

การออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยอัลกอริทึม  
การจำลองการอบเหนียว



นายสิริวัฒน์ จ้อยสุวรรณทัต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

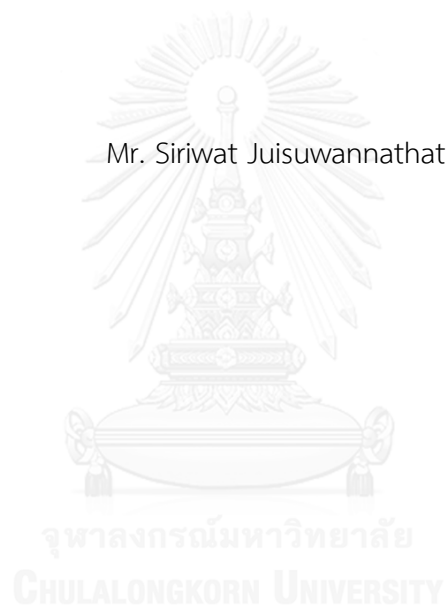
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

OPTIMAL DESIGN OF REINFORCED CONCRETE BUILDINGS BY  
SIMULATED ANNEALING ALGORITHM

Mr. Siriwat Juisuwannathat



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering  
Department of Civil Engineering  
Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2014  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว
โดย	นายสิริวัฒน์ จ้อยสุวรรณทัต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัฒนชัย สมิตถากร

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อัศวิน เล่นวารีย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัฒนชัย สมิตถากร)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สายันต์ ศิริมนตรี)

สิริวัฒน์ จุ้ยสุวรรณทัต : การออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วย  
อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว (OPTIMAL DESIGN OF REINFORCED CONCRETE  
BUILDINGS BY SIMULATED ANNEALING ALGORITHM) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:  
ผศ. ดร.วิฒนชัย สมิตธากร, 57 หน้า.

ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก นอกจากวิศวกรผู้ออกแบบต้องคำนึงถึงความปลอดภัยเป็นหลักแล้ว ความประหยัดเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง งานวิจัยนี้ได้นำอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมตามมาตรฐาน ACI 318M-11 ร่วมกับภาษาจาวา เพื่อหาค่าวัสดุก่อสร้างรวมต่ำสุดกรณีศึกษาที่ใช้คือ คาน เสา และโครงข้อแข็งพอร์ทัล รับน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรในแนวตั้ง ค่าวัสดุก่อสร้างรวมของโครงสร้างคำนวณจากปริมาตรคอนกรีต พื้นที่แบบหล่อ และน้ำหนักเหล็กเสริม

ผลการคำนวณออกแบบกรณีศึกษาในที่นี้พบว่า โครงสร้างที่มีค่าวัสดุก่อสร้างรวมต่ำสุดประกอบไปด้วยชิ้นส่วนคานและเสาที่มีความกว้างต่ำ แต่มีความลึกมาก ส่วนปริมาณเหล็กเสริมจะขึ้นอยู่กับกำลังที่ต้องใช้แบกรับน้ำหนักบรรทุกและราคาต่อหน่วยเมื่อเทียบกับคอนกรีต ดังนั้น หากราคาต่อหน่วยของวัสดุเปลี่ยนแปลงไป ค่าตอบที่ได้ก็จะเปลี่ยนไปด้วย นอกจากนี้ ในกรณีศึกษาการวางแผนพื้นที่สำเร็จรูป พบว่าการวางแผนพื้นที่ทิศทางเดียวกัน มีคานที่ไม่ต้องรับน้ำหนักบรรทุกจากพื้น ซึ่งสามารถใช้หน้าตัดขนาดเล็กได้ จึงทำให้ได้ราคาวัสดุก่อสร้างรวมต่ำที่สุด อย่างไรก็ตาม แม้อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวจะสามารถค้นหาคำตอบได้ดี แต่ระยะเวลาที่ใช้คำนวณยังคงค่อนข้างมาก โดยเฉพาะปัญหาที่มีตัวแปรจำนวนมาก

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2557

# # 5670427821 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: OPTIMAL DESIGN / REINFORCED CONCRETE STRUCTURES / SIMULATED ANNEALING ALGORITHM

SIRIWAT JUISUWANNATHAT: OPTIMAL DESIGN OF REINFORCED CONCRETE BUILDINGS BY SIMULATED ANNEALING ALGORITHM. ADVISOR: ASST. PROF. WATANACHAI SMITTAKORN, Ph.D., 57 pp.

In the design of reinforced concrete structures, engineers should design for not only safety, but economy is also another important factor. This research proposes a design of reinforced concrete structures according to ACI 318M-11 code, by simulated annealing algorithm (SA), using JAVA language to seek for the optimum cost. Case studies investigated are reinforced concrete beams, columns and portal frames subject to dead loads and vertical live loads. The cost of construction material is computed from the volume of concrete, the area of formwork and the weight of steel reinforcement.

Results from case studies have shown that the optimal structures consist of beam and column sections with minimum width, but high depth. The amount of steel reinforcement depends on both the required strength and the unit price of steel relative to the concrete. Therefore, if the unit prices vary, optimal results can be different. Furthermore, in the case studies of precast slab arrangement, placing the slabs in the same direction yields beams with no slab loads. These beams require only small sections, resulting in the minimum cost of structure. However, although Simulated Annealing algorithm can lead to the optimal solution, the process is still time-consuming, especially for problems with large number of variables.

Department: Civil Engineering

Student's Signature .....

Field of Study: Civil Engineering

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2014

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงต่อผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัฒนชัย สมิตชากร ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ ตรวจสอบ และแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่ทุกขั้นตอน สนับสนุนและส่งเสริมในการทำงานต่าง ๆ ตลอดจนให้คำปรึกษาในระเบียบวิธีวิจัยและการเขียนโปรแกรมประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมโยธา เพื่อให้การทำงานวิจัยฉบับนี้สมบูรณ์ที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สายันต์ ศิริมนตรี ที่กรุณาสละเวลาเป็นกรรมการตรวจสอบความถูกต้องวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อัศวรัช เล่นวารี ที่กรุณาสละเวลาเป็นประธานกรรมการช่วยตรวจสอบและแก้ไข ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ มารดา พี่ชาย และทุกคนในครอบครัวที่ให้ความช่วยเหลือ ความเข้าใจและกำลังใจในทุก ๆ เรื่อง และขอขอบพระคุณครูปาอาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนให้ความรู้แก่ข้าพเจ้าทำให้งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	1
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	6
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	6
1.5 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function).....	8
2.2 ฟังก์ชันข้อจำกัด (Constraint function).....	12
2.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้าง.....	13
2.2.2 การออกแบบโครงสร้าง.....	14
2.3 อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm).....	21
บทที่ 3 ขั้นตอนการคำนวณ.....	26
3.1 ตัวแปรหลักและขอบเขต.....	26
3.2 ขั้นตอนการออกแบบอย่างเหมาะสม.....	27
บทที่ 4 ตัวอย่างการออกแบบอย่างเหมาะสม.....	30

4.1 กรณีศึกษา .....	30
4.2 อุณหภูมิเริ่มต้นและอัตราการลดอุณหภูมิที่เหมาะสม .....	33
4.3 ผลการออกแบบ .....	34
บทที่ 5 สรุป .....	51
รายการอ้างอิง .....	53
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	57





## สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1	ขอบเขตของตัวแปรต่าง ๆ สำหรับการคำนวณออกแบบ .....	26
ตารางที่ 3.2	ราคาต่อหน่วยสำหรับการคิดราคาวัสดุก่อสร้าง .....	27
ตารางที่ 4.1	ผลของอุณหภูมิเริ่มต้นและอัตราการลดอุณหภูมิที่มีต่อการค้นหาคำตอบ .....	33
ตารางที่ 4.2	คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 .....	35
ตารางที่ 4.3	คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 .....	36
ตารางที่ 4.4	คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 3 .....	37
ตารางที่ 4.5	คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 4 .....	38
ตารางที่ 4.6	คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 1 (น้ำหนักบรรทุกจร $200 \text{ kg/m}^2$ ) ..	39
ตารางที่ 4.7	คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 2 (น้ำหนักบรรทุกจร $200 \text{ kg/m}^2$ ) ..	40
ตารางที่ 4.8	คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 1 (น้ำหนักบรรทุกจร $200 \text{ kg/m}^2$ ) ..	41
ตารางที่ 4.9	คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 2 (น้ำหนักบรรทุกจร $200 \text{ kg/m}^2$ ) ..	42
ตารางที่ 4.10	คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 3 (น้ำหนักบรรทุกจร $200 \text{ kg/m}^2$ ) .....	43
ตารางที่ 4.11	คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 4 (น้ำหนักบรรทุกจร $200 \text{ kg/m}^2$ ) .....	44
ตารางที่ 4.12	คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 1 (น้ำหนักบรรทุกจร $400 \text{ kg/m}^2$ ) .....	45
ตารางที่ 4.13	คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 2 (น้ำหนักบรรทุกจร $400 \text{ kg/m}^2$ ) .....	46
ตารางที่ 4.14	คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 1 (น้ำหนักบรรทุกจร $400 \text{ kg/m}^2$ ) .....	47
ตารางที่ 4.15	คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 2 (น้ำหนักบรรทุกจร $400 \text{ kg/m}^2$ ) .....	48

ตารางที่ 4.16 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 3 (น้ำหนักบรรทุกจร 400 kg/m<sup>2</sup>)..... 49

ตารางที่ 4.17 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 4 (น้ำหนักบรรทุกจร 400 kg/m<sup>2</sup>)..... 50



## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1.1 การสลับสายพันธุ์และการกลายพันธุ์ของ Genetic Algorithm.....	3
รูปที่ 1.2 การทำงานของ Particle Swarm Optimization .....	3
รูปที่ 1.3 การทำงานของ Ant Colony Optimization.....	4
รูปที่ 2.1 เหล็กเสริมในคาน .....	10
รูปที่ 2.2 การเสริมเหล็กในคานต่อเนื่อง 2 ช่วง .....	11
รูปที่ 2.3 การเสริมเหล็กในคานต่อเนื่อง 3 ช่วง .....	11
รูปที่ 2.4 การเหล็กเสริมในเสา .....	11
รูปที่ 2.5 การคิดพื้นที่ไม้แบบ .....	12
รูปที่ 2.6 แรงภายในบนหน้าตัดคานเสริมเหล็กคู่ .....	14
รูปที่ 2.7 ไดอะแกรมของแรงเฉือนในคาน .....	18
รูปที่ 2.8 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์สำหรับการแบ่งขอบเขตการวิเคราะห์ .....	20
รูปที่ 2.9 การเรียงตัวของอะตอม.....	21
รูปที่ 2.10 การทำงานของ Simulated Annealing Algorithm .....	22
รูปที่ 2.11 ผังการทำงานของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว .....	25
รูปที่ 3.1 ผังการทำงานของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวกับงานออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก .....	29
รูปที่ 4.1 โครงสร้างกรณีศึกษา .....	32
รูปที่ 4.2 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 1.....	35
รูปที่ 4.3 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 2.....	36
รูปที่ 4.4 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 3.....	37
รูปที่ 4.5 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 4.....	38
รูปที่ 4.6 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 1 (น้ำหนักบรรทุกจร $200 \text{ kg/m}^2$ ).....	39

รูปที่ 4.7 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 2 (น้ำหนักบรรทุกจร 200 kg/m<sup>2</sup>)..... 40

รูปที่ 4.8 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 1 (น้ำหนักบรรทุกจร 200 kg/m<sup>2</sup>)..... 41

รูปที่ 4.9 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 2 (น้ำหนักบรรทุกจร 200 kg/m<sup>2</sup>)..... 42

รูปที่ 4.10 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 3 (น้ำหนักบรรทุกจร 200 kg/m<sup>2</sup>)..... 43

รูปที่ 4.11 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 4 (น้ำหนักบรรทุกจร 200 kg/m<sup>2</sup>)..... 44

รูปที่ 4.12 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 1 (น้ำหนักบรรทุกจร 400 kg/m<sup>2</sup>)..... 45

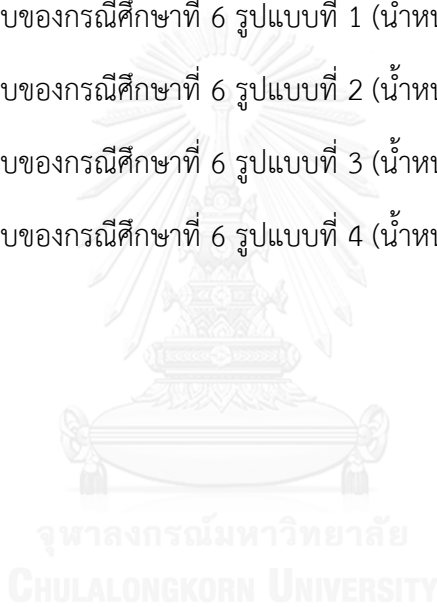
รูปที่ 4.13 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 2 (น้ำหนักบรรทุกจร 400 kg/m<sup>2</sup>)..... 46

รูปที่ 4.14 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 1 (น้ำหนักบรรทุกจร 400 kg/m<sup>2</sup>)..... 47

รูปที่ 4.15 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 2 (น้ำหนักบรรทุกจร 400 kg/m<sup>2</sup>)..... 48

รูปที่ 4.16 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 3 (น้ำหนักบรรทุกจร 400 kg/m<sup>2</sup>)..... 49

รูปที่ 4.17 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 4 (น้ำหนักบรรทุกจร 400 kg/m<sup>2</sup>)..... 50



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างอาคารประเภทต่าง ๆ อย่างกว้างขวางทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็ก เนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สามารถกำหนดรูปร่างได้หลากหลาย มีความคงทนแข็งแรงสูง และต้องการการบำรุงรักษาน้อย เหตุผลอีกประการหนึ่งคือ คอนกรีตและเหล็กเสริมเป็นวัสดุที่สามารถหาได้ง่ายและราคาไม่แพง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญอย่างยิ่งสำหรับสภาพเศรษฐกิจในปัจจุบัน

ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปร่างและขนาดหน้าตัดของชิ้นส่วนอาคาร จะต้องสามารถแบกรับน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำต่อโครงสร้างได้อย่างปลอดภัยตลอดอายุการใช้งานของอาคาร นอกจากนี้ ปัจจัยสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ควรคำนึงถึงคือ ความประหยัด ดังนั้นวิศวกรผู้ออกแบบจำเป็นต้องคำนึงถึงการออกแบบโครงสร้างอย่างเหมาะสม กล่าวคือการออกแบบโครงสร้างให้มีความปลอดภัยในการใช้งานและมีความประหยัด โดยทั่วไปวิศวกรผู้ออกแบบจะใช้ประสบการณ์ของตนเองในการตัดสินใจเลือกคุณสมบัติวัสดุและขนาดของชิ้นส่วนโครงสร้างที่คิดว่าประหยัด แต่ก็ยังไม่สามารถกล่าวได้ว่าเป็นการออกแบบที่ประหยัดที่สุด

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเสนอวิธีการออกแบบโครงสร้างอย่างเหมาะสมโดยอาศัยอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm) เพื่อให้ได้ราคาค่าก่อสร้างรวมต่ำสุด โดยใช้ภาษาจาวาในการพัฒนาการออกแบบตามมาตรฐาน ACI 318M-11 กรณีศึกษาที่ใช้คือคาน เสา และโครงข้อแข็งพอร์ทัล ราคารวมของโครงสร้างคิดจากปริมาตรคอนกรีต พื้นที่แบบหล่อ และน้ำหนักเหล็กเสริม

### 1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

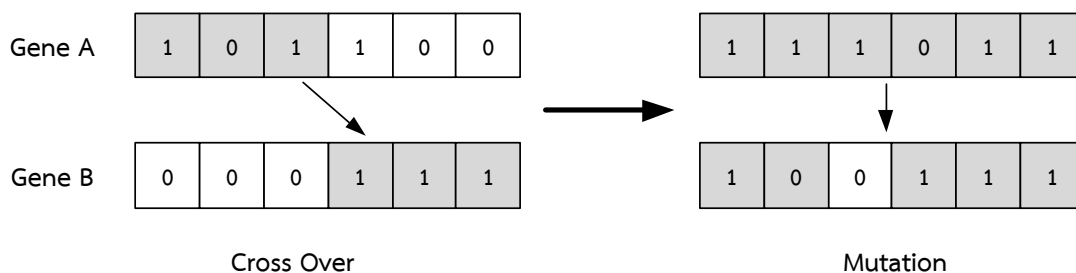
การหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization) คือการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด มีอยู่ในทุกที่ และเกือบทุกกิจกรรมในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ทุกอย่างที่มีมนุษย์กระทำนั้นต่างต้องพึ่งการหาค่าเหมาะที่สุดอยู่ตลอดเวลา เช่น บริษัทหนึ่งต้องการจะทำกำไรให้ได้มากที่สุด หรือใช้ต้นทุนที่น้อยที่สุด หรือผลงานที่ได้มีประสิทธิภาพสูงสุด เป็นต้น นั่นคือ เราทุกคนต่างพยายามค้นหาคำตอบสำหรับทุก ๆ ปัญหาที่เราพบ ถึงแม้ว่าบางปัญหาเราไม่สามารถที่จะค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ (Yang 2010)

สำหรับงานออกแบบ งานก่อสร้างทางวิศวกรรมและอุตสาหกรรม วิศวกรจำเป็นต้องใช้หลากหลายเทคนิคและการตัดสินใจเพื่อบรรลุเป้าหมาย เป้าหมายสูงสุดของการตัดสินใจอาจจะเป็นการลดต้นทุนให้ต่ำที่สุด หรือการเพิ่มยอดกำไรให้ถึงจุดที่ต้องการ หรือเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน เพราะในความเป็นจริงทรัพยากร เวลา และเงินมีปริมาณที่จำกัด ดังนั้น การหาค่าเหมาะสมที่สุดจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในทางปฏิบัติ ทั้งนี้ ยังไม่มีวิธีใดในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่สามารถประยุกต์ใช้ได้กับทุกปัญหา ดังนั้นวิธีการแก้ปัญหาในการหาค่าเหมาะสมที่สุดจึงถูกคิดค้นและพัฒนาเป็นจำนวนมากตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน

การศึกษาและการพัฒนาของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด เริ่มต้นขึ้นตั้งแต่ยุคกรีกโบราณ มาจนถึงปัจจุบัน หลังจากปี ค.ศ. 1960 วิธีการหาค่าอย่างเหมาะสมถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย มีวิธีใหม่ ๆ ถูกนำเสนอมากมาย โดยเฉพาะวิธีเมตาฮิวริสติกส์ (Metaheuristics algorithm) เป็นวิธีการหาค่าอย่างเหมาะสมทางด้านวิศวกรรมที่เป็นที่นิยม เพราะเป็นวิธีการที่ค่อนข้างนำสมัยและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายสาขา

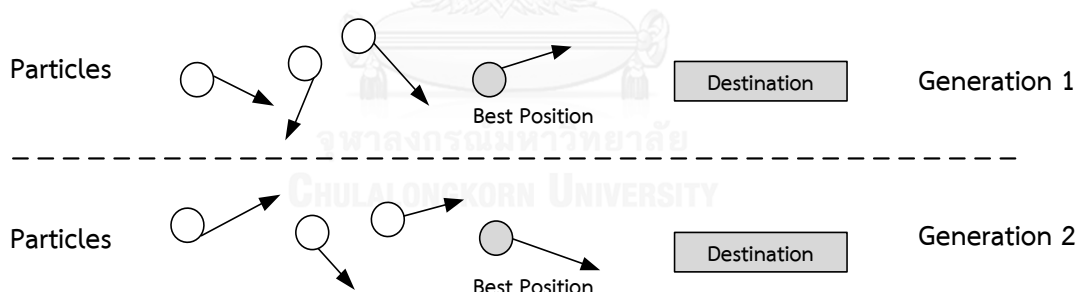
การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบเมตาฮิวริสติกส์ เป็นที่รู้จักในด้านของประสิทธิภาพและเป็นที่นิยมอย่างมากสำหรับปัญหาที่ซับซ้อน วิธีการส่วนใหญ่ของเมตาฮิวริสติกส์ได้รับแรงบันดาลใจมาจากธรรมชาติและพฤติกรรมของสัตว์ อาทิ เช่น วิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) วิธีการจำลองการอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm) วิธีการพาร์ติเคิลสวอร์ม (Particle Swarm Optimization) วิธีการอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization) วิธีการผึ้ง (Bee Algorithm) วิธีการหิ่งห้อย (Firefly Algorithm) และวิธีการฮาร์โมนีเสิร์ช (Harmony Search) เป็นต้น (Singiresu 2009, Yang 2010) ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอวิธีการเพียงบางส่วนที่เป็นที่นิยม ดังต่อไปนี้

วิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) เป็นอัลกอริทึมวิวัฒนาการแบบแรก เสนอโดย Charles Darwin และถูกพัฒนาต่อในปี ค.ศ. 1960 โดย John Holland ได้หลักการมาจากการเลียนแบบพฤติกรรมทางพันธุกรรมในธรรมชาติ มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลซึ่งกันและกันเพื่อสร้างโครโมโซมใหม่ที่พัฒนาตัวเองผ่านกระบวนการสลับสายพันธุ์ (Crossover) การกลายพันธุ์ (Mutation) และการคัดเลือก (Selection) เพื่อค้นหาโครโมโซมที่ดีที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 1.1 แต่วิธีการนี้ไม่เหมาะสำหรับนำไปใช้ในการแก้ปัญหาแบบไม่เชิงเส้น เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายที่สูง



รูปที่ 1.1 การสลับสายพันธุ์และการกลายพันธุ์ของ Genetic Algorithm (วุฒิชัย วงษ์ทัศนีย์กร 2552)

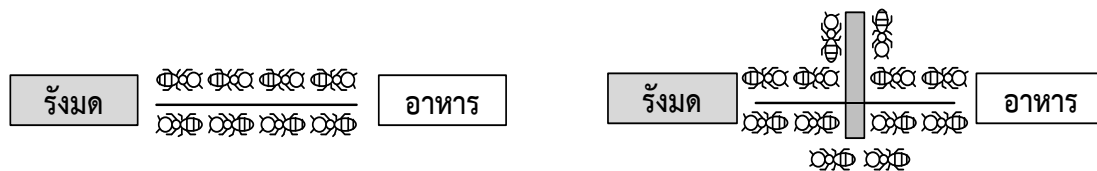
วิธีพาร์ติเคิลสวอร์ม (Particle Swarm Optimization: PSO) ถูกเสนอขึ้นในปี ค.ศ. 1995 โดย Kennedy และ Eberhart เป็นอัลกอริทึมเลียนแบบพฤติกรรมการอพยพของฝูงนกหรือฝูงปลา ไปสู่แหล่งอาหารใหม่ที่ไม่สามารถระบุตำแหน่งได้แน่นอน โดยนกหรือปลาแต่ละตัวจะทำการค้นหาจุดหมายในทิศทางต่างๆ และทำการสื่อสารกันในฝูงเพื่อระบุตำแหน่งของตัวที่อยู่ใกล้แหล่งอาหารมากที่สุด จากนั้นนกหรือปลาตัวที่เหลือจะเคลื่อนที่เข้าหาตัวที่อยู่ในตำแหน่งที่ดีที่สุด กระบวนการนี้จะถูกกระทำซ้ำจนพบตำแหน่งจุดหมายจึงจะสิ้นสุด ด้วยหลักการดังกล่าว ทำให้ทุกอนุภาคเข้ามารวมตัวกันเป็นกระจุกเดียว ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ซึ่งอาจส่งผลให้อนุภาคอาจติดอยู่ในคำตอบแบบเฉพาะที่ (Local optimum) ซึ่งเป็นจุดอ่อนของวิธีการนี้ ทำให้หลายงานวิจัยคิดค้นแนวทางในการปรับปรุงข้อด้อยดังกล่าว



รูปที่ 1.2 การทำงานของ Particle Swarm Optimization (วุฒิชัย วงษ์ทัศนีย์กร 2552)

วิธีอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization: ACO) ถูกเสนอครั้งแรกในปี ค.ศ. 1992 โดย Marco Dorigo หลักการของ ACO มีลักษณะคล้ายกับ PSO แต่เป็นการเลียนแบบการหาอาหารของมด ค้นหาเส้นทางที่สั้นที่สุดจากรังไปยังแหล่งอาหาร โดยระหว่างการค้นหาแต่ละตัวจะปล่อยสารฟีโรโมน (Pheromone) ไว้ตามทางเพื่อสื่อสารให้มดตัวอื่นรับรู้ ซึ่งในกรณีที่เจอสิ่งขีดขวาง มดแต่ละตัวจะทำการตัดสินใจเปลี่ยนโดยสุ่มเส้นทาง เมื่อเวลาผ่านไปจะพบว่าเส้นทางที่สั้นที่สุดจะมีปริมาณของ

สารฟีโรโมนสูงกว่าเส้นทางอื่น ๆ ดังรูปที่ 1.3 วิธีการนี้ค่อนข้างยากต่อการวิเคราะห์ และใช้ระยะเวลาในการลู่เข้าคำตอบ



รูปที่ 1.3 การทำงานของ Ant Colony Optimization (วุฒิชัย วงษ์ทัศน์กร 2552)

วิธีจำลองการอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm: SA) ได้รับแรงบันดาลใจจากกระบวนการหลอมละลายโลหะแข็งด้วยความร้อน จนเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของเหลว จากนั้นทำการควบคุมความเร็วในการลดอุณหภูมิที่พอเหมาะ เพื่อให้โลหะเย็นตัวลงอย่างช้า ๆ ทำให้โมเลกุลของโลหะเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานได้อย่างเสถียร ทำให้ได้โลหะที่มีความเหนียว แต่ไม่เปราะเมื่อกลายเป็นผลึกของแข็งอีกครั้ง และจากการศึกษางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวในงานออกแบบโครงสร้างมีดังนี้

Pantelides และ Tzan (2000) นำ SA มาประยุกต์ใช้ร่วมกับโปรแกรม MISA ในการวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้พลศาสตร์ โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) เพื่อระบุว่าตัวแปรออกแบบใดควรจะมีการปรับลด และในแต่ละรอบการค้นหาตัวแปรออกแบบตัวต่อไปจะได้ออกมาจากการปรับปรุงตัวแปรออกแบบปัจจุบันที่ดีที่สุด จากการศึกษาพบว่า SA สามารถทำงานร่วมกับโปรแกรม MISA ได้เป็นอย่างดี และยังสนับสนุนว่า SA มีประสิทธิภาพและความเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับปัญหาที่มีขอบเขตของเวลาที่แตกต่างกัน (Time-varying constraints)

Ceranic และคณะ (2001) นำเสนอการประยุกต์ใช้ SA ในการออกแบบกำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสม เพื่อหาราคาออกแบบที่ประหยัดที่สุดสำหรับกำแพงกันดินแบบยื่นคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Cantilever Retaining Walls) ภายใต้น้ำหนักจากดิน (Earth) ร่วมกับอุทกสถิต (Hydrostatic) และเพื่อหลีกเลี่ยงการออกนอกขอบเขตจำกัดและปรับปรุงการลู่เข้าสู่คำตอบ จึงทำการใช้ SA ร่วมกับโปรแกรม Object-oriented visual programming language เพื่อเลี่ยงปัญหาดังกล่าวและทำให้สามารถใช้ในโครงสร้างที่ซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Chen และ Su (2002) นำ SA มาปรับปรุงประสิทธิภาพในการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับงานโครงสร้าง โดยการเสนอ 2 วิธีการ ได้แก่ 1) การประเมินหาบริเวณที่มีความเป็นไปได้ (Feasible region) ของผลคำตอบด้วยขอบเขตแบบเชิงเส้น (Linearized constraints) และ 2) การเริ่มค้นหาคำตอบด้วยบริเวณที่มีค่าของตัวแปรออกแบบสูง (higher design variables values) ซึ่งวิธีการแรก



จะทำให้ SA ทำการค้นหาคำตอบแต่เฉพาะในบริเวณที่มีความเป็นไปได้เท่านั้น ส่วนการเริ่มต้นในพื้นที่ที่มีค่าตัวแปรออกแบบสูงจะทำให้สามารถเข้าสู่คำตอบได้แท้จริง และยังเป็น การลดจำนวนการวิเคราะห์ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับบริเวณที่ไม่มีความเป็นไปได้ (Infeasible region) ซึ่งผลงานวิจัยพบว่า สองวิธีดังกล่าวสามารถช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพและลดระยะเวลาในการค้นหาคำตอบได้อย่างดี

Abolbashari และ Mohitzadeh (2007) ศึกษาวิธีการนำ SA มาประยุกต์ใช้ในงานโครงสร้าง โดยเลือกศึกษาชิ้นส่วนคานมาเป็นตัวอย่างในการทดสอบหาขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมที่สุดภายใต้น้ำหนักกระทำในแนวนอนและแนวตั้ง มีการใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) เข้ามาช่วยเสริมประสิทธิภาพในการเข้าสู่คำตอบให้รวดเร็วยิ่งขึ้น ผลงานวิจัยพบว่า การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยให้การคำนวณระหว่างการค้นหาคำตอบทำให้ผลของคำตอบต่อไปไม่หลุดออกนอกบริเวณที่มีความเป็นไปได้ (Feasible region) และยังคงช่วยลดระยะเวลาในการค้นหาคำตอบได้เป็นอย่างดี ผลลัพธ์ที่ได้มีความสมเหตุสมผล

Sonmez (2007) นำ SA ใช้ร่วมกับ ANSYS Parametric Design Language เพื่อหาขนาดและรูปร่างของโครงสร้างในรูปแบบ 2 มิติ ภายใต้น้ำหนักแบบเสมือนสถิตย์ (quasi-static loads) กำหนดขอบเขตการออกแบบด้วยค่าความเค้นพัฒนา (Stresses developed) ในโครงสร้างต้องไม่เกินตามข้อกำหนดและลักษณะการเชื่อมต่อของโครงสร้างต้องไม่มีการสูญเสียระหว่างการค้นหาคำตอบ พร้อมทั้งระบุขอบเขตการเปลี่ยนตำแหน่งของตัวแปรออกแบบและทำการตรวจสอบผลของรูปร่างที่ได้ระหว่างการค้นหาคำตอบด้วยการใส่ตาข่าย (mesh) ตามแบบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อให้ผลคำตอบออกมามีความแม่นยำมากที่สุด จากผลงานวิจัยนี้พบว่า การใส่ตาข่ายเป็นจำนวนที่มากพอจะช่วยให้ผลของคำตอบหรือขนาดและรูปร่างออกมาถูกต้องแม่นยำ

อลงกรณ์ ละม่อม (2550) ประยุกต์ใช้ SA เปรียบเทียบกับฮิสทิสติกส์อัลกอริทึม ในการเลือกขนาดวัสดุเหล็กรูปพรรณที่เหมาะสมแก่โครงสร้างที่มีจุดต่อแบบผสมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โครงสร้างที่ใช้เป็นแบบ 2 มิติ และประกอบด้วยเอลิเมนต์ 2 ชนิด ได้แก่ เอลิเมนต์โครงข้อแข็งและเอลิเมนต์โครงข้อหมุน ผลจากการศึกษาพบว่า การเลือกขนาดวัสดุของทั้งสองอัลกอริทึมมีประสิทธิภาพดี และให้ขนาดวัสดุที่เหมาะสมเหมือนกัน แต่อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวใช้จำนวนรอบในการเข้าสู่คำตอบสูงกว่า เนื่องจากอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวมีการพิจารณาคำตอบทุกค่า รวมทั้งคำตอบที่ดีกว่า ทำให้ต้องใช้ระยะเวลานานเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด

Galeb (2010) ได้ทำการศึกษา นำ SA มาใช้ในการออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ร่วมกับโปรแกรม MATLAB ซึ่งกรณีศึกษาของคานนั้นเป็นคานประเภทเสริมเหล็ก

เดี่ยว (Singly reinforced beam) ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่ตลอดช่วงความยาวคาน โดยศึกษาช่วงความยาวคานตั้งแต่ 6 ถึง 10 เมตร พบว่า SA สามารถใช้หาค้นหาคำตอบของปัญหานี้ได้เป็นอย่างดี

อัศนัย ทาเถา (2556) นำ Microsoft visual basic 6 ประยุกต์ใช้ร่วมกับ SA ในการออกแบบที่เหมาะสมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ารับแรงดัดสองทาง เพื่อหาราคารวมต่ำสุดของเสาที่ออกแบบรับแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดทั้งสองแกน จำนวน 4 ตัวอย่างทดสอบ ผลการศึกษา ได้ทำการสุ่มทดสอบตัวอย่างเพื่อกำหนดค่าตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวสำหรับปัญหาดังกล่าว พบว่า การกำหนดให้ร้อยละ 100 ของราคารวมของเสาในสถานะเริ่มต้นเป็นอุณหภูมิเริ่มต้น และกำหนดให้อัตราการลดอุณหภูมิเท่ากับร้อยละ 2 ทำให้ผลการออกแบบมีเสถียรภาพสูงสุด และพบว่าผลการออกแบบได้เลือกใช้กำลังของวัสดุสูงที่สุด ได้แก่ กำลังของคอนกรีตและเหล็กเสริม มีค่าเท่ากับ 320 ksc และ 4,000 ksc ตามลำดับ ทำให้ปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการมีค่าน้อยมากเพียงร้อยละ 1 จึงกล่าวได้ว่า การออกแบบที่ประหยัดควรเลือกกำลังของวัสดุที่สูง เพราะจะทำให้ลดขนาดหน้าตัดและปริมาณเหล็กเสริมได้เป็นอย่างมากโดยหน้าตัดนั้นยังคงสามารถรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย และกระบวนการค้นหาคำตอบในงานวิจัยนี้ใช้ระยะเวลาเพียง 19 วินาทีเท่านั้นสำหรับทั้ง 4 ตัวอย่างทดสอบ

จากงานวิจัยในอดีตพบว่า อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวมีความน่าสนใจและมีประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้กับงานโครงสร้าง งานวิจัยนี้จึงเสนอวิธีการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมโดยอาศัยอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว เพื่อหาค่าวัสดุก่อสร้างที่ต่ำที่สุด โดยใช้ภาษาจาวาและออกแบบตามมาตรฐาน ACI 318M-11 กรณีศึกษาที่ใช้คือ คาน เสา และโครงข้อแข็งพอร์ทัล รับน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่และน้ำหนักบรรทุกจรในแนวตั้ง

### 1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวร่วมกับภาษาจาวา เพื่อหาค่าวัสดุก่อสร้างรวมต่ำสุด ซึ่งคำนวณจากปริมาตรคอนกรีต พื้นที่แบบหล่อ และน้ำหนักเหล็กเสริม

### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีขอบเขตการศึกษาดังต่อไปนี้

1. พิจารณาชิ้นส่วนโครงสร้างเสาและคานคอนกรีตเสริมเหล็กในรูปแบบโครงข้อแข็งพอร์ทัล

2. น้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อโครงสร้างได้แก่ น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load) และ น้ำหนักบรรทุกจรในแนวดิ่ง (Vertical Live load)
3. วิเคราะห์แรงกระทำภายในของแต่ละชิ้นส่วนของโครงสร้างแบบเชิงเส้น (Linear Analysis) ด้วยวิธีสตีฟเนสโดยตรง (Direct Stiffness Method) โดยกำหนดให้พฤติกรรมของโครงสร้างมีความยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic)
4. การออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กกำหนดให้เป็นไปตามมาตรฐาน ACI 318M-11
5. ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเป็นตัวแปรแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete variables)
6. เหล็กเสริมพิจารณาแต่ปริมาณที่ใช้ ไม่พิจารณาการจัดเรียง
7. ไม่พิจารณาเหล็กปลอก และการโค้งงอของเสา
8. ไม่พิจารณาระยะโค้ง (Deflection) และความลึกลดอย่างน้อย (Minimum thickness) ของคาน

### 1.5 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ มีขั้นตอนการวิจัยดังต่อไปนี้

1. ค้นคว้าและรวบรวมวิธีการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด
2. ศึกษาทฤษฎีการวิเคราะห์และการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก
3. ศึกษาค้นคว้างานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง
4. ศึกษาและพัฒนาภาษาจาวาร่วมกับอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวในการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก
5. วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมและเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา
6. สรุปผลและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function)

ราคาค่าก่อสร้างรวมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ในที่นี้คำนวณจากปริมาณของคอนกรีต น้ำหนักของเหล็กเสริม น้ำหนักของเหล็กปลอก และพื้นที่ของไม้แบบ สามารถเขียนสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของงานวิจัยได้ดังนี้

$$\text{Minimize } z = \sum (c_c V_c + c_s W_s + c_{st} W_{st} + c_f A_f) \quad (1)$$

เมื่อ	$z$ = ราคาค่าก่อสร้างรวม	(บาท)
	$c_c$ = ราคาคอนกรีตต่อหน่วยปริมาตร	(บาท/ลูกบาศก์เมตร)
	$c_s$ = ราคเหล็กเสริมต่อหน่วยน้ำหนัก	(บาท/กิโลกรัม)
	$c_{st}$ = ราคเหล็กปลอกต่อหน่วยน้ำหนัก	(บาท/กิโลกรัม)
	$c_f$ = ราคไม้แบบต่อหน่วยพื้นที่	(บาท/ตารางเมตร)
	$V_c$ = ปริมาตรคอนกรีต	(ลูกบาศก์เมตร)
	$W_s$ = น้ำหนักเหล็กเสริม	(กิโลกรัม)
	$W_{st}$ = น้ำหนักเหล็กปลอก	(กิโลกรัม)
	$A_f$ = พื้นที่ไม้แบบ	(ตารางเมตร)

การคำนวณปริมาตรคอนกรีต น้ำหนักเหล็กเสริม และพื้นที่ไม้แบบของชิ้นส่วนโครงสร้างคาน และเสา เป็นดังต่อไปนี้ (ดูรูปที่ 2.1 ถึง 2.5 ประกอบ)

### ปริมาตรคอนกรีต

$$V_{c(Beam)} = b \times t \times L$$

$$V_{c(Column)} = b \times t \times h$$

โดยที่  $b$  = ความกว้างของคานและเสา (เมตร)

$t$  = ความลึกของคานและเสา (เมตร)

$L$  = ความยาวของคาน (เมตร)

$h$  = ความสูงของเสา (เมตร)

### น้ำหนักเหล็กเสริม

$$W_{s(Beam)} = \left( A_{s,main\ top} + A_{s,main\ bottom} + \frac{1}{3} A_{s,extra\ top\ Left} + \frac{3}{4} A_{s,extra\ bottom\ Middle} + \frac{1}{3} A_{s,extra\ top\ Right} \right) L w_i$$

$$W_{s(Column)} = A_{st} h w_i$$

โดยที่  $A_{s,main\ top}$  = พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมหลักบน (ตารางเมตร)

$A_{s,main\ bottom}$  = พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมหลักล่าง (ตารางเมตร)

$A_{s,extra\ top\ Left}$  = พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมพิเศษบน ซ้าย (ตารางเมตร)

$A_{s,extrabottom\ Middle}$  = พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมพิเศษล่าง กลาง (ตารางเมตร)

$A_{s,extratop\ Right}$  = พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมพิเศษบน ขวา (ตารางเมตร)

$A_{st}$  = พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมยื่นรวม (ตารางเมตร)

$w_i$  = หน่วยน้ำหนักเหล็ก (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

$L$  = ความยาวของคาน (เมตร)

$h$  = ความสูงของเสา (เมตร)

### น้ำหนักเหล็กปลอก

$$W_{st(Beam)} = n l A_s w_i$$

โดยที่  $n$  = จำนวนเหล็กปลอก

$$= \left( \frac{L}{Spacing} + 1 \right) \quad (\text{ปลอก})$$

$l$  = ความยาวเหล็กปลอก 1 ปลอก (เมตร)

$A_s$  = พื้นที่หน้าตัดเหล็กปลอก (ตารางเมตร)

$w_i$  = หน่วยน้ำหนักเหล็ก (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

### พื้นที่ไม้แบบ

$$A_{f(Beam)} = bL + 2tL = L(b + 2t)$$

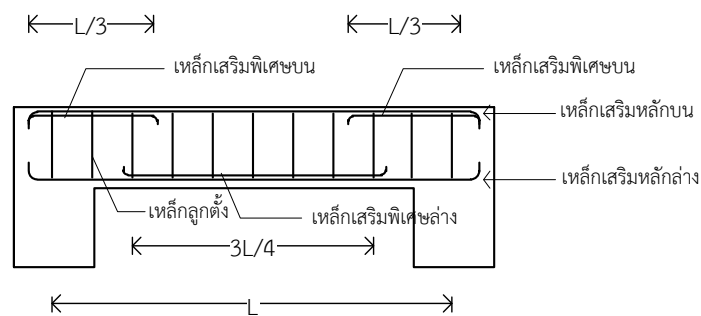
$$A_{f(Column)} = 2bh + 2th = 2h(b + t)$$

