

การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูง



นาย อติศร โอวาทศิริวงศ์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

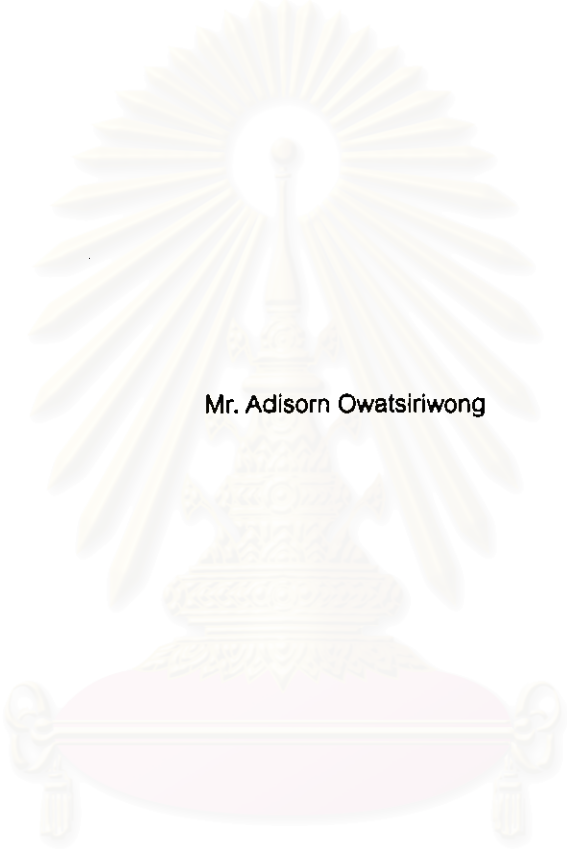
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-332-922-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF COMPUTER PROGRAM FOR MIX PROPORTIONING  
OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE



Mr. Adisorn Owatsiriwong

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University


Academic Year 1999

ISBN 974-332-922-6


หัวข้อวิทยานิพนธ์      การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับออกแบบส่วนผสมของคนกวีตมวรรณะสูง  
โดย                              นาย อติศร โอวาทศิริวงศ์  
ภาควิชา                            วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา              ศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม        ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม


---


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. รัชชัย สุมิตร)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. ปณิธาน สักคุณะประสิทธิ์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. ชัชชาติ สิทธิพันธุ์)

อดิศร โอวาทศิริวงศ์ : การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูง  
(DEVELOPMENT OF COMPUTER PROGRAM FOR MIX PROPORTIONING OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE)

อ.ที่ปรึกษา : ศ. ดร. เอกสิทธิ์ ตั้มสุวรรณ อ. ที่ปรึกษา ร่วม : ผศ.ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม 179 หน้า ISBN : 974-332-922-6

การพัฒนาคอนกรีตสมรรถนะสูงเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ทั้งทางเทคนิคเกี่ยวกับการออกแบบส่วนผสมและคุณสมบัติพื้นฐานต่าง ๆ และการประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรม จนสามารถกำหนดคุณสมบัติหลักได้คือ ในสภาวะเหลวจะต้องมีค่ายุบตัวสูงกว่า 20 ซม. และการไหลตัวเกินกว่า 50 ซม. และในสภาวะแข็งตัวมีกำลังอัดที่ 28 วันเกินกว่า 600 กก./ตร.ซม. โดยที่ กำลังอัด 24 ชม. สูงกว่า 50% ของที่ 28 วัน อีกทั้งจะต้องมีเสถียรภาพเชิงมิติและมีความทนทานสูง ในงานวิจัยนี้การออกแบบส่วนผสมใช้หลักการจัดขนาดผลของมวลรวม ควบคู่กับการปรับปรุงคุณสมบัติในสภาวะเหลวด้วยสารเคมีผสมเพิ่ม โดยมีขั้นตอนการออกแบบที่เป็นระบบซึ่งจะสามารถประกันคุณสมบัติของคอนกรีตได้ตามสภาพวัสดุมวลรวมในท้องตลาดด้วยกรรมวิธีการผลิตตามปกติ และให้รองรับกับสภาวะการใช้งานที่แตกต่างกัน 3 ประเภท คือ คอนกรีตไหล คอนกรีตกำลังสูง และคอนกรีตหยาบ ขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมเริ่มจาก การตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุผสมในกรอบของการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูง แล้วหาสัดส่วนผลของมวลรวมโดยวิธีการทางคณิตศาสตร์ นำไปสู่การหาปริมาณซีเมนต์ และสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้สอดคล้องกับกำลังอัดและข้อกำหนดด้านความทนทาน จากนั้นจะมีการตรวจสอบความสามารถที่ได้จากค่ายุบตัวเริ่มต้นตามหลักการน้ำอิสระ แล้วปรับแต่งคุณสมบัติในสภาวะเหลวด้วยสารลดน้ำพิเศษจนเป็นที่พอใจ การศึกษาในงานวิจัยมุ่งเน้นการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการออกแบบส่วนผสมสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรม โดยครอบคลุมขอบข่ายหลักในการควบคุมคุณสมบัติเด่นของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่เกี่ยวกับการไหลของคอนกรีตไหล กำลังของคอนกรีตกำลังสูง และอุณหภูมิในคอนกรีตหยาบ จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ซึ่งได้ผ่านการทดสอบ และการตรวจเทียบกับหลายการวิจัยมาก่อนนี้ การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงโดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถประกันคุณสมบัติของคอนกรีตให้เป็นไปตามเจตนาของผู้ออกแบบที่สอดคล้องกับข้อกำหนดของสภาวะเหลว และสภาวะแข็งตัวได้

