตรฐานอเมริกัน (ACI 211.1-74) โดยราคาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่ออกแบบได้มีราคาต่ำกว่าของวิธีมาตรฐานอเมริกัน (ACI 211.1-74) คิดเป็นร้อยละ 4-20 และมีแนวโน้มที่ต่ำลงเรื่อย ๆ เมื่อออกแบบที่กำลังอัดสูงขึ้น

ตาราง 5.1 แสดงความแตกต่างด้านราคาคิดเป็นร้อยละ

f_c' (กก./ซม.^{2})	ราคา (บาท)		ค่าความแตกต่างของราคา	
	Opt.	ACI	(บาท)	(%)
200	780	813.5	33.5	4.12
250	841.9	900.5	58.6	6.51
300	910.8	997.7	86.9	8.71
350	987.8	1123	135.2	12.04
400	1065.2	1238.2	173.0	13.97
500	1263.2	1570.8	307.6	19.58

5.2 การนำไปใช้งานจริง

จากการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังอัดและด้านการยุบตัวของคอนกรีตที่ออกแบบได้ จะพบว่าให้ผลออกมาอยู่ในขั้นดี ในช่วงของค่ากำลังอัด 200-500 กก./ซม.^{2} ซึ่งสามารถที่จะนำสัดส่วนผสมนี้ไปใช้งานได้จริงเพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายในการทำงาน แต่ก็ยังมีข้อด้อยทางด้านความสามารถในการเทได้ เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานอเมริกัน (ACI 211.1-74) และสามารถปรับข้อด้อยนี้ด้วยการใส่สารผสมเพิ่ม (น้ำยาลดน้ำ)

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากการออกแบบสัดส่วนผสมที่เหมาะสม สำหรับคอนกรีตประสิทธิภาพสูง คณะผู้จัดทำได้เล็งเห็นแนวทางต่าง ๆ หลาย ๆ แนวทางที่จะพัฒนาการออกแบบให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น เพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างกว้างขวาง แต่ข้อจำกัดต่าง ๆ โดยเฉพาะข้อจำกัดด้านเวลา ทำให้เป้าหมายและความตั้งใจบางอย่างของผู้จัดทำ ยังมิอาจบรรลุสู่ความเป็นจริงได้ เพื่อไม่ให้ความคิดและแนวทางต่าง ๆ ที่ได้เคยวางไว้ต้องสูญเปล่า ทางคณะผู้จัดทำจึงเสนอแนวทางและข้อเสนอแนะบางอย่างสำหรับผู้ที่เห็นความสำคัญ และความเป็นไปได้ในการปรับปรุงการออกแบบให้มีประสิทธิภาพดียิ่ง ๆ ขึ้นไป ดังนี้

1) ปรับปรุงสมการแบบจำลองต่าง ๆ ให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยทำการทดลองผสมหรือหาข้อมูลมาเพิ่มเติม เพื่อให้ได้ข้อมูลที่จะนำมาทำแบบจำลองมากขึ้นและหลากหลายสภาวะขึ้น เพื่อให้ได้วิธีการออกแบบที่ครอบคลุมการใช้งานที่กว้างขวางหรืออาจใช้แบบจำลองใหม่ที่ให้ผลดีกว่า

2) ทำการศึกษาหาแบบจำลองด้านอื่น ๆ นอกเหนือจากกำลังอัดและค่าการยุบตัว เพื่อที่จะสามารถกำหนด คุณสมบัติในด้านอื่น ๆ ของคอนกรีตที่ต้องการ เช่น ความทนทาน ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น การติดขัดของมวลรวมขณะไหลเข้าแบบหล่อและช่องว่างของมวลรวม เพื่อให้สามารถออกแบบคอนกรีตที่มีคุณสมบัติเฉพาะได้

3) ทำการศึกษาวิธีการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต โดยการเติมสารผสมเพิ่มชนิดอื่น ๆ โดยคำนึงถึงการใช้งาน การปฏิบัติงานในสนาม คุณสมบัติของวัสดุหลังผสม ราคาของสารผสมเพิ่ม รวมทั้งความทนทานของวัสดุภายหลังการผสมสารเพิ่มคุณภาพของคอนกรีต เพื่อให้สามารถที่จะออกแบบคอนกรีตได้มีประสิทธิภาพดีขึ้น

