

การออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีฮาร์โมนีเสิร์ช



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

OPTIMUM DESIGN OF REINFORCED CONCRETE BUILDINGS BY HARMONY SEARCH  
ALGORITHM

Mr. Attaphol Techaratanaprasert



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               | การออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีฮาร์โมนีเสิร์ช |
| โดย                             | นายอัฒพล เตชะรัตนประเสริฐ   |
| สาขาวิชา                        | วิศวกรรมโยธา  |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัฒนชัย สมิตถากร  |

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ แสนจันทร์ไชย)

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

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤตยาฤทธิ์ ชมภูมิ่ง)

อัฐพล เตชะรัตนประเสริฐ : การออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีฮาร์โมนีเสิร์ช (OPTIMUM DESIGN OF REINFORCED CONCRETE BUILDINGS BY HARMONY SEARCH ALGORITHM) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.วิวัฒน์ชัย สมิตถากร, 60 หน้า.

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้รับความนิยมมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน การออกแบบโครงสร้างนั้นต้องคำนึงถึงทั้งความปลอดภัยและความประหยัด โดยทั่วไปวิศวกรมักออกแบบโครงสร้างโดยใช้ประสบการณ์เฉพาะตัว ซึ่งไม่อาจมั่นใจได้ว่าจะได้โครงสร้างที่ประหยัดที่สุด งานวิจัยนี้ได้นำวิธี Harmony Search (HS) ซึ่งเป็นการค้นหาคำตอบแบบเมตะฮิวริสติก ที่ได้รับแรงบันดาลใจมาจากกระบวนการของนักดนตรีในการค้นหาสภาวะที่ดีที่สุดของเสียงประสาน มาประยุกต์ใช้กับการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีราคาค่าวัสดุก่อสร้างต่ำที่สุด ใช้โปรแกรมภาษาจาวาในการพัฒนาการออกแบบตามมาตรฐาน ACI 318M-11 และกำหนดตัวแปรเป็นแบบตัวแปรไม่ต่อเนื่อง (discrete variables)

ผลการคำนวณออกแบบโครงสร้างกรณีศึกษาพบว่า หน้าตัดคานและเสาที่รับโมเมนต์ดัด จะมีค่าความกว้างน้อย ค่าความลึกมาก และจำนวนเหล็กเสริมเพิ่มเติมเท่าที่จำเป็น โดยวิธี HS จะมีอัตราการลู่เข้าของคำตอบค่อนข้างเร็ว เนื่องจากวิธี HS มีวิธีการค้นหาคำตอบที่หลากหลายและเก็บคำตอบมากกว่า 1 ชุด การลดค่า HMCR และการเพิ่มค่า HMS จะช่วยให้ชุดคำตอบกระจายตัวทั่วถึงมากขึ้น ส่วนตัวแปร PAR จะไม่ค่อยมีผลต่อวิธี HS สำหรับปัญหาที่มีตัวแปรเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง ทั้งนี้การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับปัญหาจะช่วยให้การค้นหาคำตอบด้วยวิธี HS มีประสิทธิภาพมากขึ้น งานวิจัยนี้พบว่าค่าพารามิเตอร์ HMCR, PAR และ HMS ที่เหมาะสมกับปัญหาที่พิจารณาในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 0.75, 0.45 และ 20 ตามลำดับ

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2557

# # 5670467921 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: OPTIMAL DESIGN / REINFORCED CONCRETE STRUCTURES / HARMONY SEARCH

ATTAPHOL TECHARATANAPRASERT: OPTIMUM DESIGN OF REINFORCED CONCRETE BUILDINGS BY HARMONY SEARCH ALGORITHM. ADVISOR: ASST. PROF. WATANACHAI SMITTAKORN, Ph.D., 60 pp.

Reinforced concrete structures have been widely used from past to present. Appropriate design of structures considers not only safety measure but also economical property. In general, engineers use their own experience to design structures which may not lead to the most economical result. This study applies Harmony Search method, a meta-heuristic algorithm inspired by the musical process to find the perfect state of harmony, to the problem of reinforced concrete design and seeking for optimum cost of construction materials. Java language is used for structural design according to ACI 318M-11 code, and the primary unknowns are treated as discrete variables.

Results from case studies have shown that beams and columns subjected to bending moment have sections with minimum width but high depth while steel reinforcement must be enough to sustain loads. Harmony Search (HS) method exhibits a good rate of convergence because HS is a multi-search that finds and stores more than one set of data. Reducing HMCR and increasing HMS allow more diverse data. PAR has little effect on problems with discrete variables. However, efficiency of HS can be improved by selecting the appropriated parameters. Appropriate values of HMCR, PAR, and HMS for the case studies in this research are 0.75, 0.45, and 20, respectively

Department: Civil Engineering

Student's Signature .....

Field of Study: Civil Engineering

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2014

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัฒนชัย สมิตาคร เป็นอย่างสูง ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยเป็นอย่างดี ศาสตราจารย์ ดร. ธีรพงศ์ เสนจันทร์ดีไชย ที่กรุณาสละเวลามาเป็นประธานกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กฤตายุทธ์ ชมพูมิ่ง ที่กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้ความรักและกำลังใจแก่ข้าพเจ้าในทุกๆเรื่อง ครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้แก่ข้าพเจ้า และขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือให้คำปรึกษาในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้



## สารบัญ

|                                      | หน้า |
|--------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                 | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....              | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....                 | ฉ    |
| สารบัญ.....                          | ช    |
| สารบัญตาราง.....                     | ฅ    |
| สารบัญรูป.....                       | ญ    |
| บทที่ 1 บทนำ.....                    | 1    |
| 1.1 ความเป็นมา.....                  | 1    |
| 1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....       | 2    |
| 1.3 วัตถุประสงค์.....                | 4    |
| 1.4 ขอบเขต.....                      | 4    |
| 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....         | 5    |
| บทที่ 2 ทฤษฎี.....                   | 6    |
| 2.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....        | 6    |
| 2.2 ฟังก์ชันข้อจำกัด.....            | 10   |
| 2.3 การวิเคราะห์โครงสร้าง.....       | 11   |
| 2.4 การวิเคราะห์กำลังของหน้าตัด..... | 12   |
| 2.4.1 การวิเคราะห์หน้าตัดคาน.....    | 12   |
| 2.4.2 การวิเคราะห์หน้าตัดเสา.....    | 16   |
| 2.5 Harmony Search Algorithm.....    | 18   |
| 2.5.1 ความเป็นมา.....                | 18   |
| 2.5.2 หลักการของ Harmony Search..... | 19   |

|   |    |
|---|----|
| 2.5.3 ขั้นตอนการทำงาน.....  | 20 |
| 2.5.4 ตัวอย่างการใช้งานวิธี Harmony Search .....                                  | 24 |
| บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....  | 26 |
| 3.1 ขอบเขตงานวิจัย .....  | 26 |
| 3.1.1 ขอบเขตการสุ่มค่าตัวแปร .....  | 26 |
| 3.1.2 รายละเอียดการเสริมเหล็ก .....   | 27 |
| 3.2 การประยุกต์ใช้วิธี Harmony Search ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ..... | 29 |
| บทที่ 4 กรณีศึกษา .....   | 33 |
| 4.1 กรณีศึกษา .....   | 33 |
| 4.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลต่อกระบวนการทำงานของวิธี Harmony Search .....   | 36 |
| 4.3 ผลการออกแบบ .....   | 38 |
| บทที่ 5 สรุป.....   | 55 |
| รายการอ้างอิง .....   | 57 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....  | 60 |



## สารบัญตาราง

|   |    |
|---|----|
| ตารางที่ 2.1 ผลการหาจุดต่ำสุดของฟังก์ชัน Six-Hump Camelback ด้วยวิธี Harmony Search .....               | 25 |
| ตารางที่ 3.1 ขอบเขตของตัวแปรต่างๆในงานวิจัย .....   | 26 |
| ตารางที่ 3.2 ราคาต่อหน่วยของวัสดุก่อสร้าง .....   | 27 |
| ตารางที่ 4.1 คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 .....   | 39 |
| ตารางที่ 4.2 คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 .....   | 40 |
| ตารางที่ 4.3 คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 3 .....   | 41 |
| ตารางที่ 4.4 คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 4 .....   | 42 |
| ตารางที่ 4.5 คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 1 (Live Load 200 kg/m <sup>2</sup> ) .....  | 43 |
| ตารางที่ 4.6 คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 2 (Live Load 200 kg/m <sup>2</sup> ) .....  | 44 |
| ตารางที่ 4.7 คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 1 (Live Load 200 kg/m <sup>2</sup> ) .....  | 45 |
| ตารางที่ 4.8 คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 2 (Live Load 200 kg/m <sup>2</sup> ) .....  | 46 |
| ตารางที่ 4.9 คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 3 (Live Load 200 kg/m <sup>2</sup> ) .....  | 47 |
| ตารางที่ 4.10 คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 4 (Live Load 200 kg/m <sup>2</sup> ) ..... | 48 |
| ตารางที่ 4.11 คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 1 (Live Load 400 kg/m <sup>2</sup> ) ..... | 49 |
| ตารางที่ 4.12 คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 2 (Live Load 400 kg/m <sup>2</sup> ) ..... | 50 |
| ตารางที่ 4.13 คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 1 (Live Load 400 kg/m <sup>2</sup> ) ..... | 51 |
| ตารางที่ 4.14 คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 2 (Live Load 400 kg/m <sup>2</sup> ) ..... | 52 |
| ตารางที่ 4.15 คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 3 (Live Load 400 kg/m <sup>2</sup> ) ..... | 53 |
| ตารางที่ 4.16 คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 4 (Live Load 400 kg/m <sup>2</sup> ) ..... | 54 |

## สารบัญรูป

|   |    |
|---|----|
| รูปที่ 2.1 รายละเอียดการเสริมเหล็กในคาน .....   | 8  |
| รูปที่ 2.2 รายละเอียดการเสริมเหล็กในเสา.....  | 8  |
| รูปที่ 2.3 การคำนวณพื้นที่ไม้แบบ.....   | 9  |
| รูปที่ 2.4 แรงภายในบนหน้าตัดคานเสริมเหล็กรับแรงดิ่งและแรงอัด .....                              | 12 |
| รูปที่ 2.5 ไดอะแกรมของแรงเฉือนในคาน .....   | 15 |
| รูปที่ 2.6 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ของหน้าตัดเสา .....  | 17 |
| รูปที่ 2.7 แนวคิดของวิธี Harmony Search.....  | 18 |
| รูปที่ 2.8 ผังขั้นตอนการทำงานของวิธี Harmony Search .....                                       | 23 |
| รูปที่ 2.9 ฟังก์ชัน Six-Hump Camelback.....   | 24 |
| รูปที่ 3.1 รายละเอียดการเสริมเหล็กในคาน .....   | 27 |
| รูปที่ 3.2 รายละเอียดการเสริมเหล็กในคาน 2 ช่วง .....  | 28 |
| รูปที่ 3.3 รายละเอียดการเสริมเหล็กในคาน 3 ช่วง .....  | 28 |
| รูปที่ 3.4 รายละเอียดการเสริมเหล็กในเสา.....  | 28 |
| รูปที่ 3.5 ผังการประยุกต์ใช้วิธี Harmony Search ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก..         | 29 |
| รูปที่ 4.1 กรณีสึกษา.....   | 35 |
| รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ HMCR .....  | 36 |
| รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบขนาดของเมตริกซ์ (HMS) .....  | 37 |
| รูปที่ 4.4 การลู่เข้าคำตอบของกรณีสึกษาที่ 1.....  | 39 |
| รูปที่ 4.5 การลู่เข้าคำตอบของกรณีสึกษาที่ 2.....  | 40 |
| รูปที่ 4.6 การลู่เข้าคำตอบของกรณีสึกษาที่ 3.....  | 41 |
| รูปที่ 4.7 การลู่เข้าคำตอบของกรณีสึกษาที่ 4.....  | 42 |
| รูปที่ 4.8 การลู่เข้าคำตอบของกรณีสึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 1 (Live Load 200 kg/m <sup>2</sup> )..... | 43 |

รูปที่ 4.9 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 2 (Live Load 200 kg/m<sup>2</sup>)..... 44

รูปที่ 4.10 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 1 (Live Load 200 kg/m<sup>2</sup>)..... 45

รูปที่ 4.11 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 2 (Live Load 200 kg/m<sup>2</sup>)..... 46

รูปที่ 4.12 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 3 (Live Load 200 kg/m<sup>2</sup>)..... 47

รูปที่ 4.13 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 4 (Live Load 200 kg/m<sup>2</sup>)..... 48

รูปที่ 4.14 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 1 (Live Load 400 kg/m<sup>2</sup>)..... 49

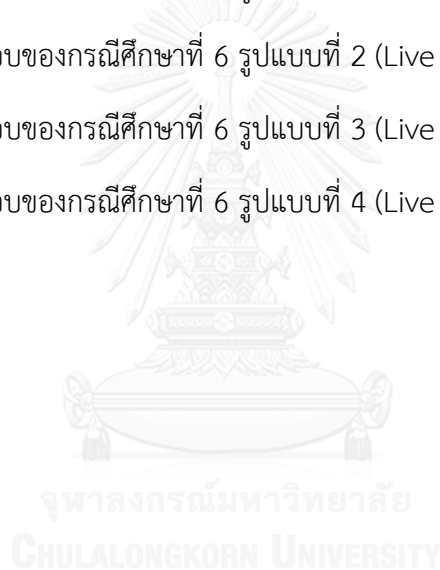
รูปที่ 4.15 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 2 (Live Load 400 kg/m<sup>2</sup>)..... 50

รูปที่ 4.16 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 1 (Live Load 400 kg/m<sup>2</sup>)..... 51

รูปที่ 4.17 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 2 (Live Load 400 kg/m<sup>2</sup>)..... 52

รูปที่ 4.18 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 3 (Live Load 400 kg/m<sup>2</sup>)..... 53

รูปที่ 4.19 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 4 (Live Load 400 kg/m<sup>2</sup>)..... 54



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้รับความนิยมมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันเนื่องจากมีความแข็งแรงทนทานสามารถรับน้ำหนักได้มาก ทำงานง่าย ราคาก่อสร้างและค่าบำรุงรักษาต่ำ

การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กกระทำโดยวิเคราะห์หาแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละชิ้นส่วนของโครงสร้าง เพื่อนำมาออกแบบขนาดหน้าตัดและเหล็กเสริมให้สามารถรับแรงที่เกิดขึ้นได้ โดยจะต้องผ่านข้อกำหนดในการออกแบบเพื่อความปลอดภัย อีกปัจจัยที่มีความสำคัญในการออกแบบโครงสร้างคือความประหยัด เนื่องด้วยสภาพเศรษฐกิจในปัจจุบันที่มีการแข่งขันทางด้านธุรกิจ การออกแบบโครงสร้างที่มีความประหยัดโดยที่โครงสร้างยังสามารถรับแรงได้อย่างปลอดภัยจึงมีความสำคัญอย่างมาก โดยทั่วไปวิศวกรมักใช้ความชำนาญและประสบการณ์เฉพาะตัวในการออกแบบเพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีความแข็งแรงและประหยัด แต่วิธีดังกล่าวยังไม่อาจกล่าวได้ว่าเป็นการออกแบบโครงสร้างที่ประหยัดที่สุด

ดังนั้นจึงมีการพัฒนาการออกแบบอย่างเหมาะสมด้วยวิธีเมตะฮิวริสติก ที่ใช้การสุ่มค่าเริ่มต้นของตัวแปร และปรับปรุงค่าด้วยวิธีที่แตกต่างกัน เช่น วิธี Genetic algorithm ได้รับแรงบันดาลใจมาจากวิวัฒนาการทางธรรมชาติ วิธี Ant colony optimization ได้รับแรงบันดาลใจมาจากธรรมชาติ ในการส่งสัญญาณติดต่อของฝูงมด เป็นต้น งานวิจัยนี้ได้้นำวิธี Harmony Search เสนอโดย Kang Seok Lee และ Zong Woo Geem ซึ่งได้รับแรงบันดาลใจจากกระบวนการของนักดนตรีในการค้นหาสภาวะที่ดีที่สุดของเสียงประสาน มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีความแข็งแรงและปลอดภัยตามมาตรฐาน ทั้งนี้การออกแบบจะพิจารณาเป็นแบบตัวแปรไม่ต่อเนื่อง (discrete variables) ดังรายละเอียดที่จะได้กล่าวต่อไป

## 1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization) ในช่วงยุคก่อนคริสต์ศักราช 1960 จะประยุกต์ใช้ความรู้ทางคณิตศาสตร์ (Xin-She Yang 2010) เช่น อนุพันธ์ และความชันในการเข้าหาจุดต่ำสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยในปี 1847 L. A. Cauchy ได้เสนอวิธีการกระทำซ้ำเพื่อค้นหาค่าตอบของสมการที่มีตัวแปรมากกว่า 1 ตัว (L. A. Cauchy 1847) นำไปสู่วิธีความลาดชัน (Gradient Method) และวิธีการค้นแบบสืบเชื้อสายอย่างสูงชัน (Steepest descent Method) อีกหนึ่งวิธีที่สำคัญคือวิธีซิมเพล็กซ์ (Simplex Method) ใช้สำหรับแก้ปัญหาเชิงเส้นขนาดใหญ่ (Linear Problem) เสนอโดย George Dantzig ในปี 1947 และวิธีอื่นๆซึ่งเหมาะสมกับปัญหาขนาดเล็กที่ไม่ซับซ้อน

อย่างไรก็ตามวิธีทางคณิตศาสตร์อาจไม่สามารถแก้ปัญหาขนาดใหญ่ที่มีความซับซ้อนมากขึ้น เช่น การออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรม เนื่องจากเป็นปัญหาแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Problem) การหาอนุพันธ์จึงเป็นไปได้ยาก และการค้นหาค่าตอบทั้งหมดต้องใช้เวลานาน ไม่เหมาะสำหรับการใช้งานจริง จึงมีการพัฒนาวิธีเมตะฮิวริสติกสำหรับแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนมากขึ้นโดยใช้หลักการกระทำซ้ำ (Iteration) เพื่อให้ได้คำตอบที่ยอมรับได้ภายในเวลาที่ไม่นานจนเกินไป ในยุคแรกวิธีเมตะฮิวริสติกที่มีความสำคัญได้แก่ วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) ได้รับแรงบันดาลใจมาจากการวิวัฒนาการและการคัดเลือกตามธรรมชาติ (Natural Selection) เพื่อให้ได้สิ่งมีชีวิตที่เหมาะสมที่สุดผ่านการสืบพันธุ์ (Reproduction) การแลกเปลี่ยนยีนส์ (Crossover or Recombination) และ การกลายพันธุ์ (Mutation) พัฒนาโดย John Holland และคณะระหว่างปี 1960 - 1970 ถัดมาในปี 1975 Kenneth De Jong เสนอวิทยานิพนธ์เกี่ยวกับการใช้วิธีเชิงพันธุกรรมสำหรับแก้ปัญหาที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง โดยวิธีเชิงพันธุกรรมประสบความสำเร็จในการแก้ปัญหาหลายรูปแบบและถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน

ในช่วงคริสต์ทศวรรษ 1980 และ 1990 เป็นช่วงเวลาที่น่าสนใจของวิธีเมตะฮิวริสติก โดยในปี 1983 S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt และ M. P. Vecchi ได้พัฒนาวิธีการจำลองการอบเหนียว (Simulated annealing) (S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt et al. 1983) ได้รับแรงบันดาลใจมาจากกระบวนการอบเหนียวของโลหะ โดยให้ความร้อนกับโลหะและลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ เพื่อให้โลหะสามารถจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ผลคือได้โลหะที่มีความเหนียวและไม่เปราะ วิธีนี้มีข้อดีคือสามารถหลีกเลี่ยงจุดต่ำสุดอื่นๆ (Local Optimal) ได้ ต่อมาในปี 1986 Fred W. Glover ได้เสนอวิธีการค้นหาแบบทาบู (Tabu Search) (F. Glover 1986) จุดเด่นของวิธีนี้คือมีรายการต้องห้าม (Tabu list) สำหรับป้องกันการค้นหาค่าตอบซ้ำ หรือเข้าสู่วัฏจักรที่ได้คำตอบแย่ลงกว่าเดิม

หลังจากนั้นได้มีการคิดค้นวิธีเมตะฮิวริสติกอื่น ๆ อีกมากมาย เช่น วิธีอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization) วิธี Particle Swarm Optimization เป็นต้น

ในปี 2001 Zong Woo Geem ได้เสนอวิธี Harmony Search (HS) ซึ่งได้รับแรงบันดาลใจมาจากกระบวนการของนักดนตรีในการค้นหาสภาวะที่ดีที่สุดของเสียงประสาน เมื่อนักดนตรีบรรเลงดนตรีโดยไม่ได้ฝึกซ้อมมาก่อนจะสามารถบรรเลงออกมาได้ 3 รูปแบบคือ 1. บรรเลงเพลงที่นักดนตรีรู้จักโดยไม่ได้เปลี่ยนแปลงโน้ตเพลงหรือระดับเสียงใดๆของเพลง 2. บรรเลงเพลงที่นักดนตรีรู้จักโดยเปลี่ยนแปลงโน้ตหรือระดับเสียงของเพลงเล็กน้อย 3. บรรเลงแบบสุ่มโน้ตเพลง เพื่อค้นหาเสียงดนตรีที่ไพเราะที่สุด โดยในปี 2004 Kang Seok Lee และ Zong Woo Geem ได้นำวิธี HS มาใช้ออกแบบขนาดหน้าตัดของชิ้นส่วนโครงสร้างเพื่อให้ได้น้ำหนักรวมโครงสร้างน้อยที่สุด (Kang Seok Lee and Zong Woo Geem 2004) ผลคือวิธี HS ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธีทางคณิตศาสตร์อื่นๆ ทั้งในด้านคำตอบและความรวดเร็วในการเข้าสู่คำตอบ ในปี 2007 M. Mahdavi, M. Fesanghary และ E. Damangir เสนอวิธี Improved harmony search algorithm (IHS) (M. Mahdavi, M. Fesanghary et al. 2007) เป็นการปรับปรุงวิธี HS โดยเปลี่ยนพารามิเตอร์บางตัวในวิธี HS ที่เป็นค่าคงที่ให้เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละรอบการคำนวณ ผลการทดสอบกับปัญหาที่มีฟังก์ชันข้อจำกัดและไม่มีฟังก์ชันข้อจำกัด ได้ผลที่ดีกว่าวิธีทางคณิตศาสตร์อื่นๆเช่นกัน ปี 2008 Mahamed G.H. Omran และ Mehrdad Mahdavi เสนอวิธี Global-best harmony search (GHS) (M. G.H. Omran and M. Mahdavi 2008) เป็นการปรับปรุงวิธี HS ที่มีขั้นตอนเหมือนกับวิธี IHS แต่ตัดพารามิเตอร์ที่กำหนดค่าได้ยากออกไปเพื่อความสะดวกในการใช้งาน รวมถึงทดสอบการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์บางตัวเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในการทำงาน

ปี 2009 M.P. Saka นำวิธี HS มาใช้ออกแบบโครงสร้างข้อแข็งเหล็กขนาดต่างๆ (M.P. Saka 2009) เพื่อให้ได้น้ำหนักรวมของเสาและคานน้อยที่สุดตามมาตรฐาน BS5950 และเลือกหน้าตัดเหล็กจาก British steel section table ซึ่งปัญหาเป็นแบบตัวแปรไม่ต่อเนื่อง ผลที่ได้คือวิธี HS เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและสามารถใช้กับปัญหาแบบตัวแปรไม่ต่อเนื่องได้เป็นอย่างดี และให้ผลการคำนวณที่ดีกว่าวิธี GA ต่อมาในปี 2010 A. Kaveh และ A. Shakouri Mahmud Abadi ได้นำวิธี IHS มาใช้ออกแบบระบบพื้นผสมระหว่างแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กและคานเหล็ก (A. Kaveh and A. Shakouri Mahmud Abadib 2010) เพื่อให้ได้ราคาก่อสร้างต่ำที่สุดพิจารณาเฉพาะราคาวัสดุก่อสร้างเท่านั้น โดยผู้วิจัยได้ตั้งข้อสังเกตว่าการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับปัญหาจะช่วยให้การเข้าสู่คำตอบรวดเร็วขึ้น ในปี 2011 Ferhat Erdal, Erkan Doğan และ Mehmet Polat Saka ได้นำวิธี HS มาใช้ออกแบบคานที่มีรู (F. Erdal, E. Doğan et al. 2011) เพื่อให้ได้น้ำหนักคานน้อยที่สุด

ตามมาตรฐาน BS5950 ตัวแปรที่ออกแบบคือ ขนาดหน้าตัดคาน จำนวนรูเจาะ และ ขนาดของรูเจาะ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี particle swarm optimizers (PSO) ได้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกัน

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะเห็นว่าวิธี HS สามารถประยุกต์ใช้ในการออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับโครงสร้างทางวิศวกรรมได้เป็นอย่างดี โดยมีวิธีที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์บางตัวในวิธี HS อีกหลากหลาย เช่นวิธี IHS และ GHS แต่ทุกวิธีจะมีหลักการทำงานเหมือนกันกับวิธี HS ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกวิธี HS มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

### 1.3 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและประยุกต์ใช้วิธี Harmony Search ในการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความปลอดภัยตามมาตรฐาน ACI 318M-11 และมีราคาก่อสร้างเฉพาะในส่วนของวัสดุต่ำที่สุด

### 1.4 ขอบเขต

ขอบเขตที่พิจารณาในการออกแบบโครงสร้างและการหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับงานวิจัยสามารถระบุได้ดังต่อไปนี้

1. พิจารณาโครงสร้างเสาและคานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นแบบโครงข้อแข็งพอร์ทัล (portal frames)
2. น้ำหนักบรรทุกประกอบด้วย น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load) และน้ำหนักบรรทุกจรในแนวตั้ง (Vertical Live load)
3. วิเคราะห์โครงสร้างหาแรงภายในของชิ้นส่วนด้วยวิธีสติฟเนสโดยตรง (Direct Stiffness) โดยพิจารณาพฤติกรรมของโครงสร้างเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic)
4. พิจารณาค่าตอบของตัวแปรเป็นตัวแปรแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete variables)
5. วิเคราะห์กำลังต้านทานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน ACI 318M-11
6. เหล็กเสริมในคานและเสาจะพิจารณาเฉพาะขนาดและปริมาณ โดยจะไม่พิจารณาการจัดเรียงเหล็กเสริม
7. โครงสร้างคานจะไม่พิจารณาระยะโก่ง และความลึกอย่างน้อย
8. โครงสร้างเสาจะพิจารณาเป็นเสาสั้นโดยไม่คิดการโก่งเดาะของเสา

### 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนในการดำเนินงานทั้งหมดวิจัยสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

1. กำหนดแนวทางของวิทยานิพนธ์
2. ศึกษาทฤษฎีการวิเคราะห์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กและการหาค่าเหมาะสมที่สุด
3. ค้นคว้าและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุด
4. พัฒนาโปรแกรม java สำหรับวิเคราะห์โครงสร้างและหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี Harmony Search
5. ทดสอบโปรแกรมกับกรณีศึกษาทั้งหมด
6. วิเคราะห์และสรุปผลการคำนวณที่ได้
7. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์





## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

การออกแบบในที่นี้จะพิจารณาโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ประกอบไปด้วยชิ้นส่วนคานและเสา ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) ในงานวิจัยนี้คือราคารวมของวัสดุก่อสร้าง โดยมีสมการของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังนี้

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

|        |          |                                   |                    |
|--------|----------|-----------------------------------|--------------------|
| โดยที่ | $z$      | คือ ราคารวมของวัสดุก่อสร้าง       | (บาท)              |
|        | $c_c$    | คือ ราคาคอนกรีตต่อหน่วยปริมาตร    | (บาท/ลูกบาศก์เมตร) |
|        | $c_s$    | คือ ราคาเหล็กเสริมต่อหน่วยน้ำหนัก | (บาท/กิโลกรัม)     |
|        | $c_{st}$ | คือ ราคาเหล็กปลอกต่อหน่วยน้ำหนัก  | (บาท/กิโลกรัม)     |
|        | $c_f$    | คือ ราคาไม้แบบต่อหน่วยพื้นที่     | (บาท/ตารางเมตร)    |
|        | $V_c$    | คือ ปริมาตรคอนกรีต                | (ลูกบาศก์เมตร)     |
|        | $W_s$    | คือ น้ำหนักเหล็กเสริม             | (กิโลกรัม)         |
|        | $W_{st}$ | คือ น้ำหนักเหล็กปลอก              | (กิโลกรัม)         |
|        | $A_f$    | คือ พื้นที่ไม้แบบ                 | (ตารางเมตร)        |

### ปริมาตรคอนกรีต ( $V_c$ )

คาน  $V_c = b \times t \times L$

เสา  $V_c = b \times t \times h$

โดยที่  $b$  = ความกว้างของคานและเสา (เมตร)

$t$  = ความลึกของคานและเสา (เมตร)

$L$  = ความยาวของคาน (เมตร)

$h$  = ความสูงของเสา (เมตร)

### น้ำหนักเหล็กเสริม ( $W_s$ )

คาน  $W_s = w_i \times \left( A_{s,mt} + A_{s,mb} + \frac{1}{3} A_{s,extl} + \frac{3}{4} A_{s,exbm} + \frac{1}{3} A_{s,extr} \right) \times L$

เสา  $W_s = w_i \times A_{st} \times h$

โดยที่  $w_i$  = หน่วยน้ำหนักของเหล็ก (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

$A_{s,mt}$  = พื้นที่เหล็กเสริมหลักบน (ตารางเมตร)

$A_{s,mb}$  = พื้นที่เหล็กเสริมหลักล่าง (ตารางเมตร)

$A_{s,extl}$  = พื้นที่เหล็กเสริมพิเศษบน-ซ้าย (ตารางเมตร)

$A_{s,exbm}$  = พื้นที่เหล็กเสริมพิเศษล่าง-กลาง (ตารางเมตร)

$A_{s,extr}$  = พื้นที่เหล็กเสริมพิเศษบน-ขวา (ตารางเมตร)

$A_{st}$  = พื้นที่เหล็กเสริมยื่นรวม (ตารางเมตร)

$L$  = ความยาวของคาน (เมตร)

$h$  = ความสูงของเสา (เมตร)

### น้ำหนักเหล็กตั่ง ( $W_{st}$ )

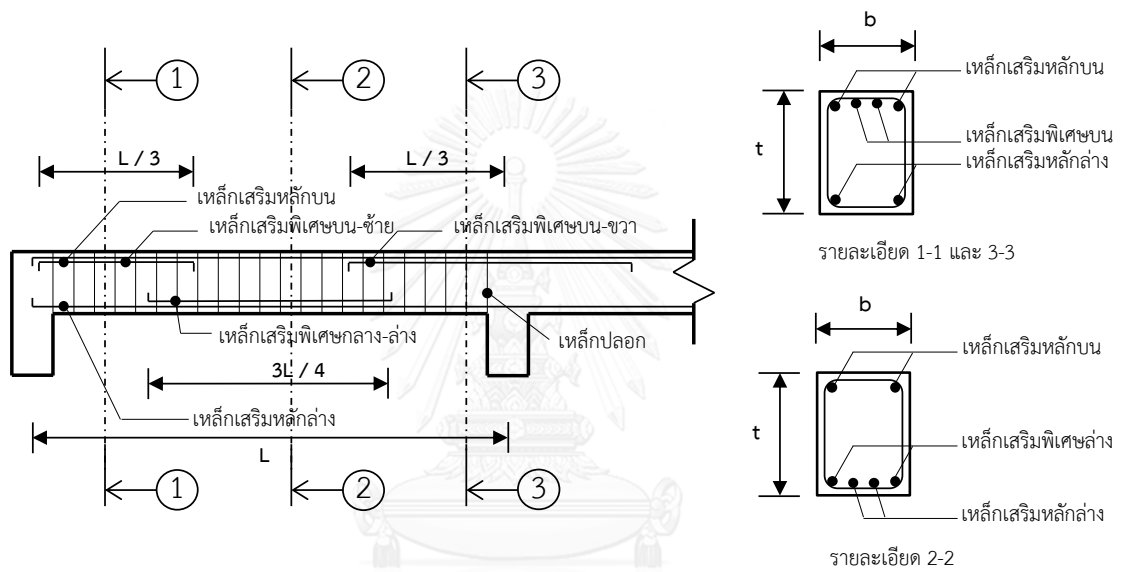
$$\text{คาน } W_{st} = w_i \times n \times A_s \times l$$

โดยที่  $w_i$  = หน่วยน้ำหนักของเหล็ก (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

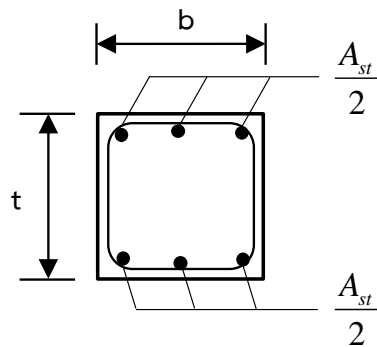
$n$  = จำนวนเหล็กปลอก

$A_s$  = พื้นที่เหล็กปลอก (ตารางเมตร)

$l$  = ความยาวเหล็กปลอก 1 ปลอก (เมตร)



รูปที่ 2.1 รายละเอียดการเสริมเหล็กในคาน



รูปที่ 2.2 รายละเอียดการเสริมเหล็กในเสา

### พื้นที่ไม้แบบ ( $A_f$ )

คาน  $A_f = (b \times L) + (2t \times L) = L(b + 2t)$

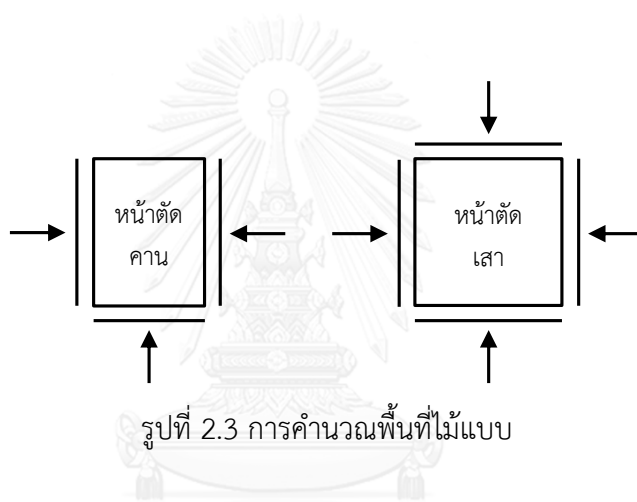
เสา  $A_f = (2b \times h) + (2t \times h) = h(2b + 2t)$

โดยที่  $b$  = ความกว้างของคานและเสา (เมตร)

$t$  = ความลึกของคานและเสา (เมตร)

$L$  = ความยาวของคาน (เมตร)

$h$  = ความสูงของเสา (เมตร)



รูปที่ 2.3 การคำนวณพื้นที่ไม้แบบ

## 2.2 ฟังก์ชันข้อจำกัด

ฟังก์ชันข้อจำกัด (Constraint function) มีความสำคัญในการตรวจสอบคำตอบที่ได้จากการสุ่มค่าตัวแปรต่างๆ หรือการปรับปรุงคำตอบเพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุด คำตอบที่นำมาพิจารณานั้นจะต้องอยู่ภายใต้ฟังก์ชันข้อจำกัดเท่านั้น ถ้าอยู่นอกเหนือฟังก์ชันข้อจำกัดจะถือว่าใช้ไม่ได้ ในงานวิจัยนี้ฟังก์ชันข้อจำกัดคือความสามารถในการรับแรงของชิ้นส่วนโครงสร้าง โดยจะต้องมีกำลังต้านทานมากกว่าแรงที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักประลัยดังนี้

$$\text{Design strength} \geq \text{Required strength} \quad (2)$$

$$\phi(\text{Nominal strength}) \geq U \quad (3)$$

การออกแบบชิ้นส่วนคานจะพิจารณากำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงเฉือนดังนี้

$$\phi M_n \geq M_u \quad (4)$$

$$\phi V_n \geq V_u \quad (5)$$

โดยที่  $M_n$  = โมเมนต์ดัดระบุ

$V_n$  = แรงเฉือนระบุ

$M_u$  = โมเมนต์ดัดประลัยที่เกิดขึ้น

$V_u$  = แรงเฉือนประลัยที่เกิดขึ้น

$\phi$  = ตัวคูณลดกำลังมีค่าเท่ากับ 0.9 และ 0.75 สำหรับ

โมเมนต์ดัดและแรงเฉือนตามลำดับ

การออกแบบชิ้นส่วนเสาจะพิจารณากำลังรับแรงตามแนวแกนและกำลังรับโมเมนต์ดัดดังนี้

$$\phi P_n \geq P_u \quad (6)$$

$$\phi M_n \geq M_u \quad (7)$$

โดยที่  $P_n$  = แรงตามแนวแกนระบุ

$M_n$  = โมเมนต์ดัดระบุ

$P_u$  = แรงตามแนวแกนประลัยที่เกิดขึ้น

$M_u$  = โมเมนต์ดัดประลัยที่เกิดขึ้น

$\phi$  = ตัวคูณลดกำลังมีค่าเท่ากับ 0.65 สำหรับแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัด

### 2.3 การวิเคราะห์โครงสร้าง

การวิเคราะห์หาแรงภายในที่กระทำต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กใช้วิธี Direct Stiffness Method อ้างอิงตามมาตรฐาน ACI 318-11 โดยมีสมมุติฐานว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของวัสดุมีลักษณะเป็นเส้นตรง น้ำหนักที่กระทำกับโครงสร้างคือ น้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจร เพื่อนำแรงภายในที่ได้มาใช้ในการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับหน้าตัดของชิ้นส่วนโครงสร้างดังนี้

$$M_u = 1.2 \cdot M_D + 1.6 \cdot M_L \quad (8)$$

$$V_u = 1.2 \cdot V_D + 1.6 \cdot V_L \quad (9)$$

$$P_u = 1.2 \cdot P_D + 1.6 \cdot P_L \quad (10)$$

โดยที่  $M_u, M_D, M_L$  = โมเมนต์ประลัย โมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุกคงที่ และโมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุกจรตามลำดับ

$V_u, V_D, V_L$  = แรงเฉือนประลัย แรงเฉือนจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ และแรงเฉือนจากน้ำหนักบรรทุกจรตามลำดับ

$P_u, P_D, P_L$  = แรงตามแนวแกนประลัย แรงตามแนวแกนจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ และแรงตามแนวแกนจากน้ำหนักบรรทุกจรตามลำดับ

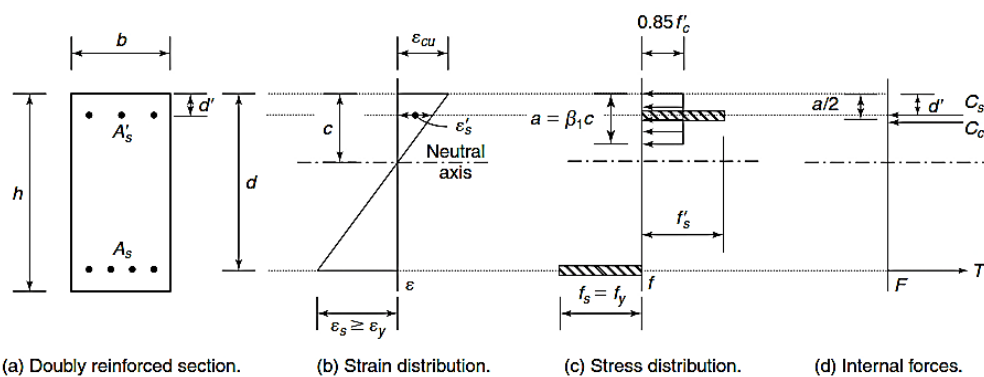
โดยงานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้โปรแกรม JSM (W. Smittakorn 2008) ช่วยในการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อหาแรงภายในที่เกิดขึ้น

## 2.4 การวิเคราะห์กำลังของหน้าตัด

การวิเคราะห์กำลังของชิ้นส่วนคาน เสา และโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กจะใช้วิธีกำลัง (Strength Design Method: SDM) ตามมาตรฐาน ACI 318M-11 (American Concrete Institute 2008)

### 2.4.1 การวิเคราะห์หน้าตัดคาน

การวิเคราะห์กำลังด้านทานของคานแบ่งเป็น หน้าตัดคานรับแรงดัดและ หน้าตัดคานรับแรงเฉือน โดยหน้าตัดคานรับแรงดัดพิจารณาเป็นหน้าตัดคานเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด (Doubly reinforced beam) ดังรูปที่ 2.4



(a) Doubly reinforced section. (b) Strain distribution. (c) Stress distribution. (d) Internal forces.

รูปที่ 2.4 แรงภายในบนหน้าตัดคานเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด

ในงานวิจัยนี้ยอมรับเฉพาะชิ้นส่วนคานที่วิบัติแบบแรงดึงเป็นหลัก ( $\epsilon_s \geq 0.005$ ,  $\phi = 0.9$ ) และกำลังของเหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดครากเท่านั้น ( $f_s = f_y$ ) ในส่วนของกำลังของเหล็กเสริมรับแรงอัดจะถึงจุดครากหรือไม่ก็ได้ โดยขั้นตอนการหาค่าโมเมนต์ดัดระบุแสดงดังต่อไปนี้ ( $M_n$ )

1. กำหนดขนาดความกว้าง ( $b$ ) ความลึก ( $t$ ) ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึง ( $A_s$ ) และปริมาณเหล็กเสริมรับแรงอัด ( $A_s'$ ) ของชิ้นส่วนคาน
2. คำนวณค่า  $\beta_1$  จากสมการ

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

$f_c'$  มีหน่วยเป็น MPa

3. สมมุติให้เหล็กเสริมรับแรงอัดถึงจุดคราก ( $f'_s = f_y$ ) และคำนวณหาค่า  $c$  และ  $a$  จากสมการ

$$A_s f_y = 0.85 f'_s \beta_1 c b + A'_s f'_s$$

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

$$a = \beta_1 c$$

4. คำนวณค่า  $\epsilon_s$  และ  $\epsilon'_s$  เปรียบเทียบกับค่า  $\epsilon_y$  โดยงานวิจัยนี้กำหนดค่า  $\epsilon_s$  ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.005 เพื่อให้หน้าตัดคานวิบัติด้วยแรงดึงเท่านั้น

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

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

ถ้าค่า  $\epsilon_s > \epsilon_y$  และ  $\epsilon'_s > \epsilon_y$  แสดงว่าสมมุติฐานที่ว่า  $f_s = f'_s = f_y$  เป็นจริงแต่ถ้าไม่แสดงว่าเหล็กเสริมรับแรงดึงและเหล็กเสริมรับแรงอัดไม่ถึงจุดคราก ให้ข้ามไปหาค่า  $f'_s$  ที่แท้จริงในขั้นตอนที่ 7

5. คำนวณค่า  $A_{s1}$  และ  $A_{s2}$  จากสมการ

$$A_{s2} = \frac{A'_s f'_s}{f_y}$$

$$A_{s1} = A_s - A_{s2}$$

6. คำนวณค่าโมเมนต์ดัดระบุ ( $M_n$ ) จากสมการ

$$M_n = A_{s1} f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f'_s (d - d')$$

และ  $\phi M_n = \phi \left[ A_{s1} f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f'_s (d - d') \right]$  โดยที่  $\phi = 0.9$

7. คำนวณค่า  $c$  และ  $a$  ใหม่ในกรณีที่เหล็กเสริมรับแรงอัดไม่ถึงจุดคราก ( $f'_s = \epsilon'_s E_s$ ) จากสมการ

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

$$a = \beta_1 c$$



8. คำนวณหาค่า  $\varepsilon_s'$  ใหม่เพื่อหาค่า  $f_s'$  และย้ายไปกระทำขั้นตอนที่ 5 และ 6 ใหม่เพื่อหาค่าโมเมนต์ดัดระบุ ( $M_n$ )

$$\varepsilon_s' = 0.003 \left( \frac{c-d'}{c} \right)$$

$$f_s' = \varepsilon_s' E_s$$

กรณีที่หน้าตัดคานไม่สามารถรับแรงเฉือนได้ จะต้องเสริมเหล็กแนวขวางเพื่อช่วยต้านทานแรงเฉือน มีสมการดังนี้