ผลของการศึกษาพบว่า การออกแบบคอนกรีตไหล ซึ่งแยกออกเป็น 2 กลุ่ม คือ คอนกรีตไหลมาก มีค่ายุบตัว 20 - 25 ซม. และการไหล 55 - 65 ซม. ซึ่งอาจใช้การจัดเพียงเล็กน้อยในการเท และคอนกรีตไหลมากพิเศษ ที่มีค่ายุบตัวเกินกว่า 25 ซม. และการไหลเกินกว่า 65 ซม. ซึ่งสามารถไหลและปรับระดับได้เองโดยปราศจากการจัดเพียงเล็กน้อย อาจพิจารณากำลังอัดที่เกินกว่า 200 กก./ซม.<sup>2</sup> และอาจใช้ได้ลดยแทนที่ซีเมนต์เพื่อลดการยึดเกาะระหว่างมวล เพิ่มความไหลลื่น และลดการเข็มของคอนกรีต ด้วยปริมาณ 15-35% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ และปริมาณพลาสติกที่ใช้ไม่น้อยกว่า 325 ลิตร/ลบม. ของคอนกรีต การออกแบบคอนกรีตกำลังสูงซึ่งมีกำลังอัด 600-850 กก./ซม.<sup>2</sup> สามารถควบคุมด้วยสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.23-0.34 ปริมาณซีเมนต์ที่ไม่เกิน 550 กก./ลบม. และปริมาณน้ำอิสระให้เหลือน้อยที่สุด การประกันกำลังอัดที่ 24 ชม.เกินกว่า 50 % ของกำลังที่ 28 วัน สามารถใช้หลักการ Maturity เพื่อควบคุมปริมาณซีเมนต์ และอุณหภูมิการบ่ม การใช้ซิลิกาฟูมสามารถเพิ่มกำลังอัดให้สูงขึ้นแต่จะทำได้ความเหมาะสมไม่ควรเกิน 15% ของปริมาณซีเมนต์ การออกแบบคอนกรีตหยาบซึ่งอุณหภูมิเพิ่มจะมีผลต่อสมรรถนะทั้งในระยะสั้น และระยะยาว จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มได้รับอิทธิพลจากปริมาณซีเมนต์ องค์ประกอบทางเคมี คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต และ ไตรแคลเซียมออกไซด์ ที่มีผลในช่วงแรก ซึ่งตรวจสอบได้ด้วยการทดสอบคอนกรีตแบบกักกันความร้อน สามารถหาสาเหตุการควบคุมความร้อนทำได้โดยใช้เถ้าลดยแทนที่ซีเมนต์ในปริมาณ 15-35% เพื่อให้การไหลและกำลังอัดยังเป็นไปตามที่กำหนด แต่สามารถควบคุมความร้อนให้อยู่ในทิศของมิติของโครงสร้างและอัตราการเทคอนกรีต ทั้งนี้พบว่าการปรับแก้ส่วนผสมจากสมการกำเนิดความร้อนของคอนกรีตจากการทดสอบแบบกักกันความร้อนด้วยตัวคูณเท่ากับ 1.7 จะให้ผลการกระจายอุณหภูมิใกล้เคียงกับสภาวะในโครงสร้างจริง

ภาควิชา..... วิศวกรรมโยธา  
สาขาวิชา..... วิศวกรรมโยธา  
ปีการศึกษา..... 2542

ลายมือชื่อนิติ.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ร่วม.....