4) ในการออกแบบนั้นอาจพิจารณา Optimize ส่วนผสมให้ได้ส่วนผสมที่มีลักษณะเฉพาะบางอย่างโดยคงคุณสมบัติที่ต้องการไว้ ลักษณะเฉพาะดังกล่าว เช่น อาจจะกำหนดน้ำในส่วนผสมให้มีค่าต่ำที่สุด โดยคงคุณสมบัติด้านกำลังอัดไว้

5) ปรับปรุงโดเมนสำหรับการ Optimization จากโดเมนแบบไม่ต่อเนื่องเป็น โดเมนแบบต่อเนื่องโดยใช้สมการ Nonlinear ในการ Optimize

บรรณานุกรม

1) เอกพล ธารสิริโรจน์ และ อิทธิพันธ์ เจียกเจิม.การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูง. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา . จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , พ.ศ.2541.

2) กิติเดช อิทธิพงษ์ และคนอื่นๆ . การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อคาดคะเนกำลังอัดประลัยของคอนกรีต. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ,พ.ศ.2542.

3) Yeh,I.-C. "Design of High-Performance Concrete Mixture Using Neural Network and Nonlinear Programming." Journal of Computing in Civil Engineering .(1999) : p 36-42

4) Yeh,I.-C. "Modeling Concrete Strength with Augment-Neuron Networks." Journal of Materials in Civil Engineering.(1998): p 263-268.

5) นิพัทธ นิพัทธสัจก์. "การทำนายกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย." การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 5, MAT 21-26. รวบรวมและจัดพิมพ์โดย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร. กรุงเทพ : สมาคมวิศวกรรมฐานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2542.

6) Phichai Kittichroenkiat. A slump Prediction Model Based on Water Retainability and Free Water concept. Thesis Master of Engineer. Sirindhorn international institute of Technology and faculty of civil Engineering. Thammasat University,1998.

7) ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต,มาตรฐาน ว.ส.ท. 1014-40, คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, ตุลาคม 2540.

8) มหาวิทยาลัยนเรศวร. คู่มือปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี. พิษณุโลก : มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2542.

9) บริษัทผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด, 2539.

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลและผลการทดสอบวัสดุส่วนผสม

ตาราง ก.1 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของมวลรวมละเอียด

รายการ	การทดสอบ		
	1	2	เฉลี่ย
น้ำหนักของมวลรวมในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง , กรัม	500	500	500
น้ำหนักของน้ำ + มวลรวม + กระบอกตวง , กรัม	1630	1625	1627.5
น้ำหนักของน้ำ 500 มล. + กระบอกตวง , กรัม	1320	1320	1320
น้ำหนักของมวลรวมในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ , กรัม	490	485	487.5
ความถ่วงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ	2.579	2.487	2.533
ความถ่วงจำเพาะเนื้อแท้ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง ***	2.632	2.564	2.60
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ	2.722	2.694	2.71
ร้อยละของการดูดซึม	2.04	3.09	2.57

ตาราง ก.2 การทดสอบหาค่าถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของมวลรวมหยาบ

รายการ	การทดสอบ		
	1	2	เฉลี่ย
น้ำหนักของมวลรวมในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง , กก.	4.0	4.0	4.0
น้ำหนักของตะกร้าลวดเหล็กในน้ำ , กก.	2.5	2.5	2.5
น้ำหนักของตะกร้าลวดเหล็ก + มวลรวมหยาบในน้ำ , กก.	5.0	5.0	5.0
น้ำหนักของมวลรวมหยาบอิ่มตัวในน้ำ , กก.	2.5	2.5	2.5
น้ำหนักของมวลรวมในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ , กก.	3.985	3.985	3.985
ความถ่วงจำเพาะทั้งหมดในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ	2.656	2.656	2.656
ความถ่วงจำเพาะเนื้อแท้ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง ***	2.67	2.67	2.67
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ	2.683	2.683	2.683
ร้อยละของการดูดซึม	0.38	0.38	0.38

ตาราง ก.3 การทดสอบหาพื้นที่ผิวจำเพาะของมวลรวมละเอียด

ขนาดตะแกรงมาตรฐาน(d_i) mm	D_i mm	ร้อยละที่ค้างบนตะแกรง (M_i)	D_iM_i	D_{av} cm	V_{av} ($\times 10^{-5}$) cm^3	W ($\times 10^{-4}$) kg	S_{so} cm^2/kg	S_s cm^2/kg
9.530								
4.750	7.140	0.5	3.57					
2.380	3.565	2.5	8.913					
1.190	1.785	8.5	15.173					
0.589	0.890	33.5	29.815	0.079	25.82	6.713	29207.03	36216.72
0.297	0.443	40.5	17.942					
0.150	0.224	13.5	3.024					
0	0.075	1.0	0.075					
		100.0	78.512					