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

โดยที่  $V_n$  = แรงเฉือนระบุ

$V_c$  = แรงเฉือนจากคอนกรีต

$V_s$  = แรงเฉือนจากเหล็กเสริมแนวขวาง

$\phi$  = ตัวคูณลดมีค่าเท่ากับ 0.75

ขั้นตอนการวิเคราะห์การเสริมเหล็กรับแรงเฉือนในคานแสดงดังต่อไปนี้

1. หาแรงเฉือนประลัยที่หน้าตัดวิกฤต ( $V_u$ ) ที่ห่างจากขอบที่รองรับเท่ากับระยะความลึกประสิทธิผล ( $d$ ) จากสมการ

$$V_u = V_{\max} - W_u(d)$$

2. คำนวณหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตจากสมการ

$$\phi V_c = \phi (0.17 \lambda \sqrt{f_c'} b_w d) \quad \text{โดยที่ } \lambda = 1.00, \phi = 0.75$$

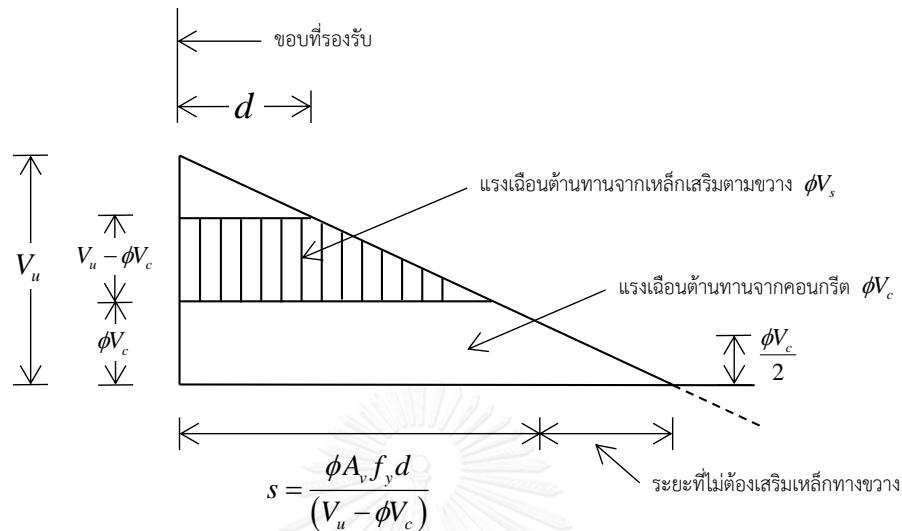
3. คำนวณกำลังต้านทานแรงเฉือนที่ต้องการสำหรับเหล็กดัดจากสมการ

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

ถ้าหาก  $\phi V_s \leq \phi 0.66 \sqrt{f_c'} b_w d$  แสดงว่าหน้าตัดสามารถรับกำลังต้านทานแรงเฉือนได้ แต่ถ้า

$\phi V_s > \phi 0.66 \sqrt{f_c'} b_w d$  แสดงว่าหน้าตัดไม่สามารถรับกำลังต้านทานแรงเฉือนได้ ให้เลือกขนาดหน้าตัดใหม่

4. พิจารณาระยะเรียงของเหล็กกล้าที่ตั้งโดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วง  $V_u \geq \phi V_c$  และช่วง  $\frac{1}{2}\phi V_c < V_u < \phi V_c$  ดังแสดงในรูปที่ 2.5



5. คำนวณหาระยะเรียงของเหล็กกล้าที่ตั้ง ( $s$ ) โดยแบ่งออกเป็น 3 กรณีคือ
- กรณีที่ 1  $V_u \geq \phi V_c$

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

- กรณีที่ 2  $\frac{1}{2}\phi V_c < V_u < \phi V_c$

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

- กรณีที่ 3

ไม่ต้องเสริมเหล็กกล้าที่ตั้งในคาน

6. คำนวณระยะเรียงของเหล็กกล้าที่ตั้งมากที่สุดพิจารณาจากค่า  $V_s$  มีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

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

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

### 2.4.2 การวิเคราะห์หน้าตัดเสา

เสาจะพิจารณาเป็นเสาสั้นรับแรงในแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัด โดยไม่คิดการโก่งคดของเสา การวิเคราะห์กำลังต้านทานของเสาทำได้โดยการสร้างแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction Diagram) โดยในงานวิจัยนี้ได้ประมาณขอบเขตการยอมรับหน้าตัดเสาของแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ด้วยสมการเส้นตรง 3 เส้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยมีขั้นตอนแสดงดังต่อไปนี้

1. เลือกขนาดความกว้าง ( $b$ ) ความลึก ( $t$ ) และปริมาณเหล็กเสริมยื่นรวม ( $A_{st}$ ) ของหน้าตัดเสา
2. คำนวณค่ากำลังต้านทานเมื่อรับแรงตามแนวแกนสูงสุด  $\phi P_{n(max)}$  จากสมการ

$$P_n = 0.85f'_c(A_g - A_{st}) + f_y A_{st} \quad \text{โดยที่ } A_c = A_g - A_{st}$$

และ  $P_{n(max)} = 0.80P_n$

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

3. พิจารณาสภาวะวิบัติสมมูล ที่มีความเครียดผิวคอนกรีตด้านรับแรงอัดถึงค่าประลัย  $\epsilon_{cu} = 0.003$

และความเครียดในเหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดคราก  $\epsilon_s = \epsilon_y = \frac{f_y}{E_s}$  เพื่อคำนวณค่า  $\phi P_{nb}$  และ

$\phi M_{nb}$  จากสมการ

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

$$a_b = \beta_1 c_b$$

จากสมมูลของแรงในแนวตั้ง

$$P_b = C_c + C_s - T$$

เมื่อ  $C_c = 0.85f'_c ab = 0.85f'_c \beta_1 c_b b$

$$C_s = A_s f'_s$$

และ  $T = A_s f_y$

คำนวณหน่วยแรง  $f'_s$  ได้จากสมการ

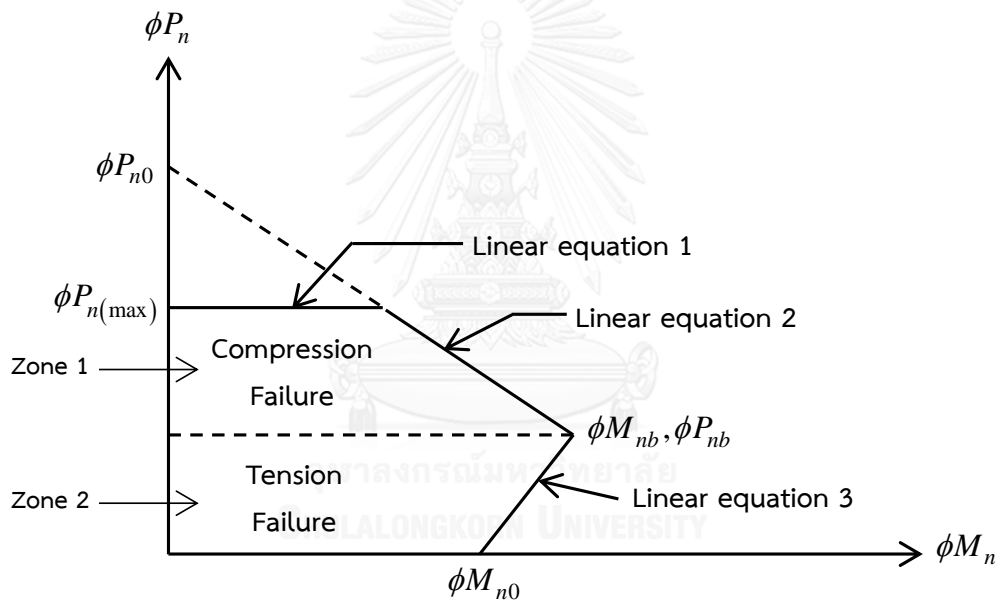
$$f'_s = \varepsilon_{cu} E_s \left( \frac{c_b - d'}{c_b} \right) \leq f_y$$

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

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

4. คำนวณกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดระบุ ณ แรงตามแนวแกนเท่ากับศูนย์ โดยใช้หลักการหากำลังต้านทานโมเมนต์ของคานเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด

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



รูปที่ 2.6 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ของหน้าตัดเสา

โดยที่  $P_{n0}$  = แรงตามแนวแกนระบุ ณ โมเมนต์ดัดเท่ากับศูนย์

$P_{n(\max)}$  = แรงตามแนวแกนระบุสูงสุด

$P_{nb}$  = แรงตามแนวแกนระบุ ณ สภาวะวิบัติสมดุล

$M_{nb}$  = โมเมนต์ดัดระบุ ณ สภาวะวิบัติสมดุล

$M_{n0}$  = โมเมนต์ดัดระบุ ณ แรงตามแนวแกนเท่ากับศูนย์

$\phi$  = ตัวคูณลดกำลังสำหรับแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดมีค่าเท่ากับ 0.65

6. ตรวจสอบกำลังต้านทานจากแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ในรูปที่ 2.6 ดังนี้

6.1 กรณีที่  $P_u < \phi P_{nb}$  ให้ตรวจสอบว่า  $M_u$  อยู่ใน Zone 1 หรือไม่

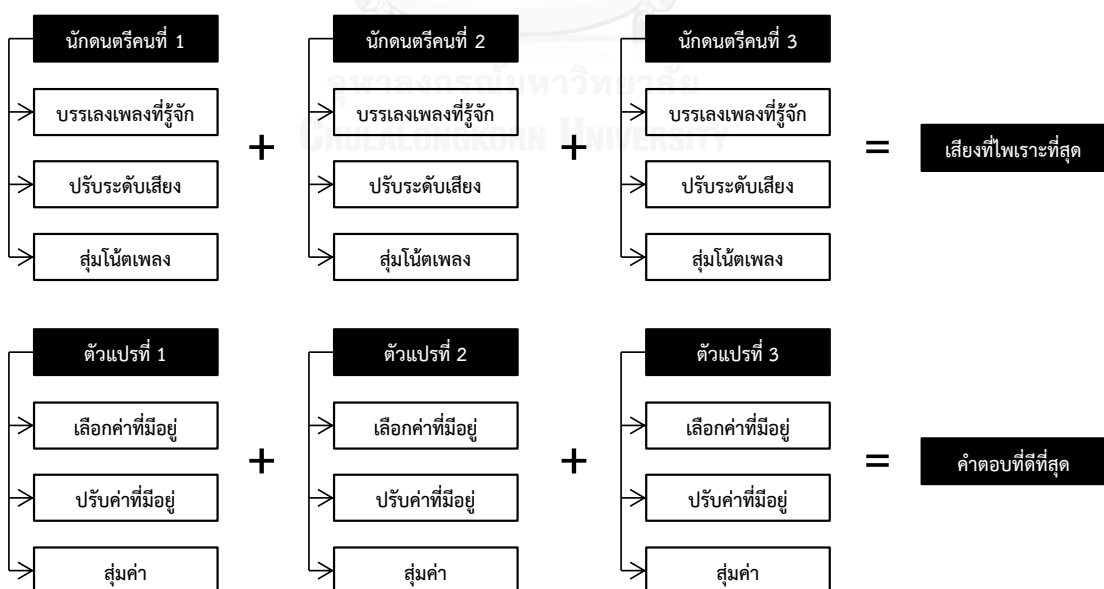
6.2 กรณีที่  $\phi P_{nb} < P_u < \phi P_{n(max)}$  ให้ตรวจสอบว่า  $M_u$  อยู่ใน Zone 2 หรือไม่

ถ้าเป็นจริงตามกรณีใดกรณีหนึ่ง จะยอมรับหน้าตัดของเสาแต่หากไม่เป็นจริงให้ทำการสุมหน้าตัดใหม่

## 2.5 Harmony Search Algorithm

### 2.5.1 ความเป็นมา

วิธี Harmony Search (HS) ได้รับแรงบันดาลใจมาจากกระบวนการของนักดนตรีในการค้นหาสภาวะที่ดีที่สุดของเสียงประสาน เมื่อนักดนตรีบรรเลงดนตรีโดยไม่ได้ฝึกซ้อมมาก่อน จะสามารถบรรเลงออกมาได้ 3 รูปแบบคือ 1. บรรเลงเพลงที่นักดนตรีรู้จักโดยไม่ได้เปลี่ยนแปลง โน้ตเพลงหรือระดับเสียงใดๆของเพลง 2. บรรเลงเพลงที่นักดนตรีรู้จักโดยเปลี่ยนแปลงโน้ตหรือระดับเสียงของเพลงเล็กน้อย 3. บรรเลงแบบสุมโน้ตเพลง เพื่อค้นหาเสียงดนตรีที่ไพเราะที่สุด เปรียบได้กับการเลือกค่าตัวแปรของวิธี HS ที่ทำได้ 3 รูปแบบคือ 1. เลือกจากค่าทั้งหมดที่มีอยู่ 2. เลือกจากค่าทั้งหมดที่มีอยู่และปรับค่าเล็กน้อย 3. สุ่มค่าขึ้นมาใหม่ เพื่อใช้สำหรับหาค่าตอบที่ดีที่สุดต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แนวคิดของวิธี Harmony Search

## 2.5.2 หลักการของ Harmony Search

ในวิธี HS จะเก็บชุดคำตอบไว้หลายๆชุดโดยเก็บเป็นเมตริกซ์ จำนวนหลักหมายถึงจำนวนตัวแปรที่สนใจทั้งหมด ( $x_i$  โดยที่  $i=1$  ถึง  $N$ ) และค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ส่วนจำนวนแถวหมายถึงจำนวนชุดคำตอบที่จะเก็บไว้ในหน่วยความจำ นอกจากนี้ยังมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องอีกคือ Harmony memory size (HMS) หรือขนาดของเมตริกซ์ ความน่าจะเป็นในการใช้หน่วยความจำ (HMCR) ความน่าจะเป็นในการปรับระดับเสียง (PAR) และจำนวนรอบที่กระทำซ้ำ (NI)

กระบวนการของวิธี HS สามารถแบ่งได้เป็นสองส่วนคือ การสร้างชุดคำตอบสำหรับเมตริกซ์เริ่มต้น และการใช้วิธี HS สร้างชุดคำตอบใหม่ ชุดคำตอบที่จะบรรจุในเมตริกซ์เริ่มต้นจะได้อาจมาจากการสุ่มค่าของตัวแปรแต่ละตัวและตรวจสอบว่าอยู่ภายใต้ฟังก์ชันข้อจำกัดหรือไม่ ถ้าใช่จึงจะคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และบรรจุลงในเมตริกซ์ แต่ถ้าไม่จะต้องสุ่มค่าตัวแปรทั้งหมดอีกครั้งเพื่อหาชุดคำตอบใหม่ และกระทำซ้ำจนได้ชุดคำตอบครบตามขนาด HMS ที่กำหนดไว้ จากนั้นจะจัดเรียงชุดคำตอบทั้งหมดโดยเรียงตามค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากน้อยไปมาก

$$\begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_N^1 & z(x^1) \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_N^2 & z(x^2) \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & \dots & x_N^{HMS} & z(x^{HMS}) \end{bmatrix}$$

ส่วนที่สองคือการสร้างชุดคำตอบใหม่โดยอาศัยวิธีการเลือกตัวแปรทั้ง 3 รูปแบบที่ได้กล่าวไปแล้ว เริ่มต้นที่ตัวแปรที่หนึ่งโดยการสุ่มเลขทศนิยมค่าตั้งแต่ 0-1 เพื่อเปรียบเทียบกับค่า HMCR ถ้าค่าที่ได้มีน้อยกว่าค่า HMCR ให้สุ่มเลือกค่าตัวแปรที่หนึ่งจากค่าใดค่าหนึ่งของตัวแปรที่หนึ่งในเมตริกซ์ (ค่าในหลักที่หนึ่ง) เปรียบเสมือนการใช้หน่วยจำที่มีอยู่หรือการบรรเลงเพลงที่นักดนตรีรู้จักนั่นเอง แต่ถ้าค่าที่ได้มากกว่า HMCR ให้สุ่มค่าของตัวแปรที่หนึ่งจากขอบเขตค่าสำหรับตัวแปรที่หนึ่งเหมือนในครั้งแรก ซึ่งเปรียบเสมือนกับการสุ่มโน้ตเพลงใหม่ ในกรณีที่เลือกค่าจากเมตริกซ์ ต้องตรวจสอบต่อว่า จะปรับเปลี่ยนค่าที่ได้หรือไม่ โดยการสุ่มเลขทศนิยมค่าตั้งแต่ 0-1 เปรียบเทียบกับค่า PAR ถ้าค่าที่ได้มีน้อยกว่าค่า PAR จะปรับค่าที่ได้โดยอาจเลือกค่าใกล้เคียงตัวบนหรือตัวล่าง กรณีนี้เปรียบเสมือนการบรรเลงเพลงโดยปรับระดับเสียงเล็กน้อย สำหรับตัวแปรอื่นๆสามารถกระทำได้โดยวิธีการเดียวกัน

เมื่อได้ชุดคำตอบใหม่แล้วจึงตรวจสอบว่าอยู่ภายใต้ฟังก์ชันข้อกำหนดหรือไม่ ถ้าไม่ให้สร้างชุดคำตอบใหม่ ถ้าใช่ให้คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเปรียบเทียบกับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของชุดคำตอบที่แย่ที่สุด (ชุดคำตอบแถวสุดท้ายในเมตริกซ์) ถ้าน้อยกว่าให้บรรจุชุดคำตอบใหม่เข้าไปแทนที่ชุดคำตอบที่แย่ที่สุดและจัดเรียงชุดคำตอบทั้งหมดใหม่โดยเรียงตามค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากน้อยไปมาก จากนั้นสร้างชุดคำตอบใหม่จนครบตามจำนวนรอบกระทำซ้ำที่กำหนด

### 2.5.3 ขั้นตอนการทำงาน

วิธี Harmony Search มีขั้นตอนการทำงานดังในรูปที่ 2.8

1. กำหนดปัญหาและค่าของตัวแปรต่างๆ
2. สร้างหน่วยความจำของฮาร์โมนี (Harmony memory)
3. ค้นหาคำตอบใหม่ของฮาร์โมนี
4. ปรับปรุงหน่วยความจำของฮาร์โมนี
5. ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด

#### ขั้นตอนที่ 1 กำหนดปัญหาและค่าของตัวแปรต่างๆ

ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดระบุได้ดังต่อไปนี้

หาค่าน้อยที่สุดของฟังก์ชัน  $z$  โดย  $x_i \in X_i, i=1,2,\dots,N$

เมื่อ  $z$  คือฟังก์ชันวัตถุประสงค์,  $x_i$  คือตัวแปรที่สนใจ,  $X_i$  คือขอบเขตของตัวแปรที่สนใจโดยที่  $X_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(K)\}$  สำหรับตัวแปรแบบไม่ต่อเนื่อง,  $N$  คือจำนวนตัวแปรทั้งหมดที่สนใจ และ  $K$  คือจำนวนค่าในขอบเขตสำหรับตัวแปรแบบไม่ต่อเนื่อง

กำหนดพารามิเตอร์ในวิธี HS คือ 1. Harmony memory size (HMS) หรือขนาดของเมตริกซ์ 2. ความน่าจะเป็นในการใช้หน่วยความจำ (HMCR) 3. ความน่าจะเป็นในการปรับระดับเสียง (PAR) และจำนวนรอบที่กระทำซ้ำ (NI)

## ขั้นตอนที่ 2 สร้างหน่วยความจำของฮาร์โมนี (Harmony memory)

วิธี HS จะเก็บชุดคำตอบเป็นเมตริกซ์ตั้งนั้นจึงมีชุดคำตอบมากกว่า 1 ชุด โดยชุดคำตอบแต่ละชุดได้มาจากการสุ่มค่าตัวแปรแต่ละตัวจากขอบเขตของตัวแปรนั้นๆ คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แล้วจึงบรรจุลงในเมตริกซ์ เมื่อได้ชุดคำตอบครบตามขนาดเมตริกซ์ที่กำหนดไว้แล้ว (HMS) ให้จัดเรียงชุดคำตอบเรียงตามค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากน้อยไปมาก

$$\begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_N^1 & z(x^1) \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_N^2 & z(x^2) \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & \dots & x_N^{HMS} & z(x^{HMS}) \end{bmatrix}$$

## ขั้นตอนที่ 3 ค้นหาคำตอบใหม่ของฮาร์โมนี

ชุดคำตอบใหม่ (new harmony vector),  $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_N)$  สามารถเลือกค่าของตัวแปรได้ 3 รูปแบบคือ 1. ใช้หน่วยความจำ 2. ปรับระดับเสียง 3. สุ่มค่าใหม่

**รูปแบบที่ 1** ใช้หน่วยความจำ ค่าตัวแปรที่หนึ่ง  $x'_1$  สำหรับชุดคำตอบใหม่ เลือกได้จากค่าใดค่าหนึ่งของตัวแปรที่หนึ่งในเมตริกซ์ ( $x_1^1 - x_1^{HMS}$ ) สำหรับค่าตัวแปรอื่น ( $x'_2, x'_3, \dots, x'_N$ ) ก็สามารรถเลือกค่าใดค่าหนึ่งของตัวแปรนั้นในเมตริกซ์เช่นเดียวกัน

**รูปแบบที่ 2** ปรับระดับเสียง ต่อเนื่องจากกรณีแรกโดยเมื่อเลือกค่าจากเมตริกซ์ ( $x'(k)$  สมมุติให้ค่าที่เลือกมาอยู่ตำแหน่งที่  $k$  ในเมตริกซ์) จะปรับค่าเป็นตำแหน่งบนหรือล่าง ( $x'(k+1)$  หรือ  $x'(k-1)$ )

**รูปแบบที่ 3** สุ่มค่าใหม่ ค่าของตัวแปรได้การสุ่มค่าใหม่จากขอบเขตเหมือนกับในขั้นตอนที่ 2

เริ่มต้นที่ตัวแปรที่หนึ่ง โดยสุ่มค่าตัวเลขตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยใช้อัตราการสุ่มแบบกระจายตัวคงที่เพื่อเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการใช้หน่วยความจำ (HMCR) ถ้าค่าที่ได้น้อยกว่าค่า HMCR ให้เลือกค่าตัวแปรจากค่าใดค่าหนึ่งในเมตริกซ์ตามรูปแบบที่ 1 แต่ถ้าไม่ให้สุ่มค่าตัวแปรใหม่จากขอบเขตตามรูปแบบที่ 3

โดยค่า HMCR คือโอกาสในการเลือกค่าตัวแปรจากค่าใดค่าหนึ่งในเมตริกซ์ ตัวอย่างเช่น  $HMCR = 0.75$  หมายความว่ามีโอกาส 75% ที่จะสุ่มค่าตัวแปรจากค่าใดค่าหนึ่งในเมตริกซ์ และมีโอกาส 25% ที่จะไปสุ่มค่าใหม่จากขอบเขตของตัวแปรนั้น ดังนั้นการใช้ค่า  $HMCR = 1$  จึงไม่แนะนำ เพราะจะไม่เปิดโอกาสให้เลือกค่าตัวแปรจากภายนอกเมตริกซ์เลย ซึ่งอาจมีค่าอื่นในขอบเขตที่ให้คำตอบดีกว่า