โดยที่  $b$  = ความกว้างของคานและเสา (เมตร)

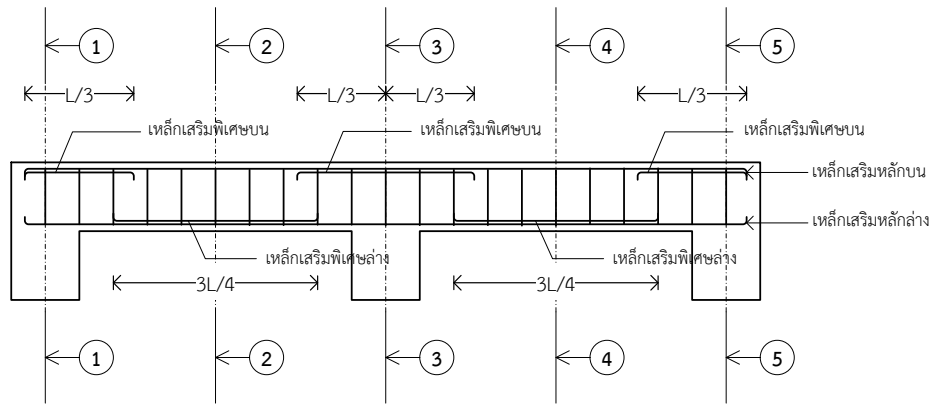
$t$  = ความลึกของคานและเสา (เมตร)

$L$  = ความยาวของคาน (เมตร)

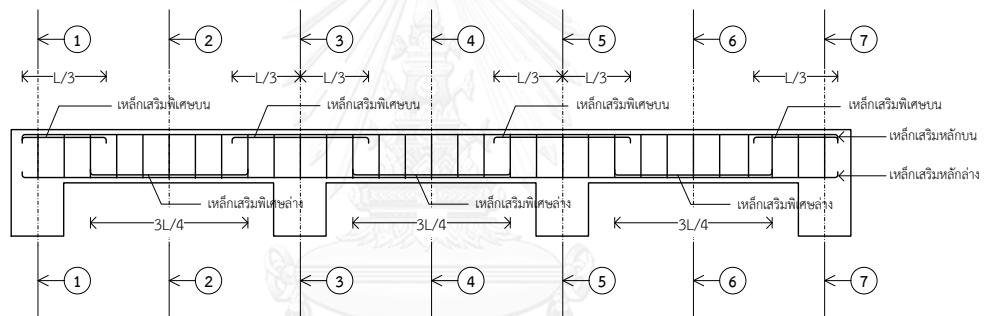
$h$  = ความสูงของเสา (เมตร)



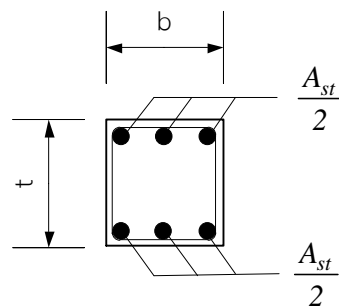
รูปที่ 2.1 เหล็กเสริมในคาน



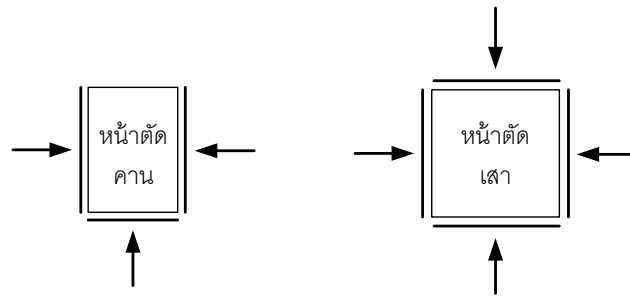
รูปที่ 2.2 การเสริมเหล็กในคานต่อเนื่อง 2 ช่วง



รูปที่ 2.3 การเสริมเหล็กในคานต่อเนื่อง 3 ช่วง



รูปที่ 2.4 การเหล็กเสริมในเสา



รูปที่ 2.5 การคิดพื้นที่ไม้แบบ

## 2.2 ฟังก์ชันข้อจำกัด (Constraint function)

ในการออกแบบโครงสร้าง จะต้องมีการตรวจสอบข้อจำกัดต่าง ๆ ซึ่งคำตอบที่ยอมรับได้จากการออกแบบคือ กำลังชิ้นส่วนของโครงสร้างจะต้องสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างปลอดภัย และเป็นไปตามข้อกำหนดในมาตรฐาน ACI 318M-11 (American Concrete Institute 2011) ดังนี้

$$\phi R_n \geq U \quad (2)$$

$$\phi M_n \geq M_u \quad (2.1)$$

$$\phi V_n \geq V_u \quad (2.2)$$

$$\phi P_n \geq P_u \quad (2.3)$$

โดยที่	$R_n$	คือ กำลังต้านทานระบุ (Nominal Strength)
	$U$	คือ แรงประลัยหรือกำลังที่ต้องการ (Ultimate Strength)
	$M_n$	คือ โมเมนต์ดัดระบุ (Nominal Moment Strength)
	$M_u$	คือ โมเมนต์ดัดประลัย (Ultimate Moment Strength)
	$V_n$	คือ แรงเฉือนระบุ (Nominal Shear Strength)
	$V_u$	คือ แรงเฉือนประลัย (Ultimate Shear Strength)
	$P_n$	คือ แรงแนวแกนระบุ (Nominal Axial Strength)
	$P_u$	คือ แรงแนวแกนประลัย (Ultimate Axial Strength)
	$\phi$	คือ ตัวคูณลดกำลัง ตาม ACI 318M-11 ระบุไว้ดังนี้



สำหรับหน้าตัดควบคุมด้วยแรงดึง	$\phi = 0.90$
สำหรับหน้าตัดควบคุมด้วยแรงอัด	
- ในเสาปลอกเกลียว	$\phi = 0.75$
- ในหน้าตัดอื่น ๆ	$\phi = 0.65$
สำหรับแรงเฉือนและแรงบิด	$\phi = 0.75$
สำหรับแรงกดบนคอนกรีต	$\phi = 0.65$

นอกจากนี้ ACI 318M-11 ได้ระบุข้อกำหนดสำหรับตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกในกรณีที่มีน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรกระทำร่วมกันต่อโครงสร้าง ดังนี้

$$U = 1.2 \cdot D + 1.6 \cdot L \quad (3)$$

$$M_u = 1.2 \cdot M_D + 1.6 \cdot M_L \quad (3.1)$$

$$V_u = 1.2 \cdot V_D + 1.6 \cdot V_L \quad (3.2)$$

$$P_u = 1.2 \cdot P_D + 1.6 \cdot P_L \quad (3.3)$$

โดยที่  $D$  คือ แรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่

$L$  คือ แรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร

### 2.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้าง

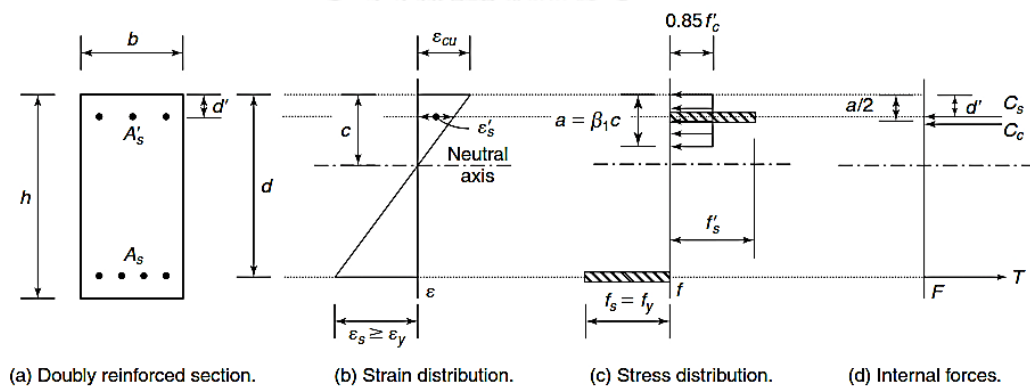
ในงานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้โปรแกรม JSM (Smittakorn 2008) ช่วยในการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิเคราะห์เป็นแบบเชิงเส้น (Linear Analysis) สมมติให้พฤติกรรมของโครงสร้างมีความยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) และใช้วิธีสติฟเนสโดยตรง (Direct Stiffness Method) ในการคำนวณหาแรงภายในที่ต้องการของชิ้นส่วนโครงสร้าง ประกอบด้วย โมเมนต์ดัดประลัย ( $M_u$ ) แรงเฉือนประลัย ( $V_u$ ) และแรงแนวแกนประลัย ( $P_u$ ) สำหรับใช้ตรวจสอบคำตอบที่เป็นไปได้ต่อไป

## 2.2.2 การออกแบบโครงสร้าง

โดยทั่วไป การออกแบบโครงสร้าง คือ การคำนวณหาขนาดของชิ้นส่วนที่มีกำลังต้านทานมากกว่าหรือเท่ากับกำลังที่ต้องการ แต่กระบวนการค้นหาคำตอบของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว จะทำการสุ่มเลือกคำตอบหรือขนาดของชิ้นส่วนและคุณสมบัติของวัสดุต่าง ๆ แล้วตรวจสอบว่าชิ้นส่วนนั้นมีกำลังต้านทานเพียงพอหรือไม่ ทำให้นักวิจัยนี้ไม่สามารถใช้วิธีการออกแบบโครงสร้างได้โดยตรง แต่จะใช้การวิเคราะห์กำลังของชิ้นส่วน การออกแบบชิ้นส่วนคาน เสา และโครงข้อแข็ง คอนกรีตเสริมเหล็กจะใช้วิธีกำลัง (Strength Design Method: SDM) ตามมาตรฐาน ACI 318M-11 (Nilson, Darwin et al. 2010)

### ชิ้นส่วนคาน

การวิเคราะห์กำลังต้านทานของคานประกอบด้วย 2 ส่วน คือ การรับแรงดัด และการรับแรงเฉือน ในการรับแรงดัดนั้นจะพิจารณาเป็นหน้าตัดคานเสริมเหล็กคู่ (Doubly reinforced beam) ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แรงภายในบนหน้าตัดคานเสริมเหล็กคู่ (Nilson, Darwin et al. 2010)

ทั้งนี้ งานวิจัยนี้จะยอมรับชิ้นส่วนคานที่วิบัติแบบแรงดึงเท่านั้น ( $\epsilon_s \geq 0.005, \phi = 0.9$ ) โดยพิจารณาให้กำลังของเหล็กเสริมรับแรงดึง ( $f_s$ ) ถึงจุดครากเท่านั้น หรือ ( $f_s = f_y$ ) และสำหรับกำลังเหล็กเสริมรับแรงอัด ( $f'_s$ ) อาจถึงจุดครากหรือไม่ก็ได้ โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าโมเมนต์ดัดระบุ ( $M_n$ ) ดังนี้

- 1) กำหนดขนาดของชิ้นส่วนคานได้แก่ ความกว้าง ( $b$ ) ความลึก ( $t$ ) ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึง ( $A_s$ ) และปริมาณเหล็กเสริมรับแรงอัด ( $A'_s$ )

2) คำนวณหาค่า  $\beta_1$  จากสมการ

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05 \left( \frac{f'_c - 28}{7} \right) \quad \text{โดย } 0.65 \leq \beta_1 \leq 0.85$$

เมื่อ  $f'_c$  มีหน่วยเป็น  $MPa$

3) สมมติให้เหล็กเสริมรับแรงดึงและเหล็กเสริมรับแรงอัดถึงจุดคราก ( $f_s = f'_s = f_y$ ) จากนั้น คำนวณหาค่า  $c$  และ  $a$  โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของคอนกรีต ( $C$ ) และกำลังของเหล็กเสริม ( $T$ ) ด้วยสมการสมดุลของหน้าตัดคานดังนี้

$$T = C \quad \text{โดยที่ } C = C_c + C_s$$

$$\text{เมื่อ } C_c = 0.85 f'_c \beta_1 c b$$

$$C_s = A'_s f_y$$

$$\text{และ } T = A_s f_y$$

$$\text{จะได้ } A_s f_y = 0.85 f'_c \beta_1 c b + A'_s f_y$$

$$\text{เมื่อ } c = \frac{(A_s - A'_s) f_y}{0.85 f'_c \beta_1 b}$$

$$\text{และ } a = \beta_1 c$$

4) ตรวจสอบสมมติฐานจากข้อที่ 3) ว่าเป็นจริงหรือไม่ โดยคำนวณหาค่าความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึง  $\epsilon_s$  และของเหล็กเสริมรับแรงอัด  $\epsilon'_s$  เปรียบเทียบกับ  $\epsilon_y$  ทั้งนี้ งานวิจัยนี้ได้กำหนดความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.005 เพื่อให้ชิ้นคานวิบัติด้วยแรงดึงเท่านั้น

$$\epsilon_s = \left( \frac{d - c}{c} \right) \epsilon_{cu}$$

$$\epsilon'_s = \left( \frac{c - d'}{c} \right) \epsilon_{cu}$$

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s}$$

หากเหล็กเสริมรับแรงดึงและเหล็กเสริมรับอัดถึงจุดครากจริง จะได้ว่า  $\varepsilon_s \geq 0.005$  และ  $\varepsilon'_s \geq \varepsilon_y$  ทำให้  $f_s = f'_s = f_y$  ตามที่สมมติไว้ ซึ่งหากไม่เป็นตามนี้ ให้ข้ามไปยังขั้นตอนที่ 6)

5) คำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดระบุ ( $M_n$ ) ดังสมการ

$$M_n = 0.85 f'_c ab \left( d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f'_s (d - d')$$

$$\text{และ } \phi M_n = \phi \left[ 0.85 f'_c ab \left( d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f'_s (d - d') \right] \quad \text{เมื่อ } \phi = 0.90$$

6) สมมติให้เหล็กเสริมรับแรงอัดยังไม่ถึงจุดคราก  $f'_s = \varepsilon'_s E_s$  แต่เหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดครากแล้ว  $\varepsilon_s \geq \varepsilon_y$  หรือ  $f_s = f_y$  จากนั้นคำนวณหาค่า  $c$  และ  $a$  ตามสมการ

$$A_s f_y = 0.85 f'_c \beta_1 c b + A'_s \left( \frac{c - d'}{c} \right) \varepsilon_{cu} E_s$$

$$a = \beta_1 c$$

7) ตรวจสอบสมมติฐานจากข้อที่ 6) โดยคำนวณหาความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึง  $\varepsilon_s$  และความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงอัด  $\varepsilon'_s$  อีกครั้ง พร้อมทั้งคำนวณหาหน่วยแรงของเหล็กเสริมรับแรงอัด  $f'_s$  ตามสมการ

$$\varepsilon_s = \left( \frac{d - c}{c} \right) \varepsilon_{cu} \geq 0.005$$

$$\varepsilon'_s = \left( \frac{c - d'}{c} \right) \varepsilon_{cu} \leq \varepsilon_y$$

$$\text{จะได้ } f'_s = \varepsilon'_s E_s$$

หากตรวจสอบแล้วเป็นไปตามสมการข้างต้น ให้ดำเนินการต่อในขั้นตอนที่ 5) เพื่อหาค่าโมเมนต์ดัดระบุ ( $M_n$ ) แต่หากไม่เป็นตามสมมติฐานข้างต้นจะไม่ยอมรับชิ้นส่วนคานนั้น และจะทำการสู่มหาขนาดคานและปริมาณเหล็กเสริมใหม่

### แรงเฉือนในคาน

สำหรับกำลังรับแรงเฉือนของคานเกิดจากกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตและกำลังรับแรงเฉือนจากเหล็กเสริมทางขวาง โดยสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$\phi V_n = \phi(V_c + V_s) \quad (4)$$

โดยที่  $V_n$  คือ แรงเฉือนระบุ

$V_c$  คือ แรงเฉือนจากคอนกรีต

$V_s$  คือ แรงเฉือนจากเหล็กเสริมทางขวาง

$\phi$  คือ ตัวคูณลดกำลังสำหรับแรงเฉือน เท่ากับ 0.75

ขั้นตอนการวิเคราะห์การเสริมเหล็กรับแรงเฉือนในคานมีดังนี้

1) พิจารณาน้ำต้ววิกฤตและคำนวณหาแรงเฉือนประลัย ( $V_u$ ) สูงสุดที่เกิดขึ้นในคาน

2) คำนวณกำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีต ตามสมการ

$$\phi V_c = \phi(0.17\lambda\sqrt{f'_c}b_wd)$$

โดยที่  $\phi = 0.75$  และ  $\lambda = 1.00$

3) คำนวณกำลังต้านทานแรงเฉือนที่ต้องการสำหรับเหล็กปลอก ตามสมการ

$$\phi V_s = V_u - \phi V_c$$

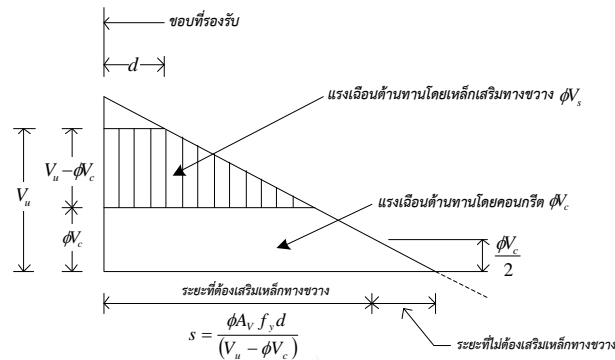
4) ตรวจสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนสูงสุดที่หน้าตัดจะรับได้

กรณีที่ 1  $\phi V_s \leq \phi(0.66\lambda\sqrt{f'_c}b_wd)$  หน้าตัดรับกำลังต้านทานแรงเฉือนได้

กรณีที่ 2  $\phi V_s > \phi(0.66\lambda\sqrt{f'_c}b_wd)$  หน้าตัดรับกำลังต้านทานแรงเฉือนไม่ได้

หากตรวจสอบแล้วพบว่าเป็นกรณีที่ 2 จะทำการสุ่มเลือกชิ้นส่วนคานใหม่

- 5) พิจารณาระยะเรียงของเหล็กปลอก โดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่  $V_u \geq \phi V_c$  และช่วงที่  $\frac{1}{2}\phi V_c < V_u < \phi V_c$  ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ไดอะแกรมของแรงเฉือนในคาน

- 6) คำนวณหาระยะเรียงของเหล็กปลอก แบ่งออกได้ 3 กรณี ได้แก่

กรณีที่ 1  $V_u \geq \phi V_c$  จะได้จากการกำหนดขนาดของเหล็กปลอก ( $A_v$ )

$$\text{ระยะเรียงเหล็กปลอก} \quad s = \frac{A_v f_y d}{V_s} = \frac{\phi A_v f_y d}{(V_u - \phi V_c)}$$

กรณีที่ 2  $\frac{1}{2}\phi V_c < V_u < \phi V_c$  จะได้จากปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือนน้อยที่สุด ( $A_{v,\min}$ )

$$\text{ระยะเรียงเหล็กปลอก} \quad s = \frac{A_{v,\min} f_{yt}}{0.062\sqrt{f'_c}b_w} \geq \frac{A_{v,\min} f_{yt}}{0.35b_w}$$

กรณีที่ 3  $V_u \leq \frac{1}{2}\phi V_c$  จะไม่ทำการเสริมเหล็กปลอกแก้หน้าตัดคาน

- 7) คำนวณระยะเรียงของเหล็กปลอกมากที่สุด พิจารณาจากค่า  $V_s$  โดยมีเงื่อนไขดังนี้

$$\text{หาก } V_s \leq 0.33\sqrt{f'_c}b_w d \quad \text{ระยะเรียงต้องไม่เกิน} \quad s = \frac{d}{2}$$

$$\text{หรือ } 0.33\sqrt{f'_c}b_w d < V_s \leq (0.66\lambda\sqrt{f'_c}b_w d) \quad \text{ระยะเรียงต้องไม่เกิน} \quad s = \frac{d}{4}$$