## 4070494021: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORDS: COMPUTER PROGRAM/MIX PROPORTIONING/HIGH PERFORMANCE CONCRETE

ADISORN OWATSIRIWONG, MR: DEVELOPMENT OF COMPUTER PROGRAM FOR MIX PROPORTIONING OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE, THESIS ADVISOR: PROF. EKASIT LIMSUWAN. DR., THESIS CO-ADVISOR : ASST. PROF BOONCHAI STITMANNAITHUM, DR., 179 pp., ISBN: 974-332-922-6

High Performance Concrete (HPC) has been developed continuously in mix proportion, principal properties, and utilization toward industrial uses. As a result, general properties of HPC can be defined as follows; in fresh state, slump, and flow would be greater than 20 cm and 50 cm, respectively; in harden state, the compressive strength at 28 day must be greater than 600 kg/cm<sup>2</sup> as which the 24 hr strength must be at least 50% of the one at 28-day, Other properties than that the HPC must be dimension stable and highly durable. Mix proportion in this research has emphasized on optimum aggregate gradation associated with using the high-range water reducing agents to improve flow ability of concrete. The process would guarantee the properties based on market-available aggregates and ordinary industrial manufacturing in 3 different types of concrete; flow concrete, high-strength concrete and mass concrete. Sequences of the mix proportion have controlled basic properties of the constituents conformed to the HPC requirements by means of mathematical models for aggregate gradation. The water to cement ratio is determined on the basis of strength and durability requirements. Workability can also be achieved by slump as means of free water concept which flow properties can be adjusted to satisfy working condition. The research aims to develop a computer program governing the process in mix design of HPC. The program is designed to control the main properties of HPC as workability for flowable concrete, strength for high-strength concrete and temperature for mass concrete. Various mathematical models tested to obtain the most reliable results, have been compiled to establish the most effective mix proportions that the principal properties can be assured both in fresh and hardened states.

The result of the study has shown mix design for flowable concrete can be categorized as normal flow concrete with 20-25 cm slump, and 55-65 cm flow, as which slightly vibration may be needed, as super flow concrete with slump and flow are greater than 25 cm, and 65 cm, respectively, which would be self-leveling without any vibration. The compressive strength of this type should be greater than 200 kg/cm<sup>2</sup>. Fly ash may be required to improve flow and to reduce bleeding at the range of 15-35% by weight of cement. The amount of paste should be greater than 325 litre/m<sup>3</sup>. The mix design for high-strength concrete of 600-800 kg/cm<sup>2</sup> cylinder strength would be controlled by water to cement ratio of 0.23-0.34, the cement content less than 550 kg/m<sup>3</sup> and least amount of free water. The 24 hrs strength can be assured to be higher than 50% of the 28 days' by 'Maturity concept' to control cement contents and curing temperature. The Silica fume can be added to the proportion to obtain higher strength but it may reduce the workability. The optimum amount of the Silica fume should be around 15% of cement content. The mix design for mass concrete as which the temperature during and after placing must be under control. The study has shown that cement content, especially the chemical composition as Tri-Calcium Silicate and Tri-Calcium Aluminate have much influenced in the early stage of temperature rise in concrete. Adiabatic temperature tests can be pre-evaluated to the most reliable one. Fly ash can also be substituted at the amount 15-35% of cement to improve the flow, to reduce the heat, and to obtain the strength. The mathematical model for heat generation in mass structures as developed in this study has proved the most accurate prediction of temperature rise with a factor 1.7 of the adiabatic temperature tests.