กรณี que เลือกค่าตัวแปรตามรูปแบบที่ 1 ต้องตรวจสอบว่าจะปรับระดับเสียงหรือไม่ โดยการสุ่มค่าตัวเลขตั้งแต่ 0 ถึง 1 เพื่อเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการปรับระดับเสียง (PAR) ถ้าค่าที่ได้ น้อยกว่าค่า PAR ให้ปรับค่าตัวแปรตามรูปแบบที่ 2 แต่ถ้าไม่ให้ใช้ค่าเดิมที่ได้จากการเลือกตัวแปรตามรูปแบบที่ 1

ความน่าจะเป็นในการปรับระดับเสียง (PAR) คือโอกาสในการปรับค่าที่ได้จากเมตริกซ์ ในกรณี que เลือกค่าใดค่าหนึ่งจากเมตริกซ์อาจปรับค่าที่ได้เป็นตำแหน่งบนหรือตำแหน่งล่าง เช่น เลือกค่าตัวแปรตำแหน่งที่ 5 ในเมตริกซ์อาจมีการปรับเป็นตำแหน่งที่ 4 หรือ 6 เป็นต้น ตัวอย่างเช่น  $PAR = 0.45$  หมายความว่ามีโอกาส  $HMCR \times 45\%$  ที่จะปรับค่าจากเมตริกซ์ และมีโอกาส  $(1-HMCR) \times 45\%$  ที่จะใช้ค่าเดิมที่ได้จากเมตริกซ์

กรณี que เลือกปรับค่าตัวแปรตามรูปแบบที่ 2 การปรับค่าเป็นตำแหน่งบนหรือล่างให้สุ่มค่าตัวเลขตั้งแต่ 0 ถึง 1 ถ้าค่าที่ได้ น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.5 ให้ปรับค่าเป็นตำแหน่งล่าง (ถ้าค่า que เลือกมา อยู่ตำแหน่งล่างสุดในเมตริกซ์ให้ใช้ค่าจากตำแหน่งเดิม) แต่ถ้ามากกว่า 0.5 ให้ปรับค่าเป็นตำแหน่งบน (ถ้าค่า que เลือกมาอยู่ตำแหน่งบนสุดในเมตริกซ์ให้ใช้ค่าจากตำแหน่งเดิม)

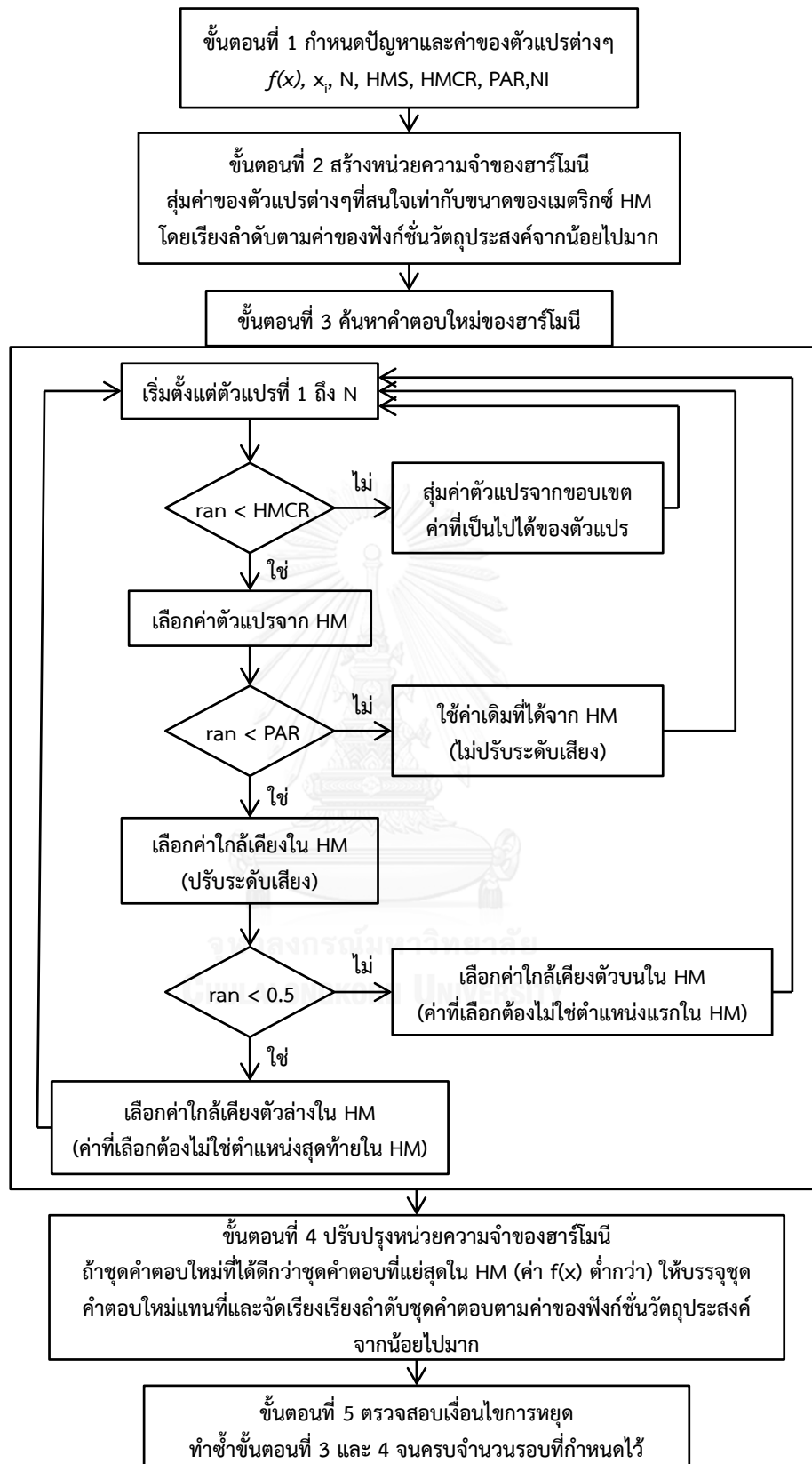
เมื่อได้ค่าใหม่ของตัวแปรที่หนึ่งแล้ว ให้เลือกค่าตัวแปรที่สองและตัวแปรอื่นๆด้วยวิธีการเดียวกัน

#### ขั้นตอนที่ 4 ปรับปรุงหน่วยความจำของฮาร์โมนี

เมื่อได้ค่าตัวแปรครบทุกตัวแล้ว จะได้ชุดคำตอบใหม่อีกหนึ่งชุดให้คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเปรียบเทียบกับชุดคำตอบที่แย่ที่สุดในเมตริกซ์ (ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากที่สุด) ถ้าค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยกว่าให้บรรจุชุดคำตอบใหม่ลงไปแทนที่และจัดเรียงชุดคำตอบใหม่ตามค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากน้อยไปมาก

#### ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด

กระทำซ้ำขั้นตอนที่ 3 และ 4 จนครบจำนวนรอบที่กระทำซ้ำ (NI)

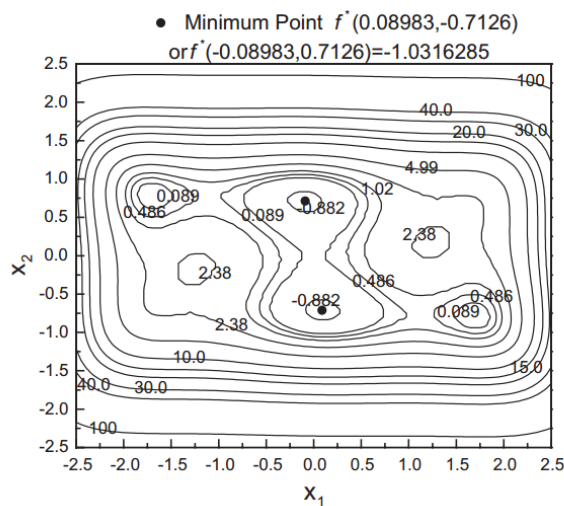


รูปที่ 2.8 ผังขั้นตอนการทำงานของวิธี Harmony Search

#### 2.5.4 ตัวอย่างการใช้งานวิธี Harmony Search

$$f(x) = 4x_1^2 - 2.1x_1^4 + \frac{1}{3}x_1^6 + x_1x_2 - 4x_2^2 + 4x_2^4$$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือฟังก์ชัน Six-Hump Camelback ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (Kang Seok Lee and Zong Woo Geem 2004) ซึ่งเป็นฟังก์ชันสำหรับทดสอบวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด ฟังก์ชันดังกล่าวมีจุดต่ำสุดทั้งหมด 6 จุด (Local optima) โดยเป็นจุดต่ำสุดที่แท้จริง 2 จุด (Global optima) ณ จุด  $x^* = (-0.08983, 0.7126)$  หรือ  $x^* = (0.08983, -0.7126)$  ที่ให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เท่ากับ  $-1.0316285$



รูปที่ 2.9 ฟังก์ชัน Six-Hump Camelback

โดยมีขอบเขตสำหรับตัวแปร  $x_1, x_2$  อยู่ระหว่าง  $-10$  ถึง  $10$  และค่าพารามิเตอร์ HMS เท่ากับ  $10$ , HMCR เท่ากับ  $0.85$  และ PAR เท่ากับ  $0.45$  ตามลำดับ ตารางที่ 2.1 แสดงชุดคำตอบเริ่มต้นของเมตริกซ์ซึ่งได้จากการสุ่มค่าตัวแปรจากขอบเขต จากนั้นจัดเรียงตามค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากน้อยไปมาก ต่อมาชุดคำตอบใหม่  $x'_i = (3.183, 8.666)$  ที่ได้จากวิธี Harmony Search มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เท่ากับ  $22454.67$  จึงถูกบรรจุในเมตริกซ์แทนที่ชุดคำตอบที่แย่ที่สุด  $(-9.50, 3.333)$  เมื่อทำการค้นหาด้วยจำนวนรอบมากขึ้นชุดคำตอบทั้งหมดจะเริ่มลู่ออกเข้าสู่คำตอบที่แท้จริงพร้อมๆกัน โดยภายหลังการค้นหาทั้งหมด  $4870$  รอบจึงได้ชุดคำตอบที่ดีที่สุดคือ  $x = (0.08984, -0.71269)$  ให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เท่ากับ  $-1.0316285$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงคำตอบที่แท้จริงมาก โดยจุดต่ำอีกจุดหนึ่ง  $x = (-0.08983, 0.7126)$  สามารถหาได้ด้วยวิธีการเดียวกันขึ้นอยู่กับชุดคำตอบเริ่มต้นที่ได้จากการสุ่ม

ตารางที่ 2.1 ผลการหาจุดต่ำสุดของฟังก์ชัน Six-Hump Camelback ด้วยวิธี Harmony Search

| ตำแหน่ง | HM เริ่มต้น             |        |          | HM ถัดมา                 |                          |                             | HM หลังการค้นหา 50 รอบ     |                             |                             |
|---------|-------------------------|--------|----------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|         | $x_1$                   | $x_2$  | $f(x)$   | $x_1$                    | $x_2$                    | $f(x)$                      | $x_1$                      | $x_2$                       | $f(x)$                      |
| 1       | 3.183                   | -0.400 | 169.95   | 3.183                    | -0.400                   | 169.95                      | 0.8055                     | -0.400                      | 0.9427                      |
| 2       | -6.600                  | 5.083  | 26274.83 | <b>3.183<sup>a</sup></b> | <b>8.666<sup>a</sup></b> | <b>22454.67<sup>a</sup></b> | 0.8055                     | 2.301                       | 94.65                       |
| 3       | 6.667                   | 7.433  | 37334.24 | -6.600                   | 5.083                    | 26274.83                    | 0.8055                     | 2.322                       | 98.47                       |
| 4       | 6.767                   | 8.317  | 46694.7  | 6.667                    | 7.433                    | 37334.24                    | 0.8167                     | 2.419                       | 117.35                      |
| 5       | -7.583                  | 5.567  | 60352.77 | 6.767                    | 8.317                    | 46694.7                     | -0.8833                    | 2.561                       | 145.66                      |
| 6       | 7.767                   | 4.7    | 67662.4  | -7.583                   | 5.567                    | 60352.77                    | -0.8833                    | 2.589                       | 152.54                      |
| 7       | 8.25                    | 2.75   | 95865.2  | 7.767                    | 4.7                      | 67662.4                     | 3.074                      | -1.833                      | 157.57                      |
| 8       | -8.300                  | 8.533  | 120137.1 | 8.25                     | 2.75                     | 95865.2                     | 3.183                      | -0.400                      | 169.95                      |
| 9       | -9.017                  | -8.050 | 182180   | -8.300                   | 8.533                    | 120137.1                    | 3.183                      | -1.755                      | 191.78                      |
| 10      | -9.500                  | 3.333  | 228704.7 | -9.017                   | -8.050                   | 182180                      | 3.183                      | 2.308                       | 271.38                      |
|         | HM หลังการค้นหา 100 รอบ |        |          | HM หลังการค้นหา 1000 รอบ |                          |                             | HM หลังการค้นหา 4870 รอบ   |                             |                             |
| 1       | 0.3167                  | 0.4    | -0.28384 | 0.09                     | -0.71143                 | -1.03161                    | <b>0.08984<sup>b</sup></b> | <b>-0.71269<sup>b</sup></b> | <b>-1.03162<sup>b</sup></b> |
| 2       | 0.2333                  | 0.3258 | -0.24394 | 0.09028                  | -0.71143                 | -1.03161                    | 0.09                       | -0.71269                    | -1.03162                    |
| 3       | 0.2650                  | 0.3258 | -0.19514 | 0.08863                  | -0.71143                 | -1.03161                    | 0.09                       | -0.71277                    | -1.03162                    |
| 4       | 0.2333                  | 0.2862 | -0.15615 | 0.09081                  | -0.71143                 | -1.03161                    | 0.09013                    | -0.71269                    | -1.03162                    |
| 5       | 0.3501                  | 0.3059 | 0.012897 | 0.09                     | -0.71446                 | -1.03160                    | 0.08951                    | -0.71269                    | -1.03162                    |
| 6       | 0.2650                  | 0.2223 | 0.02389  | 0.09028                  | -0.71446                 | -1.03160                    | 0.08951                    | -0.71277                    | -1.03162                    |
| 7       | 0.3501                  | 0.2862 | 0.05817  | 0.09081                  | -0.71446                 | -1.03160                    | 0.08951                    | -0.71279                    | -1.03162                    |
| 8       | 0.3188                  | 0.2502 | 0.07058  | 0.09                     | -0.71062                 | -1.03159                    | 0.09028                    | -0.71269                    | -1.03162                    |
| 9       | 0.3501                  | 0.2307 | 0.17688  | 0.08863                  | -0.71446                 | -1.03159                    | 0.0898                     | -0.71300                    | -1.03162                    |
| 10      | 0.5469                  | 0.2862 | 0.56     | 0.09028                  | -0.71062                 | -1.03159                    | 0.09                       | -0.71300                    | -1.03162                    |

<sup>a</sup> จุดค่าตอบใหม่หลังการค้นหารอบที่ 1 และค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

<sup>b</sup> จุดค่าตอบที่ดีที่สุด  $x = (0.08984, -0.71269)$  ให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่ำสุดเท่ากับ -1.0316285 ด้วยวิธี Harmony Search

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 ขอบเขตงานวิจัย

##### 3.1.1 ขอบเขตการสุ่มค่าตัวแปร

ขอบเขตที่เป็นไปได้สำหรับตัวแปรต่างๆ โดยพิจารณาเป็นปัญหาแบบตัวแปรไม่ต่อเนื่อง (discrete variables) ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และใช้ราคาวัสดุก่อสร้างส่วนกลาง กรุงเทพมหานคร ของกระทรวงพาณิชย์ ประจำเดือนเมษายน พ.ศ. 2558 ซึ่งเป็นราคาเงินสดไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม ค่าขนส่ง และค่าแรงงาน ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ขอบเขตของตัวแปรต่างๆในงานวิจัย

| ตัวแปร                       | ขอบเขต  | หน่วย        |
|------------------------------|---|--------------|
| กำลังอัดคอนกรีต              | 28  | MPa          |
| กำลังของเหล็กเสริม           | 400   | MPa          |
| กำลังของเหล็กปลอก            | 240   | MPa          |
| <b>คาน</b>                   |   |              |
| ความกว้างและความลึก*         | ตั้งแต่ 200 ถึง 500 mm (เพิ่มขึ้นทีละ 25 mm)              | mm           |
| $(t-d)$ , $d'$               | 50 หรือ 65<br>(เลือกใช้ค่าใดค่าหนึ่งสำหรับแต่ละกรณีศึกษา) | mm           |
| ขนาดเหล็กเสริม*              | ตั้งแต่ DB12 ถึง DB28 (เพิ่มขึ้นทีละ 1 ขนาด)              | -            |
| จำนวนเหล็กเสริมหลักบน-ล่าง   | 2   | เส้น         |
| จำนวนเหล็กเสริมพิเศษบน-ล่าง* | ตั้งแต่ 0 ถึง 10 (เพิ่มขึ้นทีละ 1 เส้น)                   | เส้น         |
| ขนาดเหล็กผูกตั้ง             | RB9   | -            |
| <b>เสา</b>                   |   |              |
| ความกว้างและความลึก*         | ตั้งแต่ 200 ถึง 500 mm (เพิ่มขึ้นทีละ 25 mm)              | mm           |
| $(t-d)$ , $d'$               | 50 หรือ 65<br>(เลือกใช้ค่าใดค่าหนึ่งสำหรับแต่ละกรณีศึกษา) | mm           |
| ขนาดเหล็กยื่น*               | ตั้งแต่ DB12 ถึง DB28 (เพิ่มขึ้นทีละ 1 ขนาด)              | -            |
| จำนวนเหล็กยื่นบน-ล่าง*       | ตั้งแต่ 2 ถึง 10 (เพิ่มขึ้นทีละ 1 เส้น)                   | เส้น/ตำแหน่ง |

หมายเหตุ \* หมายถึงตัวแปรที่ทำการสุ่มเพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้

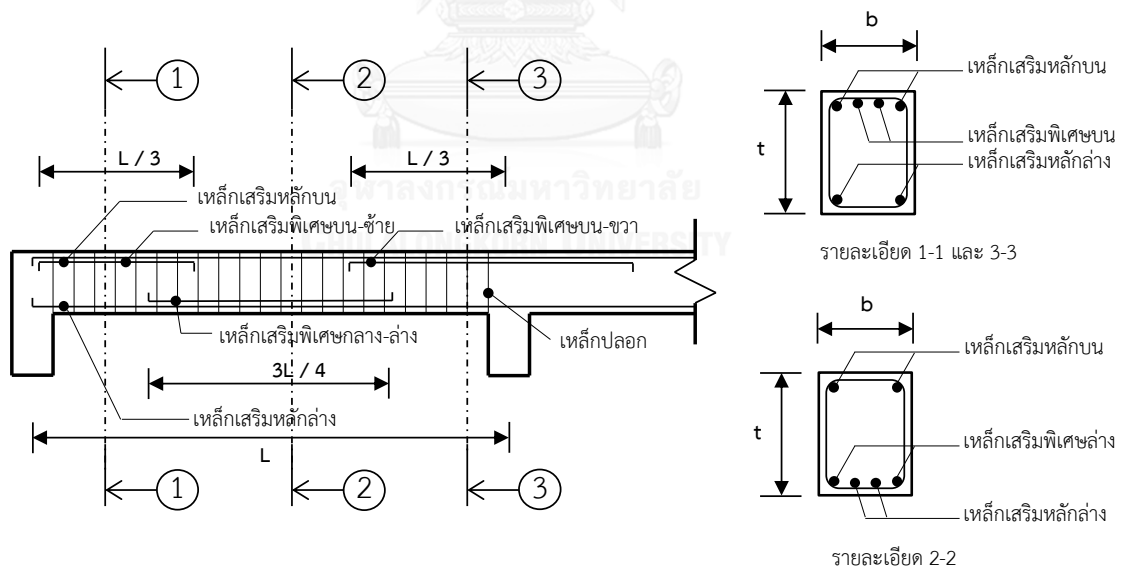
ตารางที่ 3.2 ราคาต่อหน่วยของวัสดุก่อสร้าง

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

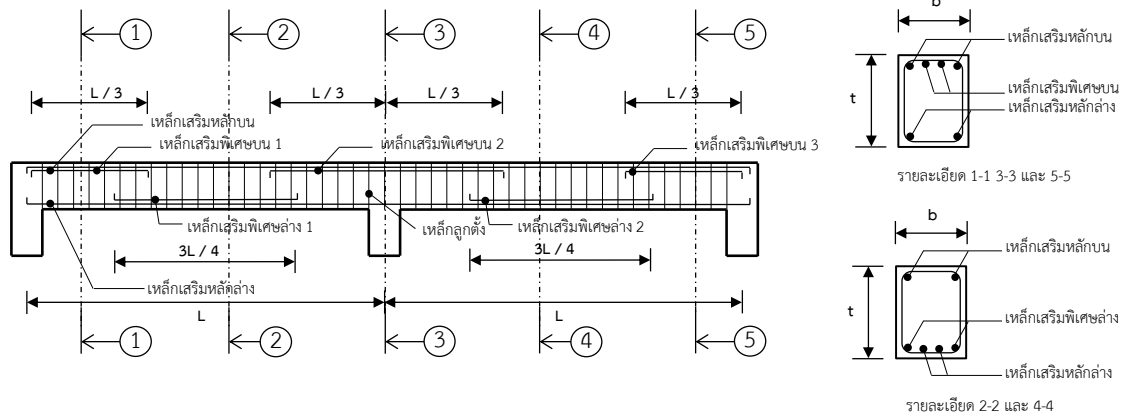
ราคาเหล็กเสริมเป็นราคาต่อหน่วยของเหล็กเส้นกลมผิวข้ออ้อย SD40 (มอก.) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 12 มม. ถึง 28 มม.