ตาราง ก.4 การทดสอบหาพื้นที่ผิวจำเพาะของมวลรวมหยาบ

ขนาดตะแกรงมาตรฐาน(d_i) mm	D_i mm	ร้อยละที่ค้างบนตะแกรง (M_i)	D_iM_i	D_{av} cm	V_{av} ($\times 10^{-5}$) cm^3	W ($\times 10^{-4}$) kg	S_{go} cm^2/kg	S_g cm^2/kg
25.40								
19.05	22.225	1.261	28.0257					
12.70	15.875	29.755	472.361					
9.53	11.115	41.737	463.907	1.268	1.067	2.849	1772.95	2499.86
4.75	14.280	20.115	287.242					
0	2.375	7.132	16.9385					
		100.000	1268.47					

ตาราง ก.5 การทดสอบหาช่องว่างของมวลรวมผสม

รายการ	การทดสอบ
ปริมาตรกระบะ , ลิตร	10
น้ำหนักของมวลรวมหยาบเต็มกระบะ , กก.	14.865
น้ำหนักของมวลรวมละเอียดเพื่ออุดช่องว่างมวลรวมหยาบ , กก.	6.280
น้ำหนักของส่วนผสม , กก.	21.145
น้ำหนักของมวลรวมผสมเต็มกระบะ , กก.	20.62
น้ำหนักของมวลรวมหยาบในส่วนผสม , กก.	14.496
น้ำหนักของมวลรวมละเอียดในส่วนผสม , กก.	6.124
ปริมาตรเนื้อแท้ของมวลรวมหยาบ , ลิตร	5.43
ปริมาตรเนื้อแท้ของมวลรวมละเอียด , ลิตร	2.36
ปริมาตรเนื้อแท้ทั้งหมด , ลิตร	7.79
ร้อยละของช่องว่างของมวลรวมผสม , %	22.1

ภาคผนวก ข

ราคาเฉลี่ยวัสดุส่วนผสม

ตาราง ข.1 ราคาวัสดุส่วนผสมตามร้านจำหน่ายวัสดุก่อสร้าง

ชื่อร้าน	ราคา		
	ปูนซีเมนต์ (บาท / 50 กก.)	มวลรวมหยาบ (บาท / ม.^{3})	มวลรวมละเอียด (บาท / ม.^{3})
1. กวางเต็กกลั้ง หจก.	135	-	-
2. ชุณหทัย หจก.	128	-	-
3. ปีนังค้าวัสดุก่อสร้าง	130	-	-
4. สินเพชรวัสดุก่อสร้าง	-	280	90
5. อำนวยอิฐบล็อคโรงงาน	135	260	90
6. ชุณหทัยพิษณุโลก จก.	128	-	-
7. จ.จูงทรัพย์	-	290	90
8. รถจันทร์กระจ่าง	-	250	90
9. บจก.พิพัฒน์	-	270	100
10. กวางเหลี่ยงหมงวัสดุก่อสร้าง	130	-	-
11. ไพโรจน์วัสดุ หจก.	130	-	-
12. ทรายนิรมล	-	250	90
13. ทรายสุเทพ	128	250	80
14. ทรายสวิง	127	250	80
15. ไทย - ไทย ค้าวัสดุก่อสร้าง	125	280	80
16. ชัยภูษาโลหะกิจ	127	-	-
17. -	-	250	80
18. -	-	250	100

หมายเหตุ: หินปูนย่อยจากแหล่งหิน จ.อุตรดิตถ์

ทรายแม่น้ำจากแหล่งทราย อ.บางระกำ

การคำนวณหาราคาเฉลี่ยของวัสดุส่วนผสมคอนกรีต

ปูนซีเมนต์ $= \frac{135 + 128 + 130 + 135 + 128 + 130 + 130 + 128 + 127 + 125 + 127}{11}$

$= 129.36$ บาท/50 กก.

$\therefore$ ปูนซีเมนต์ 1 kg $= \frac{129.36}{50} = 2.587$ บาท/กก.

หิน $= \frac{280 + 260 + 290 + 250 + 270 + 250 + 250 + 250 + 280 + 250 + 250}{11}$

$= 261.82$ บาท/ม.^{3} หรือ 261.82 บาท/2700 กก.

$\therefore$ หิน 1 kg $= \frac{261.82}{2700} = 0.097$ บาท/กก.