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา  
ปีการศึกษา..... 2542

ลายมือชื่อนิติกร.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญไชย สถิตมั่นในธรรม อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งได้อุทิศทั้งกำลังกาย กำลังใจ และเวลาอันมีค่าในการให้คำแนะนำชี้แนะอันเป็นประโยชน์ รวมทั้งตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์ และ อาจารย์ ดร. ชัชชาติ สิทธิพันธุ์ ที่ได้กรุณาให้ความสนใจในการเป็นคณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

งานวิจัยนี้จะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงลงได้หากปราศจากความอนุเคราะห์ และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์จากบุคคล จากหลายฝ่าย ซึ่งผู้เขียนขอประกาศกิตติกรรม ไว้ ณ ที่นี้ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร. สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติ สิรินคร

คุณ ณรงค์ศักดิ์ สีวานิชกิจ

บริษัท น้ำแข็ง คอนกรีต (1992) จำกัด

คุณกิติกร ดันเปาว์

บริษัท รถไฟฟ้ามหานคร จำกัด (มหาชน)

คุณพงษ์เทพ สิริกุลประทุม

บริษัท W.R.GRACE (ประเทศไทย)

ผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้าง จำกัด (มหาชน) (CPAC)

ผู้เขียนยังขอขอบคุณอย่างสุดซึ้งกับ รุ่นพี่ เพื่อน ๆ น้อง ๆ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการคอนกรีต ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินการทดสอบอย่างไม่เห็นแก่เหน็ดเหนื่อย โดยเฉพาะ พี่วิศวะ จักรไพศาล นิสิต ปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง ที่ให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์เกี่ยวกับการทดสอบส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูง รวมทั้งช่วยอ่านและแก้ไขต้นฉบับบางส่วน

ท้ายที่สุด และเหนือสิ่งอื่นใด คุณประโยชน์อันใดทั้งหมดที่พึงจะได้รับจากวิทยานิพนธ์นี้ ผู้เขียนขอมอบให้แก่ บิดา มารดา และ ครูบาอาจารย์ ทุก ๆ ท่าน ที่คอยให้การอบรม ดูแล ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในแขนงต่าง ๆ ซึ่งผู้เขียนขอจดจำไว้จนกว่าชีวิตจะหาไม่

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
รายการตารางประกอบ .....	ฅ
รายการรูปประกอบ .....	ฉ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ทัวไป.....	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	7
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	7
1.5 การดำเนินงานวิจัย .....	9
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ .....	10
<b>บทที่ 2 คอนกรีตสมรรถนะสูง</b>	
2.1 ทัวไป.....	21
2.2 ประเภทของคอนกรีตสมรรถนะสูง .....	22
2.2.1 คอนกรีตไหล.....	22
2.2.2 คอนกรีตกำลังสูง .....	23
2.2.3 คอนกรีตหนา .....	23
2.3 การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูง .....	24
2.3.1 วัสดุผสม.....	24
2.3.2 วิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูง.....	31
2.3.3 ขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมในงานวิจัย .....	34

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การพัฒนาโปรแกรมเพื่อการออกแบบส่วนผสม	
3.1 ทั่วไป.....	53
3.2 การคำนวณออกแบบส่วนผสมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ .....	53
3.2.1 การผสมมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด .....	53
3.2.2 การหาปริมาณน้ำพอเพียงต่อการยุบตัวเริ่มต้น.....	55
3.2.3 การปรับแต่งคุณสมบัติในสถานะเหลวด้วยสารเคมีผสมเพิ่ม.....	60
3.2.4 การคำนวณสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์.....	62
3.2.5 การกำหนดปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมเพื่อจำกัดอุณหภูมิเพิ่ม.....	68
3.3 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับออกแบบส่วนผสม.....	73
3.3.1 ภาษาคอมพิวเตอร์ในโปรแกรม.....	73
3.3.2 โครงสร้างและลำดับการทำงานของโปรแกรม.....	74
3.3.3 ขบวนการปรับส่วนผสมแบบอัตโนมัติ.....	75
บทที่ 4 ตัวอย่างการออกแบบส่วนผสม	
4.1 ทั่วไป.....	113
4.2 ตัวอย่างการออกแบบส่วนผสม.....	113
4.3 การเปรียบเทียบส่วนผสมคอนกรีตกับวิธีการออกแบบดั้งเดิม.....	115
4.4 การทดสอบคุณสมบัติของส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูง.....	118
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	135
รายการอ้างอิง.....	139
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในโครงสร้างคอนกรีตหลาดด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์.....	143
ภาคผนวก ข การคำนวณอุณหภูมิเพิ่มสูงสุดเพื่อควบคุมการแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีตหลาด.....	162
ภาคผนวก ค มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง.....	167
ภาคผนวก ง การใช้งานโปรแกรม.....	169
ประวัติผู้เขียน.....	179