## ชิ้นส่วนเสา

สำหรับเสา จะพิจารณาเป็นเสาสั้นรับแรงในแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัด และไม่พิจารณาการโก่งเดาะของเสา วิเคราะห์กำลังต้านทานของเสาโดยการเขียนแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction Diagram) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการประมาณแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ด้วยสมการเส้นตรง 3 เส้น และแบ่งช่วงพิจารณาเป็น 2 สภาวะ คือ สภาวะวิบัติจากแรงอัด (Compression failure) และสภาวะวิบัติจากแรงดึง (Tension failure) ดังรูปที่ 2.8 เพื่อความสะดวกในการออกแบบ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) เลือกขนาดชิ้นส่วนเสาได้แก่ ความกว้าง ( $b$ ) ความลึก ( $t$ ) และปริมาณเหล็กเสริมยื่นรวม ( $A_{st}$ )
- 2) พิจารณากำลังต้านทานในกรณีหน้าตัดเสารับเฉพาะแรงตามแนวแกน  $\phi P_{n(\max)}$  เมื่อโมเมนต์ดัดมีค่าเป็นศูนย์ ดังสมการ

$$\text{จาก} \quad P_{n0} = 0.85 f'_c A_c + f_y A_{st} \quad \text{โดยที่} \quad A_c = A_g - A_{st}$$

$$\text{และ} \quad P_{n(\max)} = 0.80 P_0$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \phi P_{n(\max)} = \phi 0.80 (0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}) \quad \text{เมื่อ} \quad \phi = 0.65$$

- 3) พิจารณาที่สภาวะวิบัติสมดุลเพื่อหาค่า  $\phi P_{nb}$  และ  $\phi M_{nb}$  กล่าวคือ พิจารณาสภาวะซึ่งความเครียดที่ผิวคอนกรีตด้านรับแรงอัดถึงค่าประลัย  $\epsilon_{cu} = 0.003$  และความเครียดในเหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุด

คราก  $\epsilon_s = \epsilon_y = \frac{f_y}{E_s}$  พร้อมกันพอดี โดยสามารถคำนวณหาค่า  $\phi P_{nb}$  และ  $\phi M_{nb}$  ได้ดังนี้

$$c_b = \frac{0.003}{\left( \frac{f_y}{E_s} + 0.003 \right)} d$$

$$a_b = \beta_1 c_b$$

จากสมดุลของแรงในแนวตั้ง  $P_b = C_c + C_s - T$

$$\text{เมื่อ} \quad C_c = 0.85 f'_c ab = 0.85 f'_c \beta_1 c_b b$$

$$C_s = A_s f'_s$$

$$\text{และ} \quad T = A_s f_y$$

คำนวณหน่วยแรง  $f'_s$  จากสมการ

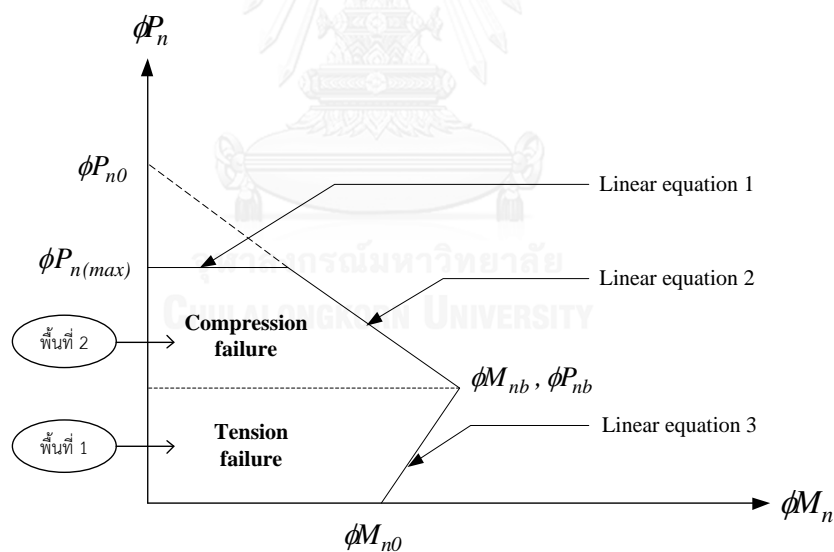
$$f'_s = \varepsilon_{cu} E_s \left( \frac{c_b - d'}{c_b} \right) \leq f_y$$

ดังนั้น  $\phi P_{nb} = \phi (0.85 f'_c \beta_1 c_b b + A'_s f'_s - A_s f_y)$

และ  $\phi M_{nb} = \phi \left( C_c \left( \frac{h}{2} - \frac{a_b}{2} \right) + C_s \left( \frac{h}{2} - d' \right) + T \left( d - \frac{h}{2} \right) \right)$  เมื่อ  $\phi = 0.65$

4) พิจารณากรณีหน้าตัดเสารับเฉพาะโมเมนต์ดัด  $\phi M_{n0}$  เมื่อแรงตามแนวแกนมีค่าเป็นศูนย์ โดยใช้หลักการวิเคราะห์เช่นเดียวกับหลักการกำลังต้านทานโมเมนต์ของชิ้นส่วนคานเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด ดังได้กล่าวแล้วข้างต้น

5) นำค่า  $\phi P_{n(max)}$ ,  $\phi P_{nb}$ ,  $\phi M_{nb}$  และ  $\phi M_{n0}$  ที่ได้มาเขียนแผนภูมิปฏิสัมพันธ์



รูปที่ 2.8 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์สำหรับการแบ่งขอบเขตการวิเคราะห์

6) ตรวจสอบกำลังต้านทาน จากแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ในรูปที่ 2.8 ดังนี้

กรณีที่ 1  $P_u$  มีค่าน้อยกว่าค่า  $\phi P_{nb}$  ให้ทำการตรวจสอบว่า  $M_u$  อยู่ในพื้นที่ที่ 1 จริงหรือไม่ ด้วยขอบเขตตามสมการเส้นตรงที่ 3

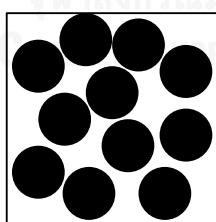


กรณีที่มีค่ามากกว่าค่า  $\phi P_{nb}$  แต่ไม่เกินค่า  $\phi P_{n(\max)}$  ให้ทำการตรวจสอบว่า  $M_u$  อยู่ในพื้นที่ที่ 2 หรือไม่ ด้วยขอบเขตตามสมการเส้นตรงที่ 2

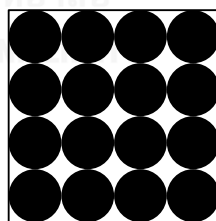
หากเป็นจริงตรงกับกรณีใด จะยอมรับคำตอบนั้นและดำเนินการต่อไป แต่หากไม่เป็นจริงให้ทำการสุ่มหน้าตัดใหม่

### 2.3 อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm)

อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวถูกนำเสนอขึ้นในปี ค.ศ. 1983 โดย Scott Kirkpatrick และคณะ (Kirkpatrick, Gelatt et al. 1983) ใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบสุ่ม อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวนั้นได้รับแรงบันดาลใจมาจากกระบวนการอบเหนียวในโลหะวิทยา โดยเริ่มต้นด้วยอุณหภูมิที่สูงในการหลอมโลหะ จากนั้นทำการลดอุณหภูมิลงอย่างช้า ๆ เพื่อให้โครงสร้างทางผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในต่ำ อะตอมมีระยะเวลาพักในการหาตำแหน่งใหม่ สามารถจัดเรียงตัวได้อย่างมีระเบียบดังรูปที่ 2.9 เมื่อโลหะเย็นตัวลงจะทำให้คุณสมบัติของโลหะที่ได้มีความสมบูรณ์ เสถียร แข็งแรงทนทาน เหนียวและไม่เปราะง่าย แต่หากไม่ทำการควบคุมการลดอุณหภูมิ หรือปล่อยให้อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว จะส่งผลให้โลหะเกิดจุดบกพร่องทางโครงสร้างและคุณสมบัติทางกายภาพที่ได้จะไม่เสถียร มีความแข็งแรงแต่เปราะ ด้วยหลักการดังกล่าวจึงนำไปสู่การประยุกต์ใช้งานแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด



การเรียงตัวของอะตอม  
ขณะหลอมละลาย

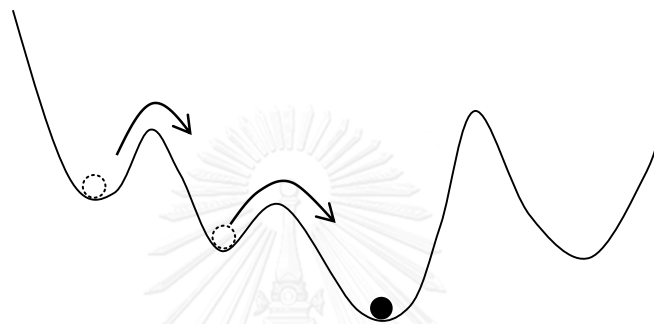


การเรียงตัวของอะตอม  
ณ สถานะสุดท้าย

รูปที่ 2.9 การเรียงตัวของอะตอม

ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวนั้น สามารถทำได้ด้วยการกำหนดให้ผลเฉลยของปัญหาเสมือนสถานะของโลหะ ส่วนสถานะของพลังงานจะเปรียบเสมือนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งได้จากการคำนวณจากผลเฉลยของปัญหานั้น ๆ ดังนั้นสถานะของพลังงานที่ต่ำที่สุดจะสามารถเปรียบได้กับผลเฉลยที่ดีที่สุด การควบคุมการลดอุณหภูมิลงอย่างช้า

ๆ เปรียบเสมือนระยะเวลาที่มากพอสำหรับการค้นหาคำตอบ และจุดเด่นเฉพาะตัวของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวนั้น คือการยอมรับคำตอบไม่เพียงแต่คำตอบที่ดีกว่าเท่านั้น แต่ยังคงพิจารณาคำตอบที่แย่กว่าด้วย ทำให้คำตอบสามารถกระโดดไปมาดังรูปที่ 2.10 และทำให้หลุดเข้าสู่คำตอบที่แท้จริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งต่างจากวิธีค้นหาคำตอบแบบความลาดชัน (Gradient-Based) และวิธีไต่เขา (Hill-Climbing) ที่พิจารณาแต่ผลของคำตอบที่ดีกว่าเท่านั้น ทำให้คำตอบอาจตกอยู่ในจุดเหมาะสมเฉพาะที่ (Local optimum) ได้ (Yang 2010)



รูปที่ 2.10 การทำงานของ Simulated Annealing Algorithm

การยอมรับคำตอบจะพิจารณาจากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของผลคำตอบใหม่ที่ดีกว่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ก่อนหน้าหรือไม่ หากดีกว่าจะยอมรับผลคำตอบนั้นทันที แต่หากแย่กว่าจะทำการตรวจสอบกับความน่าจะเป็นที่ได้จากการสุ่มจึงจะยอมรับคำตอบ ดังสมการ

$$p = e^{\frac{-\Delta z}{T}} \geq p_r \quad (5)$$

โดยที่  $\Delta z$  คือ ผลต่างของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

$p$  คือ ความน่าจะเป็นในการยอมรับผลคำตอบ

$p_r$  คือ ความน่าจะเป็นที่ได้จากการสุ่มระหว่าง 0 ถึง 1

$T$  คือ อุณหภูมิปัจจุบัน

อัตราการลู่เข้าสู่คำตอบจะถูกควบคุมด้วยค่าของอุณหภูมิเริ่มต้น และอัตราการลดอุณหภูมิ ซึ่งมีความสำคัญต่อกระบวนการค้นหาคำตอบดังนี้

อุณหภูมิเริ่มต้น ( $T_0$ ) มีผลต่อความน่าจะเป็นในการตัดสินใจเลือกคำตอบตัวต่อไป หากกำหนดให้อุณหภูมิเริ่มต้นมีค่าสูงมาก จะทำให้ค่าความน่าจะเป็นลู่เข้าสู่หนึ่ง ซึ่งหมายความว่าคำตอบล่าสุดนั้นจะถูกยอมรับ แต่หากกำหนดให้มีค่าต่ำมาก ทำให้ค่าความน่าจะเป็นลู่เข้าสู่ศูนย์ คำตอบที่แยกว่าจะไม่ถูกยอมรับ อย่างไรก็ตาม หากกำหนดให้อุณหภูมิเริ่มต้นมีค่าสูงมากเกินไป อาจส่งผลให้ระบบติดอยู่ในสถานะของพลังงานที่สูง ซึ่งทำให้ยากต่อการลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีที่สุด ในทางกลับกัน หากค่าอุณหภูมิต่ำเกินไป อาจจะมีพลังงานไม่เพียงพอ ทำให้คำตอบอาจจะตกอยู่ในจุดที่คล้ายจุดต่ำสุด ดังนั้น อุณหภูมิเริ่มต้นที่เหมาะสมของระบบควรมีค่าสูง โดยขึ้นอยู่กับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละปัญหา สำหรับค่าอุณหภูมิสุดท้ายควรจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์สอดคล้องตามหลักทฤษฎี ซึ่งนั่นหมายถึงผลคำตอบที่แยกว่าจะไม่ถูกยอมรับอีกต่อไป ในทางปฏิบัติ หากกำหนดค่าอุณหภูมิสุดท้ายเท่ากับศูนย์ อาจจะมีการประเมินค่าของผลคำตอบได้อีก ดังนั้น จึงควรกำหนดให้ค่าอุณหภูมิสุดท้ายมีค่าต่ำมาก ๆ เช่น  $10^{-10}$  -  $10^{-5}$  ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณภาพของผลของคำตอบและระยะเวลาในการค้นหาของแต่ละปัญหา (Yang 2010)

อัตราการลดอุณหภูมิ (Annealing Schedule) เป็นตัวกำหนดความเร็วหรือจำนวนรอบในการค้นหาคำตอบ โดยทั่วไปจะใช้วิธีการทางเรขาคณิต คือการลดอุณหภูมิด้วยตัวปรับค่า  $\alpha$  ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 โดยสามารถเขียนในรูปของสมการได้ดังนี้

$$T_i = \alpha T_{i-1} \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

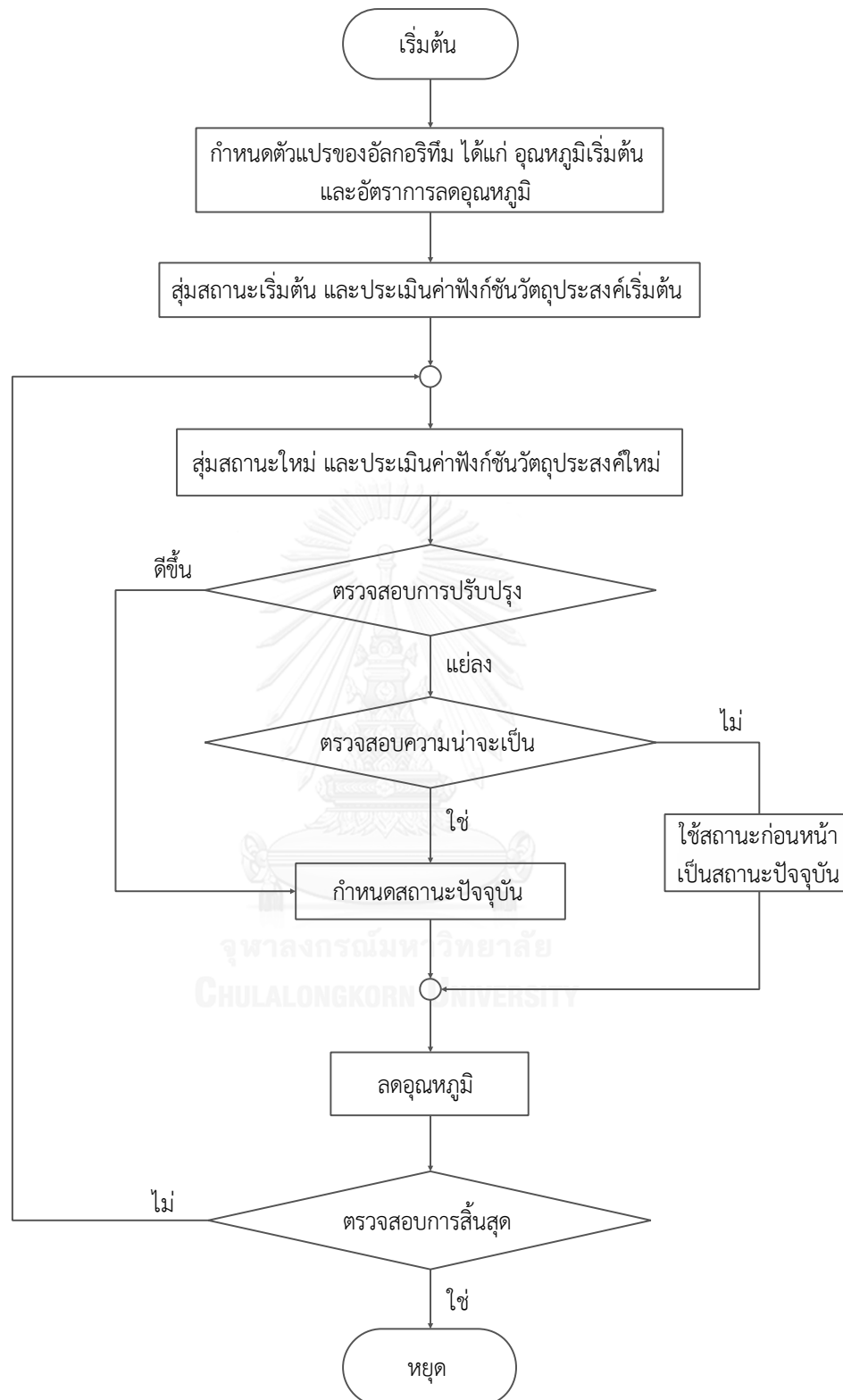
โดยที่  $T$  คือ ค่าอุณหภูมิ

$i$  คือ จำนวนรอบที่กระทำซ้ำ

ประโยชน์ของวิธีการลดอุณหภูมิแบบเรขาคณิตนี้ จะทำให้อุณหภูมิลดลงและลู่เข้าใกล้ศูนย์เมื่อระยะเวลาผ่านไป ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องกำหนดจำนวนรอบกระทำซ้ำให้แก่ระบบ ด้วยเหตุนี้ทำให้วิธีการนี้มีความง่ายต่อการใช้งาน อย่างไรก็ตาม ในกระบวนการค้นหาคำตอบไม่ควรทำการลดอุณหภูมิลงเร็วหรือช้าเกินไป เพราะหากระบบถูกลดอุณหภูมิลงเร็วเกินไป จะทำให้การลู่เข้าสู่คำตอบรวดเร็วเช่นกัน แต่คำตอบที่ได้อาจจะตกอยู่ในวงแคบหรือจุดที่คล้ายจุดต่ำสุด ในทางตรงกันข้าม หากลดอุณหภูมิลงช้าเกินไป จะทำให้ใช้ระยะเวลาในการค้นหาคำตอบนานเกินความจำเป็น ในทางปฏิบัติจะกำหนดค่า  $\alpha$  อยู่ระหว่าง 0.70 ถึง 0.95 (Yang 2010)

สำหรับขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวสามารถแบ่งออกเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้ (ดูรูปที่ 2.11 ประกอบ)

1. กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหา
2. ระบุอุณหภูมิเริ่มต้น ( $T_0$ ) และอัตราการลดอุณหภูมิ ( $1 - \alpha$ )
3. เลือกสถานะคำตอบเริ่มต้นโดยการสุ่ม พร้อมทั้งคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เริ่มต้น
4. เลือกสถานะคำตอบใหม่โดยการสุ่ม พร้อมทั้งคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใหม่
5. ตรวจสอบผลคำตอบ หากสถานะคำตอบใหม่ดีกว่า ระบบจะยอมรับและกำหนดให้เป็นสถานะคำตอบปัจจุบัน และข้ามไปขั้นตอนที่ 7 หากสถานะคำตอบใหม่ด้อยกว่า ให้ดำเนินการในขั้นตอนที่ 6
6. คำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และตรวจสอบการยอมรับด้วยความน่าจะเป็นด้วยสมการที่ (5)
7. ปรับลดอุณหภูมิของระบบตามสมการที่ (6)
8. ตรวจสอบเงื่อนไขการสิ้นสุดของระบบ โดยทั่วไป กำหนดให้เป็นอุณหภูมิสุดท้ายของระบบ โดยมีค่าเข้าใกล้ศูนย์