### 3.1.2 รายละเอียดการเสริมเหล็ก

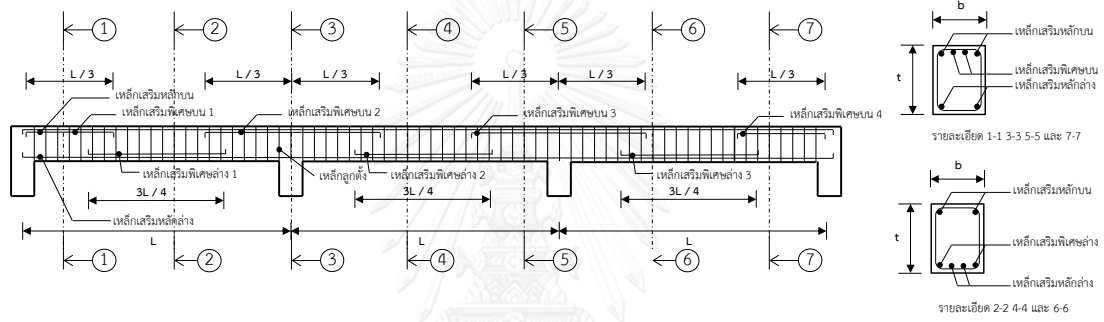
รายละเอียดการเสริมเหล็กสำหรับคานและเสาแสดงดังรูปที่ 3.1 ถึง 3.4 โดยในคานจะเสริมเหล็กลูกตั้งขนาด 9 มิลลิเมตร (RB9) 2 ขาเสมอ โดยงานวิจัยนี้จะไม่พิจารณาการจัดเรียงเหล็กเสริมในคานและเสา เนื่องจากจะทำให้ปัญหาของงานวิจัยซับซ้อนมากเกินไป ดังนั้นจึงให้ผู้ใช้งานพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้ก่อนนำไปใช้งานจริงและจัดวางเหล็กเสริมได้ตามความเหมาะสม



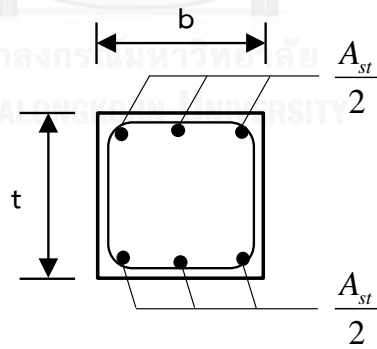
รูปที่ 3.1 รายละเอียดการเสริมเหล็กในคาน



รูปที่ 3.2 รายละเอียดการเสริมเหล็กในคาน 2 ช่วง



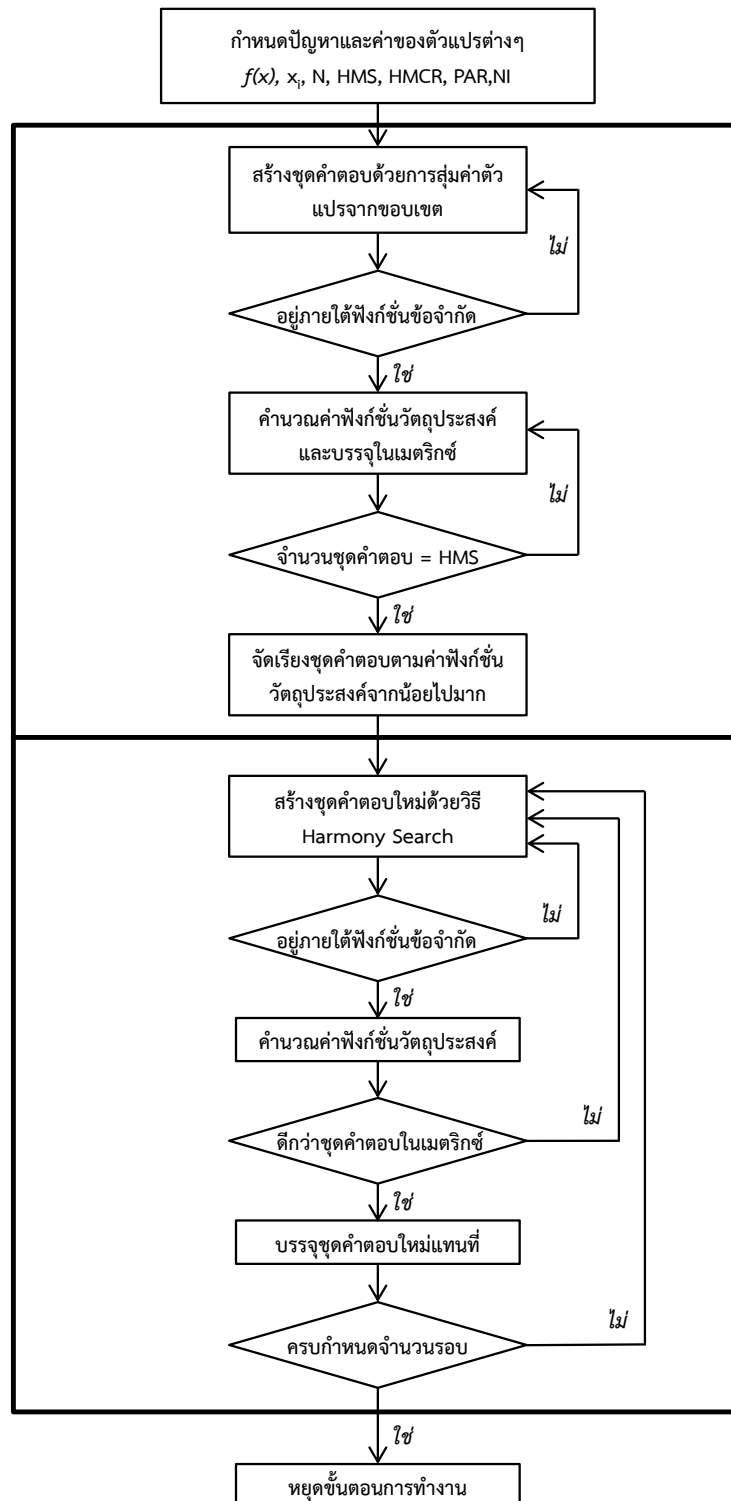
รูปที่ 3.3 รายละเอียดการเสริมเหล็กในคาน 3 ช่วง



รูปที่ 3.4 รายละเอียดการเสริมเหล็กในเสา

### 3.2 การประยุกต์ใช้วิธี Harmony Search ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

การประยุกต์ใช้วิธี HS ในการออกแบบโครงสร้างแสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ผังการประยุกต์ใช้วิธี Harmony Search ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก



การประยุกต์ใช้วิธี HS กับการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสามารถแบ่งได้เป็นสองขั้นตอนหลัก โดยก่อนเริ่มขั้นตอนที่หนึ่งจะต้องกำหนดปัญหาและค่าตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวกับการออกแบบอย่างเหมาะสมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือราคารวมของวัสดุก่อสร้าง

$$- z = c_c V_c + c_s W_s + c_{st} W_{st} + c_f A_f$$

ฟังก์ชันข้อจำกัดคือความสามารถในการรับแรงของชิ้นส่วนโครงสร้าง โดยกำลังต้านทานจะต้องมากกว่าแรงที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักประลัย

$$- \text{Design strength} \geq \text{Required strength}$$

$$- \phi(\text{Nominal strength}) \geq U$$

สำหรับคาน

$$- \phi M_n \geq M_u$$

$$- \phi V_n \geq V_u$$

สำหรับเสา

$$- \phi P_n \geq P_u$$

$$- \phi M_n \geq M_u$$

ตัวแปรที่สนใจทั้งหมดคือ

$$- \text{ความกว้าง } (b)$$

$$- \text{ความลึก } (t)$$

$$- \text{ขนาดเหล็กเสริม } (A_s)$$

$$- \text{จำนวนเหล็กเสริม}$$

รวมถึงค่าพารามิเตอร์ในวิธี HS คือ

$$- \text{Harmony memory size (HMS) หรือขนาดของเมตริกซ์, ความน่าจะเป็นในการใช้หน่วยความจำ (HMCR), ความน่าจะเป็นในการปรับระดับเสียง (PAR) และจำนวนรอบที่กระทำซ้ำ (NI)}$$



เมื่อกำหนดครบแล้ว จะเข้าสู่ขั้นตอนที่ 1 เพื่อสร้างชุดคำตอบเริ่มต้นที่จะบรรจุในเมตริกซ์ โดยในหนึ่งชุดคำตอบจะประกอบด้วยตัวแปรที่สนใจทั้งหมดและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ตัวอย่างเช่น ปัญหาการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียว ภายในชุดคำตอบจะประกอบด้วย ความกว้าง ความลึก ขนาดเหล็กเสริมหลักบน ขนาดเหล็กเสริมหลักล่าง ขนาดเหล็กเสริมพิเศษบน-ซ้าย จำนวนเหล็กเสริมพิเศษบน-ซ้าย ขนาดเหล็กเสริมพิเศษล่าง-กลาง จำนวนเหล็กเสริมพิเศษล่าง-กลาง ขนาดเหล็กเสริมพิเศษบน-ขวา จำนวนเหล็กเสริมพิเศษบน-ขวา ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (ราคารวมวัสดุก่อสร้าง) เรียงตามลำดับ เป็นต้น

| $b$ | $t$ | $A_{s,mt}$ | $A_{s,mb}$ | $A_{s,extl}$ | $n_{extl}$ | $A_{s,exbm}$ | $n_{exbm}$ | $A_{s,extr}$ | $n_{extr}$ | ราคา |
|-----|-----|------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|------|
|     |     |            |            |              |            |              |            |              |            |      |

ดังนั้นขนาดของเมตริกซ์จะมีจำนวนหลักเท่ากับ จำนวนตัวแปรที่สนใจ  $(N) + 1$  และจำนวนแถวเท่ากับ HMS โดยจะเริ่มสร้างชุดคำตอบทีละชุดด้วยการสุ่มค่าของแต่ละตัวแปรจากขอบเขตตามที่ระบุไว้ในตารางที่ 3.1 แล้วตรวจสอบว่าชุดคำตอบที่ได้อยู่ภายใต้ฟังก์ชันข้อจำกัดหรือไม่ (มีความสามารถในการรับแรง) ถ้าไม่ให้สุ่มค่าตัวแปรใหม่เพื่อสร้างชุดคำตอบใหม่ แต่ถ้าใช้ให้คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แล้วบรรจุชุดคำตอบลงในเมตริกซ์ และกระทำซ้ำการสร้างชุดคำตอบจนบรรจุครบตามขนาดของเมตริกซ์

| $b$ | $t$ | $A_{s,mt}$ | $A_{s,mb}$ | $A_{s,extl}$ | $n_{extl}$ | $A_{s,exbm}$ | $n_{exbm}$ | $A_{s,extr}$ | $n_{extr}$ | ราคา    |
|-----|-----|------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|---------|
| 350 | 550 | 201.061    | 201.061    | 113.097      | 4          | 201.061      | 4          | 201.061      | 1          | 4206.06 |
| 500 | 550 | 314.159    | 113.097    | 314.159      | 1          | 314.159      | 4          | 201.061      | 2          | 5578.35 |
| 450 | 500 | 113.097    | 314.159    | 314.159      | 2          | 201.061      | 2          | 201.061      | 3          | 4581.71 |
| 250 | 450 | 201.061    | 314.159    | 201.061      | 0          | 314.159      | 3          | 314.159      | 4          | 3691.48 |
| 400 | 550 | 113.097    | 201.061    | 314.159      | 0          | 201.061      | 4          | 113.097      | 0          | 4296.34 |

(ตัวอย่างจากการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียว HMS=5)

จากนั้นให้จัดเรียงชุดคำตอบตามค่าวัตถุประสงค์จากน้อยไปมาก

| $b$ | $t$ | $A_{s,mt}$ | $A_{s,mb}$ | $A_{s,extl}$ | $n_{extl}$ | $A_{s,exbm}$ | $n_{exbm}$ | $A_{s,extr}$ | $n_{extr}$ | ราคา    |
|-----|-----|------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|---------|
| 250 | 450 | 201.061    | 314.159    | 201.061      | 0          | 314.159      | 3          | 314.159      | 4          | 3691.48 |
| 350 | 550 | 201.061    | 201.061    | 113.097      | 4          | 201.061      | 4          | 201.061      | 1          | 4206.06 |
| 400 | 550 | 113.097    | 201.061    | 314.159      | 0          | 201.061      | 4          | 113.097      | 0          | 4296.34 |
| 450 | 500 | 113.097    | 314.159    | 314.159      | 2          | 201.061      | 2          | 201.061      | 3          | 4581.71 |
| 500 | 550 | 314.159    | 113.097    | 314.159      | 1          | 314.159      | 4          | 201.061      | 2          | 5578.35 |

(ตัวอย่างจากการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียว HMS=5)

เมื่อได้เมตริกซ์เริ่มต้นแล้วจะเข้าสู่ขั้นตอนที่ 2 คือการสร้างชุดคำตอบใหม่ด้วยวิธี Harmony Search โดยชุดค่าของแต่ละตัวแปรในชุดคำตอบใหม่จะได้มาจากการเลือกค่า 3 รูปแบบของวิธี HS ดังที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 2.5 เมื่อได้ชุดคำตอบใหม่แล้วตรวจสอบว่าชุดคำตอบที่ได้อยู่ภายใต้ฟังก์ชันข้อจำกัดหรือไม่ (มีความสามารถในการรับแรง) ถ้าไม่ให้สร้างชุดคำตอบด้วยวิธี HS ใหม่ แต่ถ้าใช่ให้คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แล้วเปรียบเทียบกับชุดคำตอบที่แย่ที่สุดในเมตริกซ์ (ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด) ซึ่งหมายถึงชุดคำตอบสุดท้ายในเมตริกซ์เนื่องจากได้จัดเรียงชุดคำตอบไว้ตามค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ถ้าเปรียบเทียบแล้วมีค่าน้อยกว่าให้บรรจุชุดคำตอบใหม่แทนที่ชุดคำตอบที่แย่ที่สุดแล้วจัดเรียงชุดคำตอบตามค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากน้อยไปมาก แต่ถ้ามีค่ามากกว่าให้สร้างชุดคำตอบด้วยวิธี HS ใหม่ กระทำซ้ำการสร้างชุดคำตอบใหม่ด้วยวิธี HS จนครบตามจำนวนรอบกระทำซ้ำที่กำหนด จะสังเกตได้ว่าเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้นสุดท้ายชุดคำตอบทุกชุดจะลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีที่สุดชุดเดียวกัน

| $b$ | $t$ | $A_{s,mt}$ | $A_{s,mb}$ | $A_{s,extl}$ | $n_{extl}$ | $A_{s,exbm}$ | $n_{exbm}$ | $A_{s,extr}$ | $n_{extr}$ | ราคา    |
|-----|-----|------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|---------|
| 200 | 450 | 113.097    | 113.097    | 314.159      | 0          | 314.159      | 3          | 314.159      | 0          | 2790.19 |
| 200 | 450 | 113.097    | 113.097    | 314.159      | 0          | 314.159      | 3          | 314.159      | 0          | 2790.19 |
| 200 | 450 | 113.097    | 113.097    | 314.159      | 0          | 314.159      | 3          | 314.159      | 0          | 2790.19 |
| 200 | 450 | 113.097    | 113.097    | 314.159      | 0          | 314.159      | 3          | 314.159      | 0          | 2790.19 |
| 200 | 450 | 113.097    | 113.097    | 314.159      | 0          | 314.159      | 3          | 314.159      | 0          | 2790.19 |

(ตัวอย่างจากการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียว HMS=5 หลังการกระทำซ้ำทั้งหมด 10000 รอบ)

## บทที่ 4 กรณีศึกษา

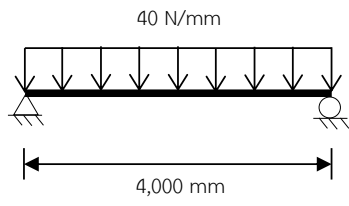
### 4.1 กรณีศึกษา

งานวิจัยนี้มีกรณีศึกษาทั้งหมด 6 กรณีดังแสดงในรูปที่ 4.1 ในกรณีที่ 1 ถึง 4 เป็นโครงสร้างพื้นฐานที่พบเห็นได้โดยทั่วไป ส่วนกรณีนี้ที่ 5 และ 6 มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบราคาของโครงสร้างเมื่อมีรูปแบบการวางแผ่นพื้นสำเร็จรูปที่แตกต่างกัน ซึ่งกรณีศึกษาทั้งหมดประกอบด้วย

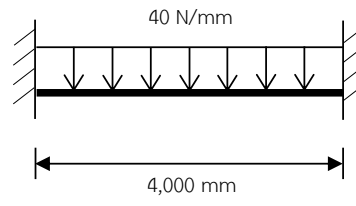
1. คานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียว ฐานรองรับแบบยึดหมุนและแบบล้อเลื่อน
2. คานคอนกรีตเสริมเหล็ก ฐานรองรับทั้งสองข้างเป็นแบบยึดแน่น
3. เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ฐานรองรับแบบยึดแน่นและปราศจากการยึดรั้ง
4. โครงข้อแข็งคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ฐานรองรับแบบยึดแน่นและจุดต่อแบบยึดรั้ง
5. คานคอนกรีตเสริมเหล็ก รับน้ำหนักบรรทุกทุกจากพื้น ขนาด  $2 \times 2$  ช่วง
6. คานคอนกรีตเสริมเหล็ก รับน้ำหนักบรรทุกทุกจากพื้น ขนาด  $3 \times 3$  ช่วง

โดย น้ำหนักในกรณีศึกษาที่ 1 ถึง 4 น้ำหนักที่แสดงเป็นน้ำหนักบรรทุกจรเท่านั้น สำหรับกรณีศึกษาที่ 5 และ 6 งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แผ่นพื้นสำเร็จรูป CPAC Hollow Core ขนาด  $120 \times 600$  mm. จำแนกคานออกเป็น 4 ตัวและกำหนดทิศทางการวางแผ่นพื้นสำเร็จรูปแบบสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 4.1 มีน้ำหนักบรรทุกดังต่อไปนี้

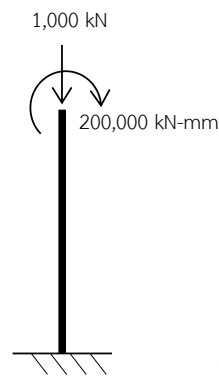
- 1 น้ำหนักแผ่นพื้นสำเร็จรูปรวมคอนกรีตเททับหน้าหนา 5 เซนติเมตร เท่ากับ  $311 \text{ kg/m}^2$
- 2 น้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม (Super-imposed dead load) เท่ากับ  $120 \text{ kg/m}^2$
- 3 น้ำหนักกำแพงวางรอบ สูง 3 เมตร เท่ากับ  $660 \text{ kg/m}$
- 4 น้ำหนักบรรทุกจร ประกอบด้วย  $200 \text{ kg/m}^2$  และ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



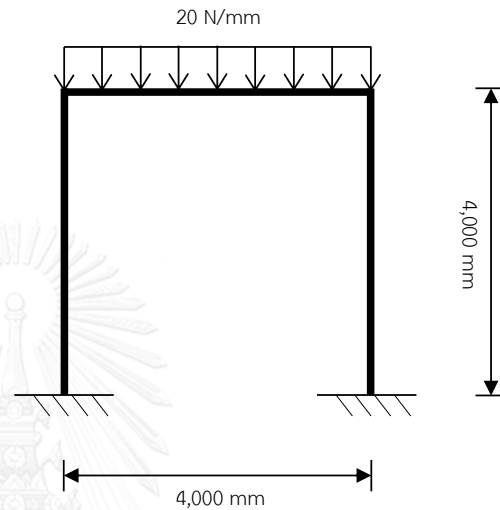
(1)



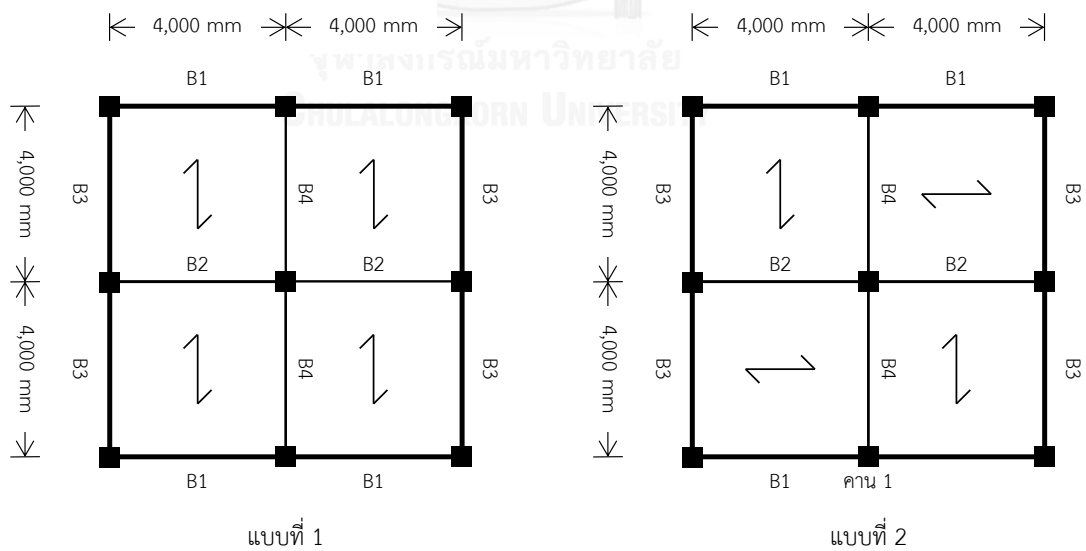
(2)