## รายการตารางประกอบ

		หน้า
ตารางที่ 1.1	สัดส่วนของมวลรวมต่อซีเมนต์ที่กำหนดใน Road Note No.4 .....	11
ตารางที่ 1.2	กำลังอัดของคอนกรีตที่สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 สำหรับปูนปอร์ตแลนด์และปูนปอร์ตแลนด์แข็ง ตัวเร็ว.....	11
ตารางที่ 1.3	ข้อกำหนดส่วนผสมคอนกรีตและระยะหุ้มเหล็กเพื่อความทนทานตามมาตรฐาน BS 8110.....	11
ตารางที่ 1.4	ปริมาณน้ำของส่วนผสมโดยวิธีการออกแบบของ DOE.....	12
ตารางที่ 1.5	ปริมาตรของมวลรวมหยาบต่อหน่วยปริมาตรคอนกรีตตาม ACI 211.1-91.....	12
ตารางที่ 1.6	ปริมาณน้ำของส่วนผสมโดยวิธีการออกแบบของ ACI 211.1-91.....	12
ตารางที่ 1.7	ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์และกำลังอัดของคอนกรีตโดยวิธี ACI 211.1.....	13
ตารางที่ 1.8 ก.	ข้อกำหนดสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ตามวิธีออกแบบของ ACI 211.1-91.....	13
ตารางที่ 1.8 ข.	ข้อกำหนดการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตด้านทานซัลเฟตตาม ACI 201.2R.....	13
ตารางที่ 1.9	ค่าน้ำหนักของคอนกรีตสดโดยประมาณโดยวิธีของ ACI 211.1.....	14
ตารางที่ 1.10	ข้อกำหนดคุณสมบัติความสม่ำเสมอของคอนกรีตตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมว่าด้วย คอนกรีตผสมเสร็จ (มอก. 213-2520).....	14
ตารางที่ 2.1	ข้อกำหนดคุณสมบัติคอนกรีตไหลตามมาตรฐานของ ASTM C1017.....	39
ตารางที่ 2.2	คุณสมบัติของส่วนประกอบหลักในปอร์ตแลนด์ซีเมนต์.....	39
ตารางที่ 2.3	องค์ประกอบหลักทางเคมีของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทต่าง ๆ ตาม ASTM C150.....	40
ตารางที่ 2.4	ขอบเขตขนาดผลของมวลรวมสำหรับการบ่มคอนกรีต.....	40
ตารางที่ 2.5	การจำแนกประเภทของสารเคมีผสมเพิ่มตามมาตรฐาน มอก.733-2530 หรือ ASTM C494.....	41
ตารางที่ 2.6	การเปรียบเทียบองค์ประกอบของเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะและเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 กับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา.....	41
ตารางที่ 2.7	อัตราการใช้เถ้าลอยทดแทนซีเมนต์ตามคำแนะนำของ ACI 211.4R.....	41
ตารางที่ 2.8	การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และซิลิกาฟูม.....	42
ตารางที่ 2.9	ปริมาตรของมวลรวมหยาบที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตกำลังสูงโดยวิธีของ ACI 211.4R.....	42
ตารางที่ 2.10 ก	สัดส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสำหรับคอนกรีตไม่ผสมสารลดน้ำพิเศษ.....	42
ตารางที่ 2.10 ข	สัดส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสำหรับคอนกรีตผสมสารลดน้ำพิเศษ.....	43
ตารางที่ 2.11	ปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้สารลดน้ำพิเศษ เทียบส่วนจากปริมาณช่องว่างของ มวลรวมละเอียดร้อยละ 35.....	43
ตารางที่ 2.12	ขอบเขตขนาดผลของมวลรวมสำหรับการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูง (วิธีร้อนตะแกรง).....	44
ตารางที่ 3.1	คุณสมบัติทางกายภาพและค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของวัสดุผง.....	77

รายการตารางประกอบ (ต่อ)