รูปที่ 2.11 ผังการทำงานของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว

### บทที่ 3

#### ขั้นตอนการคำนวณ

#### 3.1 ตัวแปรหลักและขอบเขต

ตัวแปรหลักที่ใช้ในการออกแบบคานและเสา ประกอบด้วย ความกว้าง ( $b$ ) ความลึก ( $t$ ) ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึง ( $A_s$ ) และปริมาณเหล็กเสริมรับแรงอัด ( $A'_s$ ) เพื่อให้สะดวกต่อการนำผลคำตอบจากโปรแกรมมาใช้ในการปฏิบัติงานจริง งานวิจัยนี้จึงเลือกการสุ่มตัวแปรเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete variables) โดยกำหนดขอบเขตของตัวแปรต่างๆ ไว้ในตารางที่ 3.1 และราคาวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นราคาวัสดุก่อสร้างส่วนกลาง กรุงเทพมหานคร ของกระทรวงพาณิชย์ ประจำเดือน เมษายน พ.ศ. 2558 ซึ่งเป็นราคาเงินสด ไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม ค่าขนส่ง และค่าแรงงาน ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ขอบเขตของตัวแปรต่าง ๆ สำหรับการคำนวณออกแบบ

ตัวแปร	ขอบเขต	หน่วย	หมายเหตุ
กำลังอัดคอนกรีต	28	MPa	ค่าคงที่
กำลังของเหล็กเสริม	400	MPa	ค่าคงที่
กำลังของเหล็กกล้าดัด	240	MPa	ค่าคงที่
สำหรับชิ้นส่วนคาน			
ความกว้างและความลึก	200 - 500	mm	ปรับขึ้น/ ลงครั้งละ 25 mm
ระยะหุ้มคอนกรีต	50 หรือ 65	mm	เลือกใช้ค่าใดค่าหนึ่งสำหรับแต่ละกรณีศึกษา
ขนาดเหล็กเสริม	DB12 - DB28	-	ปรับขึ้น/ ลงครั้งละ 1 ขนาด
จำนวนเหล็กเสริมหลักบนและล่าง	2	เส้น/ ตำแหน่ง	-
จำนวนเหล็กเสริมพิเศษบนและล่าง	0 - 10	เส้น/ ตำแหน่ง	ปรับขึ้น/ ลงครั้งละ 1 เส้น
เหล็กปลอก	RB9	-	-
สำหรับชิ้นส่วนเสา			
ความกว้างและความลึก	200 - 500	mm	ปรับขึ้น/ ลงครั้งละ 25 mm
ระยะหุ้มคอนกรีต	65	mm	ค่าคงที่
ขนาดเหล็กยึด	DB12 - DB28	-	ปรับขึ้น/ ลงครั้งละ 1 ขนาด
จำนวนเหล็กยึดรับแรงอัด/แรงดึง	2 - 10	เส้น/ ตำแหน่ง	ปรับขึ้น/ ลงครั้งละ 1 เส้น

ตารางที่ 3.2 ราคาต่อหน่วยสำหรับการคิดราคาวัสดุก่อสร้าง

วัสดุ	ราคาต่อหน่วย	หน่วย
คอนกรีต	2,550	บาท/ ลูกบาศก์เมตร
เหล็กเสริม	16.89	บาท/ กิโลกรัม
เหล็กลูกตั้ง	17.44	บาท/ กิโลกรัม
ไม้แบบ	150	บาท/ ตารางเมตร

ทั้งนี้ ราคาเหล็กเสริมเป็นราคาค่าเฉลี่ยของเหล็กเส้นกลมผิวข้ออ้อย SD40 (มอก.) ตั้งแต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ถึง 28 มม. สำหรับชิ้นส่วนคาน จะใช้เหล็กปลอกขนาด 9 มิลลิเมตร (RB9) 2 ขาเสมอ โดยออกแบบหาระยะเรียงให้เหมาะสมกับหน้าตัดที่สัมนั้น ๆ ทั้งนี้ งานวิจัยนี้ไม่อาจพิจารณาการจัดเรียงเหล็กเสริมในชิ้นส่วนคานและเสา เพื่อใช้ในการก่อสร้างจริงได้ เพราะจะทำให้ปัญหาของงานวิจัยนี้ยุ่งยากและซับซ้อนเกินไป ดังนั้น วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องพิจารณาปรับแก้ผลลัพธ์ที่ได้ตามความเหมาะสมก่อนจะนำไปใช้ก่อสร้างจริง

### 3.2 ขั้นตอนการออกแบบอย่างเหมาะสม

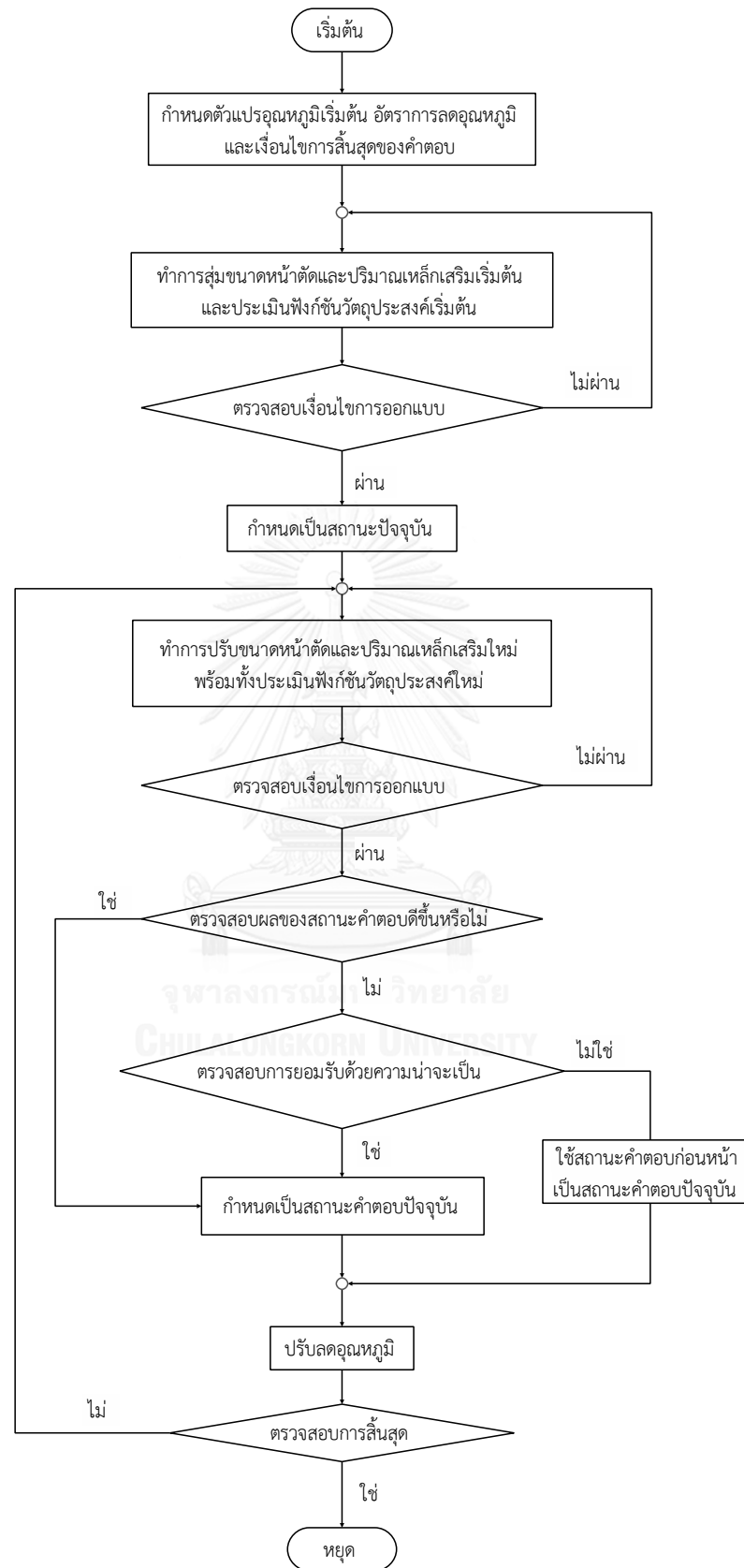
งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้โปรแกรม JSM ซึ่งเขียนด้วยภาษาจาวา ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง เช่น คาน เสา โครงข้อแข็ง โครงถัก เป็นต้น โดยได้ทำการแก้ไขเพิ่มเติมคลาส (Class) และเมธอด (Method) เข้าไปในโปรแกรม เพื่อประยุกต์ใช้กับอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวสำหรับการออกแบบโครงสร้างอย่างเหมาะสม และมีขั้นตอนการทำงานดังนี้ (ดูรูปที่ 3.1 ประกอบ)

1. กำหนดอุณหภูมิเริ่มต้น ( $T_0$ ) และอัตราการลดอุณหภูมิ ( $1 - \alpha$ )
2. สุ่มขนาดหน้าตัด และปริมาณเหล็กเสริมของชิ้นส่วนโครงสร้างเป็นสถานะคำตอบเริ่มต้นของการค้นหาคำตอบ จากนั้นทำการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เริ่มต้น
3. ตรวจสอบเงื่อนไขการออกแบบหรือฟังก์ชันข้อจำกัดจากสถานะคำตอบเริ่มต้น หากไม่ผ่านให้สุ่มขนาดหน้าตัดและปริมาณเหล็กเสริมใหม่
4. กำหนดสถานะคำตอบเริ่มต้นที่ผ่านเงื่อนไขการออกแบบเป็นสถานะคำตอบปัจจุบัน

5. หลังจากได้สถานะคำตอบปัจจุบัน ทำการสุ่มขนาดหน้าตัดและปริมาณเหล็กเสริมใหม่ โดยการปรับค่าของแต่ละตัวแปรขึ้นและลงเล็กน้อย เพื่อทำการเลือกสถานะคำตอบใหม่ พร้อมทั้งประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใหม่
6. ตรวจสอบเงื่อนไขการออกแบบหรือฟังก์ชันขอบเขตจากสถานะคำตอบใหม่ หากไม่ผ่าน ให้ย้อนกลับไปดำเนินการในขั้นตอนที่ 5
7. ตรวจสอบการปรับปรุงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระหว่างสองสถานะคำตอบ หากสถานะคำตอบใหม่ดีกว่า (ราคาค่าก่อสร้างที่ถูกกว่า) ให้กำหนดสถานะคำตอบใหม่เป็นสถานะคำตอบปัจจุบันและข้ามไปยังขั้นตอนที่ 9
8. ตรวจสอบการยอมรับสถานะคำตอบใหม่ที่ดียิ่งกว่าด้วยความน่าจะเป็นตามสมการที่ (5) หากไม่ปฏิบัติตามสมการที่ (5) ก็จะไม่ยอมรับคำตอบนั้น โดยให้สถานะคำตอบก่อนหน้าเป็นสถานะคำตอบปัจจุบัน
9. ปรับลดอุณหภูมิของระบบตามสมการที่ (6)
10. ตรวจสอบเงื่อนไขการสิ้นสุดที่กำหนด ในงานวิจัยนี้กำหนดให้อุณหภูมิสุดท้ายมีค่าเท่ากับ  $1 \times 10^{-10}$  หากยังไม่พบ ให้ย้อนกลับไปยังขั้นตอนที่ 5 ดำเนินการดังกล่าวซ้ำจนกระทั่งพบเงื่อนไขการสิ้นสุดกระบวนการค้นหาคำตอบจะสิ้นสุดลงทันที

ทั้งนี้ การสุ่มเลือกคำตอบใหม่ในขั้นตอนที่ 5 จะพิจารณาค่าของตัวแปรที่มีค่าใกล้เคียงกับคำตอบปัจจุบัน การสุ่มตัวแปรแต่ละตัวจะสุ่มเลือกค่าระหว่างตัวปัจจุบัน, น้อยกว่า, หรือมากกว่า ซึ่งวิธีการเลือกสถานะคำตอบใหม่ดังกล่าว จะช่วยให้การค้นหาคำตอบมีความครอบคลุมขอบเขตของตัวแปรที่กำหนดได้อย่างทั่วถึง





รูปที่ 3.1 ฟังก์ชันการทำงานของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวเกี่ยวกับงานออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

## บทที่ 4

### ตัวอย่างการออกแบบอย่างเหมาะสม

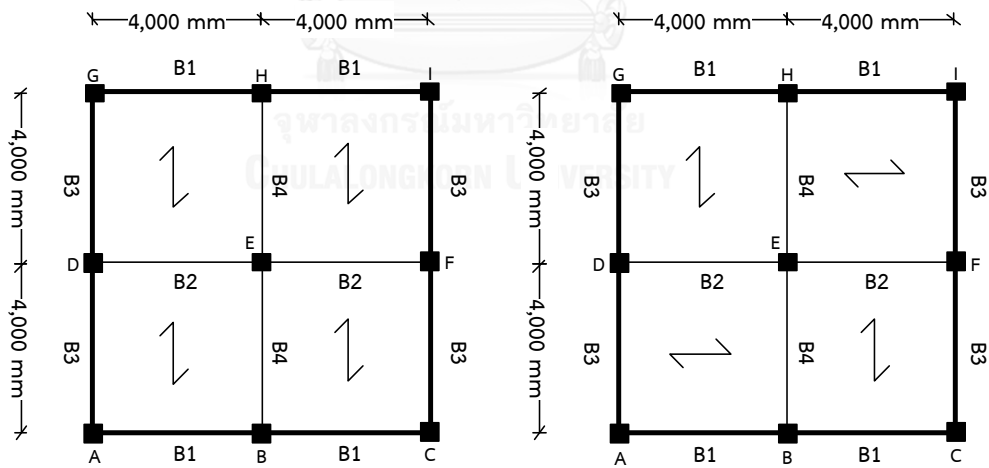
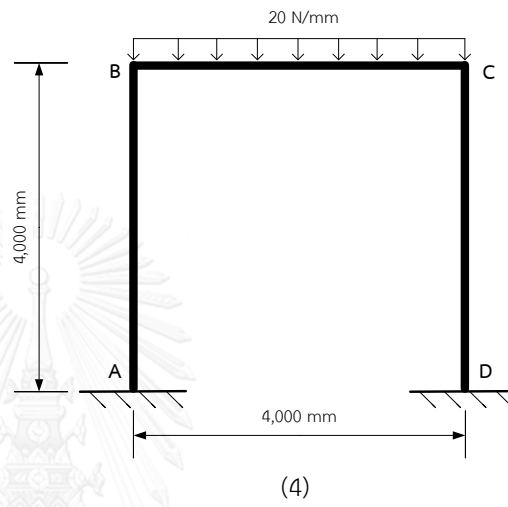
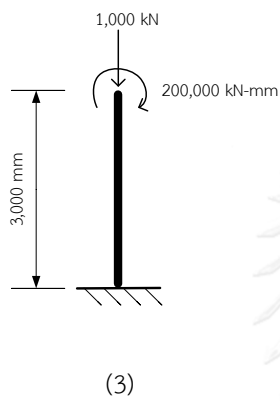
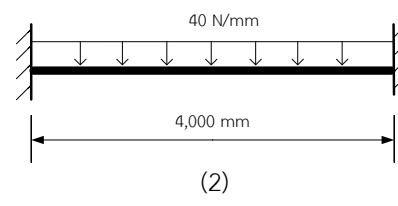
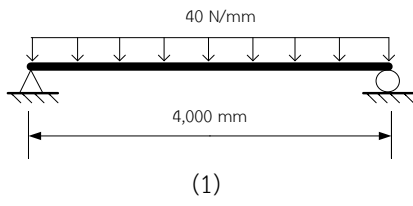
#### 4.1 กรณีศึกษา

งานวิจัยนี้ได้เลือกตัวอย่างการออกแบบสำหรับชิ้นส่วนคาน เสา และโครงข้อแข็งดังนี้ (ดูรูปที่ 4.1 ประกอบ)

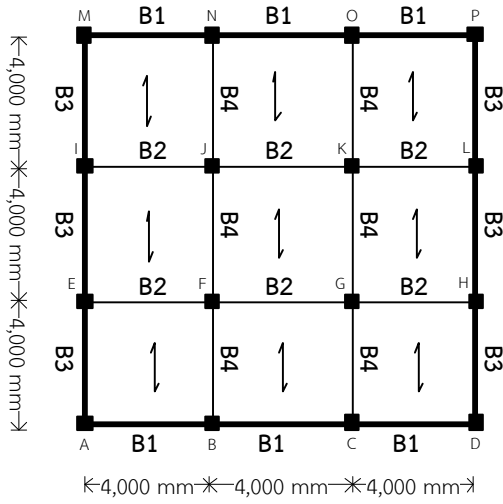
- 1) คานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียว มีฐานรองรับแบบยึดหมุน และแบบล้อยเลื่อน
- 2) คานคอนกรีตเสริมเหล็ก มีฐานรองรับทั้งสองข้างเป็นแบบยึดแน่น
- 3) เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก มีฐานรองรับเป็นแบบยึดแน่นและปราศจากการยึดรั้ง
- 4) โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก มีฐานรองรับเป็นแบบยึดแน่นและจุดต่อเป็นแบบข้อแข็ง
- 5) คานคอนกรีตเสริมเหล็ก รับน้ำหนักบรรทุกจากพื้น ขนาด  $2 \times 2$  ช่วง
- 6) คานคอนกรีตเสริมเหล็ก รับน้ำหนักบรรทุกจากพื้น ขนาด  $3 \times 3$  ช่วง

สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ถึง 4 ที่ถูกเลือกมาออกแบบอย่างเหมาะสมนั้น เพราะเป็นโครงสร้างที่สามารถพบเห็นได้ทั่วไป โดยน้ำหนักที่แสดงจะเป็นน้ำหนักบรรทุกจรเท่านั้น สำหรับกรณีศึกษาที่ 5 และ 6 ถูกเลือกมาเพื่อออกแบบคานต่อเนื่องอย่างเหมาะสมภายใต้น้ำหนักบรรทุกจากพื้น โดยเลือกใช้แผ่นพื้นสำเร็จรูป CPAC Hollow Core ขนาด  $120 \times 600$  mm. กำหนดทิศทางการวางแผ่นพื้นสำเร็จรูป และจำแนกคานออกเป็น 4 ตัว เพื่อหาทิศทางการวางแผ่นพื้นสำเร็จรูปที่ให้ค่าวัสดุก่อสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กรวมต่ำสุด โดยทิศทางการวางแผ่นพื้นสำเร็จรูปในแต่ละรูปแบบจะมีความสมมาตรกันเสมอ และมีน้ำหนักบรรทุกดังต่อไปนี้

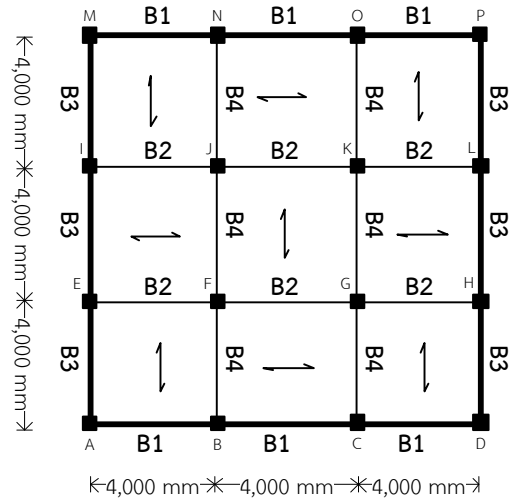
- 1) น้ำหนักแผ่นพื้นสำเร็จรูปรวมคอนกรีตเททับหน้าหนา 5 เซนติเมตร เท่ากับ  $311 \text{ kg/m}^2$
- 2) น้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม (Super-imposed dead load) เท่ากับ  $120 \text{ kg/m}^2$
- 3) น้ำหนักกำแพงโดยรอบอาคาร สูง 3 เมตร เท่ากับ  $660 \text{ kg/m}$
- 4) น้ำหนักบรรทุกจร  $200 \text{ kg/m}^2$  และ  $400 \text{ kg/m}^2$



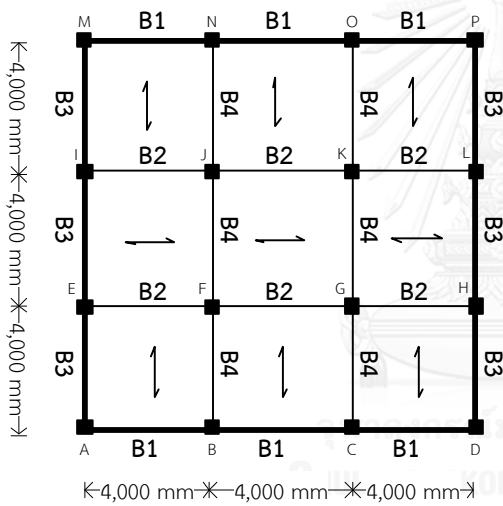
(5)