ทราย $= \frac{90 + 90 + 90 + 90 + 100 + 90 + 80 + 80 + 80 + 100 + 80}{11}$

$= 88.18$ บาท/ม.^{3} หรือ 88.18 บาท/2650 กก.

$\therefore$ ทราย $= \frac{88.18}{2650} = 0.0333$ บาท/กก.

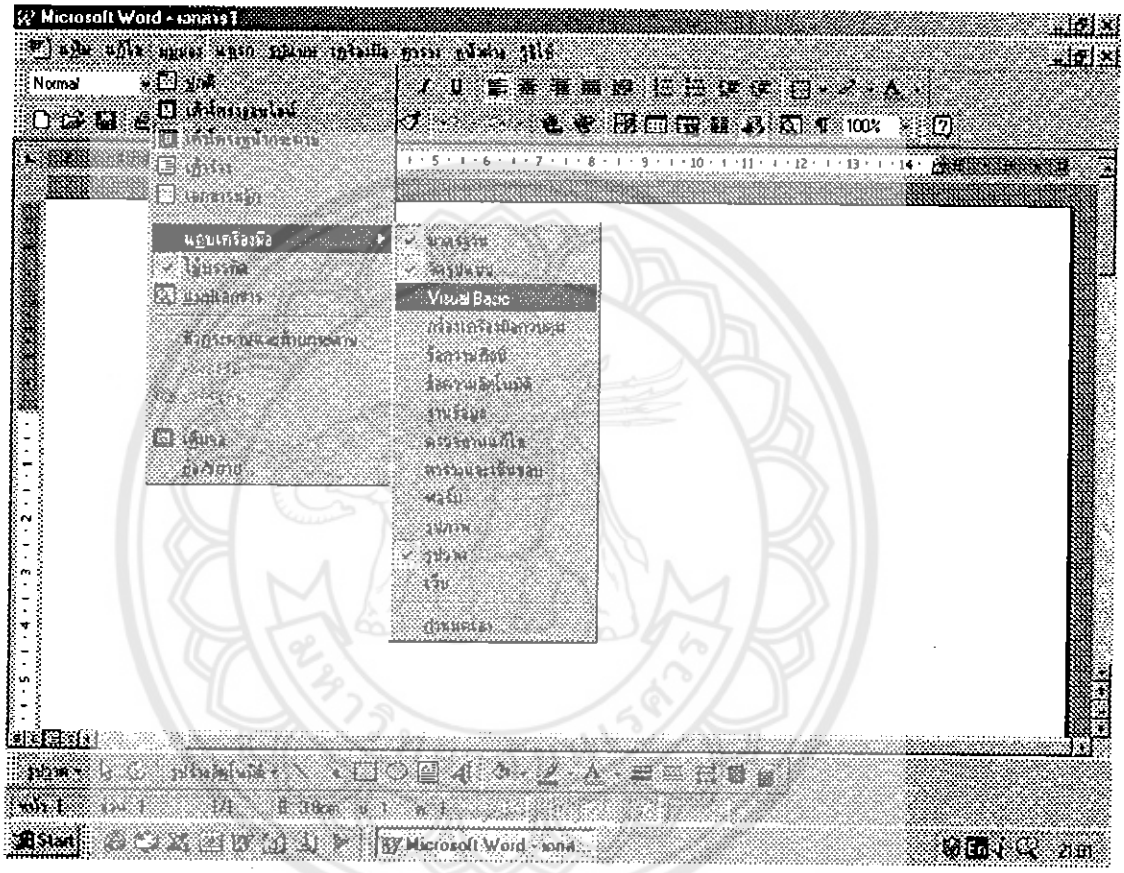
น้ำ $= 5$ บาท/ม.^{3} หรือ 5 บาท/1000 kg

$\therefore$ น้ำ 1 kg $= \frac{5}{1000} = 0.005$ บาท/กก.