		หน้า
ตารางที่ 3.2	ค่าเฉลี่ยของกลุ่มขนาด (Size group) คำนวณโดยสมการที่ (3.14) .....	77
ตารางที่ 3.3	ค่าของ $W_{free,Add}$ และ $Slump_{Add}$ เมื่อใช้สารลดน้ำพิเศษ.....	77
ตารางที่ 3.4	อัตราการใช้สารลดน้ำพิเศษตามข้อเสนอแนะของผู้ผลิต.....	78
ตารางที่ 3.5	ฟังก์ชันประสิทธิภาพของแก้วลอยและซิลิกาฟูม.....	78
ตารางที่ 3.6	องค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอย และซิลิกาฟูม ที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าของ $f(r)$ ในงานวิจัย...	79
ตารางที่ 3.7	การจำแนกชั้นความเปิดเผยของคอนกรีตตามเงื่อนไขของสภาพแวดล้อม โดย CEB.....	80
ตารางที่ 3.8	ข้อจำกัดในการออกแบบส่วนผสมเพื่อความทนทานของคอนกรีตจำแนกตามระดับชั้นความเปิดเผยของโครงสร้าง ที่กำหนดโดย CEB.....	81
ตารางที่ 3.9	ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มของอุณหภูมิในโครงสร้างคอนกรีตหยาบ.....	82
ตารางที่ 3.10	โปรแกรมย่อย และรายละเอียดหน้าที่การทำงาน.....	83
ตารางที่ 4.1	คุณสมบัติส่วนผสมตัวอย่างที่ทำการออกแบบ.....	122
ตารางที่ 4.2	ผลการวิเคราะห์ขนาดผลของมวลรวม.....	122
ตารางที่ 4.3	ขนาดผลของมวลรวมที่ได้จากการผสม และข้อกำหนดสำหรับคอนกรีตสมรรถนะสูง.....	123
ตารางที่ 4.4	คุณสมบัติทั่วไปของมวลรวมที่ใช้.....	123
ตารางที่ 4.5	หน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่างของมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียด.....	123
ตารางที่ 4.6	หน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่างของมวลรวมตามสัดส่วนผสมที่ใช้ในการออกแบบ.....	123
ตารางที่ 4.7	แสดงส่วนผสมผลลัพ์ที่ได้จากการคำนวณออกแบบและผลการทดสอบ (วัสดุผสมต่อลูกบาศก์เมตร).....	124
ตารางที่ 4.8	วิธีการออกแบบมาตรฐานที่นำมาใช้เปรียบเทียบ.....	124
ตารางที่ 4.9	การเปรียบเทียบส่วนผสมของคอนกรีตจากการออกแบบกับวิธีแบบดั้งเดิม.....	125
ตารางที่ 4.10	ผลการทดสอบคุณสมบัติหลักของตัวอย่างส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูง.....	127

## รายการรูปประกอบ

		หน้า
รูปที่ 1.1	ขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตโดยวิธีของ Road Note No. 4.....	15
รูปที่ 1.2	ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์และกำลังอัดของคอนกรีตโดยวิธีของ Road Note No.4 ...	16
รูปที่ 1.3	ขอบเขตขนาดคละของมวลรวมที่กำหนดโดย Road Note No. 4 (ขนาดโตสุด 20 มม.).....	16
รูปที่ 1.4	ขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตโดยวิธีของ DOE .....	17
รูปที่ 1.5	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด (ลูกบาศก์) และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์โดยวิธีของ DOE.....	18
รูปที่ 1.6	ค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสดโดยประมาณในวิธีการออกแบบของ DOE.....	18
รูปที่ 1.7	สัดส่วนของมวลรวมละเอียดที่เหมาะสมโดยวิธีของ BRE/DOE สำหรับมวลรวมขนาดโตสุด 20 มม...	19
รูปที่ 1.8	ขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตโดยวิธีของ ACI 211.1-91.....	20
รูปที่ 2.1	การพิจารณาคุณสมบัติการใช้งานของคอนกรีตสมรรถนะสูงตาม FHWA.....	45
รูปที่ 2.2	การพัฒนา กำลังอัดขององค์ประกอบหลักในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	45
รูปที่ 2.3	การพัฒนา กำลังอัดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทต่าง ๆ.....	46
รูปที่ 2.4	การพัฒนา ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนปอร์ตแลนด์ประเภทต่าง ๆ.....	46
รูปที่ 2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะกับการพัฒนา กำลังของปูนปอร์ตแลนด์ในคอนกรีต.....	47
รูปที่ 2.6	ลักษณะการจัดเรียงตัว ของขนาดคละมวลรวม.....	47
รูปที่ 2.7	ขอบเขตขนาดคละที่เหมาะสมของมวลรวมสำหรับผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูง.....	48
รูปที่ 2.8	การแทรกตัวของซิลิกาฟุ่มระหว่างอนุภาคซีเมนต์ .....	48
รูปที่ 2.9 ก.	ส่วนสัมผัสร่วมของคอนกรีตที่ไม่ผสมซิลิกาฟุ่ม.....	49
รูปที่ 2.9 ข.	ส่วนสัมผัสร่วมของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟุ่ม.....	49
รูปที่ 2.10	ขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงโดยวิธีของ ACI 211.4 R .....	50
รูปที่ 2.11	ขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูงในงานวิจัย .....	51
รูปที่ 2.12	ขั้นตอนการผสมมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดด้วยโปรแกรม.....	52
รูปที่ 3.1 ก.	ลำดับการหาสัดส่วนคละของมวลรวมโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด.....	84
รูปที่ 3.1 ข.	ขั้นตอนการคำนวณสัดส่วนผสมของมวลรวมโดยวิธีซิมเพลกซ์.....	84
รูปที่ 3.2	ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บน้ำของของ ททราย, แกลก และ ซีเมนต์ โดยวิธีเซนตริฟิวก์....	85
รูปที่ 3.3	ความสัมพันธ์ของค่าตัวประกอบความเป็นเหลี่ยมมุม และช่องว่างของมวลรวม.....	86
รูปที่ 3.4	ความสัมพันธ์ของน้ำอิสระ และค่าการยุบตัวของคอนกรีตในสภาวะเหลว.....	86
รูปที่ 3.5	ความสัมพันธ์ของความชื้นของค่าการยุบตัวต่อปริมาณน้ำอิสระ กับอัตราส่วนของปริมาตรของเพสต์ต่อช่องว่างของมวลรวม.....	87
รูปที่ 3.6.	การเปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดสอบ.....	88
รูปที่ 3.7	แบบจำลองกลไกการเพิ่มค่าการยุบตัวของคอนกรีตในสภาวะเหลวจากผลของสารลดน้ำพิเศษ.....	89