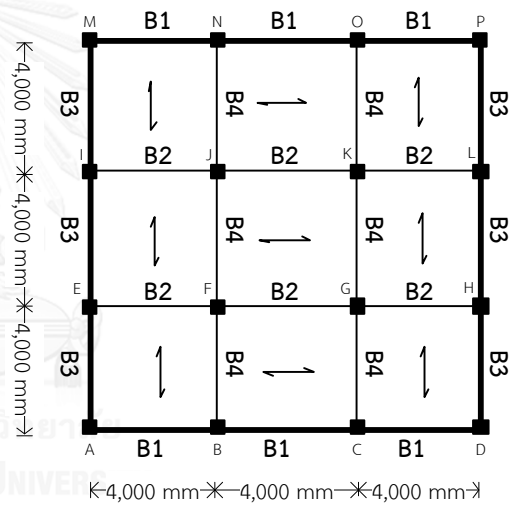
รูปแบบที่ 1



รูปแบบที่ 2



รูปแบบที่ 3



รูปแบบที่ 4

(6)

รูปที่ 4.1 โครงสร้างกรณีศึกษา

## 4.2 อุณหภูมิเริ่มต้นและอัตราการลดอุณหภูมิที่เหมาะสม

เพื่อให้กระบวนการค้นหาคำตอบของอัลกอริทึมเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งความแม่นยำ และระยะเวลาที่ใช้ จึงต้องทดสอบหาค่าอุณหภูมิเริ่มต้นและอัตราการลดอุณหภูมิที่เหมาะสมของ ปัญหา (อัตราณ์ ทาเกา 2556) โดยงานวิจัยนี้ได้นำตัวอย่างที่ 4 ของกรณีศึกษามาทำการทดสอบ ซึ่ง อุณหภูมิเริ่มต้นนั้นยังไม่มีวิธีการใดที่สามารถประมาณค่าได้แน่นอน (Lamberti 2008) งานวิจัยนี้จึง กำหนดให้อุณหภูมิเริ่มต้นคิดเป็นร้อยละของผลคำตอบของราคาออกแบบเริ่มต้น (Pantelides and Tzan 2000) ได้แก่ ร้อยละ 25, 50, 100 และ 200 ของราคาออกแบบเริ่มต้น และกำหนดให้อัตรา การลดอุณหภูมามีค่าเท่ากับร้อยละ 0.01, 0.03, 0.05, 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10, 20 และ 30 เพื่อ แสดงให้เห็นความแตกต่างของคำตอบที่ได้รับ

ตารางที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิเริ่มต้นและอัตราการลดอุณหภูมิที่มีต่อการค้นหาคำตอบ

อัตรา การ ลด อุณหภูมิ (ร้อยละ)	อุณหภูมิเริ่มต้น											
	ร้อยละ 25 ของคำตอบเริ่มต้น (2,500 บาท)			ร้อยละ 50 ของคำตอบเริ่มต้น (5,000 บาท)			ร้อยละ 100 ของคำตอบ เริ่มต้น (10,000 บาท)			ร้อยละ 200 ของคำตอบ เริ่มต้น (20,000 บาท)		
	จำนวน รอบ	ระยะ เวลา (นาทึ)	ราคา (บาท)	จำนวน รอบ	ระยะ เวลา (นาทึ)	ราคา (บาท)	จำนวน รอบ	ระยะ เวลา (นาทึ)	ราคา (บาท)	จำนวน รอบ	ระยะ เวลา (นาทึ)	ราคา (บาท)
0.01	308,484	10.328	<u>4,428</u>	315,413	10.902	<u>4,428</u>	322,346	11.296	<u>4,428</u>	329,277	12.407	<u>4,428</u>
0.03	102,818	3.288	<u>4,428</u>	105,128	3.623	<u>4,428</u>	107,438	3.792	<u>4,428</u>	109,748	4.068	4,544
0.05	61,685	2.182	4,454	63,071	2.534	<u>4,428</u>	64,457	2.290	<u>4,428</u>	65,843	2.454	4,454
0.10	30,835	1.075	4,505	31,528	1.093	4,514	32,221	1.270	4,454	32,913	1.332	4,503
0.30	10,268	0.365	4,569	10,499	0.455	4,539	10,730	0.449	4,553	10,960	0.516	4,598
0.50	6,155	0.256	4,548	6,293	0.298	4,579	6,432	0.273	4,694	6,570	0.254	4,701
1	3,070	0.141	5,079	3,139	0.216	4,735	3,208	0.208	4,814	3,277	0.159	4,729
2	1,528	0.144	5,161	1,561	0.140	4,836	1,596	0.126	4,743	1,630	0.180	4,954
3	1,013	0.080	5,452	1,036	0.114	5,195	1,059	0.129	5,164	1,082	0.106	4,836
5	602	0.082	5,232	615	0.081	5,355	629	0.085	5,165	642	0.083	5,072
10	293	0.047	6,355	300	0.045	5,472	306	0.060	4,729	313	0.047	5,311
20	139	0.035	6,735	142	0.039	6,621	145	0.034	5,453	148	0.036	5,880
30	87	0.043	6,907	89	0.031	7,027	91	0.03	6,962	93	0.028	5,738

ผลการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า อุณหภูมิเริ่มต้น มีส่วนช่วยในกระบวนการค้นหาคำตอบน้อยกว่าอัตราการลดอุณหภูมิ เพราะเมื่อเพิ่มหรือลดค่าของอุณหภูมิเริ่มต้น ส่งผลให้จำนวนรอบของการค้นหาคำตอบเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ในทางตรงกันข้าม เมื่อเพิ่มหรือลดค่าของอัตราการลดอุณหภูมิ จำนวนรอบของการค้นหาคำตอบมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อใช้อุณหภูมิที่ร้อยละ 50 และ 100 ของคำตอบเริ่มต้น พบว่าผลลัพธ์มีค่าใกล้เคียงกัน แต่อุณหภูมิเริ่มต้นร้อยละ 50 จะใช้เวลาคำนวณน้อยกว่า

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกอุณหภูมิเริ่มต้นมีค่าเท่ากับร้อยละ 50 ของคำตอบเริ่มต้น และกำหนดอัตราการลดอุณหภูมิเท่ากับร้อยละ 0.03 เนื่องจากที่อัตราการลดอุณหภูมินี้ได้ผลคำตอบที่ดีที่สุดเกือบทุกกรณียกเว้นที่ร้อยละ 200 ของคำตอบเริ่มต้น ซึ่งอัตราการลดอุณหภูมิที่เลือกใช้นี้มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ เนื่องจากกรณีศึกษาที่ใช้เป็นปัญหาที่มีความซับซ้อนและมีตัวแปรในการค้นหาจำนวนมาก

#### 4.3 ผลการออกแบบ

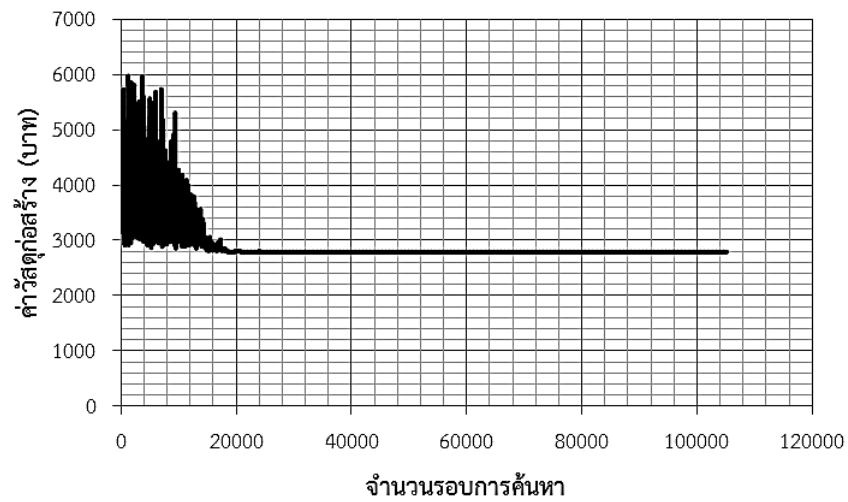
ในช่วงแรกอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวจะยอมรับผลคำตอบที่ต่ำกว่าด้วย ทำให้ลักษณะการลู่เข้าคำตอบกว้างไปมา แต่เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง ลักษณะการลู่เข้าจะเริ่มคงที่และหยุดการค้นหาคำตอบในที่สุด ซึ่งผลการลู่เข้าคำตอบของทั้ง 6 กรณีศึกษา แสดงในรูปที่ 4.2 ถึง 4.17 และคำตอบที่ดีที่สุดแสดงในตารางที่ 4.2 ถึง 4.17

ทั้งนี้ ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นที่ร้อยละ 50 ของคำตอบเริ่มต้น และอัตราการลดอุณหภูมิเท่ากับร้อยละ 0.03 ที่ได้จากการทดสอบในหัวข้อ 4.2 สามารถใช้ได้กับกรณีศึกษาที่ 1 ถึง 4 เท่านั้น สำหรับกรณีศึกษาที่ 5 และ 6 ถึงแม้จะเป็นเพียงการออกแบบชิ้นส่วนคาน แต่เนื่องจากตัวแปรของทั้งสองกรณีมีจำนวนมาก จึงจำเป็นต้องเพิ่มจำนวนรอบการค้นหาคำตอบให้สูงขึ้นถึง 1,051,420 รอบ ด้วยการลดค่าอัตราการลดอุณหภูมิให้ต่ำลงเท่ากับร้อยละ 0.003 แต่ยังคงใช้ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นเท่าเดิม

สำหรับผลการออกแบบของกรณีศึกษาที่ 1 ถึง 6 พบว่า การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ประหยัดคือ การเลือกใช้หน้าตัดที่มีความกว้างน้อย แต่ใช้ความลึกที่มีค่ามาก ซึ่งทำให้ปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการนั้นค่อนข้างต่ำ แต่หน้าตัดยังคงสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างปลอดภัย นอกจากนี้ ผลการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับน้ำหนักบรรทุกจากพื้นของกรณีศึกษาที่ 5 และ 6 พบว่า การวางแผ่นพื้นสำเร็จรูปในทิศทางเดียวกันตามรูปแบบที่ 1 ให้ราคาค่าวัสดุก่อสร้างรวมต่ำสุด และเมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจากรวม 200 kg/m<sup>2</sup> เป็น 400 kg/m<sup>2</sup> พบว่า ขนาดหน้าตัดและปริมาณเหล็กเสริมมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ราคาค่าวัสดุก่อสร้างรวมเพิ่มขึ้น แต่รูปแบบการวางแผ่นพื้นสำเร็จรูปที่ให้ราคาค่าวัสดุก่อสร้างรวมต่ำสุดยังคงเป็นรูปแบบที่ 1

ตารางที่ 4.2 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 1

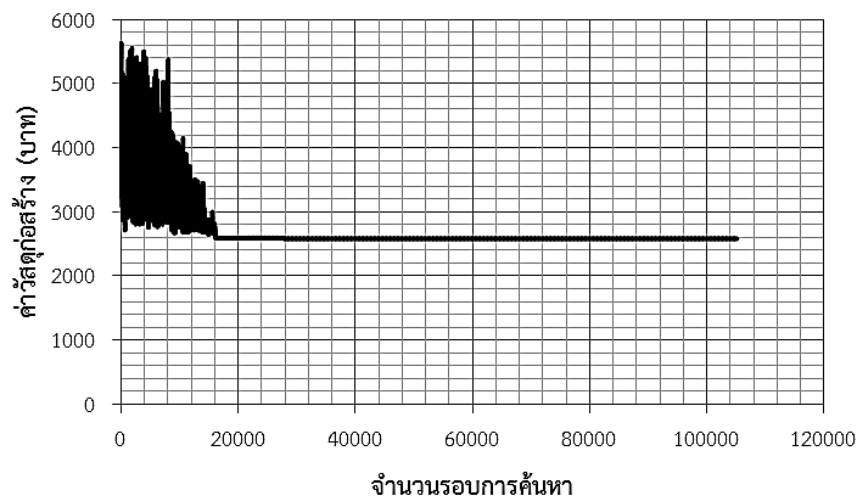
ตัวแปร	หน่วย	ค่าตอบที่ดีที่สุด
ความกว้างคาน	mm	200
ความลึกคาน	mm	450
เหล็กเสริมหลักบน	-	2-DB12
เหล็กเสริมหลักล่าง	-	2-DB12
เหล็กเสริมพิเศษบน (ซ้าย)	-	-
เหล็กเสริมพิเศษล่าง (กลาง)	-	3-DB20
เหล็กเสริมพิเศษบน (ขวา)	-	-
ระยะเรียงเหล็กปลอก	mm	RB9@100
ค่าวัสดุก่อสร้าง	บาท	2,790



รูปที่ 4.2 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 1

ตารางที่ 4.3 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 2

ตัวแปร	หน่วย	ค่าตอบที่ดีที่สุด
ความกว้างคาน	mm	200
ความลึกคาน	mm	400
เหล็กเสริมหลักบน	-	2-DB12
เหล็กเสริมหลักล่าง	-	2-DB12
เหล็กเสริมพิเศษบน (ซ้าย)	-	3-DB16
เหล็กเสริมพิเศษล่าง (กลาง)	-	1-DB16
เหล็กเสริมพิเศษบน (ขวา)	-	3-DB16
ระยะเรียงเหล็กปลอก	mm	RB9@75
ค่าวัสดุก่อสร้าง	บาท	2,581

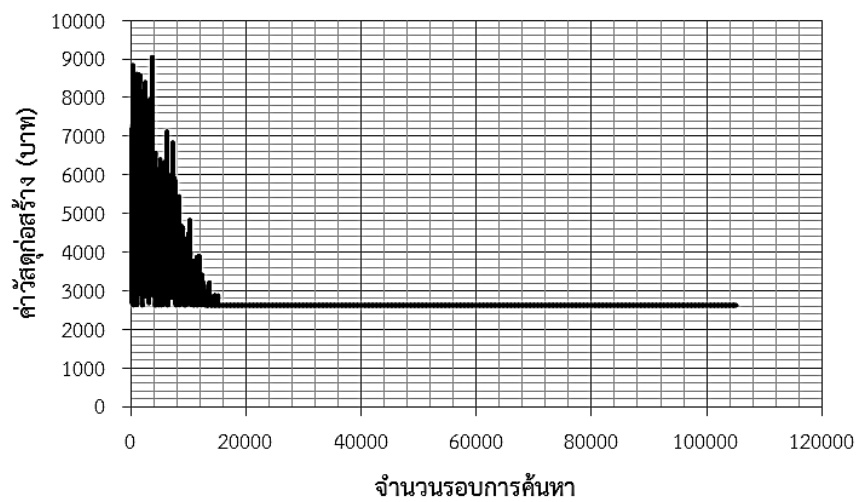


รูปที่ 4.3 การรู้เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 2



ตารางที่ 4.4 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 3

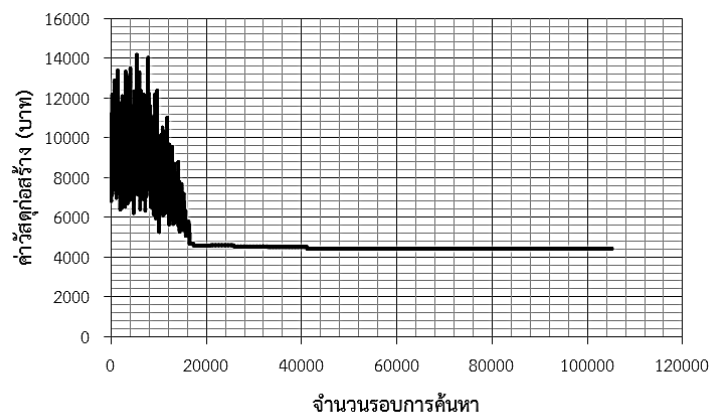
ตัวแปร	หน่วย	ค่าตอบที่ดีที่สุด
ความกว้างเสา	mm	250
ความลึกเสา	mm	500
เหล็กเสริมยื่นรวม	-	4-DB25
ค่าวัสดุก่อสร้าง	บาท	2,626



รูปที่ 4.4 การลู่อู่ค่าตอบของกรณีศึกษาที่ 3

ตารางที่ 4.5 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 4

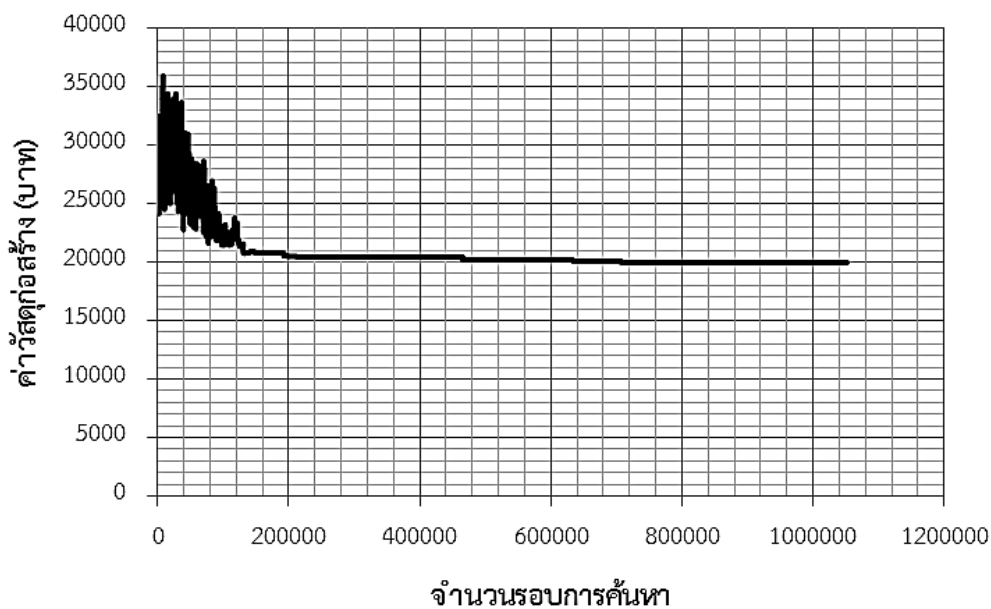
ตัวแปร	หน่วย	ค่าตอบที่ดีที่สุด
ความกว้างคาน	mm	200
ความลึกคาน	mm	350
เหล็กเสริมหลักบน	-	2-DB12
เหล็กเสริมหลักล่าง	-	2-DB12
เหล็กเสริมพิเศษบน (ซ้าย)	-	-
เหล็กเสริมพิเศษล่าง (กลาง)	-	2-DB16
เหล็กเสริมพิเศษบน (ขวา)	-	-
ระยะเรียงเหล็กถูกตั้งในคาน	mm	RB9@125
ความกว้างเสา AB	mm	200
ความลึกเสา AB	mm	200
เหล็กเสริมยื่นรวม AB	-	4-DB12
ความกว้างเสา CD	mm	200
ความลึกเสา CD	mm	200
เหล็กเสริมยื่นรวม CD	-	4-DB12
ค่าวัสดุก่อสร้าง	บาท	4,428



รูปที่ 4.5 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 4

ตารางที่ 4.6 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 1 (น้ำหนักบรรทุกจร 200 kg/m<sup>2</sup>)