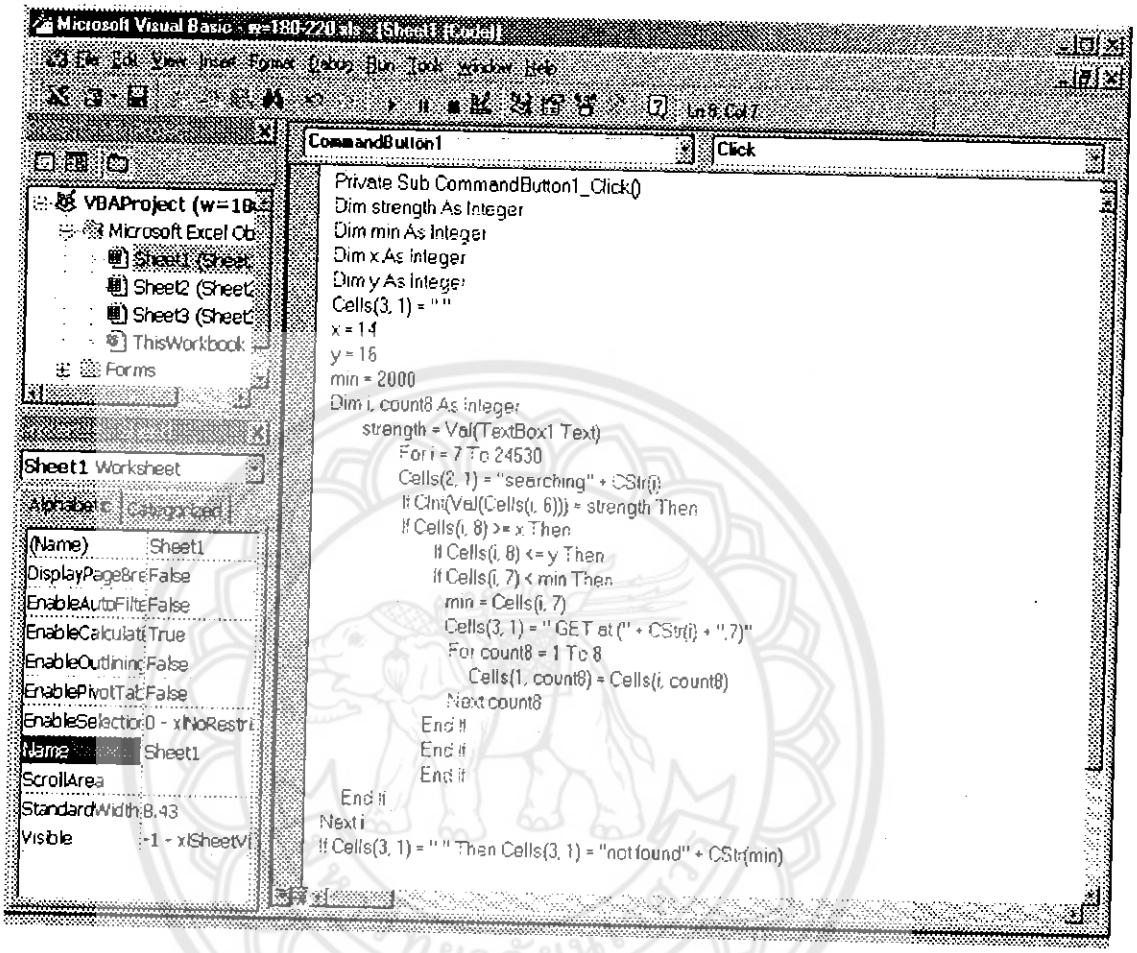
ภาคผนวก ค.