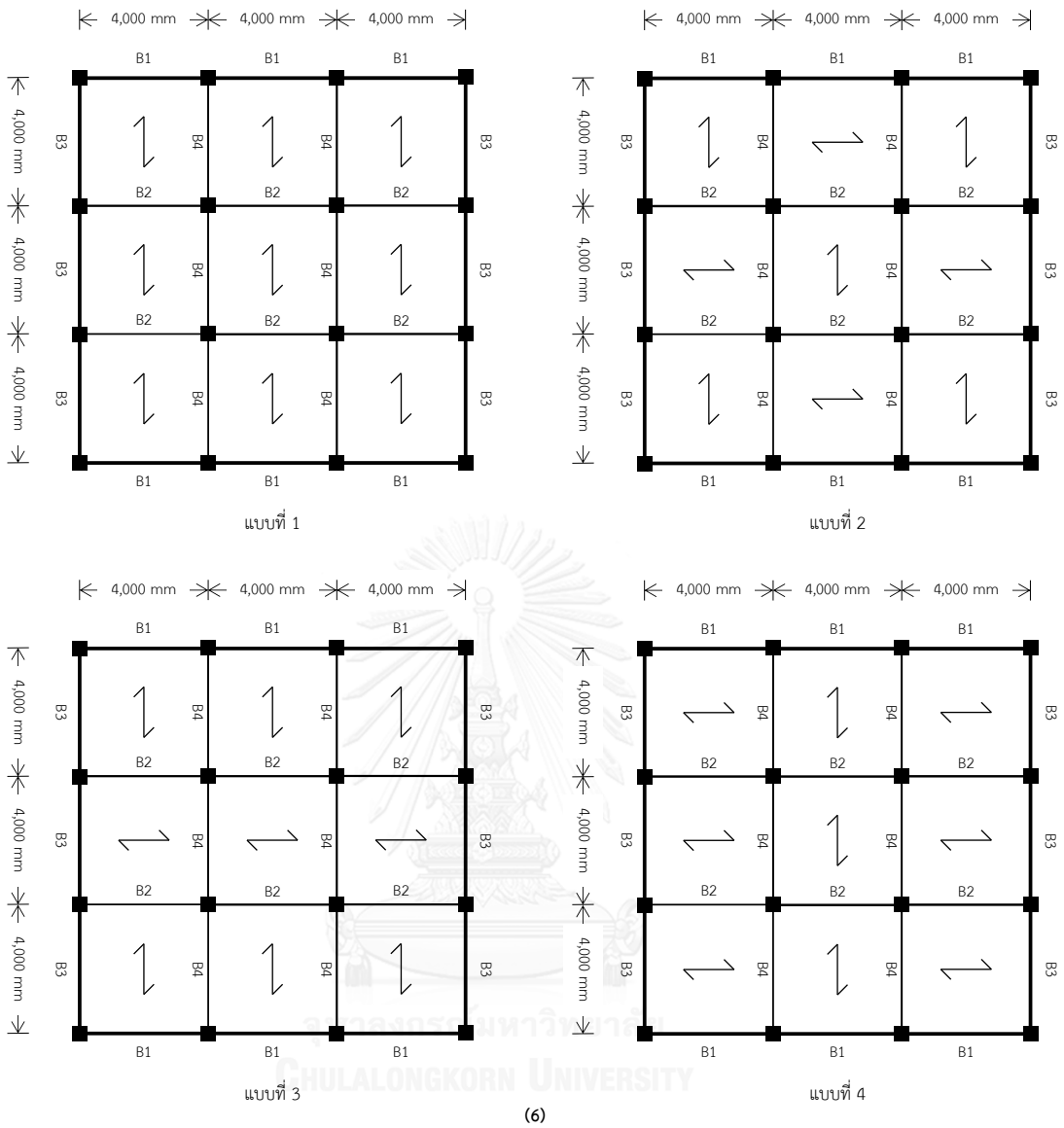
(3)



(4)



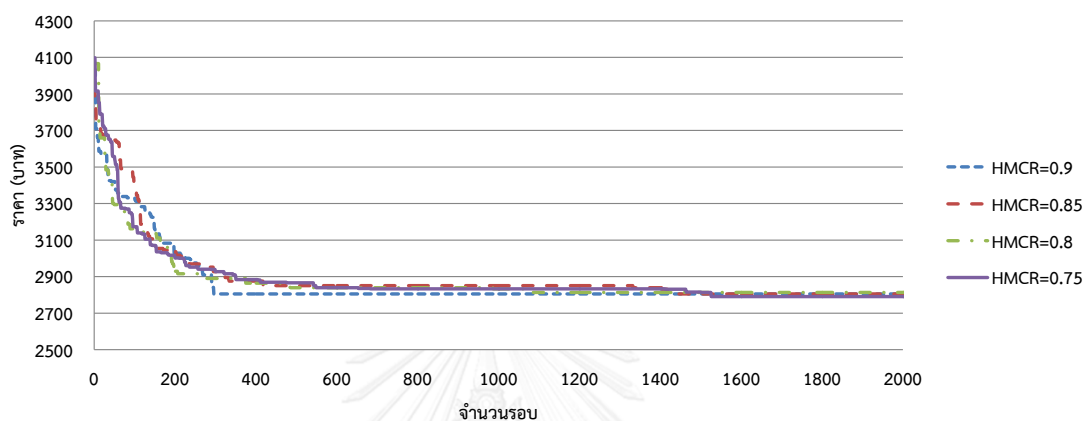
(5)



รูปที่ 4.1 กรณีศึกษา

## 4.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลต่อกระบวนการทำงานของวิธี Harmony Search

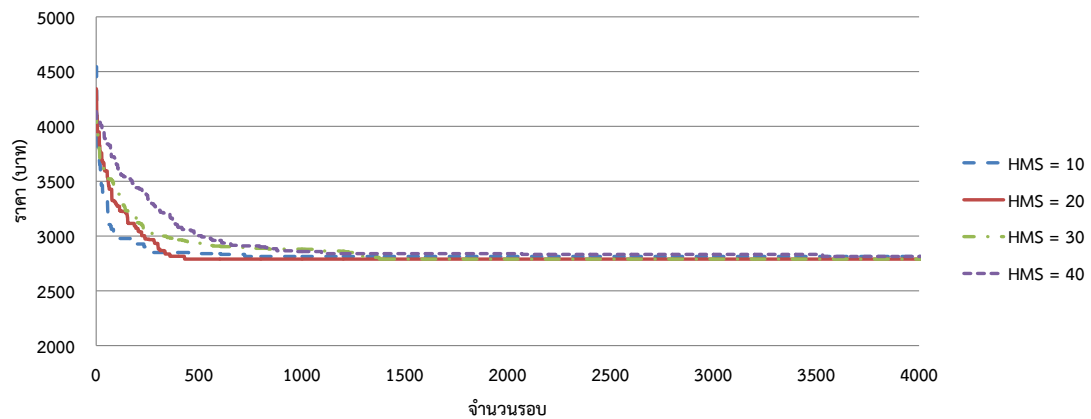
พารามิเตอร์ที่มีผลต่อวิธี HS ได้แก่ HMCR, PAR และ HMS โดย HMCR จะส่งผลต่อความน่าจะเป็นในการเลือกค่าจากเมตริกซ์หรือสุ่มค่าใหม่จากขอบเขตค่าที่เป็นไปได้สำหรับแต่ละตัวแปร ยิ่งลด HMCR โอกาสในการสุ่มค่าจากขอบเขตจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นการใช้ค่า HMCR ที่ต่ำจะทำให้ได้คำตอบใหม่ที่หลากหลายขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ HMCR

ในส่วนของค่า PAR จะส่งผลต่อความน่าจะเป็นในการเลือกค่าใกล้เคียงจากค่าที่เลือกมาจากเมตริกซ์ แต่เนื่องจากปัญหาที่เราพิจารณาเป็นปัญหาแบบตัวแปรไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นค่าใกล้เคียงที่ได้จะเป็นค่าของตำแหน่งด้านบนหรือตำแหน่งด้านล่าง ซึ่งใกล้เคียงกับการเลือกค่าตัวใดตัวหนึ่งจากเมตริกซ์ ดังนั้นตัวแปร PAR จึงไม่มีผลต่อกระบวนการทำงานของวิธี HS มากเท่าตัวแปรอื่น

สำหรับ HMS หมายถึงจำนวนชุดคำตอบเริ่มต้นที่ได้จากการสุ่มค่าจากขอบเขต ยิ่งเมตริกซ์มีขนาดใหญ่ชุดคำตอบเริ่มต้นยังมีความหลากหลายมาก แต่เนื่องจากการทำงานของวิธี HS นั้นทุกๆชุดคำตอบจะค่อยๆเข้าสู่ค่าเดียวกัน ทำให้เมตริกซ์ที่มีขนาดใหญ่อาจเข้าสู่คำตอบที่ดีที่สุดช้าลงเมื่อเทียบกับเมตริกซ์ที่มีขนาดเล็กกว่าดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบขนาดของเมตริกซ์ (HMS)

การเพิ่มความหลากหลายของคำตอบทำให้คำตอบกระจายตัวไปทั่วพื้นที่ๆสนใจ เพิ่มโอกาสในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด (Global Solution) เพราะการกระจายตัวของคำตอบที่น้อยอาจทำให้คำตอบที่ไม่ดีที่สุด (Local Solution) ซึ่งกระทำได้สองวิธีคือ ลดค่า HMCR และเพิ่มขนาด HMS แต่การเพิ่มความหลากหลายของคำตอบที่มากเกินไปอาจทำให้การลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีที่สุดช้าลง ดังนั้นการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับแต่ละปัญหาจึงมีความสำคัญ เช่น เมื่อเพิ่มขนาด HMS แล้วอาจใช้ค่า HMCR ที่สูงกว่าเดิมได้ หรือเมื่อลดค่า HMCR อาจใช้ขนาด HMS ที่น้อยลงได้ ซึ่งต้องทดสอบสำหรับแต่ละปัญหาเนื่องจากปัญหาที่แตกต่างกันค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมก็จะแตกต่างกันออกไป โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ HMCR, PAR และ HMS เท่ากับ 0.75 0.45 และ 20 ตามลำดับ



### 4.3 ผลการออกแบบ

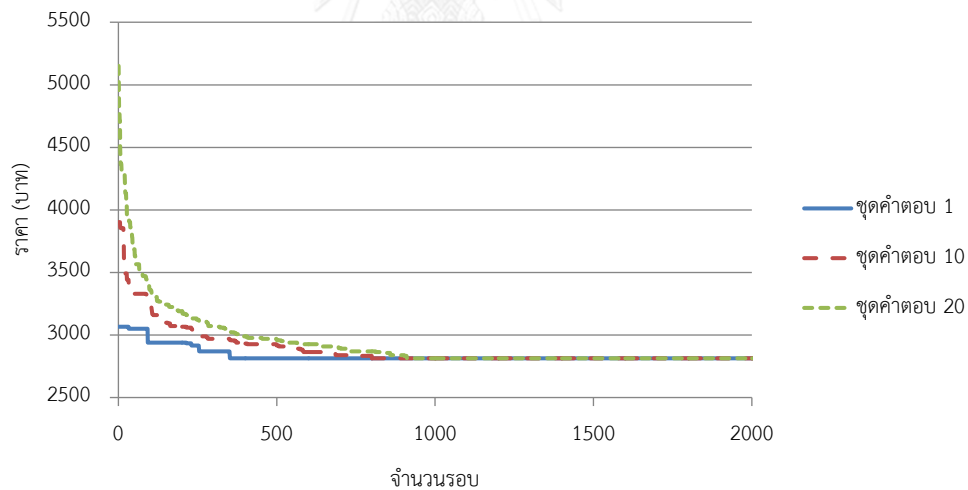
การประยุกต์ใช้วิธี HS สำหรับปัญหาการออกแบบโครงสร้างทั้ง 6 แบบได้ผลคำตอบที่ดีที่สุดแสดงในตารางที่ 4.1 ถึง 4.16 และการลู่เข้าของชุดคำตอบที่ 1 10 และ 20 เมื่อเพิ่มรอบการคำนวณแสดงในรูปที่ 4.4 ถึง 4.19

โดยในกรณีที่ 1 ถึง 4 จะคำนวณทั้งหมด 10,000 รอบ กรณีที่ 5 จะคำนวณทั้งหมด 300,000 รอบ และกรณีที่ 6 จะคำนวณทั้งหมด 500,000 รอบ โดยในทุกกรณีศึกษาจะใช้ค่าค่าพารามิเตอร์ HMCR, PAR และ HMS เท่ากับ 0.75 0.45 และ 20 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าชุดคำตอบจะกระจายตัวในช่วงแรก และเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้นชุดคำตอบทั้งหมดจะลู่เข้าสู่คำตอบเดียวกัน



ตารางที่ 4.1 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 1

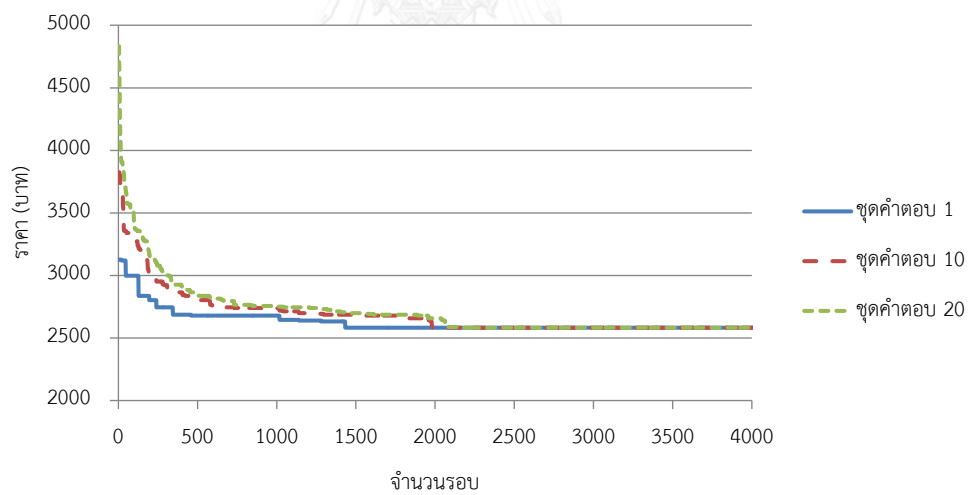
| ตัวแปร  | หน่วย | ค่าตอบที่ดีที่สุด     |
|---|-------|-----------------------|
| ความกว้างคาน  | mm    | 200                   |
| ความลึกคาน  | mm    | 450                   |
| เหล็กเสริมหลักบน  |       | 2-DB12                |
| เหล็กเสริมหลักล่าง                                      |       | 2-DB12                |
| เหล็กเสริมพิเศษบน-ซ้าย                                  |       |                       |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง-กลาง                                |       | 3-DB20                |
| เหล็กเสริมพิเศษบน-ขวา                                   |       |                       |
| ระยะเรียงเหล็กลูกตั้ง                                   | mm    | 100                   |
| ราคาค่าก่อสร้าง   | บาท   | 2,790                 |
| จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด                           |       | $7.02 \times 10^8$    |
| ร้อยละของจำนวนรอบที่ใช้ต่อจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด | %     | $2.13 \times 10^{-4}$ |



รูปที่ 4.4 การลู่อู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 1

ตารางที่ 4.2 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 2

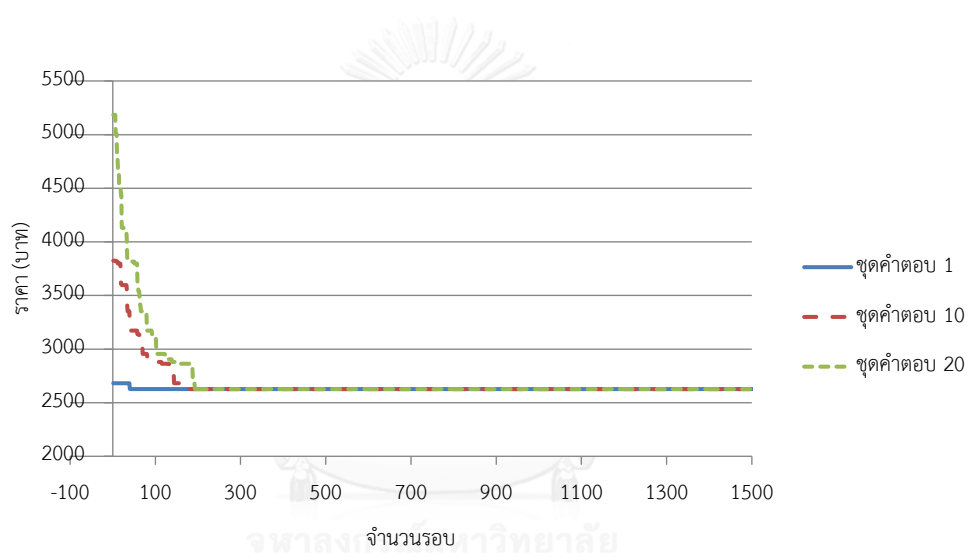
| ตัวแปร  | หน่วย | ค่าตอบที่ดีที่สุด     |
|---|-------|-----------------------|
| ความกว้างคาน  | mm    | 200                   |
| ความลึกคาน  | mm    | 400                   |
| เหล็กเสริมหลักบน  |       | 2-DB12                |
| เหล็กเสริมหลักล่าง                                      |       | 2-DB12                |
| เหล็กเสริมพิเศษบน-ซ้าย                                  |       | 3-DB16                |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง-กลาง                                |       | 1-DB16                |
| เหล็กเสริมพิเศษบน-ขวา                                   |       | 3-DB16                |
| ระยะเรียงเหล็กกุกตั้ง                                   | mm    | 75                    |
| ราคาค่าก่อสร้าง   | บาท   | 2,581                 |
| จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด                           |       | $7.02 \times 10^8$    |
| ร้อยละของจำนวนรอบที่ใช้ต่อจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด | %     | $3.56 \times 10^{-4}$ |



รูปที่ 4.5 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 2

ตารางที่ 4.3 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 3

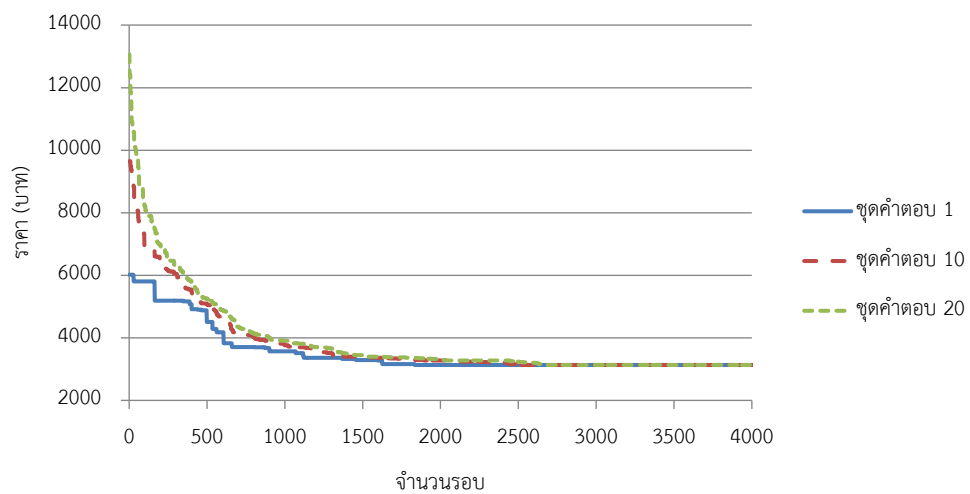
| ตัวแปร  | หน่วย | ค่าตอบที่ดีที่สุด |
|---|-------|-------------------|
| ความกว้างเสา  | mm    | 250               |
| ความลึกเสา  | mm    | 500               |
| เหล็กเสริมยื่นรวม                                       |       | 4-DB25            |
| ราคาค่าก่อสร้าง   | บาท   | 2,626             |
| จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด                           |       | 7605              |
| ร้อยละของจำนวนรอบที่ใช้ต่อจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด | %     | 6.57              |



รูปที่ 4.6 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 3

ตารางที่ 4.4 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 4

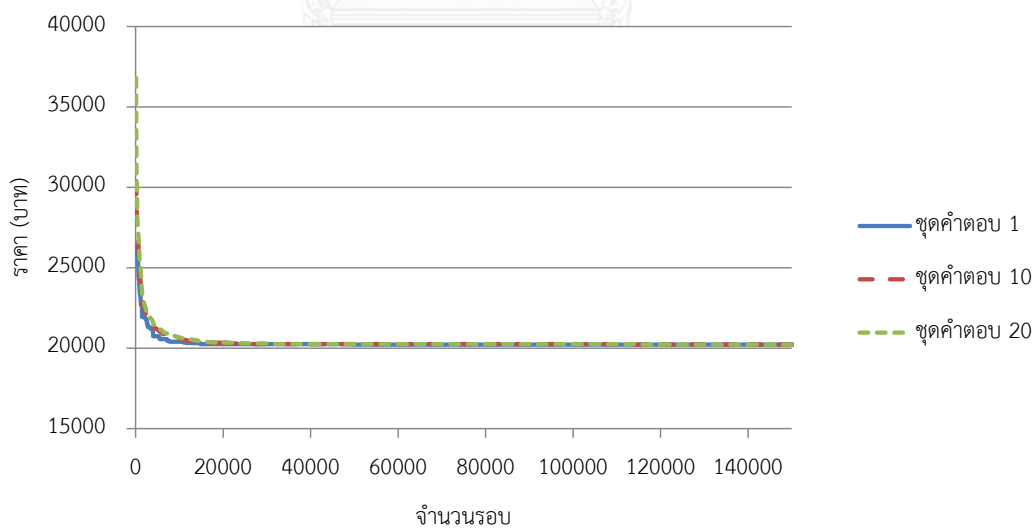
| ตัวแปร  | หน่วย | ค่าตอบที่ดีที่สุด      |
|---|-------|------------------------|
| ความกว้างคาน  | mm    | 200                    |
| ความลึกคาน  | mm    | 350                    |
| เหล็กเสริมหลักบน  |       | 2-DB12                 |
| เหล็กเสริมหลักล่าง                                      |       | 2-DB12                 |
| เหล็กเสริมพิเศษบน-ซ้าย                                  |       |                        |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง-กลาง                                |       | 2-DB16                 |
| เหล็กเสริมพิเศษบน-ขวา                                   |       |                        |
| ระยะเรียงเหล็กลูกตั้งในคาน                              | mm    | 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                 |
| ราคาค่าก่อสร้าง   | บาท   | 4,428                  |
| จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด                           |       | $4.06 \times 10^{16}$  |
| ร้อยละของจำนวนรอบที่ใช้ต่อจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด | %     | $8.62 \times 10^{-12}$ |



รูปที่ 4.7 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 4

ตารางที่ 4.5 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 1 (Live Load 200 kg/m<sup>2</sup>)