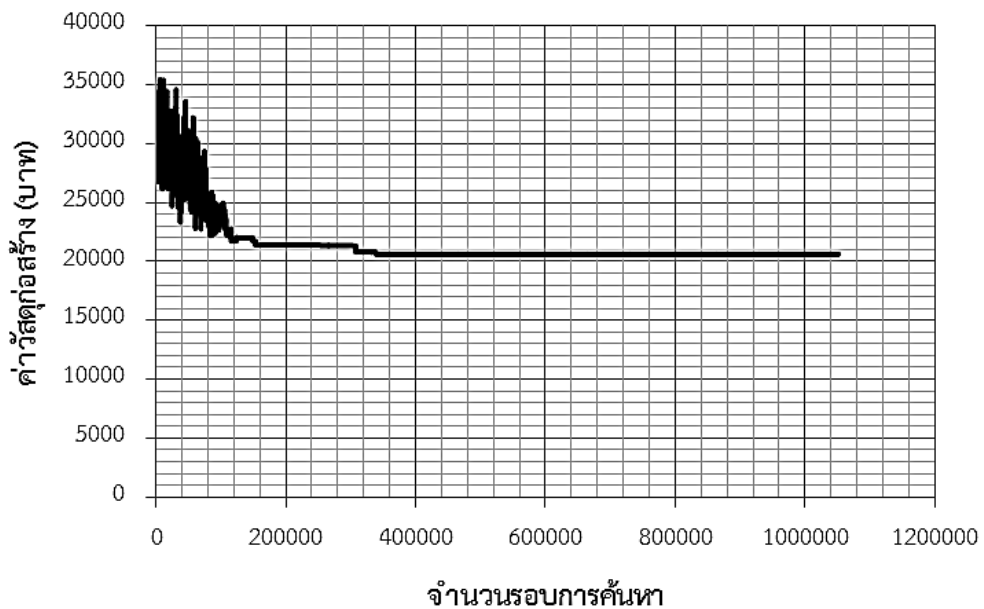
ตัวแปร		B1	B2	B3	B4
ความกว้าง (mm)		200	200	200	200
ความลึก (mm)		275	300	225	200
เหล็กเสริมหลัก	บน	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12
	ล่าง	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12
เหล็กเสริมพิเศษบน	หน้าตัด 1-1	-	-	-	-
	หน้าตัด 3-3	3-DB16	4-DB16	1-DB16	-
	หน้าตัด 5-5	-	-	-	-
เหล็กเสริมพิเศษล่าง	หน้าตัด 2-2	1-DB16	3-DB16	-	-
	หน้าตัด 4-4	1-DB16	3-DB16	-	-
ระยะเรียงเหล็กปลอก (mm)	ช่วงที่ 1	RB9@100	RB9@100	RB9@75	-
	ช่วงที่ 2	RB9@100	RB9@100	RB9@75	-
ค่าวัสดุก่อสร้าง (บาท)		19,947			



รูปที่ 4.6 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 1 (น้ำหนักบรรทุกจร 200 kg/m<sup>2</sup>)

ตารางที่ 4.7 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 2 (น้ำหนักบรรทุกทุกจร 200 kg/m<sup>2</sup>)

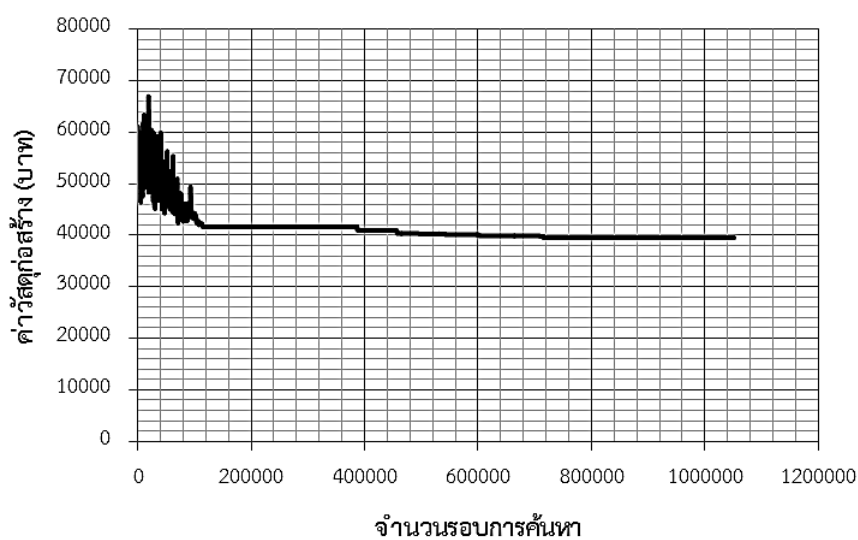
ตัวแปร		B1	B2	B3	B4
ความกว้าง (mm)		200	200	200	200
ความลึก (mm)		275	250	275	250
เหล็กเสริมหลัก	บน	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12
	ล่าง	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12
เหล็กเสริมพิเศษบน	หน้าตัด 1-1	-	-	-	-
	หน้าตัด 3-3	3-DB12	2-DB16	3-DB12	2-DB16
	หน้าตัด 5-5	-	-	-	-
เหล็กเสริมพิเศษล่าง	หน้าตัด 2-2	-	1-DB12	3-DB12	1-DB12
	หน้าตัด 4-4	3-DB12	1-DB12	-	1-DB12
ระยะเรียงเหล็กปลอก (mm)	ช่วงที่ 1	RB9@100	RB9@100	RB9@100	RB9@100
	ช่วงที่ 2	RB9@100	RB9@100	RB9@100	RB9@100
ค่าวัสดุก่อสร้าง (บาท)		21,068			



รูปที่ 4.7 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 2 (น้ำหนักบรรทุกทุกจร 200 kg/m<sup>2</sup>)

ตารางที่ 4.8 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 1 (น้ำหนักบรรทุกจร 200 kg/m<sup>2</sup>)

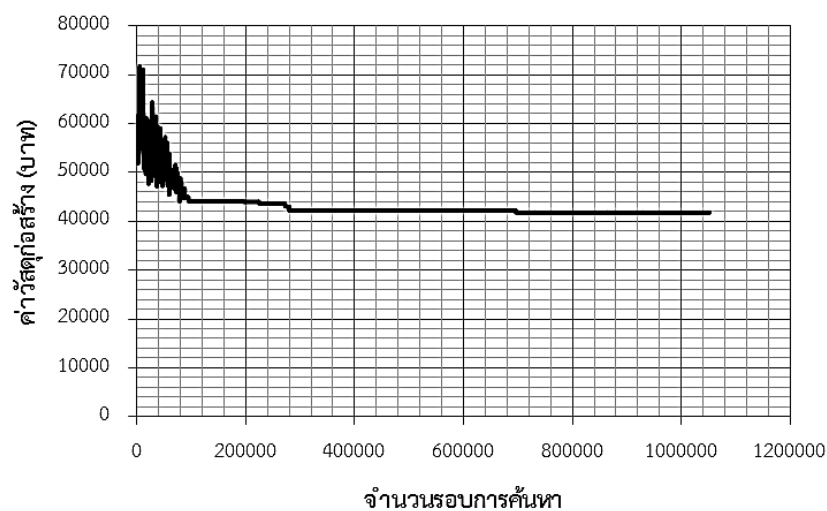
ตัวแปร		B1	B2	B3	B4
ความกว้าง (mm)		200	200	200	200
ความลึก (mm)		300	375	225	200
เหล็กเสริมหลัก	บน	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12
	ล่าง	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12
เหล็กเสริมพิเศษบน	หน้าตัด 1-1	-	-	-	-
	หน้าตัด 3-3	3-DB12	3-DB12	1-DB12	-
	หน้าตัด 5-5	3-DB12	3-DB12	1-DB12	-
	หน้าตัด 7-7	-	-	-	-
เหล็กเสริมพิเศษล่าง	หน้าตัด 2-2	1-DB16	2-DB12	1-DB12	-
	หน้าตัด 4-4	-	-	1-DB12	-
	หน้าตัด 6-6	1-DB16	2-DB12	1-DB12	-
ระยะเรียงเหล็กปลอก (mm)	ช่วงที่ 1	RB9@125	RB9@150	RB9@75	-
	ช่วงที่ 2	RB9@125	RB9@150	RB9@75	-
	ช่วงที่ 3	RB9@125	RB9@150	RB9@75	-
ค่าวัสดุก่อสร้าง (บาท)		39,497			



รูปที่ 4.8 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 1 (น้ำหนักบรรทุกจร 200 kg/m<sup>2</sup>)

ตารางที่ 4.9 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 2 (น้ำหนักบรรทุกจร 200 kg/m<sup>2</sup>)

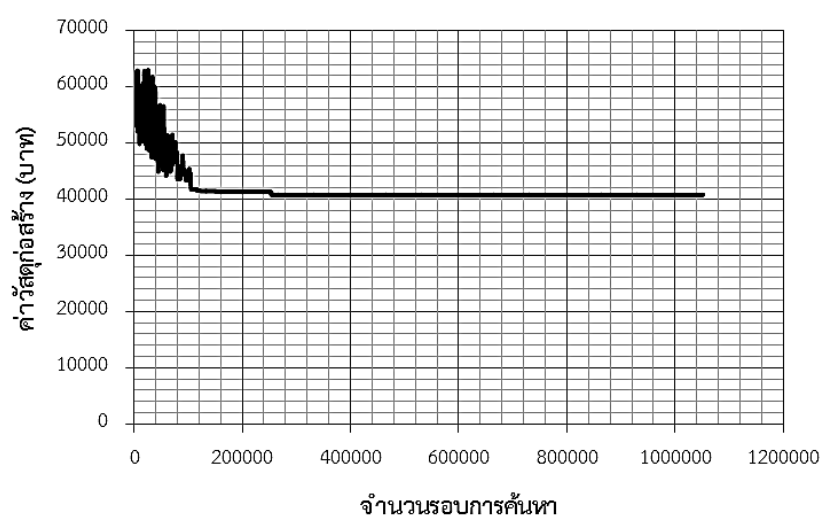
ตัวแปร		B1	B2	B3	B4
ความกว้าง (mm)		200	200	200	200
ความลึก (mm)		350	225	275	225
เหล็กเสริมหลัก	บน	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12
	ล่าง	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12
เหล็กเสริมพิเศษบน	หน้าตัด 1-1	-	-	-	-
	หน้าตัด 3-3	1-DB12	3-DB12	2-DB12	3-DB12
	หน้าตัด 5-5	1-DB12	3-DB12	2-DB12	3-DB12
	หน้าตัด 7-7	-	-	-	-
เหล็กเสริมพิเศษล่าง	หน้าตัด 2-2	1-DB16	1-DB16	-	1-DB16
	หน้าตัด 4-4	-	-	1-DB12	-
	หน้าตัด 6-6	1-DB16	1-DB16	-	1-DB16
ระยะเรียงเหล็กปลอก (mm)	ช่วงที่ 1	RB9@150	RB9@100	RB9@100	RB9@100
	ช่วงที่ 2	-	RB9@100	RB9@100	RB9@100
	ช่วงที่ 3	RB9@150	RB9@100	RB9@100	RB9@100
ค่าวัสดุก่อสร้าง (บาท)		41,323			



รูปที่ 4.9 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 2 (น้ำหนักบรรทุกจร 200 kg/m<sup>2</sup>)

ตารางที่ 4.10 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 3 (น้ำหนักบรรทุกจร 200 kg/m<sup>2</sup>)

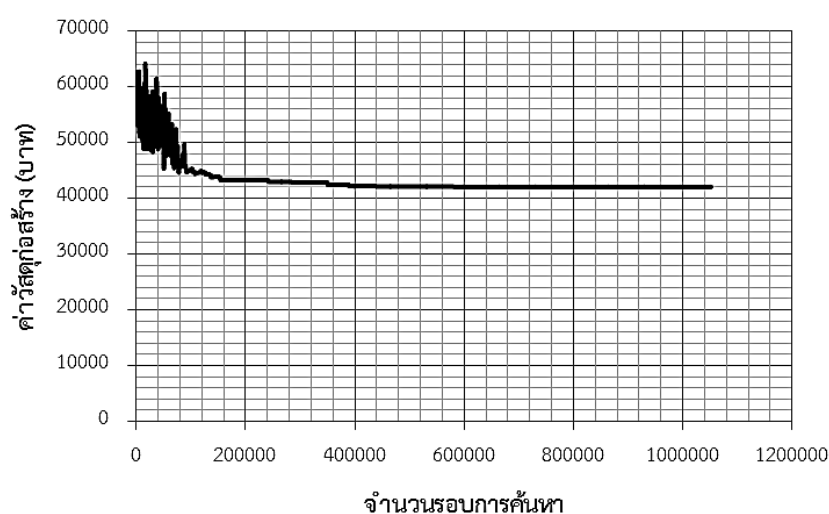
ตัวแปร		B1	B2	B3	B4
ความกว้าง (mm)		200	200	200	200
ความลึก (mm)		300	225	275	275
เหล็กเสริมหลัก	บน	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12
	ล่าง	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12
เหล็กเสริมพิเศษบน	หน้าตัด 1-1	-	-	-	-
	หน้าตัด 3-3	3-DB12	3-DB12	2-DB12	2-DB12
	หน้าตัด 5-5	3-DB12	3-DB12	2-DB12	2-DB12
	หน้าตัด 7-7	-	-	-	-
เหล็กเสริมพิเศษล่าง	หน้าตัด 2-2	1-DB16	1-DB16	-	-
	หน้าตัด 4-4	-	-	1-DB12	3-DB12
	หน้าตัด 6-6	1-DB16	1-DB16	-	-
ระยะเรียงเหล็กปลอก (mm)	ช่วงที่ 1	RB9@125	RB9@100	RB9@100	-
	ช่วงที่ 2	RB9@125	RB9@100	RB9@100	RB9@100
	ช่วงที่ 3	RB9@125	RB9@100	RB9@100	-
ค่าวัสดุก่อสร้าง (บาท)		40,672			



รูปที่ 4.10 การเข้าสู่คำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 3 (น้ำหนักบรรทุกจร 200 kg/m<sup>2</sup>)

ตารางที่ 4.11 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 4 (น้ำหนักบรรทุกจร 200 kg/m<sup>2</sup>)

ตัวแปร		B1	B2	B3	B4
ความกว้าง (mm)		200	200	200	200
ความลึก (mm)		350	350	225	225
เหล็กเสริมหลัก	บน	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12
	ล่าง	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12
เหล็กเสริมพิเศษบน	หน้าตัด 1-1	-	-	-	-
	หน้าตัด 3-3	1-DB12	1-DB12	1-DB12	3-DB12
	หน้าตัด 5-5	1-DB12	1-DB12	1-DB12	3-DB12
	หน้าตัด 7-7	-	-	-	-
เหล็กเสริมพิเศษล่าง	หน้าตัด 2-2	1-DB16	3-DB12	1-DB12	1-DB16
	หน้าตัด 4-4	-	-	-	-
	หน้าตัด 6-6	1-DB16	3-DB12	1-DB12	1-DB16
ระยะเรียงเหล็กปลอก (mm)	ช่วงที่ 1	RB9@150	RB9@150	RB9@100	RB9@100
	ช่วงที่ 2	-	-	RB9@100	RB9@100
	ช่วงที่ 3	RB9@150	RB9@150	RB9@100	RB9@100
ค่าวัสดุก่อสร้าง (บาท)		41,829			

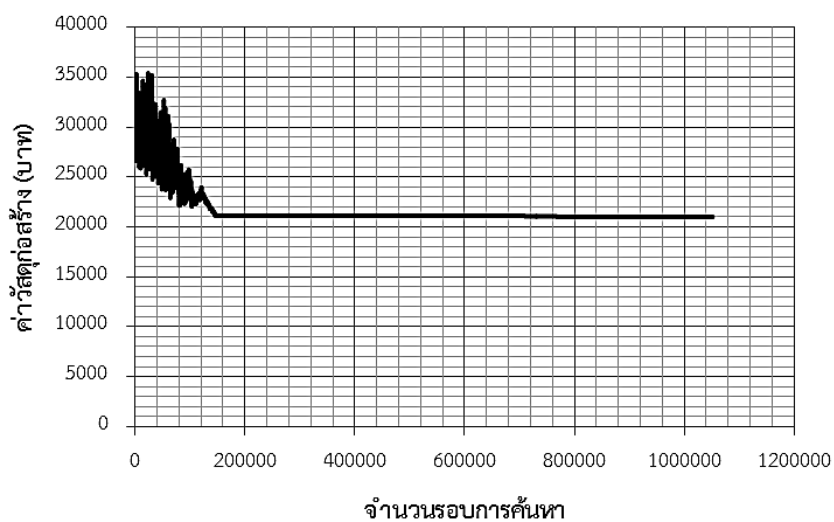


รูปที่ 4.11 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 4 (น้ำหนักบรรทุกจร 200 kg/m<sup>2</sup>)



ตารางที่ 4.12 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 1 (น้ำหนักบรรทุกจร 400 kg/m<sup>2</sup>)

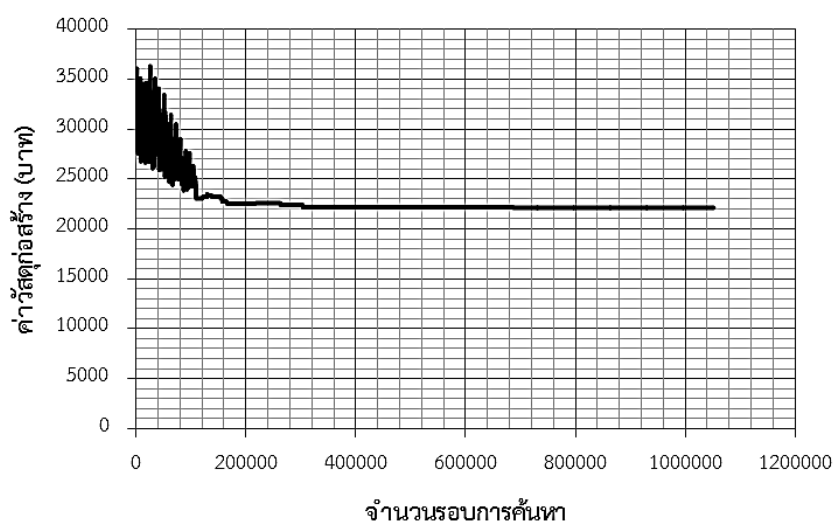
ตัวแปร		B1	B2	B3	B4
ความกว้าง (mm)		200	200	200	200
ความลึก (mm)		325	375	225	200
เหล็กเสริมหลัก	บน	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12
	ล่าง	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12
เหล็กเสริมพิเศษบน	หน้าตัด 1-1	-	-	-	-
	หน้าตัด 3-3	3-DB16	4-DB16	1-DB16	-
	หน้าตัด 5-5	-	-	-	-
เหล็กเสริมพิเศษล่าง	หน้าตัด 2-2	1-DB16	3-DB12	-	-
	หน้าตัด 4-4	1-DB16	3-DB12	-	-
ระยะเรียงเหล็กปลอก (mm)	ช่วงที่ 1	RB9@125	RB9@75	RB9@75	-
	ช่วงที่ 2	RB9@125	RB9@75	RB9@75	-
ค่าวัสดุก่อสร้าง (บาท)		21,148			



รูปที่ 4.12 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 1 (น้ำหนักบรรทุกจร 400 kg/m<sup>2</sup>)

ตารางที่ 4.13 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 2 (น้ำหนักบรรทุกจร 400 kg/m<sup>2</sup>)

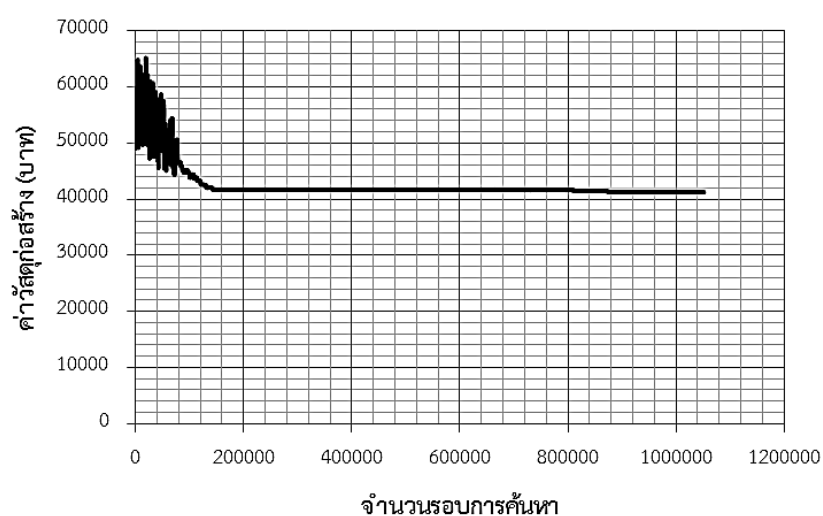
ตัวแปร		B1	B2	B3	B4
ความกว้าง (mm)		200	200	200	200
ความลึก (mm)		275	300	275	300
เหล็กเสริมหลัก	บน	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12
	ล่าง	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12
เหล็กเสริมพิเศษบน	หน้าตัด 1-1	-	-	-	-
	หน้าตัด 3-3	4-DB12	4-DB12	4-DB12	4-DB12
	หน้าตัด 5-5	-	-	-	-
เหล็กเสริมพิเศษล่าง	หน้าตัด 2-2	-	1-DB16	3-DB12	1-DB16
	หน้าตัด 4-4	3-DB12	1-DB16	-	1-DB16
ระยะเรียงเหล็กปลอก (mm)	ช่วงที่ 1	RB9@100	RB9@125	RB9@100	RB9@125
	ช่วงที่ 2	RB9@100	RB9@125	RB9@100	RB9@125
ค่าวัสดุก่อสร้าง (บาท)		22,008			



รูปที่ 4.13 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 2 (น้ำหนักบรรทุกจร 400 kg/m<sup>2</sup>)