## รายการรูปประกอบ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3.8 ก.	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำอิสระเพิ่มเติมกับปริมาณสารลดน้ำพิเศษ.....	90
รูปที่ 3.8 ข.	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของน้ำที่ต้องเอาชนะแรงเสียดทานที่ลดลงกับปริมาณการใช้สารลดน้ำพิเศษ.....	90
รูปที่ 3.9	ความสัมพันธ์ของค่าการยุบตัวเพิ่มเติมกับปริมาณสารลดน้ำพิเศษจากการคำนวณโดยสมการที่ (3.22).....	91
รูปที่ 3.10	การเปรียบเทียบค่าการยุบตัวจากการคำนวณและการทดสอบ.....	91
รูปที่ 3.11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ายุบตัว และการไหลตัวของคอนกรีต.....	92
รูปที่ 3.12	ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์และกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน.....	92
รูปที่ 3.13	เปรียบเทียบค่ากำลังอัดจากสมการที่ (3.33) และผลการทดสอบ.....	93
รูปที่ 3.14	การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตตามอายุ คำนวณจากสมการที่ (3.33).....	93
รูปที่ 3.15ก	ความสัมพันธ์ของตัวปรับแก้วัสดุประสานและสัดส่วนของแฉะลอย ที่อายุ 1 วัน.....	94
รูปที่ 3.15ข	ความสัมพันธ์ของตัวปรับแก้วัสดุประสานและสัดส่วนของแฉะลอยที่อายุ 28 วัน 56 วัน และ 91 วัน.....	94
รูปที่ 3.16ก	ความสัมพันธ์ของตัวปรับแก้วัสดุประสานและสัดส่วนของซิลิกาฟูมที่อายุ 1 วัน.....	95
รูปที่ 3.16ข	ความสัมพันธ์ของตัวปรับแก้วัสดุประสานและสัดส่วนของซิลิกาฟูมที่อายุ 28 วัน.....	95
รูปที่ 3.16ค	ความสัมพันธ์ของตัวปรับแก้วัสดุประสานและสัดส่วนของซิลิกาฟูมที่อายุ 56 วัน.....	96
รูปที่ 3.16ง	ความสัมพันธ์ของตัวปรับแก้วัสดุประสานและสัดส่วนของซิลิกาฟูมที่อายุ 91 วัน.....	96
รูปที่ 3.17	ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ต่อความสามารถซึมผ่านของซีเมนต์เพสต์และคอนกรีต.....	97
รูปที่ 3.18	เปรียบเทียบค่าจากสมการที่ (3.17) กับผลการทดสอบแบบกึ่งกักกันความร้อน.....	978
รูปที่ 3.19	อุณหภูมิเพิ่มแบบกักกันความร้อนของซีเมนต์แทนที่ด้วยแฉะลอยชนิด F และ C (สมการที่ 3.25).....	98
รูปที่ 3.20ก	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โครงสร้างที่ใช้วิเคราะห์.....	99
รูปที่ 3.20ข	เปรียบเทียบผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ในกรณี $\alpha = 1.00$ กับค่าที่ได้จากการตรวจวัด.....	100
รูปที่ 3.20ค	เปรียบเทียบผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ในกรณี $\alpha = 1.69$ กับค่าที่ได้จากการตรวจวัด.....	101
รูปที่ 3.21	โครงสร้างของโปรแกรม.....	102
รูปที่ 3.22	ลำดับการทำงานของโปรแกรมสำหรับออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงในงานวิจัย.....	103
รูปที่ 3.23	ลำดับการทำงานของโปรแกรมการคำนวณหลัก.....	104
รูปที่ 3.24	ลำดับการทำงานของโปรแกรมย่อย MaxCM.....	105
รูปที่ 3.25	ลำดับการคำนวณในโปรแกรมย่อย CalWC.....	106
รูปที่ 3.26	ลำดับการคำนวณของโปรแกรมย่อย AggSSCal.....	107
รูปที่ 3.27	ลำดับการทำงานของโปรแกรมย่อย SlumpCal.....	109
รูปที่ 3.28	ลำดับการทำงานของโปรแกรมย่อย CalcSuper.....	110
รูปที่ 3.29	ลำดับการทำงานของโปรแกรมย่อย Adjust.....	111