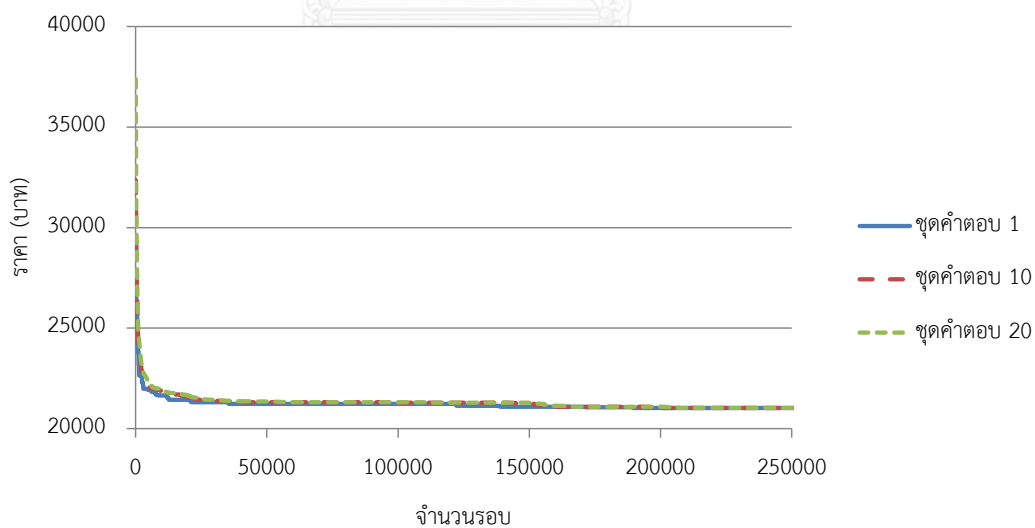
| ตัวแปร  | หน่วย | B1                     | B2      | B3     | B4     |
|---|-------|------------------------|---------|--------|--------|
| ความกว้างคาน  | mm    | 200                    | 200     | 200    | 200    |
| ความลึกคาน  | mm    | 275                    | 300     | 225    | 200    |
| เหล็กเสริมหลักบน  |       | 2-DB12                 | 2-DB12  | 2-DB12 | 2-DB12 |
| เหล็กเสริมหลักล่าง  |       | 2-DB12                 | 2-DB12  | 2-DB12 | 2-DB12 |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 1   |       | -                      | -       | -      | -      |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 1                                       |       | 1DB-16                 | 3DB-16  | -      | -      |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 2   |       | 3DB-16                 | 4DB-16  | 1DB-16 | -      |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 2                                       |       | 1DB-16                 | 3DB-16  | -      | -      |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 3   |       | -                      | -       | -      | -      |
| ระยะเรียงเหล็กลูกตั้ง                                       | mm    | 100,100                | 100,100 | 75,75  | -      |
| ราคาก่อสร้างรวม   |       | 19,947                 |         |        |        |
| จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด                               |       | $2.04 \times 10^{49}$  |         |        |        |
| ร้อยละของจำนวนรอบที่ใช้ต่อจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด (%) |       | $7.34 \times 10^{-43}$ |         |        |        |



รูปที่ 4.8 การเข้าสู่คำตอบของกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 1 (Live Load 200 kg/m<sup>2</sup>)

ตารางที่ 4.6 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 2 (Live Load 200 kg/m<sup>2</sup>)

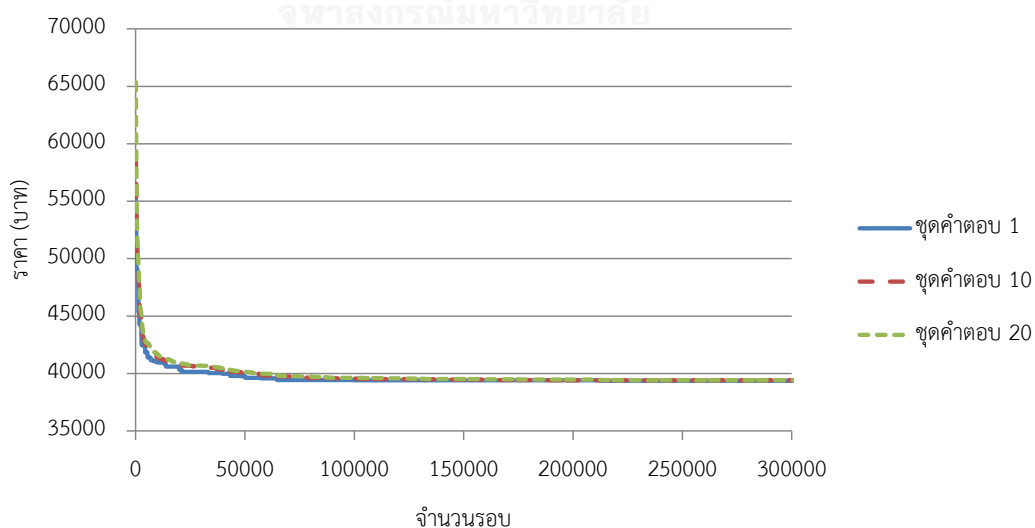
| ตัวแปร  | หน่วย | B1                     | B2      | B3      | B4      |
|---|-------|------------------------|---------|---------|---------|
| ความกว้างคาน  | mm    | 200                    | 200     | 200     | 200     |
| ความลึกคาน  | mm    | 275                    | 250     | 275     | 250     |
| เหล็กเสริมหลักบน  |       | 2-DB12                 | 2-DB12  | 2-DB12  | 2-DB12  |
| เหล็กเสริมหลักล่าง  |       | 2-DB12                 | 2-DB12  | 2-DB12  | 2-DB12  |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 1   |       | -                      | -       | -       | -       |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 1                                       |       | -                      | 1DB-12  | 3DB-12  | 1DB-12  |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 2   |       | 3DB-12                 | 2DB-16  | 3DB-12  | 2DB-16  |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 2                                       |       | 3DB-12                 | 1DB-12  | -       | 1DB-12  |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 3   |       | -                      | -       | -       | -       |
| ระยะเรียงเหล็กลูกตั้ง                                       | mm    | 100,100                | 100,100 | 100,100 | 100,100 |
| ราคาก่อสร้างรวม   |       | 21,068                 |         |         |         |
| จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด                               |       | $2.04 \times 10^{49}$  |         |         |         |
| ร้อยละของจำนวนรอบที่ใช้ต่อจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด (%) |       | $1.22 \times 10^{-42}$ |         |         |         |



รูปที่ 4.9 การเข้าสู่คำตอบของกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 2 (Live Load 200 kg/m<sup>2</sup>)

ตารางที่ 4.7 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 1 (Live Load 200 kg/m<sup>2</sup>)

| ตัวแปร  | หน่วย | B1                     | B2          | B3       | B4     |
|---|-------|------------------------|-------------|----------|--------|
| ความกว้างคาน  | mm    | 200                    | 200         | 200      | 200    |
| ความลึกคาน  | mm    | 300                    | 375         | 225      | 200    |
| เหล็กเสริมหลักบน  |       | 2-DB12                 | 2-DB12      | 2-DB12   | 2-DB12 |
| เหล็กเสริมหลักล่าง  |       | 2-DB12                 | 2-DB12      | 2-DB12   | 2-DB12 |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 1   |       | -                      | -           | -        | -      |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 1                                       |       | 1-DB16                 | 2-DB12      | 1-DB12   | -      |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 2   |       | 3-DB12                 | 3-DB12      | 1-DB12   | -      |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 2                                       |       | -                      | -           | -        | -      |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 3   |       | 3-DB12                 | 3-DB12      | 1-DB12   | -      |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 3                                       |       | 1-DB16                 | 2-DB12      | 1-DB12   | --     |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 4   |       | -                      | -           | -        | -      |
| ระยะเรียงเหล็กลูกตั้ง                                       | mm    | 125,125,125            | 150,150,150 | 75,75,75 | -      |
| ราคาก่อสร้างรวม   |       | 39,497                 |             |          |        |
| จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด                               |       | $1.71 \times 10^{63}$  |             |          |        |
| ร้อยละของจำนวนรอบที่ใช้ต่อจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด (%) |       | $1.75 \times 10^{-56}$ |             |          |        |

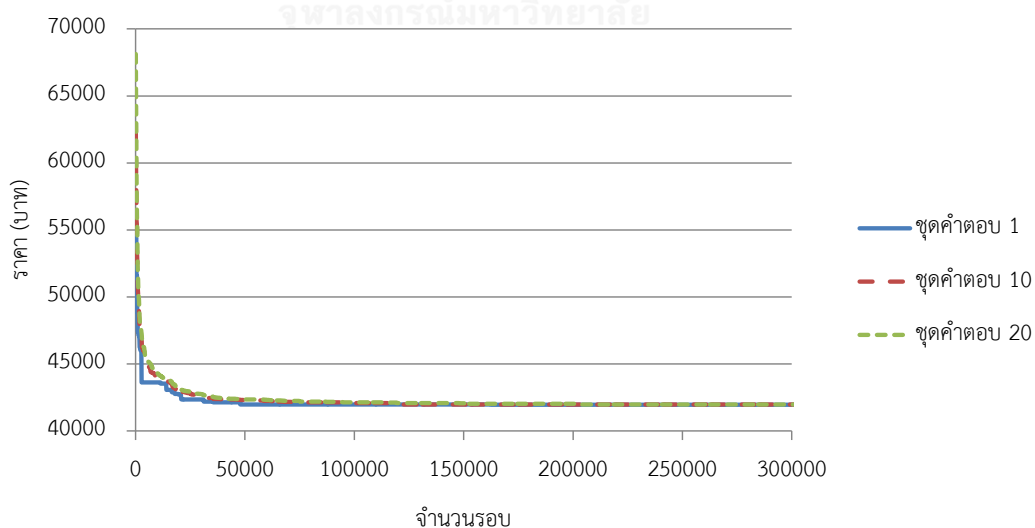


รูปที่ 4.10 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 1 (Live Load 200 kg/m<sup>2</sup>)



ตารางที่ 4.8 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 2 (Live Load 200 kg/m<sup>2</sup>)

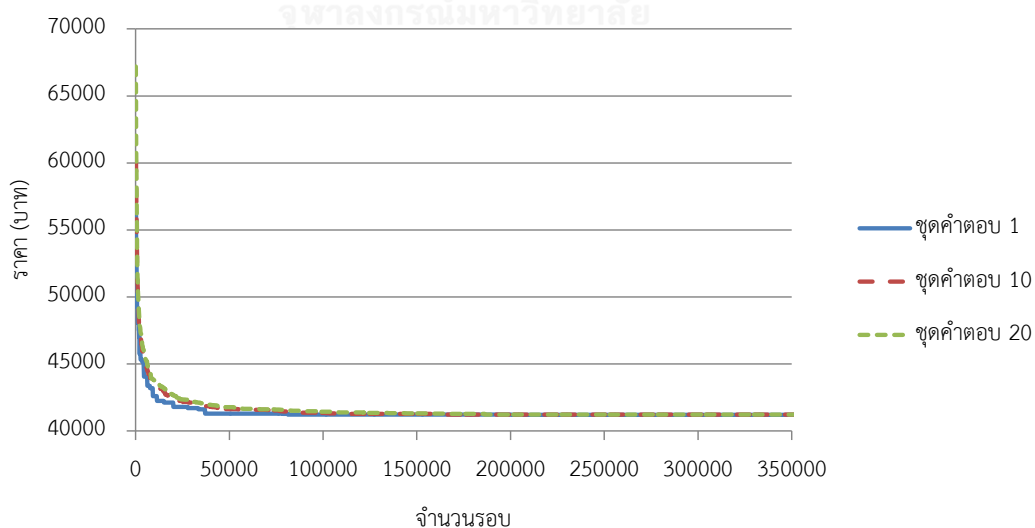
| ตัวแปร  | หน่วย | B1                     | B2          | B3          | B4          |
|---|-------|------------------------|-------------|-------------|-------------|
| ความกว้างคาน  | mm    | 200                    | 200         | 200         | 200         |
| ความลึกคาน  | mm    | 350                    | 225         | 275         | 225         |
| เหล็กเสริมหลักบน  |       | 2-DB12                 | 2-DB12      | 2-DB12      | 2-DB12      |
| เหล็กเสริมหลักล่าง  |       | 2-DB12                 | 2-DB12      | 2-DB12      | 2-DB12      |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 1   |       | -                      | -           | -           | -           |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 1                                       |       | 1-DB16                 | 1-DB16      | -           | 1-DB16      |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 2   |       | 1-DB12                 | 3-DB12      | 2-DB12      | 3-DB12      |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 2                                       |       | -                      | -           | 1-DB12      | -           |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 3   |       | 1-DB12                 | 3-DB12      | 2-DB12      | 3-DB12      |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 3                                       |       | 1-DB16                 | 1-DB16      | -           | 1-DB16      |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 4   |       | -                      | -           | -           | -           |
| ระยะเรียงเหล็กลูกตั้ง                                       | mm    | 150,-,150              | 100,100,100 | 100,100,100 | 100,100,100 |
| ราคาก่อสร้างรวม   |       | 41,323                 |             |             |             |
| จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด                               |       | $1.71 \times 10^{63}$  |             |             |             |
| ร้อยละของจำนวนรอบที่ใช้ต่อจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด (%) |       | $1.75 \times 10^{-56}$ |             |             |             |



รูปที่ 4.11 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 2 (Live Load 200 kg/m<sup>2</sup>)

ตารางที่ 4.9 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 3 (Live Load 200 kg/m<sup>2</sup>)

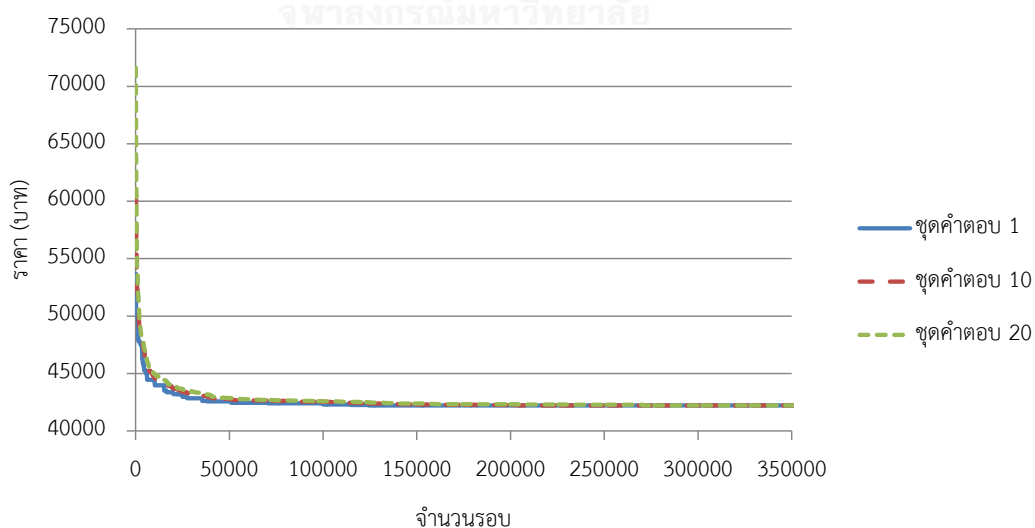
| ตัวแปร  | หน่วย | B1                     | B2          | B3          | B4      |
|---|-------|------------------------|-------------|-------------|---------|
| ความกว้างคาน  | mm    | 200                    | 200         | 200         | 200     |
| ความลึกคาน  | mm    | 300                    | 225         | 275         | 275     |
| เหล็กเสริมหลักบน  |       | 2-DB12                 | 2-DB12      | 2-DB12      | 2-DB12  |
| เหล็กเสริมหลักล่าง  |       | 2-DB12                 | 2-DB12      | 2-DB12      | 2-DB12  |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 1   |       | -                      | -           | -           | -       |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 1                                       |       | 1-DB16                 | 1-DB16      | -           | -       |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 2   |       | 3-DB12                 | 3-DB12      | 2-DB12      | 2-DB12  |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 2                                       |       | -                      | -           | 1-DB12      | 3-DB12  |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 3   |       | 3-DB12                 | 3-DB12      | 2-DB12      | 2-DB12  |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 3                                       |       | 1-DB16                 | 1-DB16      | -           | -       |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 4   |       | -                      | -           | -           | -       |
| ระยะเรียงเหล็กคูกตั้ง                                       | mm    | 125,125,125            | 100,100,100 | 100,100,100 | -,100,- |
| ราคาก่อสร้างรวม   |       | 40,627                 |             |             |         |
| จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด                               |       | $1.71 \times 10^{63}$  |             |             |         |
| ร้อยละของจำนวนรอบที่ใช้ต่อจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด (%) |       | $2.04 \times 10^{-56}$ |             |             |         |



รูปที่ 4.12 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 3 (Live Load 200 kg/m<sup>2</sup>)

ตารางที่ 4.10 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 4 (Live Load 200 kg/m<sup>2</sup>)

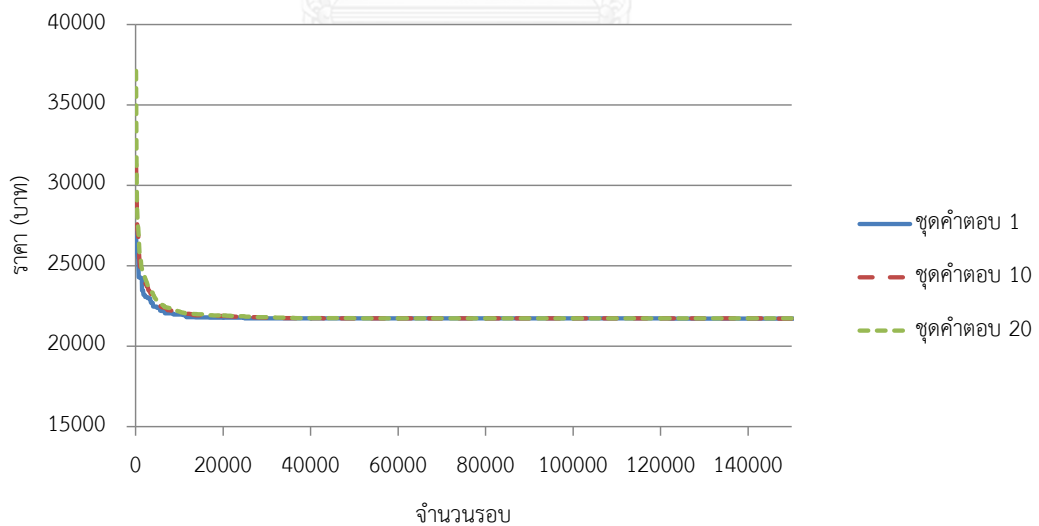
| ตัวแปร  | หน่วย | B1                     | B2        | B3          | B4          |
|---|-------|------------------------|-----------|-------------|-------------|
| ความกว้างคาน  | mm    | 200                    | 200       | 200         | 200         |
| ความลึกคาน  | mm    | 350                    | 350       | 225         | 225         |
| เหล็กเสริมหลักบน  |       | 2-DB12                 | 2-DB12    | 2-DB12      | 2-DB12      |
| เหล็กเสริมหลักล่าง  |       | 2-DB12                 | 2-DB12    | 2-DB12      | 2-DB12      |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 1   |       | -                      | -         | -           | -           |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 1                                       |       | 1-DB16                 | 3-DB12    | 1-DB12      | 1-DB16      |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 2   |       | 1-DB12                 | 1-DB12    | 1-DB12      | 3-DB12      |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 2                                       |       | -                      | -         | -           | -           |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 3   |       | 1-DB12                 | 1-DB12    | 1-DB12      | 3-DB12      |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 3                                       |       | 1-DB16                 | 3-DB12    | 1-DB12      | 1-DB16      |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 4   |       | -                      | -         | -           | -           |
| ระยะเรียงเหล็กคูกตั้ง                                       | mm    | 150,-,150              | 150,-,150 | 100,100,100 | 100,100,100 |
| ราคาก่อสร้างรวม   |       | 41,829                 |           |             |             |
| จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด                               |       | $1.71 \times 10^{63}$  |           |             |             |
| ร้อยละของจำนวนรอบที่ใช้ต่อจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด (%) |       | $2.04 \times 10^{-56}$ |           |             |             |



รูปที่ 4.13 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 4 (Live Load 200 kg/m<sup>2</sup>)

ตารางที่ 4.11 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 1 (Live Load 400 kg/m<sup>2</sup>)

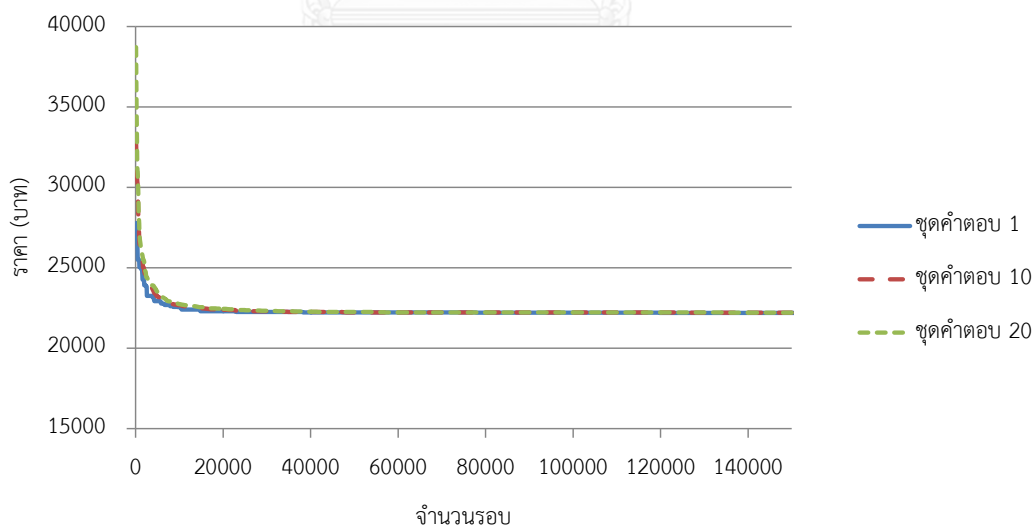
| ตัวแปร  | หน่วย | B1                     | B2     | B3     | B4     |
|---|-------|------------------------|--------|--------|--------|
| ความกว้างคาน  | mm    | 200                    | 200    | 200    | 200    |
| ความลึกคาน  | mm    | 325                    | 375    | 225    | 200    |
| เหล็กเสริมหลักบน  |       | 2-DB12                 | 2-DB12 | 2-DB12 | 2-DB12 |
| เหล็กเสริมหลักล่าง  |       | 2-DB12                 | 2-DB12 | 2-DB12 | 2-DB12 |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 1   |       | -                      | -      | -      | -      |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 1                                       |       | 1DB-16                 | 3DB-12 | -      | -      |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 2   |       | 3DB-16                 | 4DB-16 | 1DB-16 | -      |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 2                                       |       | 1DB-16                 | 3DB-12 | -      | -      |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 3   |       | -                      | -      | -      | -      |
| ระยะเรียงเหล็กกุกตั้ง                                       | mm    | 125,125                | 75,75  | 75,75  | -      |
| ราคาก่อสร้างรวม   |       | 21,148                 |        |        |        |
| จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด                               |       | $2.04 \times 10^{49}$  |        |        |        |
| ร้อยละของจำนวนรอบที่ใช้ต่อจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด (%) |       | $7.34 \times 10^{-43}$ |        |        |        |



รูปที่ 4.14 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 1 (Live Load 400 kg/m<sup>2</sup>)

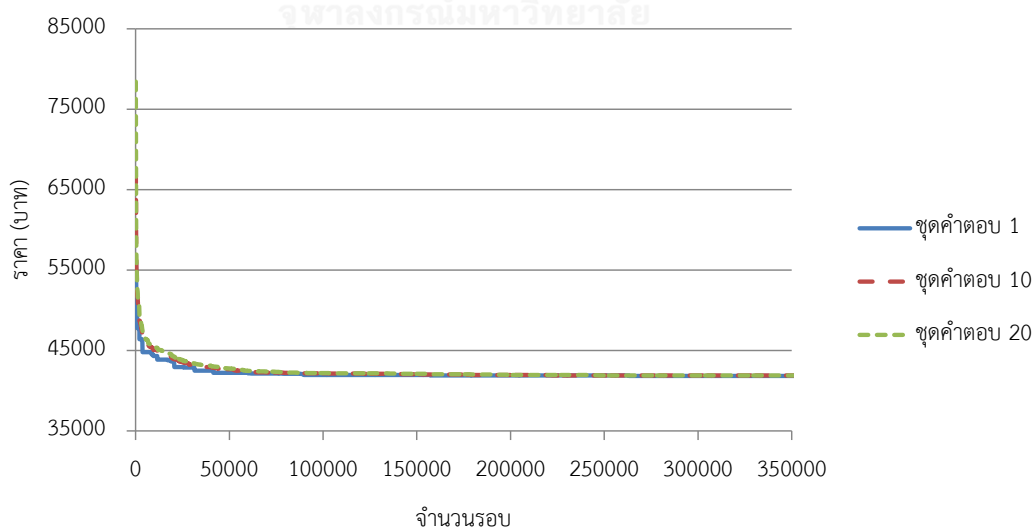
ตารางที่ 4.12 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 2 (Live Load 400 kg/m<sup>2</sup>)

| ตัวแปร  | หน่วย | B1                     | B2      | B3      | B4      |
|---|-------|------------------------|---------|---------|---------|
| ความกว้างคาน  | mm    | 200                    | 200     | 200     | 200     |
| ความลึกคาน  | mm    | 275                    | 300     | 275     | 300     |
| เหล็กเสริมหลักบน  |       | 2-DB12                 | 2-DB12  | 2-DB12  | 2-DB12  |
| เหล็กเสริมหลักล่าง  |       | 2-DB12                 | 2-DB12  | 2-DB12  | 2-DB12  |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 1   |       | -                      | -       | -       | -       |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 1                                       |       | -                      | 1DB-16  | 3DB-12  | 1DB-16  |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 2   |       | 4DB-12                 | 4DB-12  | 4DB-12  | 4DB-12  |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 2                                       |       | 3DB-12                 | 1DB-16  | -       | 1DB-16  |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 3   |       | -                      | -       | -       | -       |
| ระยะเรียงเหล็กกุกตั้ง                                       | mm    | 100,100                | 125,125 | 100,100 | 125,125 |
| ราคาก่อสร้างรวม   |       | 22,008                 |         |         |         |
| จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด                               |       | $2.04 \times 10^{49}$  |         |         |         |
| ร้อยละของจำนวนรอบที่ใช้ต่อจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด (%) |       | $7.34 \times 10^{-43}$ |         |         |         |

รูปที่ 4.15 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 2 (Live Load 400 kg/m<sup>2</sup>)

ตารางที่ 4.13 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 1 (Live Load 400 kg/m<sup>2</sup>)

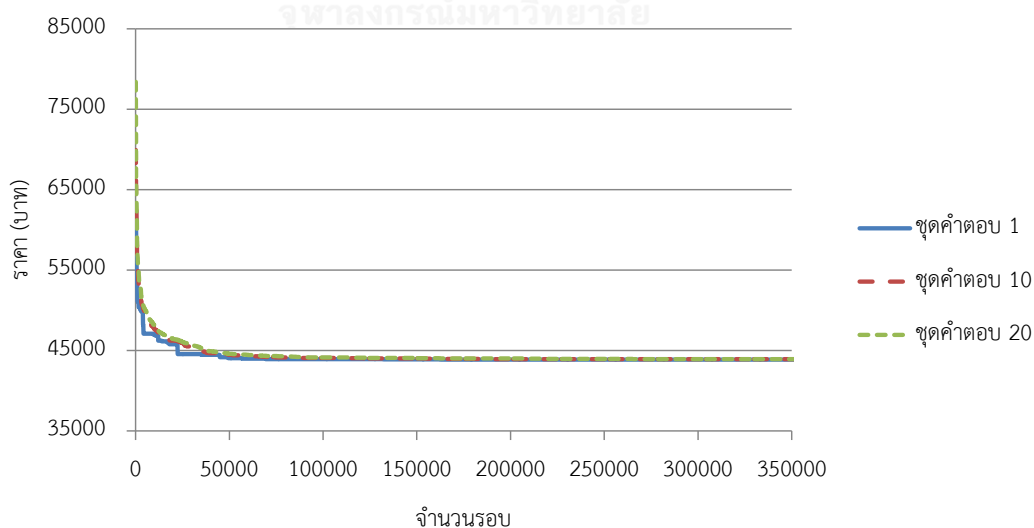
| ตัวแปร  | หน่วย | B1                     | B2          | B3       | B4     |
|---|-------|------------------------|-------------|----------|--------|
| ความกว้างคาน  | mm    | 200                    | 200         | 200      | 200    |
| ความลึกคาน  | mm    | 350                    | 400         | 225      | 200    |
| เหล็กเสริมหลักบน  |       | 2-DB12                 | 2-DB12      | 2-DB12   | 2-DB12 |
| เหล็กเสริมหลักล่าง  |       | 2-DB12                 | 2-DB12      | 2-DB12   | 2-DB12 |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 1   |       | -                      | -           | -        | -      |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 1                                       |       | 2-DB12                 | 3-DB12      | 1-DB12   | -      |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 2   |       | 3-DB12                 | 4-DB12      | 1-DB12   | -      |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 2                                       |       | -                      | 1-DB12      | -        | -      |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 3   |       | 3-DB12                 | 4-DB12      | 1-DB12   | -      |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 3                                       |       | 2-DB12                 | 3-DB12      | 1-DB12   | -      |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 4   |       | -                      | -           | -        | -      |
| ระยะเรียงเหล็กลูกตั้ง                                       | mm    | 150,150,150            | 100,150,100 | 75,75,75 | -      |
| ราคาก่อสร้างรวม   |       | 41,912                 |             |          |        |
| จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด                               |       | $1.71 \times 10^{63}$  |             |          |        |
| ร้อยละของจำนวนรอบที่ใช้ต่อจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด (%) |       | $2.04 \times 10^{-56}$ |             |          |        |



รูปที่ 4.16 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 1 (Live Load 400 kg/m<sup>2</sup>)

ตารางที่ 4.14 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 2 (Live Load 400 kg/m<sup>2</sup>)

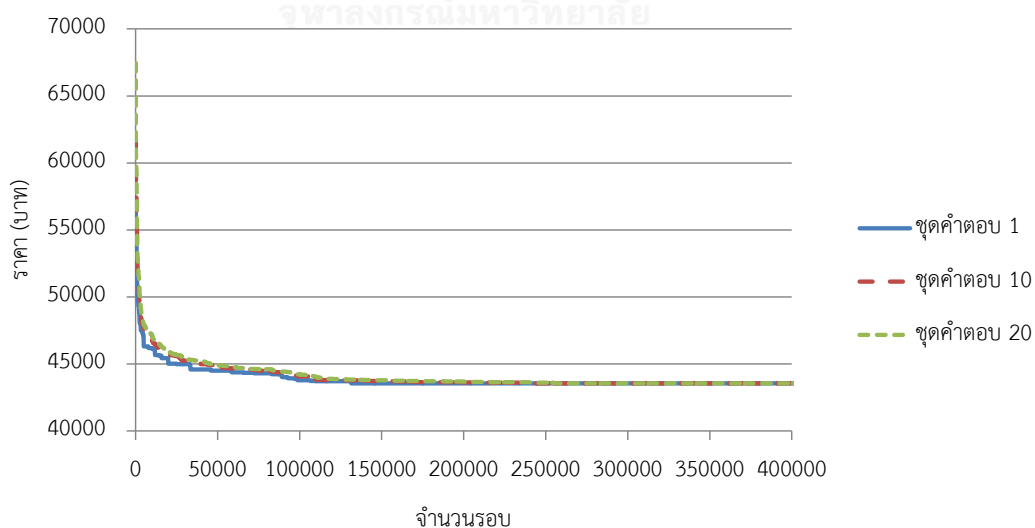
| ตัวแปร  | หน่วย | B1                     | B2          | B3          | B4          |
|---|-------|------------------------|-------------|-------------|-------------|
| ความกว้างคาน  | mm    | 200                    | 200         | 200         | 200         |
| ความลึกคาน  | mm    | 300                    | 250         | 275         | 250         |
| เหล็กเสริมหลักบน  |       | 2-DB12                 | 2-DB12      | 2-DB12      | 2-DB12      |
| เหล็กเสริมหลักล่าง  |       | 2-DB12                 | 2-DB12      | 2-DB12      | 2-DB12      |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 1   |       | -                      | -           | -           | -           |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 1                                       |       | 2-DB16                 | 1-DB16      | -           | 1-DB16      |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 2   |       | 2-DB12                 | 4-DB12      | 3-DB12      | 4-DB12      |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 2                                       |       | -                      | 1-DB12      | 1-DB16      | 1-DB12      |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 3   |       | 2-DB12                 | 4-DB12      | 3-DB12      | 4-DB12      |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 3                                       |       | 2-DB16                 | 1-DB16      | -           | 1-DB16      |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 4   |       | -                      | -           | -           | -           |
| ระยะเรียงเหล็กลูกตั้ง                                       | mm    | 150,-,150              | 100,100,100 | 125,125,125 | 100,100,100 |
| ราคาก่อสร้างรวม   |       | 43,615                 |             |             |             |
| จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด                               |       | $1.71 \times 10^{63}$  |             |             |             |
| ร้อยละของจำนวนรอบที่ใช้ต่อจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด (%) |       | $2.04 \times 10^{-56}$ |             |             |             |



รูปที่ 4.17 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 2 (Live Load 400 kg/m<sup>2</sup>)

ตารางที่ 4.15 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 3 (Live Load 400 kg/m<sup>2</sup>)

| ตัวแปร  | หน่วย | B1                     | B2          | B3          | B4      |
|---|-------|------------------------|-------------|-------------|---------|
| ความกว้างคาน  | mm    | 200                    | 200         | 200         | 200     |
| ความลึกคาน  | mm    | 350                    | 250         | 275         | 300     |
| เหล็กเสริมหลักบน  |       | 2-DB12                 | 2-DB12      | 2-DB12      | 2-DB12  |
| เหล็กเสริมหลักล่าง  |       | 2-DB12                 | 2-DB12      | 2-DB12      | 2-DB12  |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 1   |       | -                      | -           | -           | -       |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 1                                       |       | 2-DB12                 | 1-DB16      | -           | -       |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 2   |       | 3-DB12                 | 4-DB12      | 3-DB12      | 3-DB12  |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 2                                       |       | -                      | 1-DB12      | 1-DB16      | 4-DB12  |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 3   |       | 3-DB12                 | 4-DB12      | 3-DB12      | 3-DB12  |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 3                                       |       | 2-DB12                 | 1-DB16      | -           | -       |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 4   |       | -                      | -           | -           | -       |
| ระยะเรียงเหล็กคูกตั้ง                                       | mm    | 150,150,150            | 100,100,100 | 125,125,125 | -,100,- |
| ราคาก่อสร้างรวม   |       | 43,487                 |             |             |         |
| จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด                               |       | $1.71 \times 10^{63}$  |             |             |         |
| ร้อยละของจำนวนรอบที่ใช้ต่อจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด (%) |       | $2.33 \times 10^{-56}$ |             |             |         |

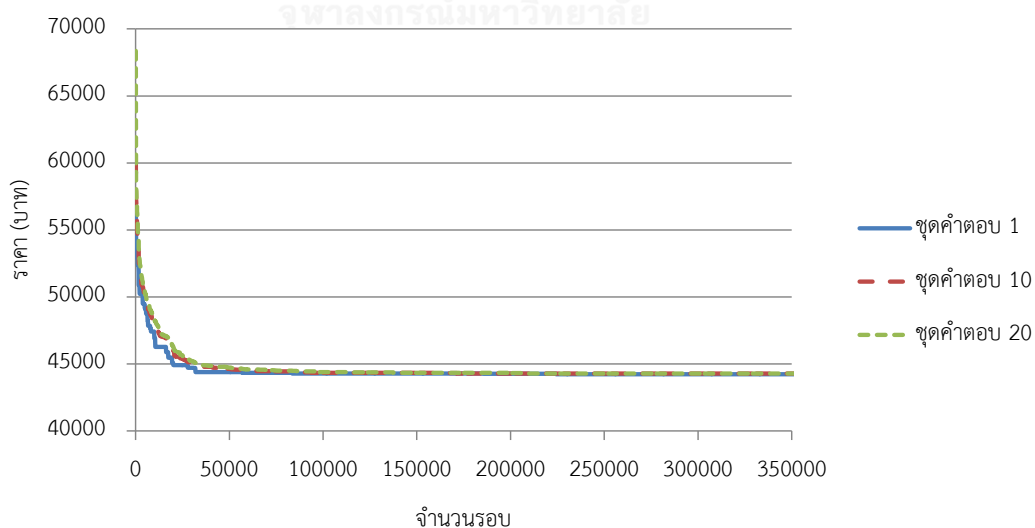


รูปที่ 4.18 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 3 (Live Load 400 kg/m<sup>2</sup>)



ตารางที่ 4.16 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 4 (Live Load 400 kg/m<sup>2</sup>)

| ตัวแปร  | หน่วย | B1                     | B2          | B3       | B4          |
|---|-------|------------------------|-------------|----------|-------------|
| ความกว้างคาน  | mm    | 200                    | 200         | 200      | 200         |
| ความลึกคาน  | mm    | 300                    | 350         | 225      | 250         |
| เหล็กเสริมหลักบน  |       | 2-DB12                 | 2-DB12      | 2-DB12   | 2-DB12      |
| เหล็กเสริมหลักล่าง  |       | 2-DB12                 | 2-DB12      | 2-DB12   | 2-DB12      |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 1   |       | -                      | -           | -        | -           |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 1                                       |       | 2-DB16                 | 3-DB16      | 1-DB12   | 1-DB16      |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 2   |       | 2-DB12                 | 1-DB16      | 1-DB12   | 4-DB12      |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 2                                       |       | -                      | -           | -        | 1-DB12      |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 3   |       | 2-DB12                 | 1-DB16      | 1-DB12   | 4-DB12      |
| เหล็กเสริมพิเศษล่าง 3                                       |       | 2-DB16                 | 3-DB16      | 1-DB12   | 1-DB16      |
| เหล็กเสริมพิเศษบน 4   |       | -                      | -           | -        | -           |
| ระยะเรียงเหล็กลูกตั้ง                                       | mm    | 150,0,150              | 100,100,100 | 75,75,75 | 100,100,100 |
| ราคาก่อสร้างรวม   |       | 43,923                 |             |          |             |
| จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด                               |       | $1.71 \times 10^{63}$  |             |          |             |
| ร้อยละของจำนวนรอบที่ใช้ต่อจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด (%) |       | $2.04 \times 10^{-56}$ |             |          |             |



รูปที่ 4.19 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 4 (Live Load 400 kg/m<sup>2</sup>)

## บทที่ 5

### สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิธีการประยุกต์ใช้วิธี Harmony Search ในการออกแบบโครงสร้างอย่างเหมาะสมที่สุดกับกรณีศึกษาทั้งหมด 6 กรณี โดยผลการประยุกต์ใช้วิธี HS ให้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ มีอัตราการลู่เข้าสู่ค่าตอบค่อนข้างรวดเร็ว เนื่องจาก HS มีวิธีการค้นหาคำตอบที่หลากหลาย เช่น การสุ่มจากชุดคำตอบที่มีอยู่แล้วหรือการสุ่มจากขอบเขตของตัวแปร อีกทั้งยังเก็บชุดคำตอบเป็นเมตริกซ์จึงมีชุดคำตอบมากกว่า 1 ชุด โดยชุดคำตอบเริ่มต้นจะกระจายตัวไปตามจุดต่างๆ ทำให้การค้นหาค่อนข้างทั่วถึงป้องกันการตกสู่คำตอบที่ยังไม่ดีพอ และเมื่อรอบการคำนวณเพิ่มขึ้นชุดคำตอบทุกชุดจะค่อยๆลู่เข้าสู่ชุดคำตอบที่ดีที่สุด

พารามิเตอร์ในวิธี HS ได้แก่ HMCR, PAR และ HMS ค่า HMCR ส่งผลต่อโอกาสในการเลือกค่าจากเมตริกซ์หรือสุ่มค่าจากขอบเขต เมื่อค่า HMCR ลดลงโอกาสในการสุ่มค่าจากขอบเขตจะเพิ่มขึ้นทำให้ชุดคำตอบมีความหลากหลายมากขึ้น ส่วนค่า PAR ส่งผลต่อการปรับค่าที่เลือกมาจากเมตริกซ์ แต่เนื่องจากเป็นปัญหาแบบตัวแปรไม่ต่อเนื่องค่าที่ได้จึงเป็นค่าจากในเมตริกซ์เช่นกันทำให้ค่า PAR ไม่มีผลต่อวิธี HS เท่าตัวแปรอื่น และค่า HMS ส่งผลต่อจำนวนชุดคำตอบเริ่มต้นในเมตริกซ์ ยิ่งค่า HMS มากจะทำให้ชุดคำตอบเริ่มต้นมีความหลากหลาย แต่ทั้งนี้การเพิ่มความหลากหลายของชุดคำตอบอาจทำให้อัตราการลู่เข้าหาค่าตอบช้าลง ดังนั้นการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับแต่ละปัญหานั้นมีความสำคัญเนื่องจากจะช่วยให้ประสิทธิภาพการทำงานของวิธี HS ดีขึ้นและรวดเร็วขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ค่า HMCR, PAR และ HMS เท่ากับ 0.75, 0.45 และ 20 ตามลำดับ

ในส่วนของผลคำตอบจะเห็นได้ว่า ความกว้างของหน้าตัดจะมีค่าต่ำ และความลึกของหน้าตัดจะมีค่ามากกว่าเนื่องจากเมื่อเพิ่มค่าความกว้างและความลึกในอัตราส่วนที่เท่ากัน การเพิ่มความลึกจะสามารถรับโมเมนต์ได้มากกว่าจึงช่วยให้ประหยัดราคาได้ ในส่วนของเหล็กจะเสริมเพิ่มเติมเท่าที่จำเป็นเพื่อช่วยรับโมเมนต์ในส่วนที่เหลื่อ สำหรับกรณีศึกษาที่ 5 และ 6 ผลราคาเมื่อจัดวางรูปแบบพื้นที่แตกต่างกันและให้น้ำหนักบรรทุกทุกจร 200 และ 400 kg/m<sup>2</sup> ได้ว่าการวางแผ่นพื้นสำเร็จรูปในทิศทางเดียวกันทั้งหมดจะได้ราคารวมต่ำที่สุด

จากการวิเคราะห์ผลลัพธ์ทั้งหมดในงานวิจัยนี้ พบว่าปัจจัยที่ส่งผลการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดเพื่อให้เกิดความประหยัดนั้นค่อนข้างหลากหลาย ทั้งราคาต่อหน่วยของวัสดุ พารามิเตอร์ในวิธี HS และการจัดวางรูปแบบโครงสร้าง เป็นต้น ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้จึงต้องตรวจสอบความเหมาะสมอีกครั้งก่อนนำไปใช้จริงหรือพัฒนาต่อ เนื่องจากในแต่ละปัญหาอาจมีค่าตัวแปรต่างๆ หรือรูปแบบโครงสร้างที่แตกต่างกัน

ข้อเสนอแนะในการนำวิธี HS ไปในการออกแบบโครงสร้างอย่างเหมาะสมที่สุดนอกเหนือจากการกำหนดพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับปัญหาแล้ว การลดขอบเขตความเป็นไปได้ของตัวแปรจะสามารถทำให้กระบวนการค้นหานั้นเป็นไปรวดเร็วขึ้นเนื่องจากยิ่งขอบเขตของตัวแปรน้อยจะทำให้จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดน้อยลงตาม ซึ่งตัวแปรบางตัวอาจไม่จำเป็นต้องมีขอบเขตของตัวแปรที่มาก เช่น ตัวแปรความกว้างที่ได้ค่าต่ำสุดเกือบทุกกรณีดังนั้นอาจใช้ขอบเขตที่ลดลงเป็น 200-300 ได้ เป็นต้น ทั้งนี้การลดขอบเขตของตัวแปรนั้นวิศวกรผู้ใช้งานต้องใช้ความรู้และประสบการณ์ส่วนบุคคลเพื่อเลือกใช้ค่าขอบเขตที่เหมาะสมสำหรับตัวแปรแต่ละตัว

## รายการอ้างอิง

A. Kaveh and A. Shakouri Mahmud Abadib (2010). "Cost optimization of a composite floor system using an improved harmony search algorithm." Journal of Constructional Steel Research **66**: 664-669.

American Concrete Institute (2008). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary, ACI Committee 318.

F. Erdal, et al. (2011). "Optimum design of cellular beams using harmony search and particle swarm optimizers." Journal of Constructional Steel Research **67**: 237-247.

F. Glover (1986). "Future paths for integer programming and links to artificial intelligence." Computers and Operations Research **13**: 533-549.

Kang Seok Lee and Zong Woo Geem (2004). "A new structural optimization method based on the harmony search algorithm." Computers and Structures **82**: 781-798.

L. A. Cauchy (1847). "Methode generale pour la resolution des systemes d'equations simulatanees." Comptes Rendus de l'Academie de Sciences de Paris.

M. G.H. Omran and M. Mahdavi (2008). "Global-best harmony search." Applied Mathematics and Computation **198**: 643-656.

M. Mahdavi, et al. (2007). "An improved harmony search algorithm for solving optimization problems." Applied Mathematics and Computation **188**: 1567-1579.

M.P. Saka (2009). "Optimum design of steel sway frames to BS5950 using harmony search algorithm." Journal of Constructional Steel Research **65**: 36-43.

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

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

Xin-She Yang (2010). Engineering Optimization An Introduction with Metaheuristic Applications, John Wiley & Sons.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอัษฎพล เตชะรัตนประเสริฐ เกิดเมื่อวันที่ 17 เมษายน พ.ศ. 2534 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จาก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2555 และเข้ารับการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2556