ตารางที่ 4.14 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 1 (น้ำหนักบรรทุกจร 400 kg/m<sup>2</sup>)

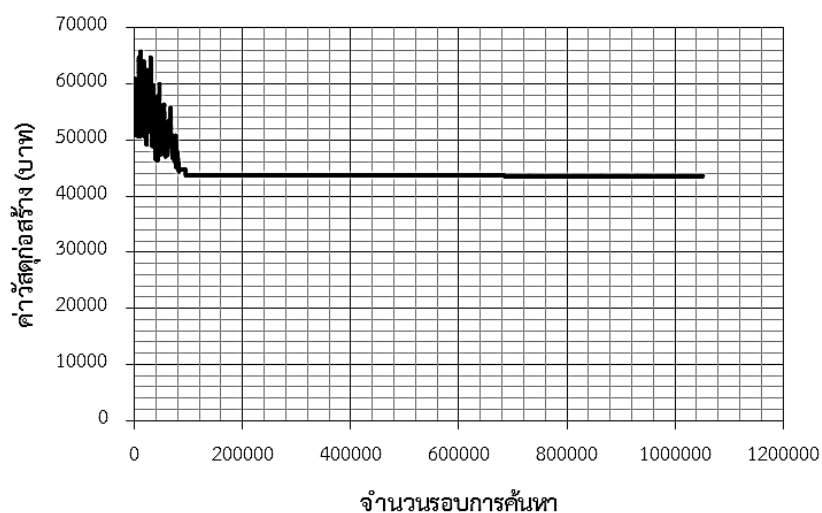
ตัวแปร		B1	B2	B3	B4
ความกว้าง (mm)		200	200	200	200
ความลึก (mm)		350	400	225	200
เหล็กเสริมหลัก	บน	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12
	ล่าง	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12
เหล็กเสริมพิเศษบน	หน้าตัด 1-1	-	-	-	-
	หน้าตัด 3-3	3-DB12	4-DB12	1-DB12	-
	หน้าตัด 5-5	3-DB12	4-DB12	1-DB12	-
	หน้าตัด 7-7	-	-	-	-
เหล็กเสริมพิเศษล่าง	หน้าตัด 2-2	2-DB12	3-DB12	1-DB12	-
	หน้าตัด 4-4	-	1-DB12	-	-
	หน้าตัด 6-6	2-DB12	3-DB12	1-DB12	-
ระยะเรียงเหล็กปลอก (mm)	ช่วงที่ 1	RB9@150	RB9@100	RB9@75	-
	ช่วงที่ 2	RB9@150	RB9@150	RB9@75	-
	ช่วงที่ 3	RB9@150	RB9@100	RB9@75	-
ค่าวัสดุก่อสร้าง (บาท)		41,912			



รูปที่ 4.14 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 1 (น้ำหนักบรรทุกจร 400 kg/m<sup>2</sup>)

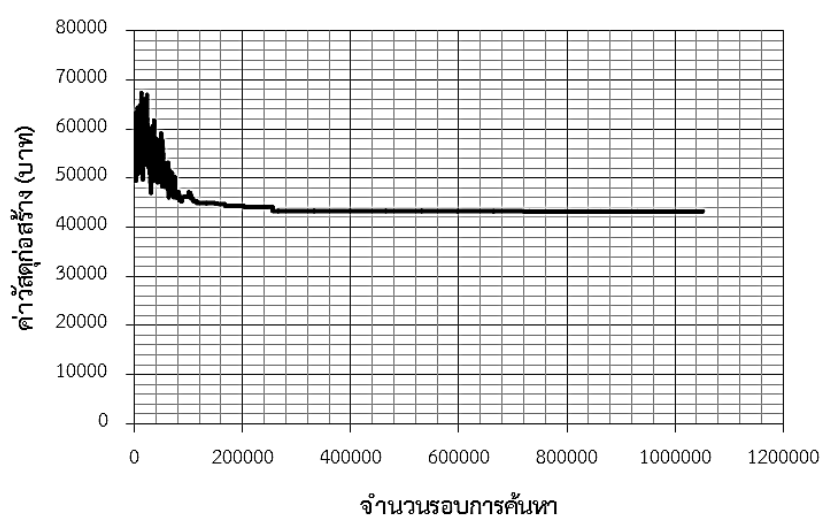
ตารางที่ 4.15 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 2 (น้ำหนักบรรทุกจร 400 kg/m<sup>2</sup>)

ตัวแปร		B1	B2	B3	B4
ความกว้าง (mm)		200	200	200	200
ความลึก (mm)		300	250	275	250
เหล็กเสริมหลัก	บน	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12
	ล่าง	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12
เหล็กเสริมพิเศษบน	หน้าตัด 1-1	-	-	-	-
	หน้าตัด 3-3	2-DB12	4-DB12	3-DB12	4-DB12
	หน้าตัด 5-5	2-DB12	4-DB12	3-DB12	4-DB12
	หน้าตัด 7-7	-	-	-	-
เหล็กเสริมพิเศษล่าง	หน้าตัด 2-2	2-DB16	1-DB16	-	1-DB16
	หน้าตัด 4-4	-	1-DB12	1-DB16	1-DB12
	หน้าตัด 6-6	2-DB16	1-DB16	-	1-DB16
ระยะเรียงเหล็กปลอก (mm)	ช่วงที่ 1	RB9@150	RB9@100	RB9@125	RB9@100
	ช่วงที่ 2	-	RB9@100	RB9@125	RB9@100
	ช่วงที่ 3	RB9@150	RB9@100	RB9@125	RB9@100
ค่าวัสดุก่อสร้าง (บาท)		43,615			

รูปที่ 4.15 การลู่อู่ค่าตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 2 (น้ำหนักบรรทุกจร 400 kg/m<sup>2</sup>)

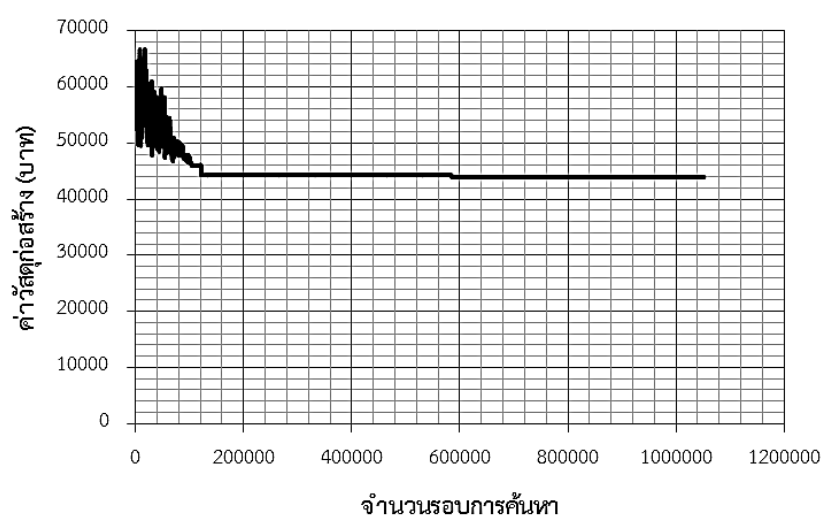
ตารางที่ 4.16 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 3 (น้ำหนักบรรทุกจร 400 kg/m<sup>2</sup>)

ตัวแปร		B1	B2	B3	B4
ความกว้าง (mm)		200	200	200	200
ความลึก (mm)		350	250	275	300
เหล็กเสริมหลัก	บน	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12
	ล่าง	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12
เหล็กเสริมพิเศษบน	หน้าตัด 1-1	-	-	-	-
	หน้าตัด 3-3	3-DB12	4-DB12	3-DB12	3-DB12
	หน้าตัด 5-5	3-DB12	4-DB12	3-DB12	3-DB12
	หน้าตัด 7-7	-	-	-	-
เหล็กเสริมพิเศษล่าง	หน้าตัด 2-2	2-DB12	1-DB16	-	-
	หน้าตัด 4-4	-	1-DB12	1-DB16	4-DB12
	หน้าตัด 6-6	2-DB12	1-DB16	-	-
ระยะเรียงเหล็กปลอก (mm)	ช่วงที่ 1	RB9@150	RB9@100	RB9@125	-
	ช่วงที่ 2	RB9@150	RB9@100	RB9@125	RB9@100
	ช่วงที่ 3	RB9@150	RB9@100	RB9@125	-
ค่าวัสดุก่อสร้าง (บาท)		43,487			

รูปที่ 4.16 การลู่อู่ค่าตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 3 (น้ำหนักบรรทุกจร 400 kg/m<sup>2</sup>)

ตารางที่ 4.17 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 4 (น้ำหนักบรรทุกจร 400 kg/m<sup>2</sup>)

ตัวแปร		B1	B2	B3	B4
ความกว้าง (mm)		200	200	200	200
ความลึก (mm)		350	350	225	225
เหล็กเสริมหลัก	บน	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12
	ล่าง	2-DB12	2-DB12	2-DB12	2-DB12
เหล็กเสริมพิเศษบน	หน้าตัด 1-1	-	-	-	-
	หน้าตัด 3-3	2-DB12	1-DB16	1-DB12	4-DB12
	หน้าตัด 5-5	2-DB12	1-DB16	1-DB12	4-DB12
	หน้าตัด 7-7	-	-	-	-
เหล็กเสริมพิเศษล่าง	หน้าตัด 2-2	2-DB16	3-DB16	1-DB12	1-DB16
	หน้าตัด 4-4	-	-	-	-
	หน้าตัด 6-6	2-DB16	3-DB16	1-DB12	1-DB16
ระยะเรียงเหล็กปลอก (mm)	ช่วงที่ 1	RB9@150	RB9@100	RB9@75	RB9@100
	ช่วงที่ 2	-	RB9@100	RB9@75	RB9@100
	ช่วงที่ 3	RB9@150	RB9@100	RB9@75	RB9@100
ค่าวัสดุก่อสร้าง (บาท)		43,923			

รูปที่ 4.17 การลู่อู่ค่าตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 4 (น้ำหนักบรรทุกจร 400 kg/m<sup>2</sup>)

## บทที่ 5

### สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมตามมาตรฐาน ACI 318M-11 เพื่อให้ได้ค่าวัสดุก่อสร้างรวมต่ำสุด พิจารณาคำตอบเป็นแบบตัวแปรไม่ต่อเนื่องให้สอดคล้องกับการทำงานจริง ซึ่งพบว่าอัลกอริทึมนี้สามารถค้นหาคำตอบได้ดี อย่างไรก็ตาม การค้นหาคำตอบของอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวนั้นเป็นวิธีการค้นหาแบบจุดเดียว (Single search) และพิจารณาความน่าจะเป็นในการยอมรับผลคำตอบที่ดีกว่าด้วย จึงทำให้สามารถหลีกเลี่ยงคำตอบที่ดีที่สุดเฉพาะที่ได้ (Local optimum) ทั้งนี้กระบวนการค้นหาคำตอบจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาการคำนวณหรือจำนวนรอบที่สูงเพื่อให้เข้าสู่คำตอบที่ดีที่สุดแท้จริง (Global optimum)

เพื่อให้แน่ใจว่ากระบวนการค้นหาคำตอบนั้นได้ครอบคลุมบริเวณที่เป็นไปได้อย่างทั่วถึง งานวิจัยนี้จึงทำการทดสอบเลือกพารามิเตอร์อุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความเสถียร และใช้ระยะเวลาในการค้นหาที่ไม่ยาวนานนัก ผลจากการทดสอบพบว่า อุณหภูมิเริ่มต้นและอัตราการลดอุณหภูมิเป็นสองพารามิเตอร์ที่สำคัญในการควบคุมกระบวนการค้นหาคำตอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอัตราการลดอุณหภูมิสามารถเพิ่มหรือลดจำนวนรอบของการค้นหาคำตอบอย่างเห็นได้ชัด จำนวนรอบที่เหมาะสมมีผลต่อการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงกำหนดให้ใช้อัตราการลดอุณหภูมิที่มีค่าต่ำมาก เพื่อให้กระบวนการค้นหาคำตอบมีเสถียรภาพและประสิทธิภาพมากที่สุด สำหรับปัญหาที่ซับซ้อนอย่างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและปัญหาที่มีจำนวนตัวแปรมากอย่างการออกแบบคานต่อเนื่องคอนกรีตเสริมเหล็กในกรณีศึกษาที่ 5 และ 6

ผลลัพธ์จากกรณีศึกษาที่ 1 ถึง 6 พบว่า ในการออกแบบให้ได้ค่าวัสดุก่อสร้างรวมต่ำสุด ชิ้นส่วนโครงสร้างมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือ ขนาดหน้าตัดจะมีความกว้างต่ำที่สุด แต่มีความลึกสูงมาก และพื้นที่เหล็กเสริมมีปริมาณตามกำลังที่ต้องการ ทั้งนี้ ราคาต่อหน่วยของคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ค่อนข้างสูง ทำให้คำตอบที่ได้ไม่เลือกใช้ค่าความลึกสูงสุดในการเพิ่มกำลังต้านทาน แต่เพิ่มพื้นที่เหล็กเสริมแทน เพื่อความประหยัดและชิ้นส่วนโครงสร้างก็ยังคงปลอดภัยต่อการใช้งาน อย่างไรก็ตาม หากราคาวัสดุต่อหน่วยที่ใช้มีการเปลี่ยนแปลง ผลการออกแบบที่ได้ก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน

ในกรณีศึกษาที่ 5 และ 6 โปรแกรมไม่สามารถเลือกรูปแบบการวางแผ่นพื้นสำเร็จรูปเองได้ ผู้ใช้ต้องเป็นผู้กำหนดรูปแบบการวางแผ่นพื้นสำเร็จรูป และจำแนกคานตามที่ต้องการ จากนั้น

โปรแกรมจะทำการออกแบบชิ้นส่วนคานที่เหมาะสมให้ ซึ่งรูปแบบที่กำหนดให้ของงานวิจัยนี้ดังกล่าวไว้ในบทที่ 4 พบว่า ค่าวัสดุก่อสร้างรวมที่ได้สำหรับแต่ละรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน โดยรูปแบบที่ 1 นั่นคือ การวางแผนพื้นสำเร็จรูปในทิศทางเดียวกัน ให้ค่าวัสดุก่อสร้างรวมต่ำที่สุด เนื่องจากการวางแผนพื้นสำเร็จรูปในลักษณะนี้ ส่งผลให้ชิ้นส่วนคานที่ได้จากการออกแบบมีขนาดแตกต่างกันมาก ซึ่งคานบางตัวที่ไม่ได้น้ำหนักบรรทุก จะมีขนาดหน้าตัดที่เล็กที่สุด ค่าวัสดุก่อสร้างของคานตัวนั้นจึงค่อนข้างต่ำ ในทางตรงกันข้าม การวางแผนพื้นสำเร็จรูปในทิศทางสลับกัน ส่งผลให้ชิ้นส่วนคานจะมีขนาดใกล้เคียงกัน ค่าวัสดุก่อสร้างของคานแต่ละตัวจึงไม่ค่อยแตกต่างกัน ทำให้ค่าวัสดุก่อสร้างรวมที่ได้นั้นสูงกว่านั่นเอง ทั้งนี้ ผลลัพธ์ที่ได้ไม่อาจกล่าวได้ว่า การวางแผนพื้นสำเร็จรูปในทิศทางเดียวกันเป็นรูปแบบที่ดีที่สุด แต่เป็นเพียงคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้เท่านั้น ซึ่งหากรูปแบบของโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลง เช่น พื้นมีขนาดไม่สมมาตรกัน น้ำหนักบรรทุกที่กระทำเปลี่ยนแปลง หรือเพิ่มเงื่อนไขความลึกอย่างน้อยแก่ชิ้นส่วนคาน ผลลัพธ์ที่ได้ อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน

## ข้อเสนอแนะ

แม้อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวจะสามารถค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาในงานวิจัยนี้ได้เป็นอย่างดี แต่ความแม่นยำของคำตอบและระยะเวลาที่ใช้การค้นหาคำตอบแต่ละครั้งยังคงควรได้รับการปรับปรุง ซึ่งจะเห็นได้ว่า งานวิจัยนี้เลือกใช้ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นที่สูง และอัตราการลดอุณหภูมิที่ต่ำมาก เนื่องจากผู้วิจัยต้องการให้คำตอบสุดท้ายที่ได้ในแต่ละครั้งมีความเสถียร แต่ผลเสียคือระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบนั้นนานเกินไป สำหรับแนวทางพัฒนางานวิจัยต่อไปอาจทำได้ดังนี้

1. กำหนดให้อัตราการลดอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว แต่ต้องทำการรันโปรแกรมจำนวนหลาย ๆ ครั้ง เพื่อให้มั่นใจกับคำตอบสุดท้ายที่จะได้รับ เพราะการกระทำดังกล่าว คำตอบที่ได้ อาจจะยังไม่ดีที่สุด
2. กำหนดให้อัตราการลดอุณหภูมิลดลงอย่างช้ามาก ๆ จำนวน 1 ครั้ง เพื่อดูแนวโน้มของคำตอบที่ได้ของแต่ละตัวแปร จากนั้นทำการปรับลดขอบเขตของตัวแปร แล้วจึงทำการค้นหาคำตอบด้วยอัตราการลดอุณหภูมิที่ลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้สามารถลดระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ และเพิ่มโอกาสในการที่จะได้รับคำตอบแบบดีที่สุดแท้จริง
3. เปลี่ยนเงื่อนไขการสิ้นสุดของการค้นหาคำตอบด้วยอุณหภูมิสุดท้ายที่มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ เป็นการตรวจสอบผลต่างของคำตอบสุดท้ายของแต่ละรอบ โดยอาจกำหนดให้มีค่าแตกต่างกันได้ไม่เกินศูนย์ หรือเข้าใกล้ศูนย์เป็นจำนวนรอบตามความเหมาะสมของปัญหา



## รายการอ้างอิง

American Concrete Institute (2011). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-11) and Commentary, ACI Committee 318.

Ceranic, B., et al. (2001). "An application of simulated annealing to the optimum design of reinforced concrete retaining structures." Computers & Structures **79**(17): 1569-1581.

Chen, T.-Y. and J.-J. Su (2002). "Efficiency improvement of simulated annealing in optimal structural designs." Advances in Engineering Software **33**(7-10): 675-680.

Farhad Kolahan, M. H. A. and Samaeddin Mohitzadeh (2007). "Simulated Annealing Application for Structural Optimization." World Academy of Science, Engineering and Technology **35**: 326-329.

Galeb, A. C. (2010). "Optimum Design Of Reinforced Concrete Rectangular Beams Using Simulated Annealing." The Iraq Journal For Mechanical And Material Engineering(B): 201-210.

Kirkpatrick, S., et al. (1983). "Optimization by Simulated Annealing." Science **220**(4598): 671-680.

Lamberti, L. (2008). "An efficient simulated annealing algorithm for design optimization of truss structures." Computers & Structures **86**(19-20): 1936-1953.

Nilson, A. H., et al. (2010). Design of Concrete Structures. New York, The McGraw-Hill Companies, Inc., 1221 Avenue of the Americas, New York.

Pantelides, C. P. and S. R. Tzan (2000). "Modified iterated simulated annealing algorithm for structural synthesis." Advances in Engineering Software **31**(6): 391-400.

Singiresu, S. R. (2009). Engineering Optimization Theory and Practice. United States of America, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Smittakorn, W. (2008). "JSM as a Toolbox for Structural Analysis and Design Applications." National Convention on Civil Engineering **13**: 73-78.

Sonmez, F. O. (2007). "Shape optimization of 2D structures using simulated annealing." Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering **196**(35-36): 3279-3299.

Yang, X.-S. (2010). Engineering Optimization An Introduction with Metaheuristic Applications. United States of America, John Wiley & Sons, Inc., Publication.

วุฒิชัย วงษ์ทัศนีย์กร (2552). "การวิจารณ์และเปรียบเทียบ 5 อัลกอริทึมทางด้านวิวัฒนาการ." วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ **19**(2): 285-290.

อลงกรณ์ ละม่อม (2550). อัลกอริทึมการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสมด้วยเทคนิคการจำลองการอบเหนียว. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต: 167.

อัศนัย ทาเถา (2556). "การออกแบบที่เหมาะสมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ารับแรงดัดสองทางด้วยอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว." วารสารวิจัยแลพัฒนา มจร. 1: 33-50.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสิริวัฒน์ จ้อยสุวรรณทัต เกิดเมื่อวันที่ 7 กันยายน พ.ศ. 2533 ที่จังหวัดนครปฐม สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2555 และเข้ารับการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2556