## รายการรูปประกอบ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3.30	ลำดับการทำงานของโปรแกรมย่อย CalBatch.....	112
รูปที่ 4.1	หน้าต่างแสดงข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุผสม.....	128
รูปที่ 4.2	สัดส่วนผสมของมวลรวมและขนาดคละ.....	129
รูปที่ 4.3	หน้าต่างแสดงการคำนวณออกแบบสำหรับส่วนผสม H-1.....	130
รูปที่ 4.4	ส่วนผสม H-1 จากการคำนวณออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	131
รูปที่ 4.5	การเปรียบเทียบกราฟขนาดคละของมวลรวมของส่วนผสม F- 1 ด้วยวิธีการออกแบบต่าง ๆ.....	132
รูปที่ 4.6	การเปรียบเทียบกราฟขนาดคละของมวลรวมของส่วนผสม F- 2 ด้วยวิธีการออกแบบต่าง ๆ.....	132
รูปที่ 4.7	การเปรียบเทียบกราฟขนาดคละของมวลรวมของส่วนผสม H- 1 ด้วยวิธีการออกแบบต่าง ๆ.....	133
รูปที่ 4.8	การเปรียบเทียบกราฟขนาดคละของมวลรวมของส่วนผสม H- 1 ด้วยวิธีการออกแบบต่าง ๆ.....	133
รูปที่ 4.9	แสดงการวิบัติของคอนกรีตกำลังต่ำที่รับแรงอัดในแนวแกน.....	134
รูปที่ 4.10	แสดงการวิบัติของคอนกรีตกำลังสูงที่รับแรงในแนวแกน.....	134
รูปที่ ผ.1	ปัญหาการถ่ายเทความร้อนในสามมิติ.....	161
รูปที่ ผ.2	เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบความเครียดคงที่สำหรับการวิเคราะห์.....	161
รูปที่ ผ.3	การหดตัวของชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีหน้าตัดสมมาตร.....	166
รูปที่ ผ.4	การกระจายอุณหภูมิของหน้าตัดที่ได้จากการวิเคราะห์.....	166
รูปที่ ผ.5	หน้าต่างรับข้อมูลวัสดุผสมและกรอรับข้อมูลต่าง ๆ สำหรับการคำนวณ.....	175
รูปที่ ผ.6	หน้าต่างรับข้อมูลเพื่อกำหนดคุณสมบัติของคอนกรีตในการออกแบบ.....	176
รูปที่ ผ.7	หน้าต่างแสดงขนาดคละของมวลรวม.....	177
รูปที่ ผ.8	หน้าต่างแสดงผลลัพธ์ของการคำนวณออกแบบ.....	178