การประยุกต์ใช้โปรแกรม

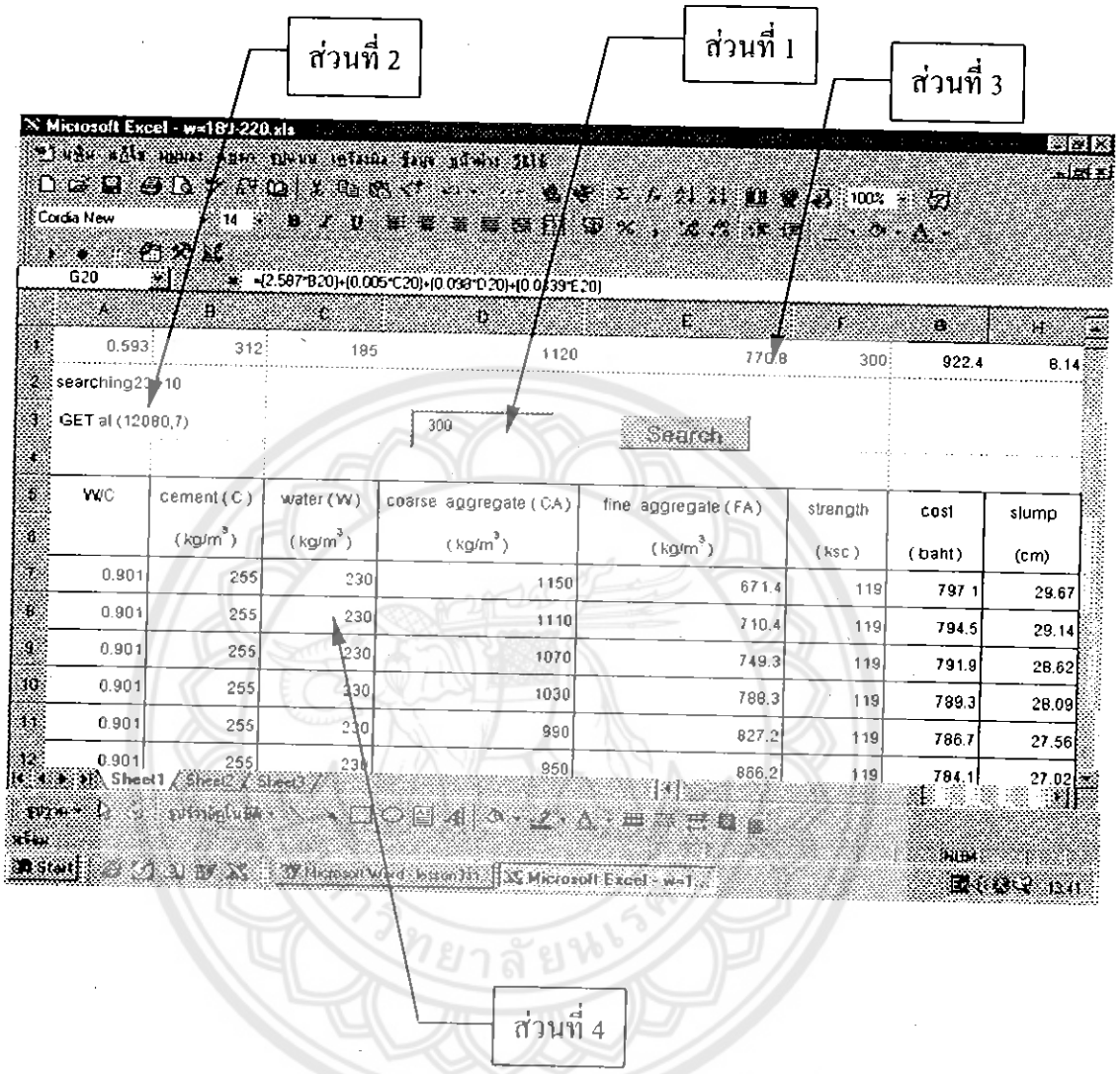
รูปที่ ค.1 การเข้าถึงโปรแกรม Visual Basic



รูปที่ ค.2 การใช้ภาษาเขียนโปรแกรม



รูปที่ ค.3 แสดงส่วนประกอบการใช้โปรแกรมค้นหาสัดส่วนผสม



ส่วนที่ 1 คือ บริเวณกรอบที่ใส่ค่ากำลังอัดที่ต้องการ

ส่วนที่ 2 คือ ส่วนของการแสดงผลการค้นหา

ส่วนที่ 3 คือ ส่วนแสดงผลของสัดส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนที่ 4 คือ ส่วนของข้อมูลสัดส่วนผสมทั้งหมด

ประวัติผู้เขียน

1.ชื่อ-สกุล นายกติกร ทวีชัยถาวร

เกิดวันที่ 19 กันยายน 2522 จังหวัดนครสวรรค์

ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2539 มัธยมปลาย โรงเรียนลาซาลโชติรวี จังหวัดนครสวรรค์

พ.ศ.2543 วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก

2.ชื่อ-สกุล นายสมเดช ทองทุม

เกิดวันที่ 3 มีนาคม 2522 จังหวัดพิจิตร

ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2539 มัธยมปลาย โรงเรียนตะพานหิน จังหวัดพิจิตร

พ.ศ.2543 วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก

3.ชื่อ-สกุล นายสุรศักดิ์ สุขวิญญา

เกิดวันที่ 17 เมษายน 2521 จังหวัดนครสวรรค์

ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2538 มัธยมปลาย โรงเรียนนครสวรรค์ จังหวัดนครสวรรค์

พ.ศ.2543 วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก

4.ชื่อ-สกุล นายเปี่ยมศักดิ์ พ้องพงษ์ศรี

เกิดวันที่ 25 มิถุนายน 2522 จังหวัดพิจิตร

ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2539 มัธยมปลาย โรงเรียนอุตรดิตถ์ จังหวัดอุตรดิตถ์

พ.ศ.2543 วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก