

การออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับแผ่นพื้นที่องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยอัลกอริทึมหึ่งห้อย
แบบแบ่งกลุ่มย่อย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

OPTIMUM DESIGN OF REINFORCED CONCRETE FLAT PLATE BY FIREFLY ALGORITHM
SUBDIVIDED INTO GROUPS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2018
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับแผ่นพื้นห้องเรียน
โดย	คอนกรีตเสริมเหล็ก โดยอัลกอริทึมหึ่งห้อยแบบแบ่งกลุ่มย่อย
สาขาวิชา	นายอรรณวุฒิ สุขสรรควณิช
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	วิศวกรรมโยธา
	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัฒนชัย สมิตธากร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสวกชัย ตั้งอรามวงศ์)	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
.....	
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัฒนชัย สมิตธากร)	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.สายันต์ ศิริมนตรี)	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

อรรถวุฒิ สุขสรรควณิช : การออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับแผ่นพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยอัลกอริทึมหิ่งห้อยแบบแบ่งกลุ่มย่อย. (OPTIMUM DESIGN OF REINFORCED CONCRETE FLAT PLATE BY FIREFLY ALGORITHM SUBDIVIDED INTO GROUPS) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.วัฒนชัย สมิตาการ

โครงสร้างแผ่นพื้นท้องเรียบเป็นที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันเนื่องจากขั้นตอนก่อสร้างไม่ซับซ้อนและเพิ่มพื้นที่ใช้สอยให้มากขึ้น ในการออกแบบโครงสร้าง วิศวกรผู้ออกแบบนอกจากจะต้องคำนึงถึงความแข็งแรงและความปลอดภัยของโครงสร้างเป็นหลักแล้ว ยังต้องคำนึงถึงความประหยัดด้วย โดยทั่วไปวิศวกรจะใช้ประสบการณ์เฉพาะบุคคลในการออกแบบให้ได้โครงสร้างที่มีความแข็งแรงและประหยัด แต่ก็ยังไม่สามารถยืนยันได้ว่าโครงสร้างนั้นประหยัดที่สุด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำอัลกอริทึมหิ่งห้อยแบบแบ่งกลุ่มย่อยมาประยุกต์ใช้กับการออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับแผ่นพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งอัลกอริทึมนี้เป็นวิธีการเมตาฮีริสติกที่ได้รับแรงบันดาลใจมาจากพฤติกรรมการใช้แสงในการหาคู่ และหาอาหารของหิ่งห้อย ฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ ราคาค่าก่อสร้าง ซึ่งประกอบด้วยราคาคอนกรีต เหล็กเสริม และแบบหล่อ การวิเคราะห์โครงสร้างแผ่นพื้นท้องเรียบใช้วิธีโครงสร้างข้อแข็งเทียบเท่า และการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กใช้ตามมาตรฐาน ACI 318M-14 การพัฒนาโปรแกรมสำหรับการออกแบบอย่างเหมาะสมใช้ภาษาจาวา ตัวแปรหลักที่พิจารณา ได้แก่ ความหนาพื้น มิติเสา ขนาดและจำนวนของเหล็กเสริมในแต่ละทิศทาง ทั้งในแถบเสาและแถบกลางของแผ่นพื้น การหาค่าตอบอย่างเหมาะสมด้วยอัลกอริทึมหิ่งห้อย มีข้อดีคือ สามารถหาค่าตอบที่เหมาะสมเฉพาะที่หลาย ๆ ค่าได้ในเวลาเดียวกัน ทำให้สามารถตรวจหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ง่าย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5970358421 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Optimum design, Reinforced concrete flat plate, Firefly algorithm

Atthawut Suksankhawanit : OPTIMUM DESIGN OF REINFORCED CONCRETE FLAT PLATE BY FIREFLY ALGORITHM SUBDIVIDED INTO GROUPS. Advisor: Asst. Prof. Watanachai Smittakorn, Ph.D.

Flat plate structures have been widely used recently due to the ease of construction and increase in floor areas. In general, structural engineers should consider not only strength and safety but also economy of structures. Practically, engineers use personal experience in designing for such structures. As a result, the structures are not guaranteed the most economical. Therefore, this research presents the application of firefly algorithm subdivided into groups to the optimum design of reinforced concrete flat plate structures. This algorithm is a meta-heuristic method inspired by the behavior of fireflies which use flashes to attract mate partners and potential prey. The objective function is the construction cost consisting of the cost of concrete, reinforcement and formwork. Flat plate structures are modelled and analyzed using the equivalent frame method, and reinforced concretes are designed according to ACI 318M-14 code. Computer programs for the optimum design are developed by Java programming language. Primary variables comprise slab thickness, column dimensions, size and number of reinforcing steels along column strips and middle strips in each direction. With the use of firefly algorithm, multiple local optimums can be obtained simultaneously, therefore the global optimum solution can be easily detected.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัฒนชัย สมิตาการ เป็นอย่างสูง ที่ให้ความรู้ คำแนะนำปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง และสนับสนุนในการดำเนินงานวิจัยนี้เป็นอย่างดี เพื่อให้งานวิจัยนี้สมบูรณ์ ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์ ที่กรุณาสละเวลามาเป็นประธานกรรมการ ตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สายันต์ ศิริมนตรี ที่กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบพระคุณนางสาวพรชนก สุขสรรควณิช ที่สละเวลาช่วยแนะ แนวทางการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาจาวา ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้ความรัก กำลังใจ และความ สนับสนุนในการดำเนินงานวิจัยนี้ในทุกด้าน ขอขอบพระคุณครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้แก่ ข้าพเจ้า และขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือให้คำปรึกษาในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

อรรณภูมิ สุขสรรควณิช



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง	ง
กิตติกรรมประกาศ.....จ	จ
สารบัญ.....ฉ	ฉ
สารบัญตาราง.....ช	ช
สารบัญรูปภาพ.....ฌ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ..... 1	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ..... 1	1
1.2 วัตถุประสงค์..... 2	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย..... 2	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน..... 3	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 4	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 4	4
2.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์..... 7	7
2.2.1 การคำนวณปริมาตรคอนกรีต..... 8	8
2.2.2 การคำนวณน้ำหนักเหล็กเสริม..... 9	9
2.2.3 การคำนวณพื้นที่ไม้แบบ..... 12	12
2.3 ฟังก์ชันข้อจำกัด..... 13	13
2.4 การออกแบบโครงสร้าง..... 14	14
2.4.1 ความหนาต่ำสุดของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสองทาง..... 16	16
2.4.2 โมเมนต์ดัดของแผ่นพื้น..... 17	17

2.4.3 การกระจายโมเมนต์ดัดเข้าสู่แถบเสาและแถบกลาง.....	23
2.4.4 แรงเฉือนของแผ่นพื้น	23
2.4.5 การถ่ายโมเมนต์-แรงเฉือน ตรงรอยต่อระหว่างแผ่นพื้นกับเสา	24
2.4.6 โมเมนต์ดัดระบุ.....	26
2.4.7 แรงเฉือนระบุ.....	29
2.4.8 เหล็กรับแรงเฉือน	30
2.5 อัลกอริทึมหึ่งห้อย	32
2.5.1 ความเข้มแสงและความนำดึงดูด	32
2.5.2 ขั้นตอนการดำเนินการอัลกอริทึมหึ่งห้อย.....	35
2.6 วิธีการแบ่งกลุ่มย่อย	37
บทที่ 3 ขั้นตอนการวิจัย	38
3.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการออกแบบที่เหมาะสม	39
3.2 ขั้นตอนการออกแบบอย่างเหมาะสมของอัลกอริทึมหึ่งห้อยแบบแบ่งกลุ่มย่อย.....	48
บทที่ 4 กรณีศึกษา	51
4.1 การวิเคราะห์พารามิเตอร์และจำนวนตัวแปรในการออกแบบ.....	51
4.2 ผลการออกแบบอย่างเหมาะสม	56
บทที่ 5 บทสรุป	66
5.1 สรุปผล	66
5.2 ข้อเสนอแนะ	67
บรรณานุกรม	69
ภาคผนวก	71
ประวัติผู้เขียน	75

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงของมาตรฐานของเหล็กเสริมหลัก.....	12
ตารางที่ 2.2 ความหนาต่ำสุดของพื้นไม่มีคานภายในรองรับ t_{min}	16
ตารางที่ 2.3 ตัวคูณประกอบวิธีกระจายโมเมนต์สำหรับพื้นที่องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็กไม่มีแปงหัวเสา	19
ตารางที่ 2.5 ร้อยละของโมเมนต์บวกและลบที่กระจายสู่แถบเสา-คาน	23
ตารางที่ 2.6 ค่าตัดแปลงมากที่สุดของตัวคูณประกอบ γ_f	25
ตารางที่ 2.7 ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดัดขั้นต่ำ ($A_{s,min}$).....	29
ตารางที่ 3.1 ขอบเขตของตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัย.....	38
ตารางที่ 3.2 ราคาวัสดุก่อสร้างต่อหน่วย	39
ตารางที่ 4.1 คำตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 1.....	57
ตารางที่ 4.2 คำตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 - 4.....	60
ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบคำตอบของกรณีศึกษาที่ 1 กับการออกแบบทั่วไป	64
ตารางที่ ก.1 คำนวณโมเมนต์และแรงเฉือนของแผ่นพื้นในกรณีที่ 1 ด้วยวิธีออกแบบด้วยมือ.....	72

สารบัญรูปร่าง

	หน้า
รูปภาพที่ 2.1 แผ่นพื้นสำหรับการคำนวณปริมาตรคอนกรีต	8
รูปภาพที่ 2.2 แสดงระยะฝังเหล็กเสริมอย่างน้อยสำหรับแผ่นพื้นไร้คาน	11
รูปภาพที่ 2.3 การเข้าไม้แบบของแผ่นพื้นสำหรับการคำนวณไม้แบบ	12
รูปภาพที่ 2.4 แปลนโครงสร้างข้อแข็งเทียบเท่าของแผ่นพื้น	16
รูปภาพที่ 2.5 แสดงตัวอย่างการคำนวณค่าสติฟเนสของแผ่นพื้น-คาน	18
รูปภาพที่ 2.6 แสดงตัวอย่างการคำนวณค่าสติฟเนสของเสา	19
รูปภาพที่ 2.7 การยึดระหว่างเสากับแถบพื้น-คานในโครงสร้างข้อแข็งเทียบเท่าด้วยชิ้นส่วนทางขวาง	21
รูปภาพที่ 2.8 การกระจายของหน่วยแรงเฉือนรวมรอบหน้าตัดวิกฤต	26
รูปภาพที่ 2.9 แรงภายในบนหน้าตัดคานเหล็กเสริมเดียว	27
รูปภาพที่ 2.10 เหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแผ่นพื้นที่องเรียบ	31
รูปภาพที่ 2.11 แผนภาพการทำงานของอัลกอริทึมหึ่งห้อย	36
รูปภาพที่ 2.12 ตัวอย่างการจับกลุ่มของค่าในเซต S	37
รูปภาพที่ 2.13 ตัวอย่างการจับกลุ่มเซต Z ที่มีความสัมพันธ์กับค่าในเซต S	37
รูปภาพที่ 3.1 แผ่นพื้นที่องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็กสามช่วง ขนาดเสา 45×45 ซม.	41
รูปภาพที่ 3.2 แผ่นพื้นที่องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็กสามช่วง แบ่งกลุ่มขนาดเสาเป็น 1 กลุ่ม	43
รูปภาพที่ 3.3 แผ่นพื้นที่องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็กสามช่วง แบ่งกลุ่มขนาดเสาเป็น 2 กลุ่ม	45
รูปภาพที่ 3.4 แผ่นพื้นที่องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็กสามช่วง แบ่งกลุ่มขนาดเสาเป็น 4 กลุ่ม	47
รูปภาพที่ 3.5 แผนภาพของอัลกอริทึมหึ่งห้อยแบบแบ่งกลุ่มย่อย	49
รูปภาพที่ 3.6 แผนภาพกระบวนการตรวจสอบการรับกำลังของโครงสร้าง	50
รูปภาพที่ 4.1 ความเป็นไปได้ของคำตอบ	52
รูปภาพที่ 4.2 แปลนโครงสร้างกรณีศึกษา	52
รูปภาพที่ 4.3 การลู่หาคำตอบของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์การสู่มกรณีที่ 1	53

รูปภาพที่ 4.4 การลู่หาคำตอบของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์การสุ่มกรณีที่ 254

รูปภาพที่ 4.5 การลู่หาคำตอบของการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การกรองแสงของตัวกลาง54

รูปภาพที่ 4.6 การลู่เข้าหาคำตอบของการเปลี่ยนแปลงประชากรหึ่งห้อยกรณีศึกษาที่ 155

รูปภาพที่ 4.7 การลู่เข้าหาคำตอบของการเปลี่ยนแปลงประชากรหึ่งห้อยกรณีศึกษาที่ 256

รูปภาพที่ 4.8 การลู่เข้าหาคำตอบของกรณีที่ 159

รูปภาพที่ 4.9 การลู่เข้าหาคำตอบของกรณีที่ 262

รูปภาพที่ 4.10 การลู่เข้าหาคำตอบของกรณีที่ 362

รูปภาพที่ 4.11 การลู่เข้าหาคำตอบของกรณีที่ 463



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

โครงสร้างแผ่นพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็กได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในงานก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เช่น โรงแรม คอนโดมิเนียม สำนักงาน โรงเรียน เป็นต้น เนื่องจากแผ่นพื้นท้องเรียบคานคอนกรีตเสริมเหล็กใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างน้อย ขั้นตอนการดำเนินการก่อสร้างไม่ซับซ้อน ค่าการบำรุงรักษาน้อย สามารถลดความสูงระหว่างชั้นทำให้ความสูงรวมของอาคารไม่เกินข้อกำหนดของกฎหมาย วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างสามารถหาได้ง่ายและราคาไม่แพง อีกทั้งยังช่วยเพิ่มพื้นที่ใช้สอยให้มากขึ้นอีกด้วย

การออกแบบโครงสร้างแผ่นพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็กจะต้องคำนึงถึงแรงที่เกิดขึ้นในพื้นที่เพื่อนำมาออกแบบขนาดหน้าตัดและเหล็กเสริมให้สามารถรับแรงที่กระทำได้ โดยจะต้องผ่านเงื่อนไขในการออกแบบตามมาตรฐานเพื่อความปลอดภัย นอกจากนี้ความแข็งแรงปลอดภัยแล้วยังต้องคำนึงถึงความประหยัด ความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ และการลดต้นทุนการก่อสร้าง เนื่องจากสภาพเศรษฐกิจในปัจจุบันมีการแข่งขันกันสูงทางด้านธุรกิจ โดยทั่วไปการออกแบบโครงสร้างให้มีความเหมาะสม และแข็งแรงนั้นจะใช้ความชำนาญและประสบการณ์เฉพาะบุคคลในการออกแบบ ซึ่งยังไม่มีหลักการตายตัว ทำให้ไม่สามารถกล่าวได้ว่าเป็นการออกแบบโครงสร้างที่ประหยัดที่สุด

การออกแบบอย่างเหมาะสมคือ การออกแบบโครงสร้างให้มีความประหยัด ความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ และลดต้นทุนการก่อสร้าง โดยที่โครงสร้างยังสามารถรับแรงกระทำได้อย่างปลอดภัย และผ่านมาตรฐานการออกแบบ การออกแบบอย่างเหมาะสมนี้สามารถใช้วิธีการเมตาฮิวริสติก (Metaheuristic) ช่วยในการออกแบบ ซึ่งวิธีการเมตาฮิวริสติกมีวิธีการต่าง ๆ มากมาย อาทิ อัลกอริทึมพันธุกรรม (Genetic Algorithm) อัลกอริทึมจำลองการอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm) วิธีฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization) วิธีอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization) อัลกอริทึมผึ้ง (Bee Algorithm) และอัลกอริทึมหิ่งห้อย (Firefly Algorithm) เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้อัลกอริทึมหิ่งห้อยแบบแบ่งกลุ่มย่อย (Firefly Algorithm Subdivided into Groups) ในการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับโครงสร้างแผ่นพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อให้ได้โครงสร้างแผ่นพื้นท้องเรียบที่มีความแข็งแรงและ

ราคารวมของโครงสร้างที่ต่ำ โดยใช้ภาษาจาวาในการพัฒนาโปรแกรมการออกแบบตามมาตรฐาน ACI 318M-14

1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

- 1) ศึกษาวิธีการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับโครงสร้างแผ่นพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมหึ่งห้อยแบบแบ่งกลุ่มย่อย
- 2) พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับโครงสร้างแผ่นพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็ก
- 3) ศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของอัลกอริทึมหึ่งห้อยแบบแบ่งกลุ่มย่อย

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

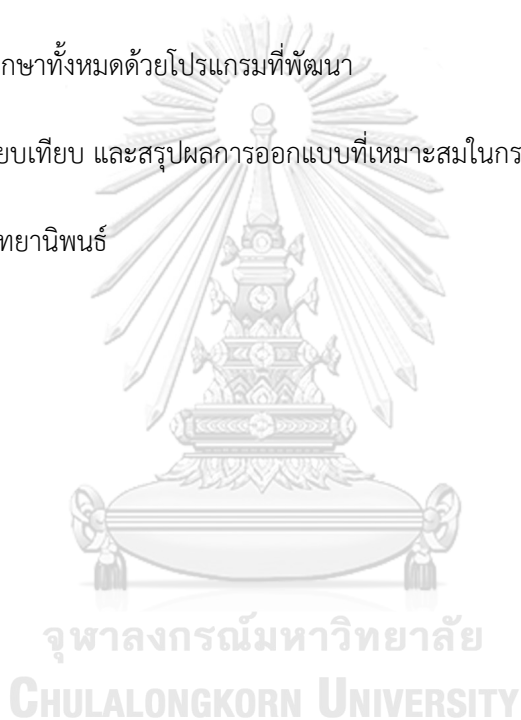
ขอบเขตการศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้มีดังต่อไปนี้

- 1) พิจารณาโครงสร้างแผ่นพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็ก (Flat Plate)
- 2) น้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อโครงสร้างประกอบด้วย น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load) และน้ำหนักบรรทุกจรเฉพาะในแนวตั้ง (Gravity Live Load)
- 3) วิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีโครงข้อแข็งเทียบเท่า (Equivalent Frame Method)
- 4) การคำนวณออกแบบโครงสร้างเป็นไปตามมาตรฐาน ACI 318M-14
- 5) ไม่พิจารณาช่องเปิดในแผ่นพื้น
- 6) ไม่พิจารณาคานขอบ และแป้นหัวเสา
- 7) ไม่พิจารณาการออกแบบเสา
- 8) ไม่พิจารณาราคาของเสา

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ศึกษาทฤษฎีการหาค่าเหมาะสมที่สุด
- 2) ค้นคว้าและศึกษางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง
- 3) ศึกษาและพัฒนาโปรแกรมการออกแบบโครงสร้างแผ่นพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยอัลกอริทึมหึ่งห้อยแบบแบ่งกลุ่มย่อย โดยใช้ภาษาจาวา
- 4) ทดสอบกรณีศึกษาทั้งหมดด้วยโปรแกรมที่พัฒนา
- 5) วิเคราะห์ เปรียบเทียบ และสรุปผลการออกแบบที่เหมาะสมในกรณีศึกษาต่าง ๆ
- 6) จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization) คือ การหาค่าตอบที่ดีที่สุดจากคำตอบที่เป็นไปได้จำนวนมาก ในอดีตได้มีการพัฒนาวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดเชิงตัวเลข (Numerical Optimization) ขึ้นมา แต่วิธีนี้สามารถใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดของปัญหาที่ไม่มีความซับซ้อนมากได้รวดเร็ว แต่ถ้าเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อนมากขึ้นก็จะใช้เวลาในการค้นหาค่าเหมาะสมที่สุดของปัญหานั้นนานมากขึ้น จึงได้มีการพัฒนาวิธีประมาณการ (Heuristic) ซึ่งวิธีการนี้จะช่วยแก้ปัญหาในเรื่องของระยะเวลาในการค้นหาค่าเหมาะสมที่สุดของปัญหาที่มีความซับซ้อนได้รวดเร็วขึ้นแต่ผลลัพธ์ที่ได้ไม่ค่อยดีนัก ต่อมาการหาค่าเหมาะสมที่สุดได้มีการนำมาใช้งานในการแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนมากขึ้น จึงมีการคิดค้นวิธีการแก้ปัญหาขึ้นมาใหม่เพื่อปรับใช้กับปัญหาที่มีความซับซ้อนมากขึ้นนั่นคือ วิธีเมตาฮิวริสติก (Metaheuristic) ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่ออกแบบมาสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่มีความซับซ้อนมาก โดยวิธีการของเมตาฮิวริสติกนั้นถูกพัฒนามาจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติต่าง ๆ [1] รวมทั้งพฤติกรรมของสัตว์สังคมในการแก้ปัญหาและการดำเนินชีวิต เช่น พฤติกรรมการสร้างรังของปลวก การหาเส้นทางที่สั้นที่สุดของมด การหาอาหารของผึ้ง เป็นต้น

วิธีเมตาฮิวริสติก (Metaheuristic) ได้รับความนิยมในการใช้งานทางด้านวิศวกรรม เนื่องจากเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง ประสิทธิภาพที่ดี และสามารถปรับใช้กับปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดได้หลายรูปแบบ แต่ไม่ได้หมายความว่าวิธีเมตาฮิวริสติกวิธีใดวิธีหนึ่ง จะมีความสามารถในการแก้ปัญหาได้ทุกปัญหา โดยวิธีที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรม เช่น อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) อัลกอริทึมจำลองการอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm) วิธีฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization) วิธีอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization) อัลกอริทึมผึ้ง (Bee Algorithm) และอัลกอริทึมหิ่งห้อย (Firefly Algorithm) เป็นต้น

จากการศึกษางานวิจัยในอดีตพบว่าได้มีการนำวิธีเมตาฮิวริสติกมาประยุกต์ใช้ในงานออกแบบโครงสร้าง ดังต่อไปนี้

Sahab, Ashour และ Toropov (2004) [2] ได้ทำการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม (GA) ผสมกับวิธี Hook and Jeeves ในการออกแบบอาคารที่ใช้พื้นที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน

BS8110 เพื่อออกแบบอาคารที่ใช้พื้นที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีความประหยัดที่สุด และเปรียบเทียบผลที่ได้กับการออกแบบปกติ ผลจากการวิจัยพบว่าการใช้อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม (GA) ผสมกับวิธี Hook and Jeeves ในการออกแบบทำให้ได้รับราคาต่ำกว่าการออกแบบปกติ และพบว่าค่าใช้จ่ายที่มากที่สุดในการก่อสร้างอาคารที่ใช้พื้นที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น คือ พื้น

Ali Kaveh และ Omid Sabzi (2011) [3] ได้ทำการประยุกต์ใช้วิธีจำลองการระเบิดจักรวาล (HBB-BC) ซึ่งเป็นวิธีที่ผสมระหว่าง วิธีจำลองการระเบิดจักรวาล (BB-BC) กับฮาร์โมนีเสิร์ช (HS) และวิธีฝูงอนุภาคผสมฝูงมด (HPSACO) ซึ่งเป็นวิธีที่ผสมระหว่าง วิธีฝูงอนุภาค (PSO) วิธีฝูงมด (ACO) และวิธีฮาร์โมนีเสิร์ช (HS) ในการออกแบบโครงสร้างข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสมที่รับแรงกระทำตามแนวตั้งและด้านข้างตามมาตรฐาน ACI318-08 เพื่อการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการออกแบบของทั้งสองวิธีที่ได้กล่าวข้างต้น ผลจากการวิจัยพบว่าประสิทธิภาพของวิธีจำลองการระเบิดจักรวาล (HBB-BC) มีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีจำลองการระเบิดจักรวาลแบบทั่วไป (BB-BC) และวิธีฝูงอนุภาคผสมฝูงมด (HPSACO) มีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีฝูงอนุภาคทั่วไป (PSO) ส่วนการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีจำลองการระเบิดจักรวาล (HBB-BC) กับวิธีฝูงอนุภาคผสมฝูงมด (HPSACO) พบว่าวิธีจำลองการระเบิดจักรวาล (HBB-BC) มีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีฝูงอนุภาคผสมฝูงมด (HPSACO)

Jahjough, Arafa และ Alqedra (2013) [4] ได้ทำการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ (ABC) ร่วมกับเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงตัวแปร (VCP) ในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กต่อเนื่องตามมาตรฐาน ACI 318-08 เพื่อออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กต่อเนื่องให้มีความเหมาะสมที่สุด และเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม (GA) และ generalized reduced gradient (GRG) จากการวิจัยพบว่าการใช้วิธีอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ (ABC) ร่วมกับเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงตัวแปร (VCP) ด้วยค่า VCP 40% ได้รับคำตอบที่ดีกว่าอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม (GA) และ generalized reduced gradient (GRG)

อัศนัย ทาภา, จักรพันธ์ วงษ์พา, อลงกรณ์ ละม่อม และเรืองรุชดี ชีระโรจน์ (2013) [5] ได้ทำการประยุกต์ใช้ Microsoft visual basic 6 และวิธีจำลองการอบเหนียว (SA) ในการออกแบบที่เหมาะสมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ารับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดสองทางตามมาตรฐานการออกแบบของ ว.ส.ท. 1008-38 วิธีกำลัง เพื่อออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีความรวดเร็ว ปลอดภัย และประหยัดมากที่สุด โดยพิจารณาเฉพาะเสาสั้นปลอกเดี่ยว ผลจากงานวิจัยพบว่าในสถานการณ์ใช้วิธีจำลองการอบเหนียวต้องเลือกค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับปัญหา เนื่องจากมีผลต่อความเร็วและความ

แม่นยำในการหาคำตอบ (ค่าพารามิเตอร์ที่กล่าวข้างต้นคือ ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นและอัตราการลดอุณหภูมิ) ส่วนการออกแบบที่ประหยัดนั้นควรเลือกกำลังของวัสดุที่สูงจะสามารถลดขนาดหน้าตัดเสาและปริมาณเหล็กเสริมให้น้อยลงได้อย่างมากขณะที่หน้าตัดเสายังรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย

อัศนัย ทาภา และเรืองรุชดี ชีระโรจน์ (2015) [6] ได้ทำการประยุกต์ใช้ Microsoft visual basic 6 และอัลกอริทึมอาณานิคมฝูงประดิษฐ์ (ABC) ในการออกแบบที่เหมาะสมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ารับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัดสองทางตามมาตรฐานการออกแบบของ ว.ส.ท. 1008-38 วิธีกำลัง เพื่อการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีความรวดเร็ว ปลอดภัย ประหยัดมากที่สุด และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการออกแบบระหว่างอัลกอริทึมอาณานิคมฝูงประดิษฐ์ (ABC) กับอัลกอริทึมจำลองการอบเหนียว (SA) โดยพิจารณาเฉพาะเสาสั้นปลอกเดี่ยว ผลจากการวิจัยพบว่าอัลกอริทึมอาณานิคมฝูงประดิษฐ์สามารถประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบได้ โดยผลการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดมีค่าเท่ากับวิธีจำลองการอบเหนียว แต่ระยะเวลาในการดำเนินการของอัลกอริทึมอาณานิคมฝูงประดิษฐ์รวดเร็วกว่าวิธีจำลองการอบเหนียวประมาณ 9 เท่า

Gheytratmand, Gholizadeh และ Vababzadeh (2015) [7] ได้ทำการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมอาณานิคมฝูงประดิษฐ์ (ABC) และอัลกอริทึมอาณานิคมฝูงประดิษฐ์ผสมค้างคาว (IABC) ในการออกแบบออกแบบโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสมที่รับแรงกระทำตามแนวดิ่งและด้านข้างตามมาตรฐาน ACI318-08 เพื่อการออกแบบโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กให้ประหยัดที่สุดและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมอาณานิคมฝูงประดิษฐ์ผสมค้างคาว (IABC) อัลกอริทึมอาณานิคมฝูงประดิษฐ์ (ABC) วิธีจำลองการระเบิดจักรวาล (HBB-BC) และวิธีฝูงอนุภาคผสมฝูงมด (HPSACO) ผลจากการวิจัยพบว่าอัลกอริทึมอาณานิคมฝูงประดิษฐ์ผสมค้างคาว (IABC) มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าอัลกอริทึมอาณานิคมฝูงประดิษฐ์ (ABC) ในด้านของราคาและอัตราความเร็วในการลู่วางหาคำตอบ ในส่วนการเปรียบเทียบกับวิธีจำลองการระเบิดจักรวาล (HBB-BC) และวิธีฝูงอนุภาคผสมฝูงมด (HPSACO) พบว่าอัลกอริทึมอาณานิคมฝูงประดิษฐ์ผสมค้างคาว (IABC) มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าสองวิธีการที่กล่าวมาในด้านราคาและจำนวนรอบของการวิเคราะห์โครงสร้าง

เอกราช ประกอบกิจ (2015) [8] ได้ทำการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมหิ่งห้อย (FA) ในการออกแบบโครงสร้างคาน เสา และโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีราคาประหยัดที่สุด และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมหิ่งห้อย (FA) กับวิธีฮาร์โมนีเสิร์ช (HS) และวิธีจำลองการอบเหนียว

(SA) ผลจากการวิจัยพบว่าประสิทธิภาพของอัลกอริทึมหึ่งห้อยนั้นมีความใกล้เคียงกับวิธีฮาร์โมนีเสิร์ชและวิธีจำลองการอบเหนียว แต่ถ้ามีจำนวนตัวแปรมากเกินไปประสิทธิภาพของอัลกอริทึมหึ่งห้อยก็จะไม่ค่อยดี

อัศนัย ทาภา และเรืองรุชดี ชีระโรจน์ (2016) [9] ได้ทำการประยุกต์ใช้ Microsoft visual basic 6 และวิธีฝูงอนุภาค (PSO) ในการออกแบบโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสมที่รับแรงกระทำตามแนวตั้งและด้านข้างตามมาตรฐาน ACI318-08 เพื่อการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการออกแบบกับวิธีจำลองการระเบิดจักรวาล (HBB-BC) และวิธีฝูงอนุภาคผสมฝูงมด (HPSACO) ผลจากการวิจัยพบว่าอัลกอริทึมฝูงอนุภาคสามารถออกแบบโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสมได้เป็นอย่างดี และผลจากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการออกแบบกับสองวิธีที่ได้กล่าวข้างต้น พบว่าวิธีฝูงอนุภาคสามารถออกแบบได้ประหยัดกว่าวิธีจำลองการระเบิดจักรวาลและวิธีอนุภาคผสมฝูงมด

อัศนัย ทาภา และเรืองรุชดี ชีระโรจน์ (2017) [10] ได้ทำการศึกษาตัวแปรที่ควบคุมประสิทธิภาพของอัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ (ABC) ในการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้มาตรฐาน ACI318-08 โดยใช้โครงข้อแข็งทั้งหมดสามขนาดที่มีแรงกระทำในแนวตั้งและแรงกระทำด้านข้างเป็นตัวอย่างในการทดสอบ จากการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพของอัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ถูกควบคุมด้วยตัวแปรสี่ตัวแปรคือ เงื่อนไขการหยุด, จำนวนผึ้ง, จำนวนแหล่งอาหาร และจำนวนรอบการค้นหา โดยเงื่อนไขการหยุดที่เหมาะสมที่สุดคือ 60 ครั้ง จำนวนรอบการค้นหาที่เพียงพอสำหรับปัญหานี้คือ 100 รอบ และประสิทธิภาพของอัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์มากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ เมื่อจำนวนแหล่งอาหารมากกว่าหรือเท่ากับ 200 ประสิทธิภาพของอัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ทุกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ เมื่อประชากรผึ้งมีมากกว่า 300 นอกจากนี้ ถ้าจำนวนประชากรผึ้งเป็นสองเท่าของจำนวนแหล่งอาหาร เวลาที่ใช้ดำเนินการจะมีค่าน้อยที่สุด

2.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับงานวิจัยนี้ คือ ราคารวมของโครงสร้างแผ่นพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งประกอบด้วยราคาคอนกรีต ราคาเหล็กเสริม และราคาแบบหล่อ มีรูปแบบสมการดังนี้

$$\text{Minimize } C = (C_c V_c + C_s W_s + C_{sv} W_{sv} + C_f A_f) \quad (2.2.1)$$

โดยที่ C คือ ราคารวมของโครงสร้างแผ่นพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็ก (บาท)

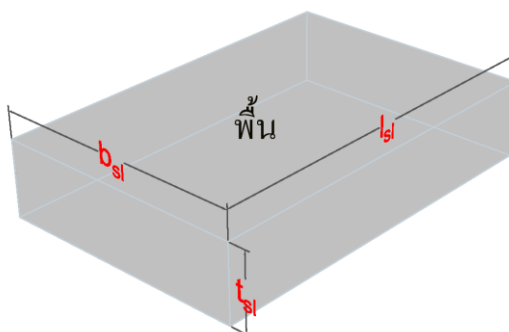
C_c	คือ ราคาต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีต	(บาท/ลูกบาศก์เมตร)
C_s	คือ ราคาต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของเหล็กเสริมหลัก	(บาท/กิโลกรัม)
C_{sv}	คือ ราคาต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของเหล็กปลอก	(บาท/กิโลกรัม)
C_f	คือ ราคาต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของแบบหล่อ	(บาท/ตารางเมตร)
V_c	คือ ปริมาตรของคอนกรีต	(ลูกบาศก์เมตร)
W_s	คือ น้ำหนักของเหล็กเสริมหลัก	(กิโลกรัม)
W_{sv}	คือ น้ำหนักของเหล็กปลอก	(กิโลกรัม)
A_f	คือ พื้นที่ของแบบหล่อ	(ตารางเมตร)

2.2.1 การคำนวณปริมาตรคอนกรีต

ปริมาตรคอนกรีตของแผ่นพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้ (ดูรูปภาพที่ 2.1)

$$V_c = b_{sl} \times l_{sl} \times t_{sl} \quad (2.2.2)$$

โดยที่	b_{sl}	คือ ความกว้างของแผ่นพื้น	(เมตร)
	l_{sl}	คือ ความยาวของแผ่นพื้น	(เมตร)
	t_{sl}	คือ ความหนาของแผ่นพื้น	(เมตร)



รูปภาพที่ 2.1 แผ่นพื้นสำหรับการคำนวณปริมาตรคอนกรีต

2.2.2 การคำนวณน้ำหนักเหล็กเสริม

การคำนวณน้ำหนักเหล็กเสริมสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$W_s = w_s (V_{s\ col,Ext} + V_{s\ col,Int} + V_{s\ mid}) \quad (2.2.3)$$

$$W_{sv} = w_s \cdot V_{s\ shear} \quad (2.2.4)$$

โดยที่	w_s	คือ ความถ่วงจำเพาะของเหล็ก	(กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
	$V_{s\ col,Ext}$	คือ ปริมาตรของเหล็กเสริมแถบเสากลางนอก	(ลูกบาศก์เมตร)
	$V_{s\ col,Int}$	คือ ปริมาตรของเหล็กเสริมแถบเสากลางใน	(ลูกบาศก์เมตร)
	$V_{s\ mid}$	คือ ปริมาตรของเหล็กเสริมแถบกลาง	(ลูกบาศก์เมตร)
	$V_{s\ shear}$	คือ ปริมาตรของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน	(ลูกบาศก์เมตร)

ปริมาตรของเหล็กเสริมสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} V_{s\ col,Ext} = & \sum [N_{s\ col,Ext\ Sup} \times A_{s\ col,Ext\ Sup}^- \times (l_{col,top1} + l_{col,top2})] \\ & + \sum [N_{s\ col,Int\ Sup} \times A_{s\ col,Int\ Sup}^- \times (l_{col,top3} + l_{col,top4})] \\ & + \sum [N_{s\ col,Ext\ Sup} \times A_{s\ col,Ext\ Sup}^+ \times (l_{col,bot1})] \\ & + \sum [N_{s\ col,Int\ Sup} \times A_{s\ col,Int\ Sup}^+ \times (l_{col,bot2})] \end{aligned} \quad (2.2.5)$$

$$\begin{aligned} V_{s\ col,Int} = & \sum [N_{s\ col,Ext\ Sup} \times A_{s\ col,Ext\ Sup}^- \times (l_{col,top1} + l_{col,top2})] \\ & + \sum [N_{s\ col,Int\ Sup} \times A_{s\ col,Int\ Sup}^- \times (l_{col,top3} + l_{col,top4})] \\ & + \sum [N_{s\ col,Ext\ Sup} \times A_{s\ col,Ext\ Sup}^+ \times (l_{col,bot1})] \\ & + \sum [N_{s\ col,Int\ Sup} \times A_{s\ col,Int\ Sup}^+ \times (l_{col,bot2})] \end{aligned} \quad (2.2.6)$$

$$\begin{aligned} V_{s\ mid} = & \sum [N_{s\ mid,Ext} \times A_{s\ mid,Ext}^- \times (l_{mid,top5})] \\ & + \sum [N_{s\ mid,Int} \times A_{s\ mid,Int}^- \times (l_{mid,top6})] \\ & + \sum [N_{s\ mid,Ext} \times A_{s\ mid,Ext}^+ \times (l_{mid,bot3} + l_{mid,bot4})] \\ & + \sum [N_{s\ mid,Int} \times A_{s\ mid,Int}^+ \times (l_{mid,bot3} + l_{mid,bot5})] \end{aligned} \quad (2.2.7)$$

$$\begin{aligned} V_{s\ shear} = & \left\{ \sum [N_{shear,col\ int} \times A_{shear,col\ int} \times (l_{shear,col\ int})] \right. \\ & + \sum [N_{shear,col\ edge} \times A_{shear,col\ edge} \times (l_{shear,col\ edge})] \\ & \left. + \sum [N_{shear,col\ cor} \times A_{shear,col\ cor} \times (l_{shear,col\ cor})] \right\} \end{aligned} \quad (2.2.8)$$

โดยที่	$A_{S\ col,Ext\ Sup}^-$	คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมบนของเสานอกบริเวณแถบเสา
	$A_{S\ col,Int\ Sup}^-$	คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมบนของเสาในบริเวณแถบเสา
	$A_{S\ col,Ext\ Sup}^+$	คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมล่างของเสานอกบริเวณแถบเสา
	$A_{S\ col,Int\ Sup}^+$	คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมล่างของเสาในบริเวณแถบเสา
	$A_{S\ mid,Ext}^-$	คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมบนของด้านนอกบริเวณแถบกลาง
	$A_{S\ mid,Int}^-$	คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมบนของด้านในบริเวณแถบกลาง
	$A_{S\ mid,Ext}^+$	คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมล่างด้านนอกบริเวณแถบกลาง
	$A_{S\ mid,Int}^+$	คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมล่างด้านในบริเวณแถบกลาง
	$A_{shear,int}$	คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กรับแรงเฉือนบริเวณเสาใน
	$A_{shear,edge}$	คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กรับแรงเฉือนบริเวณเสาขอบ
	$A_{shear,cor}$	คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กรับแรงเฉือนบริเวณเสามุม
	$N_{S\ col,Ext\ Sup}$	คือ จำนวนเหล็กเสริมของเสากายนอกบริเวณแถบเสา
	$N_{S\ col,Int\ Sup}$	คือ จำนวนเหล็กเสริมของเสากายในบริเวณแถบเสา
	$N_{S\ mid,Ext}$	คือ จำนวนเหล็กเสริมของเสากายนอกบริเวณแถบกลาง
	$N_{S\ mid,Int}$	คือ จำนวนเหล็กเสริมของเสากายในบริเวณแถบกลาง
	$N_{shear,Int}$	คือ จำนวนเหล็กเสริมรับแรงเฉือนของเสากายใน
	$N_{shear,Ext}$	คือ จำนวนเหล็กเสริมรับแรงเฉือนของเสากายนอก
	$N_{shear,edge}$	คือ จำนวนเหล็กเสริมรับแรงเฉือนของเสามุม

ระยะความยาวของเหล็กเสริมสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้ (ดูรูปภาพที่ 2.2 และ ตารางที่ 2.1)

$$l_{col,top1} = 0.3l_n + 6d_b + 12d_b, l_{col,top2} = 0.2l_n + 6d_b + 12d_b,$$

$$l_{col,top3} = 0.3l_n + \frac{c_1}{2}, l_{col,top4} = 0.2l_n + \frac{c_1}{2}, l_{mid,top5} = 0.22l_n + 6d_b + 12d_b,$$

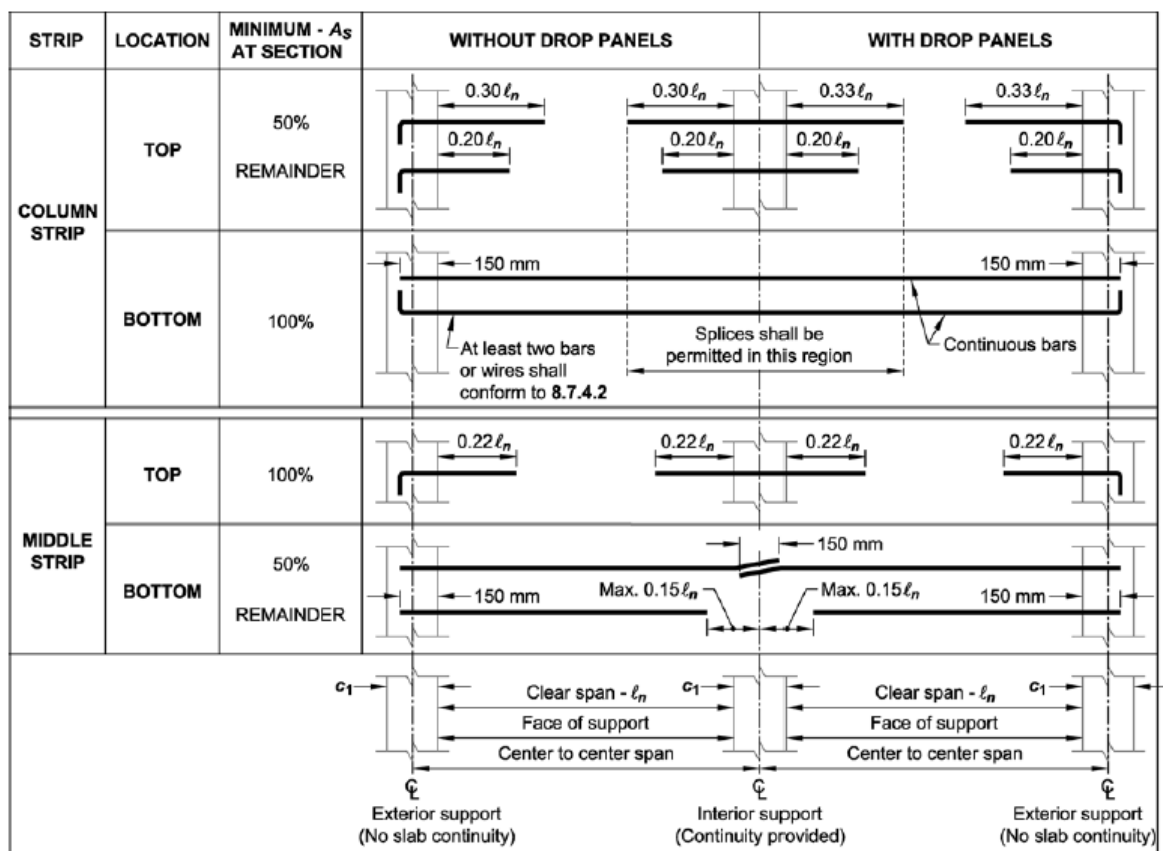
$$l_{mid,top6} = 0.22l_n + \frac{c_1}{2}, l_{col,bot1} = l_n + \frac{c_1}{2} + 6d_b + 12d_b + 150 \text{ mm},$$

$$l_{col,bot2} = l_n + c_1, l_{mid,bot3} = l_n + 300 \text{ mm}, l_{mid,bot4} = l_n - \left(0.15l_n + \frac{c_1}{2}\right),$$

$$l_{mid,bot5} = l_n - 2\left(0.15l_n + \frac{c_1}{2}\right), l_{shear,col \text{ int}} = 4d + 2(4d_b + 6d_b) + 2(t_{sl} - 2cover),$$

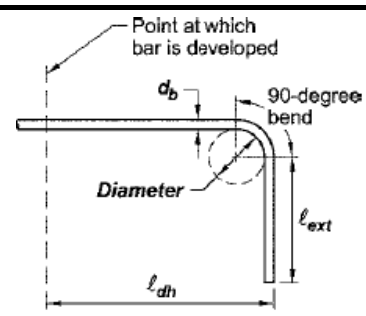
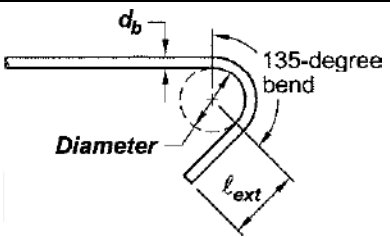
$$l_{shear,col \text{ cor}} = 4d + 2(4d_b + 6d_b) + 2(t_{sl} - 2cover),$$

$$l_{shear,col \text{ edge}} = 4d + 2(4d_b + 6d_b) + 2(t_{sl} - 2cover).$$



รูปภาพที่ 2.2 แสดงระยะฝังเหล็กเสริมอย่างน้อยสำหรับแผ่นพื้นไร้คาน

ตารางที่ 2.1 แสดงของมาตรฐานของเหล็กเสริมหลัก [11]

ขนาดโค้งภายในน้อยที่สุด	ส่วนที่ยืดตรง (l_{ext})	ชนิดของของมาตรฐาน
$6d_b$	$12d_b$	
$4d_b$	$6d_b \geq 75 \text{ mm.}$	

2.2.3 การคำนวณพื้นที่ไม้แบบ

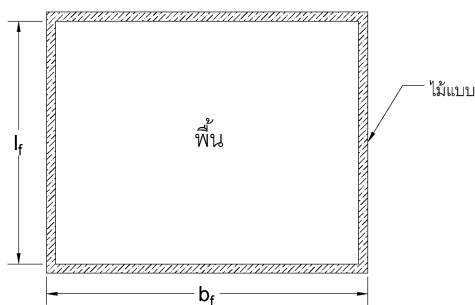
การคำนวณพื้นที่ไม้แบบของพื้นที่ต้องเรียบสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้ (ดูรูปภาพที่ 2.3)

$$A_f = (b_f l_f) + 2(h_f l_f) + 2(h_f b_f) \tag{2.2.9}$$

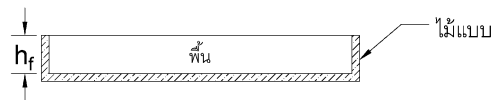
โดยที่ b_f คือ ความกว้างของแบบหล่อ (เมตร)

l_f คือ ความยาวของแบบหล่อ (เมตร)

h_f คือ ความสูงของแบบหล่อ (เมตร)



รูปแปลน



รูปด้านข้าง

รูปภาพที่ 2.3 การเข้าไม้แบบของแผ่นพื้นสำหรับการคำนวณไม้แบบ

2.3 ฟังก์ชันข้อจำกัด

ฟังก์ชันข้อจำกัด (Constraint Function) คือ ฟังก์ชันที่ใช้สำหรับตรวจสอบคำตอบที่ได้ว่าอยู่ในเงื่อนไขที่กำหนดหรือไม่ สำหรับงานวิจัยนี้ฟังก์ชันข้อจำกัด คือ ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกได้อย่างปลอดภัยตามมาตรฐาน ACI 318M-14 ดังนี้

$$Design\ Strength \geq Required\ Strength \quad (2.3.1)$$

การออกแบบพื้นที่ต้องเรียบมาตรฐานกำหนดพิจารณากำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงเฉือนดังนี้

$$\phi M_n \geq M_u \quad (2.3.2)$$

$$\phi M_n \geq \gamma_f M_{sc} \quad (2.3.3)$$

$$\phi V_n \geq V_u \quad (2.3.4)$$

$$\phi v_n \geq v_u \quad (2.3.5)$$

โดยที่	M_u	คือ โมเมนต์ดัดประลัย
	V_u	คือ แรงเฉือนประลัยทางเดียว
	v_u	คือ หน่วยแรงเฉือนรวมประลัย (หน่วยแรงเฉือนทะลุประลัย)
	M_{sc}	คือ โมเมนต์ดัดประลัยที่ไม่สมดุล
	γ_f	คือ ตัวคูณการถ่ายโมเมนต์ดัด
	M_n	คือ กำลังรับโมเมนต์ดัด
	V_n	คือ กำลังรับแรงเฉือนทางเดียว
	v_n	คือ กำลังรับหน่วยแรงเฉือนสองทาง (กำลังรับหน่วยแรงเฉือนทะลุ)

ϕ คือ ตัวคูณลดกำลัง

ตัวคูณลดกำลังมาตรฐานกำหนดไว้ดังต่อไปนี้

สำหรับหน้าตัดที่ควบคุมด้วยแรงดึง $\phi = 0.90$

สำหรับแรงเฉือนและแรงบิด $\phi = 0.75$

น้ำหนักบรรทุกประลัยที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีดังต่อไปนี้

$$w_u = 1.2D + 1.6L \quad (2.3.6)$$

โดยที่ w_u คือ น้ำหนักบรรทุกประลัย

D คือ น้ำหนักบรรทุกคงที่

L คือ น้ำหนักบรรทุกจร

2.4 การออกแบบโครงสร้าง

การออกแบบโครงสร้างสำหรับงานวิจัยนี้จะใช้การวิเคราะห์กำลังของชิ้นส่วนพื้นท้องเรียบ โดยใช้วิธีกำลัง (Strength Design Method: SDM) ตามมาตรฐาน ACI 318M-14

การออกแบบพื้นเสริมเหล็กสองทางจะพิจารณาแบ่งพื้นที่ทางด้านสั้นและด้านยาวออกเป็น แถบออกแบบ (Design strip) ที่เปรียบเสมือนเป็นคานกว้างที่รองรับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ แถบออกแบบประกอบด้วยครึ่งหนึ่งของความกว้างช่วงห่างเสาวัดจากจุดศูนย์กลางเสาที่รองรับ ซึ่งแถบออกแบบแบ่งออกเป็น แถบเสา (Column strip) และ แถบกลาง (Middle strip) [12] โดยแถบเสา คือ แถบที่มีความกว้างจากเส้นกึ่งกลางเสาออกไปแต่ละด้าน มีความกว้างเป็นค่าที่น้อยของ $0.25l_1$ หรือ $0.25l_2$ ส่วนแถบกลาง คือ แถบที่อยู่ตรงกลางระหว่างแถบเสาสองแถบ สามารถกำหนดได้ดังนี้

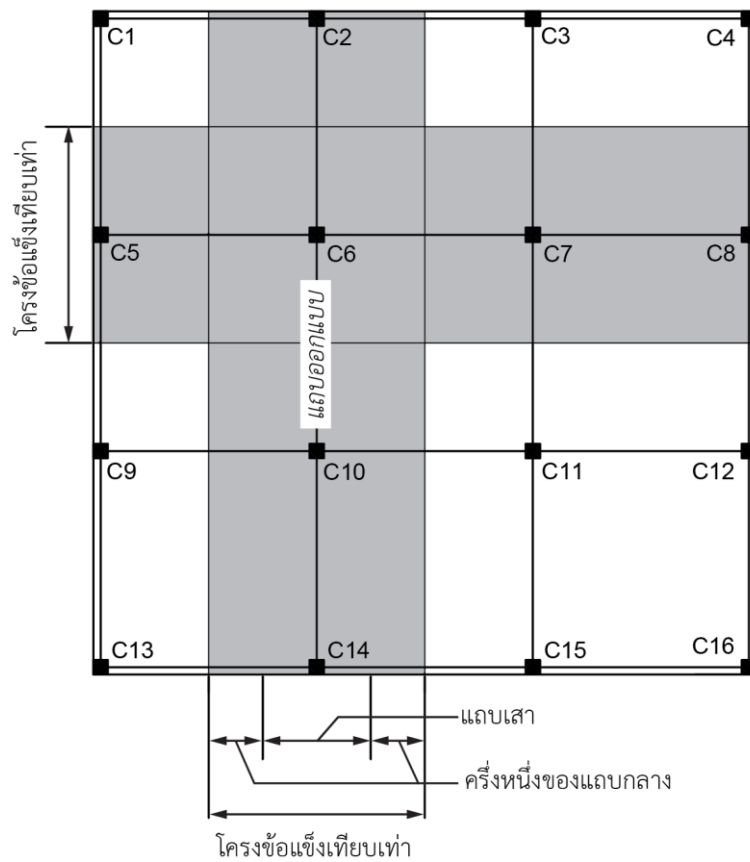
$$b_c = \min(l_1/4, l_2/4) \quad (2.4.1)$$

$$b_m = l_2 - 2 \times b_c \quad (2.4.2)$$

- โดยที่ b_c คือ ความกว้างของแถบเสา
- b_m คือ ความกว้างของแถบกลาง
- l_1 คือ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของที่รองรับในทิศทางที่จะวิเคราะห์หาโมเมนต์ดัด
- l_2 คือ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของที่รองรับในทิศที่ตั้งฉากกับระยะ l_1

เมื่อพิจารณาแถบออกแบบเป็นเสมือนคานากว้างที่ยึดรั้งกับเสาที่รองรับก็จะได้โครงข้อแข็งเทียบเท่า (Equivalent frames) การวิเคราะห์โครงข้อแข็งเทียบเท่าจะวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีอิลาสติก ซึ่งเรียกว่า วิธีโครงข้อแข็งเทียบเท่า (Equivalent Frame Method : EFM) ข้อกำหนดสำหรับวิธีโครงข้อแข็งเทียบเท่ามีดังนี้ [13]

- 1) โครงสร้างประกอบด้วยโครงข้อแข็งเทียบเท่าตามแนวเสาทั้งที่อยู่ในแนวยาว และแนวขวางกับอาคาร
- 2) แต่ละโครงข้อแข็งประกอบด้วยเสาหรือที่รองรับหนึ่งแถว และแถบของ พื้น-คาน ซึ่งอยู่ระหว่างเส้นกึ่งกลางของแผ่นพื้นที่อยู่ในแต่ละด้านของเส้นกึ่งกลางของเสาหรือที่รองรับ
- 3) โครงข้อแข็งที่อยู่ติด และขนาดกับขอบจะอยู่ระหว่างขอบ และเส้นกึ่งกลางของแผ่นพื้นที่อยู่ติดกัน
- 4) ต้องสมมติให้เสา หรือที่รองรับยึดติดกับแถบพื้น-คาน โดยขึ้นส่วนรับแรงบิดที่อยู่ขนานกับทิศทางของช่วงที่ใช้คำนวณหาโมเมนต์ และครอบคลุมไปถึงเส้นกึ่งกลางของแผ่นพื้นทางขวางที่อยู่ในแต่ละด้านของเสา
- 5) อาจวิเคราะห์โครงข้อแข็งเทียบเท่าครั้งเดียวทั้งระบบ หรือแบ่งการพิจารณาทีละชั้นเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกในแนวตั้ง โดยถือว่าที่ปลายด้านไกลของเสามีสภาพยึดแน่น
- 6) กรณีการวิเคราะห์ที่แยกพิจารณาเป็นชั้น ๆ เมื่อต้องการคำนวณหาโมเมนต์ที่จุดรองรับใด ให้สมมติว่าปลายของแผ่นพื้น-คานที่อยู่ห่างออกไปจากจุดรองรับนั้นทั้งสองข้าง ข้างละหนึ่งช่วงพื้น (เป็นอย่างน้อย) มีสภาพยึดแน่น แต่ทั้งนี้แผ่นพื้นนั้นต้องมีความต่อเนื่องไปจากจุดรองรับที่กำลังพิจารณาด้วย



รูปภาพที่ 2.4 แพลนโครงข้อแข็งเทียบเท่าของแผ่นพื้น

2.4.1 ความหนาต่ำสุดของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสองทาง

ความหนาต่ำสุดของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสองทางกำหนดเพื่อควบคุมการโก่งตัวของพื้นในสภาวะใช้งาน โดยมาตรฐาน ACI 318M-14 กำหนดความหนาต่ำสุดของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสองทางไม่มีคานรองรับ เมื่อด้านยาวไม่เกินกว่าสองเท่าของด้านสั้น ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 ความหนาต่ำสุดของพื้นไม่มีคานภายในรองรับ (t_{min}) [11]

กำลังจุดคราก f_y (MPa)	ไม่มีแป้นหัวเสา		
	ช่วงพื้นภายนอก		ช่วงพื้นภายใน
	ไม่มีคานขอบ	มีคานขอบ	
280	$l_n/33$	$l_n/36$	$l_n/36$
420	$l_n/30$	$l_n/33$	$l_n/33$
520	$l_n/28$	$l_n/31$	$l_n/31$

- หมายเหตุ (1) L_n คือ ระยะช่วงว่างจากขอบถึงขอบของที่รองรับทางด้านที่จะพิจารณาหาโมเมนต์ดัด
- (2) คานขอบ (Edge beams) ระหว่างเสาของช่วงพื้นภายนอก ต้องมีค่าอัตราส่วนระหว่างสติฟเนสการดัดของคานต่อสติฟเนสการดัดของแผ่นพื้น (α) ไม่น้อยกว่า 0.8

ความหนาที่ได้จากตารางที่ 2.2 ต้องมีความหนาไม่น้อยกว่า 125 มม. สำหรับพื้นที่ไม่มีแป้นหัวเสา

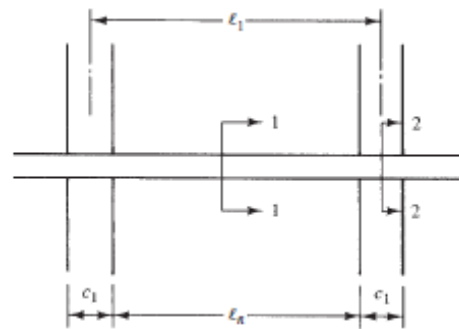
2.4.2 โมเมนต์ดัดของแผ่นพื้น

การคำนวณหาโมเมนต์ดัดของวิธีโครงข้อแข็งเทียบเท่าจะใช้วิธีกระจายโมเมนต์สองรอบ (2 Cycle Moment Distribution) [14] ในการคำนวณ วิธีกระจายโมเมนต์สองรอบมีหลักการคือ การกระจาย (Distribute) และส่งถ่าย (Carry over) โมเมนต์ 2 รอบ ซึ่งมีการจัดวางน้ำหนักบรรทุกจร (Live load) ให้อยู่เฉพาะในช่วงที่จะเกิดค่าโมเมนต์ลบที่รองรับ (Support moment) และโมเมนต์บวกที่ระหว่างช่วง (Span moment) สูงสุด โดยวิธีกระจายโมเมนต์สองรอบจะต้องทราบค่าสติฟเนสของการดัด (Stiffness factor) และค่าตัวประกอบการกระจายโมเมนต์ (Distribution factor)

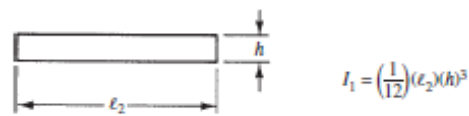
ค่าสติฟเนสการดัด (K) ทั่วไปที่มีหน้าตัดคงที่ตลอดความยาวจะมีค่าเท่ากับ $4EI/L$ สำหรับโครงข้อแข็งเทียบเท่าต้องพิจารณาถึงการแปรเปลี่ยนของโมเมนต์เฉื่อยด้วย ดังนั้นมาตรฐาน ACI กำหนดข้อพิจารณาดังนี้

1) โมเมนต์เฉื่อยของแผ่นพื้น-คาน

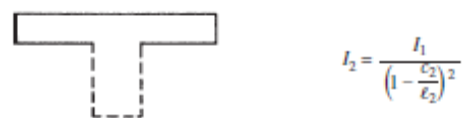
โมเมนต์เฉื่อยของแผ่นพื้น-คานที่หน้าตัดใด ๆ ที่อยู่นอกจุดต่อหรือหมวกเสาให้คิดจากพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตทั้งหมด ในส่วนที่อยู่ระหว่างจุดศูนย์กลางเสากับขอบของเสา ขอบแป้นหูช้าง หรือขอบของหมวกเสา ให้คิดโมเมนต์เฉื่อยของแผ่นพื้น-คานจากเนื้อที่ทั้งหมดที่ขอบของเสา แป้นหูช้าง หรือหมวกเสานั้นหารด้วย $(1 - c_2/l_2)^2$ โดยที่ c_2 และ l_2 เป็นระยะที่วัดตามขวางตั้งฉากกับทิศทางของช่วงพื้นที่วิเคราะห์หาโมเมนต์ ดังรูปภาพที่ 2.5



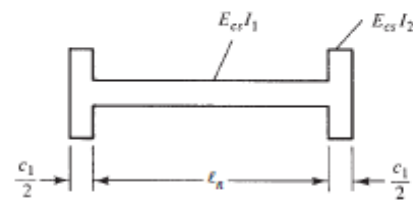
(a) Actual floor system



(b) Section 1-1



(c) Equivalent Section 2-2

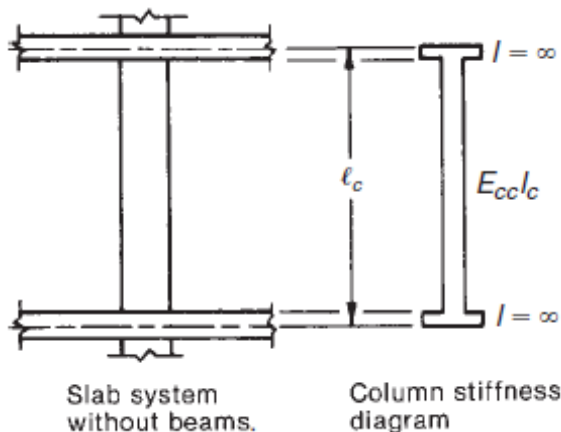


(d) Equivalent slab beam stiffness diagram

รูปภาพที่ 2.5 แสดงตัวอย่างการคำนวณค่าสติฟเนสของแผ่นพื้น-คาน [15]

2) โมเมนต์เฉื่อยของเสา

โมเมนต์เฉื่อยของเสาส่วนที่อยู่นอกจุดต่อหรือหมวกเสา ให้คิดจากเนื้อที่หน้าตัดทั้งหมดของคอนกรีต สำหรับส่วนที่อยู่ใต้จุดต่อหรือหมวกเสาให้ถือว่าโมเมนต์เฉื่อยของเสามีค่านับตั้งรูปภาพที่ 2.6



รูปภาพที่ 2.6 แสดงตัวอย่างการคำนวณค่าสติฟเนสของเสา [16]

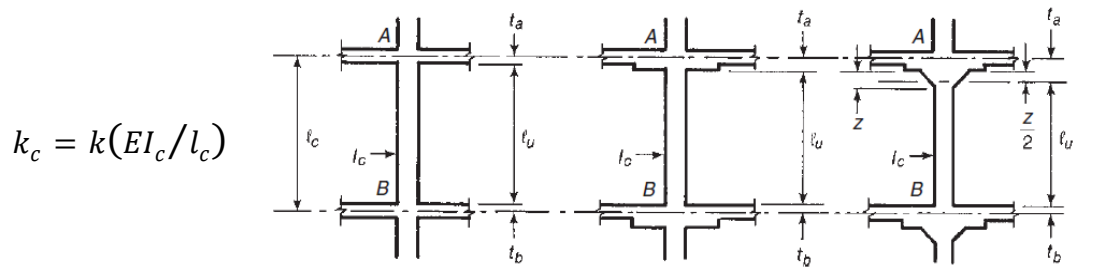
งานวิจัยนี้จะใช้ตารางช่วยออกแบบในการหาค่าสติฟเนสการดัดของแผ่นพื้น และเสา ดังตารางที่ 2.3 ถึง ตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 ตัวคูณประกอบวิธีกระจายโมเมนต์สำหรับพื้นที่รองรับคอนกรีตเสริมเหล็กไม่มีแป้นหัวเสา [16]

FEM (uniform load w) = $Mw\ell_2\ell_1^2$		K (stiffness) = $kE\ell_2t^3/12\ell_1$					
Carryover factor = COF		c_2/ℓ_2					
c_1/ℓ_1		0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
0.00	M	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083
	k	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
	COF	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
0.05	M	0.083	0.084	0.084	0.084	0.085	0.085
	k	4.000	4.047	4.093	4.138	4.181	4.222
	COF	0.500	0.503	0.507	0.510	0.513	0.516
0.10	M	0.083	0.084	0.085	0.085	0.086	0.087
	k	4.000	4.091	4.182	4.272	4.362	4.449
	COF	0.500	0.506	0.513	0.519	0.524	0.530
0.15	M	0.083	0.084	0.085	0.086	0.087	0.088
	k	4.000	4.132	4.267	4.403	4.541	4.680
	COF	0.500	0.509	0.517	0.526	0.534	0.543
0.20	M	0.083	0.085	0.086	0.087	0.088	0.089
	k	4.000	4.170	4.346	4.529	4.717	4.910
	COF	0.500	0.511	0.522	0.532	0.543	0.554
0.25	M	0.083	0.085	0.086	0.087	0.089	0.090
	k	4.000	4.204	4.420	4.648	4.887	5.138
	COF	0.500	0.512	0.525	0.538	0.550	0.563
$x = (1 - c_2/\ell_2^3)$		1.000	0.856	0.729	0.613	0.512	0.421

^a c_1 and c_2 are the widths of the column measured parallel to ℓ_1 and ℓ_2

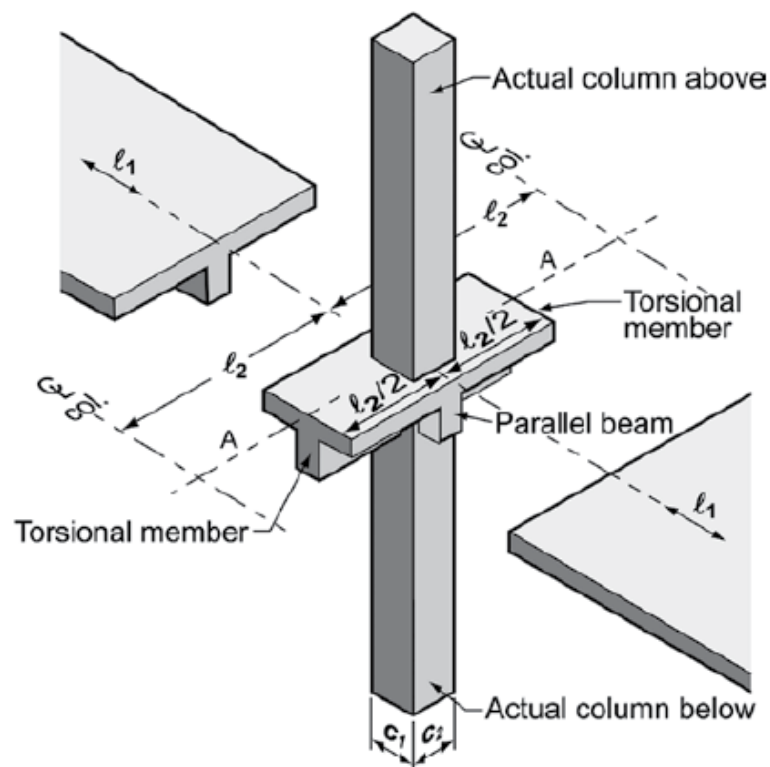
ตารางที่ 2.4 สติพเนสการดัดและตัวประกอบถ่ายโมเมนต์สำหรับเสา [16]



$$k_c = k(EI_c/l_c)$$

		l_c/l_u								
t_a/t_b		1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45
0.00	k_{AB}	4.20	4.40	4.60	4.80	5.00	5.20	5.40	5.60	5.80
	C_{AB}	0.57	0.65	0.73	0.80	0.87	0.95	1.03	1.10	1.17
0.2	k_{AB}	4.31	4.62	4.95	5.30	5.65	6.02	6.40	6.79	7.20
	C_{AB}	0.56	0.62	0.68	0.74	0.80	0.85	0.91	0.96	1.01
0.4	k_{AB}	4.38	4.79	5.22	5.67	6.15	6.65	7.18	7.74	8.32
	C_{AB}	0.55	0.60	0.65	0.70	0.74	0.79	0.83	0.87	0.91
0.6	k_{AB}	4.44	4.91	5.42	5.96	6.54	7.15	7.81	8.50	9.23
	C_{AB}	0.55	0.59	0.63	0.67	0.70	0.74	0.77	0.80	0.83
0.8	k_{AB}	4.49	5.01	5.58	6.19	6.85	7.56	8.31	9.12	9.98
	C_{AB}	0.54	0.58	0.61	0.64	0.67	0.70	0.72	0.75	0.77
1.0	k_{AB}	4.52	5.09	5.71	6.38	7.11	7.89	8.73	9.63	10.60
	C_{AB}	0.54	0.57	0.60	0.62	0.65	0.67	0.69	0.71	0.73
1.2	k_{AB}	4.55	5.16	5.82	6.54	7.32	8.17	9.08	10.07	11.12
	C_{AB}	0.53	0.56	0.59	0.61	0.63	0.65	0.66	0.68	0.69
1.4	k_{AB}	4.58	5.21	5.91	6.68	7.51	8.41	9.38	10.43	11.57
	C_{AB}	0.53	0.55	0.58	0.60	0.61	0.63	0.64	0.65	0.66
1.6	k_{AB}	4.60	5.26	5.99	6.79	7.66	8.61	9.64	10.75	11.95
	C_{AB}	0.53	0.55	0.57	0.59	0.60	0.61	0.62	0.63	0.64
1.8	k_{AB}	4.62	5.30	6.06	6.89	7.80	8.79	9.87	11.03	12.29
	C_{AB}	0.52	0.55	0.56	0.58	0.59	0.60	0.61	0.61	0.62
2.0	k_{AB}	4.63	5.34	6.12	6.98	7.92	8.94	10.06	11.27	12.59
	C_{AB}	0.52	0.54	0.56	0.57	0.58	0.59	0.59	0.60	0.60
2.2	k_{AB}	4.65	5.37	6.17	7.05	8.02	9.08	10.24	11.49	12.85
	C_{AB}	0.52	0.54	0.55	0.56	0.57	0.58	0.58	0.59	0.59
2.4	k_{AB}	4.66	5.40	6.22	7.12	8.11	9.20	10.39	11.68	13.08
	C_{AB}	0.52	0.53	0.55	0.56	0.56	0.57	0.57	0.58	0.58
2.6	k_{AB}	4.67	5.42	6.26	7.18	8.20	9.31	10.53	11.86	13.29
	C_{AB}	0.52	0.53	0.54	0.55	0.56	0.56	0.56	0.57	0.57
2.8	k_{AB}	4.68	5.44	6.29	7.23	8.27	9.41	10.66	12.01	13.48
	C_{AB}	0.52	0.53	0.54	0.55	0.55	0.55	0.56	0.56	0.56
3.0	k_{AB}	4.69	5.46	6.33	7.28	8.34	9.50	10.77	12.15	13.65
	C_{AB}	0.52	0.53	0.54	0.54	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
3.5	k_{AB}	4.71	5.50	6.40	7.39	8.48	9.69	11.01	12.46	14.02
	C_{AB}	0.51	0.52	0.53	0.53	0.54	0.54	0.54	0.53	0.53
4.0	k_{AB}	4.72	5.54	6.45	7.47	8.60	9.84	11.21	12.70	14.32
	C_{AB}	0.51	0.52	0.52	0.53	0.53	0.52	0.52	0.52	0.52
4.5	k_{AB}	4.73	5.56	6.50	7.54	8.69	9.97	11.37	12.89	14.57
	C_{AB}	0.51	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.51	0.51	0.51
5.0	k_{AB}	4.75	5.59	6.54	7.60	8.78	10.07	11.50	13.07	14.77
	C_{AB}	0.51	0.51	0.52	0.52	0.51	0.51	0.51	0.50	0.49
6.0	k_{AB}	4.76	5.63	6.60	7.69	8.90	10.24	11.72	13.33	15.10
	C_{AB}	0.51	0.51	0.51	0.51	0.50	0.50	0.49	0.49	0.48
7.0	k_{AB}	4.78	5.66	6.65	7.76	9.00	10.37	11.88	13.54	15.34
	C_{AB}	0.51	0.51	0.51	0.50	0.50	0.49	0.48	0.48	0.47
8.0	k_{AB}	4.78	5.68	6.69	7.82	9.07	10.47	12.01	13.70	15.54
	C_{AB}	0.51	0.51	0.50	0.50	0.49	0.49	0.48	0.47	0.46
9.0	k_{AB}	4.80	5.71	6.74	7.89	9.18	10.61	12.19	13.93	15.83
	C_{AB}	0.50	0.50	0.50	0.49	0.48	0.48	0.47	0.46	0.45

ค่าสติพเนสการดัดของเสาเทียบเท่า (K_{ec}) สามารถหาได้จากผลรวมของค่าเฟลกซ์บิลิตีของเสาจริงที่อยู่เหนือและใต้แผ่นพื้น-คาน กับเฟลกซ์บิลิตีของชิ้นส่วนที่ยึดติดทางขวาง ดังรูปภาพที่ 2.7 ซึ่งสมมุติว่าการโค้งงอเนื่องจากโมเมนต์บิดมีค่าเท่ากันทุกจุด



รูปภาพที่ 2.7 การยึดระหว่างเสากับแผ่นพื้น-คานในโครงข้อแข็งเทียบเท่ากับชิ้นส่วนทางขวาง
[11]

ดังนั้นค่าเฟลกซ์IBILITIของเสาเทียบเท่าจะได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{1}{K_{ec}} = \frac{1}{\sum K_c} + \frac{1}{K_t} \quad (2.4.3)$$

จากสมการที่ (2.4.3) สามารถจัดให้อยู่ในรูปของสติฟเนสได้ดังนี้

$$K_{ec} = \frac{\sum K_c}{1 + \sum K_c/K_t} \quad (2.4.4)$$

โดยที่ K_{ec} คือ สติฟเนสการัดดของเสาเทียบเท่า

$\sum K_c$ คือ ผลรวมของสติฟเนสการัดดของเสาจริงที่อยู่เหนือและใต้แผ่นพื้น

K_t คือ สติฟเนสการบิตของส่วนแผ่นพื้น-คานที่ยึดติดทางขวางกับเสา

สติฟเนสการบิตของส่วนแผ่นพื้น-คานที่ยึดติดทางขวางกับเสา สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$K_t = \sum \frac{9E_{cs}C}{l_2[1 - c_2/l_2]^3} \quad (2.4.5)$$

โดยที่ C คือ ค่าคงที่ด้านการบิด

E_{cs} คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้ในพื้นที่

ค่าคงที่ด้านการบิด สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$C = \frac{\sum(1 - 0.63x/y) x^3 y}{3} \quad (2.4.6)$$

โดยที่ x คือ ด้านสั้นของรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่อยของหน้าตัด

y คือ ด้านยาวของรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าย่อยของหน้าตัด

ตัวประกอบสำหรับกระจายโมเมนต์ (DF) ของแผ่นพื้นที่จุดต่อใด ๆ สามารถหาได้สมการต่อไปนี้

$$DF_s = \frac{K_s}{\sum K} \quad (2.4.7)$$

โดยที่ $\sum K$ คือ $K_{ec} + K_s$ ด้านซ้ายมือของเสา + K_s ด้านขวามือของเสา

ค่าตัวประกอบสำหรับถ่ายโมเมนต์ (COF) สามารถรับได้จากตารางที่ 2.3

ค่าโมเมนต์ดัดที่ปลายยึดแน่น (FEM) สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$FEM = Mw_u l_2 l_1^2 \quad (2.4.8)$$

โดยที่ M คือ ตัวคูณประกอบสามารถได้รับจากตารางที่ 2.3

ค่าโมเมนต์ที่ได้จากวิธีการกระจายโมเมนต์เป็นค่าที่จุดศูนย์กลางของเสาที่รองรับ แต่ในการคำนวณออกแบบจะพิจารณาใช้โมเมนต์ที่ขอบเสา โดยค่าโมเมนต์ลบที่ขอบเสาจะลดลง $Vc/3$ ซึ่ง V เป็นแรงเฉือนที่ศูนย์กลางของเสาที่รองรับ และ c เป็นขนาดความกว้างของเสาในทิศที่พิจารณา ส่วนค่าโมเมนต์บวกสูงสุด ในระหว่างช่วงเสาจะอยู่ตรงตำแหน่งที่แรงเฉือนมีค่าเท่ากับศูนย์

2.4.3 การกระจายโมเมนต์ดัดเข้าสู่แถบเสาและแถบกลาง

พิจารณาการกระจายโมเมนต์ดัดบวกและลบเข้าสู่แถบเสา-คาน และแถบกลางของแผ่นพื้นที่อยู่ในแถบออกแบบที่พิจารณา โดยมีค่าขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างด้านสั้นต่อด้านยาวของแผ่นพื้น (l_2/l_1) อัตราส่วนระหว่างสติฟเนสการดัดระหว่างคานต่อแผ่นพื้น ($\alpha = E_{cb}I_b/E_{cs}I_s$) และอัตราส่วนระหว่างสติฟเนสการบิดของคานขอบทางขวางต่อสติฟเนสการดัดของแผ่นพื้น ($\beta_t = E_{cb}C/2E_{cs}I_s$) งานวิจัยนี้ค่า α และ β_t มีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากพิจารณาเฉพาะแผ่นพื้นที่องเรียบ ดังนั้นการกระจายโมเมนต์ดัดเข้าสู่แถบเสา-คานจะเป็นดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ร้อยละของโมเมนต์บวกและลบที่กระจายสู่แถบเสา-คาน

	(l_2/l_1)		
	0.5	1.0	2.0
โมเมนต์ลบในแถบเสาที่ขอบพื้นช่วงใน	0.75	0.75	0.75
โมเมนต์ลบในแถบเสาที่ขอบพื้นช่วงนอก	1.00	1.00	1.00
โมเมนต์บวกในแถบเสา	0.60	0.60	0.60

การกระจายโมเมนต์บวกและลบเข้าสู่แถบกลางพิจารณา ดังนี้

- 1) โมเมนต์ลบและบวกที่ไม่ได้แบ่งเข้าสู่แถบเสาให้นำมาแบ่งเข้าครึ่งแถบกลางของด้านที่สอดคล้องกัน
- 2) ผลรวมของโมเมนต์ที่ได้จากครึ่งแถบกลางทั้งสองด้าน จะเป็นโมเมนต์ที่กระทำบนแถบกลางนั้น
- 3) แถบกลางที่อยู่ติดกันและขนานกับขอบซึ่งรองรับโดยกำแพง ต้องรับโมเมนต์เป็นสองเท่าของโมเมนต์ที่ได้จากครึ่งแถบกลางของด้านที่สอดคล้องกับแถวแรกของที่รองรับภายใน

2.4.4 แรงเฉือนของแผ่นพื้น

แรงเฉือนวิกฤตตรงหัวเสาในแผ่นพื้นที่องเรียบที่รับน้ำหนักแผ่ มีอยู่สองลักษณะ ดังนี้

- 1) แบบการเฉือนทางเดียว คือ การพิจารณาว่าพื้นเปรียบเสมือนคานกว้างที่วางพาดบนแถบเสาซึ่งอยู่ในแนวตั้งฉาก หน้าตัดวิกฤตสำหรับการเฉือนทางเดียวให้พิจารณาที่ระยะ d ห่างออกจากหน้าเสา ซึ่งแรงเฉือนประลัยทางเดียวสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$V_u = w_u l_2 \left(\frac{l_n}{2} - d \right) \quad (2.4.9)$$

$$V_{u \text{ intf}} = w_u l_2 \left(\frac{1.15 l_n}{2} - d \right) \quad (2.4.10)$$

โดยที่ $V_{u \text{ intf}}$ คือ แรงเฉือนทางเดียวประลัยบริเวณเสาตัวในแรก

V_u คือ แรงเฉือนทางเดียวประลัยบริเวณเสาตัวอื่น ๆ

d คือ ระยะความลึกประสิทธิผลเฉลี่ย

- 2) แบบการเฉือนสองทาง (เฉือนทะเล) คือ การเฉือนที่เกิดจากพื้นรับน้ำหนักแผ่นในสองทิศทาง หรือน้ำหนักบรรทุกกระทำแบบจุด หน้าตัดวิกฤตของการเฉือนทะเลให้พิจารณาตามแนวเส้นรอบรูปที่มีค่าน้อยที่สุด โดยวัดห่างออกจากขอบเสา หรือจากน้ำหนักบรรทุกแบบจุด เป็นระยะเท่ากับ $d/2$ ซึ่งแรงเฉือนประลัยสองทางสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$V_{ug} = [l_1 l_2 - (c_1 + d)(c_2 + d)] w_u \quad (2.4.11)$$

2.4.5 การถ่ายโมเมนต์-แรงเฉือน ตรงรอยต่อระหว่างแผ่นพื้นกับเสา

การถ่ายโมเมนต์ตัดประลัยที่ไม่สมดุลเกิดจากความไม่สมดุลของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนแผ่นพื้นที่แต่ละด้านของเสาหรือจากแรงทางข้าง [12] ซึ่งกระทำผ่านความกว้างประสิทธิผลของแผ่นพื้น (b_{slab}) ซึ่งประกอบด้วยความกว้างของหน้าเสาพร้อมกับระยะที่ยื่นออกไปอีกข้างละ 1.5 เท่าของความหนาพื้น โดยสัดส่วนของการถ่ายโมเมนต์ตัดประลัยที่ไม่สมดุล มีดังนี้

$$M_{ub} = \gamma_f M_{sc} \quad (2.4.12)$$

$$M_{uv} = \gamma_v M_{sc} \quad (2.4.13)$$

โดยที่ M_{ub} คือ โมเมนต์ตัดประลัยที่ส่งถ่ายโดยการตัด

M_{uv} คือ โมเมนต์ตัดประลัยที่ส่งถ่ายโดยการเฉือน

ตัวคูณประกอบ γ_f สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\gamma_f = \frac{1}{1 + \frac{2}{3}\sqrt{b_1/b_2}} \quad (2.4.14)$$

ค่ามากที่สุดสำหรับตัวคูณประกอบ γ_f กำหนดไว้ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ค่าตัดแปลงมากที่สุดของตัวคูณประกอบ (γ_f) [11]

ตำแหน่งเสา	ทิศทางของช่วงพื้น	v_{ug}	ε_t (ภายใน b_{slab})	ค่าตัดแปลงมากที่สุด γ_f
เสามุม	ทั้งสองทิศทาง	$\leq 0.5\phi v_c$	≥ 0.004	1.0
	ทิศตั้งฉากกับขอบ	$\leq 0.75\phi v_c$	≥ 0.004	1.0
เสาขอบ	ทิศขนานกับขอบ	$\leq 0.4\phi v_c$	≥ 0.010	$\frac{1.25}{1 + \left(\frac{2}{3}\right)\sqrt{\frac{b_1}{b_2}}} \leq 1.0$
		$\leq 0.4\phi v_c$	≥ 0.010	$\frac{1.25}{1 + \left(\frac{2}{3}\right)\sqrt{\frac{b_1}{b_2}}} \leq 1.0$

เมื่อ b_2 คือ ความกว้างของหน้าตัดวิกฤตด้านที่รับโมเมนต์ดัด

b_1 คือ ความกว้างของหน้าตัดวิกฤตด้านที่ตั้งฉากกับ b_2

ตัวคูณประกอบ γ_v สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\gamma_v = 1 - \gamma_f \quad (2.4.15)$$

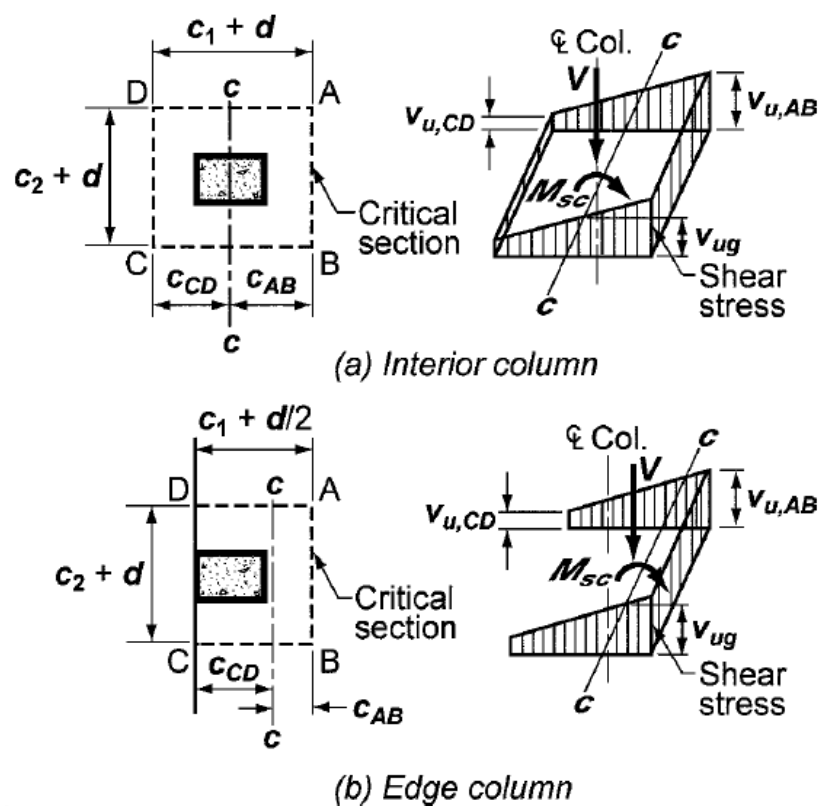
หน่วยแรงเฉือนรวมประลัย (v_u) ที่หน้าตัดวิกฤตรอบหัวเสา โดยลักษณะการกระจายของหน่วยแรงเฉือนรวมแสดงดังรูปภาพที่ 2.8 และสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$v_{u,AB} = \frac{V_{ug}}{A_c} + \frac{M_{uv}C_{AB}}{J_c} \quad (2.4.16)$$

$$v_{u,CD} = \frac{V_{ug}}{A_c} + \frac{M_{uv}C_{CD}}{J_c} \quad (2.4.17)$$

โดยที่ $v_{u,AB}$ คือ หน่วยแรงเฉือนรวมประลัยที่ด้านขวามือของเสา

- $v_{u,CD}$ คือ หน่วยแรงเฉือนรวมประลัยที่ด้านซ้ายมือของเสา
- A_c คือ พื้นที่หน้าตัดวิกฤตที่รับแรงเฉือน
- c_{AB} คือ ระยะจากแกนศูนย์ถ่วงของหน้าตัดวิกฤตไปยังหน้าตัดวิกฤตด้านขวามือ
- c_{CD} คือ ระยะจากแกนศูนย์ถ่วงของหน้าตัดวิกฤตไปยังหน้าตัดวิกฤตด้านซ้ายมือ
- J_c คือ โมเมนต์เฉื่อยของเนื้อที่หน้าตัดคอนกรีตที่รับแรงเฉือนรอบหน้าตัดวิกฤต

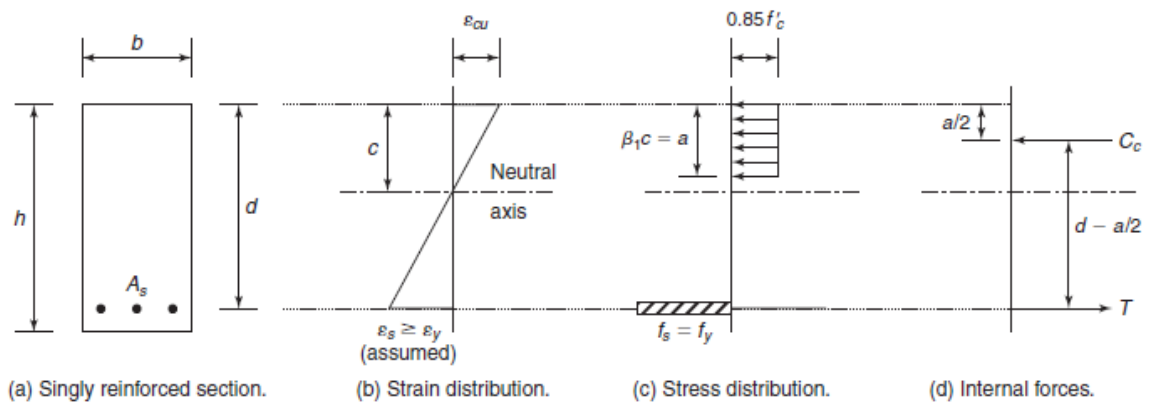


รูปภาพที่ 2.8 การกระจายของหน่วยแรงเฉือนรวมรอบหน้าตัดวิกฤต

[11]

2.4.6 โมเมนต์ดัดระบุ

การหาโมเมนต์ดัดระบุของพื้น สามารถหาได้จากโมเมนต์ดัดระบุของคาน เนื่องจากการออกแบบพื้นสองทางได้แบ่งพื้นออกเป็นแถบออกแบบที่เปรียบเสมือนคานกว้าง ดังนั้นการหาโมเมนต์ดัดระบุจะพิจารณาเป็นหน้าตัดคานแบบเหล็กเสริมเดียว ดังรูปภาพที่ 2.9



รูปภาพที่ 2.9 แรงภายในบนหน้าตัดคานเหล็กเสริมเดียว [16]

คำนวณกำลังต้านทานโมเมนต์รับแรงดัด ดังสมการต่อไปนี้

$$M_{n\ col, mid} = A_{s\ col, mid} f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.4.18)$$

$$M_{n\ col, edge} = A_{s\ col, edge} f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.4.19)$$

$$M_{n\ mid} = A_{s\ mid} f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.4.20)$$

โดยที่	$M_{n\ col, mid}$	คือ โมเมนต์ดัดระบุบริเวณแถบเสาช่วงกลางพื้น
	$M_{n\ col, edge}$	คือ โมเมนต์ดัดระบุบริเวณแถบเสาช่วงขอบพื้น
	$M_{n\ mid}$	คือ โมเมนต์ดัดระบุบริเวณแถบกลาง
	$A_{s\ col, mid}$	คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมบริเวณแถบเสาช่วงกลางพื้น
	$A_{s\ col, edge}$	คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมบริเวณแถบเสาช่วงขอบพื้น
	$A_{s\ mid}$	คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมบริเวณแถบกลาง
	f_y	คือ หน่วยแรงครากของเหล็กเสริม
	d	คือ ระยะความลึกประสิทธิภาพเฉลี่ย
	a	คือ ความลึกของการกระจายหน่วยแรงอัดเทียบเท่า

ความลึกของการกระจายหน่วยแรงอัดเทียบเท่า สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$a_{col,mid} = \frac{A_{s\ col,mid} f_y}{0.85 f_c' \times 2b_c} \quad (2.4.21)$$

$$a_{col,edge} = \frac{A_{s\ col,edge} f_y}{0.85 f_c' \times (b_c + (c_2/2))} \quad (2.4.22)$$

$$a_{mid} = \frac{A_{s\ mid} f_y}{0.85 f_c' b_m} \quad (2.4.23)$$

โดยที่	$a_{col,mid}$	คือ ความลึกของการกระจายแรงอัดเทียบเท่าบริเวณแถบเสาช่วงกลางพื้น
	$a_{col,edge}$	คือ ความลึกของการกระจายแรงอัดเทียบเท่าบริเวณแถบเสาช่วงขอบพื้น
	a_{mid}	คือ ความลึกของการกระจายแรงอัดเทียบเท่าบริเวณแถบกลาง
	f_c'	คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$A_{s\ col,mid} = \frac{\pi D_b^2}{4} (N_{s\ col,mid}) \quad (2.4.24)$$

$$A_{s\ col,edge} = \frac{\pi D_b^2}{4} (N_{s\ col,edge}) \quad (2.4.25)$$

$$A_{s\ mid} = \frac{\pi D_b^2}{4} (N_{s\ mid}) \quad (2.4.26)$$

โดยที่	D_b	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม
	$N_{s\ col,mid}$	คือ ปริมาณเหล็กเสริมบริเวณแถบเสาช่วงกลางพื้น
	$N_{s\ col,edge}$	คือ ปริมาณเหล็กเสริมบริเวณแถบเสาช่วงขอบพื้น
	$N_{s\ mid}$	คือ ปริมาณเหล็กเสริมบริเวณแถบกลาง

โดยปริมาณเหล็กเสริมจะกำหนดด้วยระยะห่างระหว่างเหล็กต่ำสุดและสูงสุด ดังนี้

$$s_{min} = \max(25 \text{ mm}, D_b) \quad (2.4.27)$$

$$s_{max} = \min(450 \text{ mm}, 2t_{sl}) \quad (2.4.28)$$

ปริมาณเหล็กเสริมขั้นต่ำมาตรฐานได้กำหนดไว้ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดัดขั้นต่ำ ($A_{s,min}$) [11]

ชนิดเหล็กเสริม	f_y, MPa	$A_{s,min}, \text{mm}^2$
เหล็กข้ออ้อย	< 420	$0.0020A_g$
เหล็กข้ออ้อยหรือลวด ตะแกรงเหล็ก	≥ 420 มากกว่า	$\frac{0.0018 \times 420}{f_y} A_g$ $0.0014A_g$

2.4.7 แรงเฉือนระบุ

แรงเฉือนระบุของคอนกรีตแบบการเฉือนทางเดียว สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$V_n = \phi V_c = \phi 0.17 \sqrt{f'_c} l_2 d \quad (2.4.29)$$

แรงเฉือนระบุของคอนกรีตแบบการเฉือนสองทาง (แรงเฉือนทะลุ) สามารถหาได้จากค่าน้อยที่สุดของสมการดังต่อไปนี้

$$V_n = \phi V_c = \phi 0.33 \sqrt{f'_c} b_0 d \quad (2.4.30)$$

$$V_n = \phi V_c = \phi 0.17 \left(1 + \frac{2}{\beta_c} \right) \sqrt{f'_c} b_0 d \quad (2.4.31)$$

$$V_n = \phi V_c = \phi 0.083 \left(2 + \frac{\alpha_s d}{b_0} \right) \sqrt{f'_c} b_0 d \quad (2.4.32)$$

โดยที่ β_c คือ อัตราส่วนระหว่างด้านยาวต่อด้านสั้นของเสา

b_0 คือ เส้นรอบรูปวิกฤต

d คือ ระยะความลึกประสิทธิภาพเฉลี่ย

α_s มีค่าเท่ากับ 40, 30 และ 20 สำหรับเสาต้นใน เสาต้นริม และเสามุม ตามลำดับ

2.4.8 เหล็กรับแรงเฉือน

เมื่อหน่วยแรงเฉือนรวมประลัย (v_u) มีค่ามากกว่าหน่วยแรงเฉือนระบุคอนกรีตแบบการเฉือนทะลุ (ϕv_c) ต้องพิจารณาเสริมเหล็กรับแรงเฉือน ซึ่งการคำนวณกำลังเหล็กรับแรงเฉือน (V_s) จะใช้หลักเกณฑ์การออกแบบดังสมการที่ (2.4.33)

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s) \geq V_u \quad (2.4.33)$$

ดังนั้นแรงเฉือนที่เหล็กรับแรงเฉือนต้องต้านทานเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$\phi V_s = V_u - \phi V_c \quad (2.4.34)$$

โดยที่ V_c คือ แรงเฉือนระบุของคอนกรีตคำนวณได้ดังนี้ $0.17\sqrt{f'_c}b_0d$

งานวิจัยนี้จะพิจารณาเสริมเหล็กรับแรงเฉือนแบบเหล็กปลอกเดี่ยวทั้งสองทิศทาง ซึ่งจะกระจายออกจากหัวเสาในสองทิศทางที่ตั้งฉากกัน ดังรูปภาพที่ 2.10 มาตรฐานกำหนดว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนสูงสุดของแผ่นพื้นต้องไม่เกินค่าดังนี้

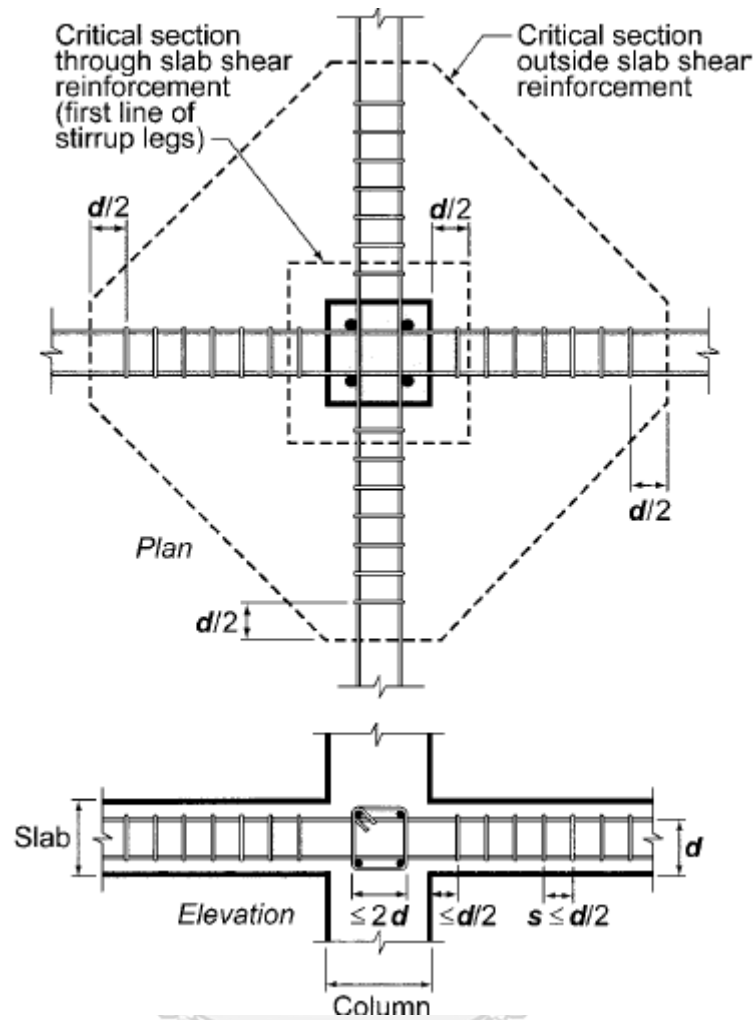
$$\phi V_n = 0.5\phi\sqrt{f'_c}b_0d \quad (2.4.35)$$

และระยะห่างเหล็กปลอกเดี่ยวมีค่าดังนี้

$$s = \frac{\phi A_v f_y d}{V_u - \phi V_c} \leq d/2 \quad (2.4.36)$$

โดยที่ A_v คือ เนื้อที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กปลอกเดี่ยว (2ขา)

V_c คือ แรงเฉือนระบุของคอนกรีตคำนวณได้ดังนี้ $0.17\sqrt{f'_c}b_0d$



รูปภาพที่ 2.10 เหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแผ่นพื้นท้องเรียบ [11]

เส้นรอบรูปวิกฤตภายนอกที่ไม่ต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือนสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$b_{0 \text{ ext}} \geq V_u / 0.5\phi\sqrt{f'_c}d \quad (2.4.37)$$

ระยะของเหล็กปลอกตัวสุดท้ายที่อยู่ห่างจากหน้าเสา (x) สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$x = \left(\frac{b_{0 \text{ ext}}}{4} - d \right) / \sqrt{2} \quad (2.4.38)$$

จำนวนเหล็กรับแรงเฉือน (N_{shear}) ที่ต้องใช้ในแต่ละทิศสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$N_{\text{shear}} = \frac{x}{s} \quad (2.4.39)$$

2.5 อัลกอริทึมหึ่งห้อย

อัลกอริทึมหึ่งห้อยคือ วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด ถูกพัฒนาขึ้นในปีคริสต์ศักราชที่ 2007 โดย Xin-She Yang [17, 18] ซึ่งได้แรงบันดาลใจมาจากพฤติกรรมการกระพริบแสงของหึ่งห้อยในการหาคู่สืบพันธุ์ และหาอาหารของหึ่งห้อย การหาคู่สืบพันธุ์ของหึ่งห้อยนั้นหึ่งห้อยตัวผู้จะเริ่มกระพริบแสงเป็นจังหวะในการส่งสัญญาณให้หึ่งห้อยตัวเมีย หึ่งห้อยตัวเมียจะดูจังหวะของการกระพริบแสงของหึ่งห้อยตัวผู้ ถ้าหึ่งห้อยตัวเมียถูกใจจังหวะของการกระพริบแสงของหึ่งห้อยตัวผู้ก็จะส่งสัญญาณตอบกลับไปยังหึ่งห้อยตัวผู้ จากนั้นหึ่งห้อยตัวผู้ก็จะบินเข้ามาหาหึ่งห้อยตัวเมียเพื่อเข้าสู่กระบวนการสืบพันธุ์ นอกจากนี้การกระพริบแสงของหึ่งห้อยในแต่ละชนิดยังมีความแตกต่างกัน จึงมีหึ่งห้อยบางชนิดมีความสามารถเลียนแบบการกระพริบแสงของหึ่งห้อยชนิดอื่นเพื่อล่อหึ่งห้อยชนิดอื่นมาเป็นอาหาร

Xin-She Yang จึงได้นำพฤติกรรมเหล่านี้ของหึ่งห้อยมาประยุกต์ให้เป็นวิธีการหาค่าเหมาะสม โดยมีกฎสามข้อดังต่อไปนี้

- 1) หึ่งห้อยทุกตัวเป็นได้ทั้งสองเพศ (Unisex) หมายความว่าหึ่งห้อยทุกตัวนั้นสามารถดึงดูดกันและกันได้
- 2) ความน่าดึงดูดระหว่างหึ่งห้อยขึ้นอยู่กับความสว่างที่หึ่งห้อยปล่อยออกมา หึ่งห้อยตัวที่มีความสว่างมากกว่าจะเป็นตัวที่ดึงดูดหึ่งห้อยตัวที่มีความสว่างน้อยกว่าเข้ามาหา ซึ่งความสว่างนั้นจะขึ้นกับระยะทาง ถ้าระยะทางระหว่างหึ่งห้อยห่างกันมาก ความสว่างก็จะลดลงทำให้ความน่าดึงดูดลดลงด้วย ถ้าหากไม่มีหึ่งห้อยตัวใดตัวหนึ่งที่สว่างกว่ากัน หึ่งห้อยก็จะทำการเคลื่อนที่แบบสุ่ม
- 3) ความสว่างหรือความเข้มแสงของหึ่งห้อยถูกกำหนดโดยค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ หมายความว่าความสว่างของหึ่งห้อยแต่ละตัวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

2.5.1 ความเข้มแสงและความน่าดึงดูด

ความเข้มแสงของหึ่งห้อย คือ ความค่าสว่างของหึ่งห้อยที่ปล่อยออกมาเพื่อดึงดูดให้หึ่งห้อยตัวอื่นเข้ามาหา ซึ่งค่าความเข้มแสงจะขึ้นกับระยะทางระหว่างหึ่งห้อยทั้งสองตัว สามารถเขียนเป็นสมการดังต่อไปนี้

$$I = I_0 e^{-\gamma r^2} \quad (2.5.1)$$

ความน่าดึงดูดของหิ่งห้อยจะแปรผันตรงกับความเข้มแสง สามารถเขียนเป็นสมการดังต่อไปนี้

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (2.5.2)$$

โดยที่	I	คือ ความเข้มแสงที่หิ่งห้อยตัวที่สว่างน้อยได้รับ
	I_0	คือ ความเข้มแสงของหิ่งห้อยตัวที่สว่างมาก
	β	คือ ความน่าดึงดูดที่หิ่งห้อยตัวที่สว่างมากดึงดูดหิ่งห้อยตัวที่สว่างน้อย
	β_0	คือ ความน่าดึงดูดของหิ่งห้อยตัวที่สว่างมาก โดยส่วนใหญ่จะมีค่าเท่ากับ 1
	γ	คือ สัมประสิทธิ์การกรองแสงของตัวกลาง
	r	คือ ระยะทางระหว่างหิ่งห้อยทั้งสองตัว

ระยะทางระหว่างหิ่งห้อยทั้งสองตัวสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$r_{ij} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (2.5.3)$$

โดยที่	x_i	คือ ตำแหน่งของหิ่งห้อยตัวที่สว่างน้อย
	x_j	คือ ตำแหน่งของหิ่งห้อยตัวที่สว่างมาก
	$x_{i,k}$	คือ ตำแหน่งของหิ่งห้อยตัวที่สว่างน้อยในมิติที่ k
	$x_{j,k}$	คือ ตำแหน่งของหิ่งห้อยตัวที่สว่างมากในมิติที่ k

การเคลื่อนที่ของหิ่งห้อยที่มีความสว่างน้อยไปสู่หิ่งห้อยที่มีความสว่างมาก สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$x_i^{k+1} = x_i^k + \beta(x_j^k - x_i^k) + \alpha(rand - 0.5)S_n \quad (2.5.4)$$

$$S_n = L_u - L_l \quad (2.5.5)$$

- โดยที่ x_i^{k+1} คือ ตำแหน่งหิ่งห้อยตัวที่สว่างน้อยตัวที่ i หลังการเคลื่อนที่
- x_i^k คือ ตำแหน่งหิ่งห้อยตัวที่สว่างน้อยตัวที่ i ก่อนการเคลื่อนที่
- x_j^k คือ ตำแหน่งหิ่งห้อยตัวที่สว่างมากตัวที่ j ก่อนการเคลื่อนที่
- S_n คือ พารามิเตอร์การปรับขนาดของแต่ละมิติการเคลื่อนที่
- L_u คือ ขอบเขตสูงสุดของตัวแปร
- L_l คือ ขอบเขตต่ำสุดของตัวแปร
- α คือ พารามิเตอร์การสุ่ม กำหนดค่าครั้งเดียวก่อนหิ่งห้อยเคลื่อนที่ มีผลต่อความเร็วในการลู่เข้าของคำตอบ
- $rand$ คือ การสุ่มค่าในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1

จากสมการที่ (2.5.4) จะสังเกตพบว่ถ้าในเทอมที่สอง $\beta = 0$ หิ่งห้อยทุกตัวจะทำการเคลื่อนที่แบบสุ่มตลอดเวลา ทำให้หิ่งห้อยไม่สามารถลู่เข้าหาคำตอบได้ถึงแม้จะพบคำตอบนั้นแล้วก็ตาม เนื่องจากหิ่งห้อยไม่สามารถดึงดูดหิ่งห้อยตัวอื่นให้มายังตำแหน่งนั้นได้ หิ่งห้อยตัวดังกล่าวเคลื่อนที่ด้วยการสุ่มหึ่งคำตอบนั้นไปหาคำตอบอื่นต่อไปโดยไม่มีจุดหมาย

สัมประสิทธิ์การกรองแสงของตัวกลาง (γ) มีผลต่อความเร็วในการเคลื่อนที่ของหิ่งห้อย ถ้าสัมประสิทธิ์การกรองแสงของตัวกลางมีมากเกินไป ($\gamma \rightarrow \infty$) หิ่งห้อยจะไม่สามารถมองเห็นซึ่งกันและกันได้ หิ่งห้อยก็จะทำการเคลื่อนที่แบบสุ่มเหมือนกับหิ่งห้อยไม่มีการส่องแสง แต่ถ้าสัมประสิทธิ์การกรองแสงของตัวกลางมีน้อยเกินไป ($\gamma \rightarrow 0$) ค่าความน่าดึงดูดจะมีค่าคงที่ คือ ความสว่างของหิ่งห้อยก็จะมีผลลดตามระยะห่างระหว่างหิ่งห้อย และหิ่งห้อยจะเคลื่อนที่เข้าหาตัวที่สว่างที่สุดเท่าที่ส่งผลให้หิ่งห้อยจะไม่พบคำตอบเฉพาะที่ ซึ่งเป็นวิธีการเดียวกับวิธีฝูงอนุภาค (PSO) ส่วนใหญ่สัมประสิทธิ์การกรองแสงของตัวกลางจะอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 10

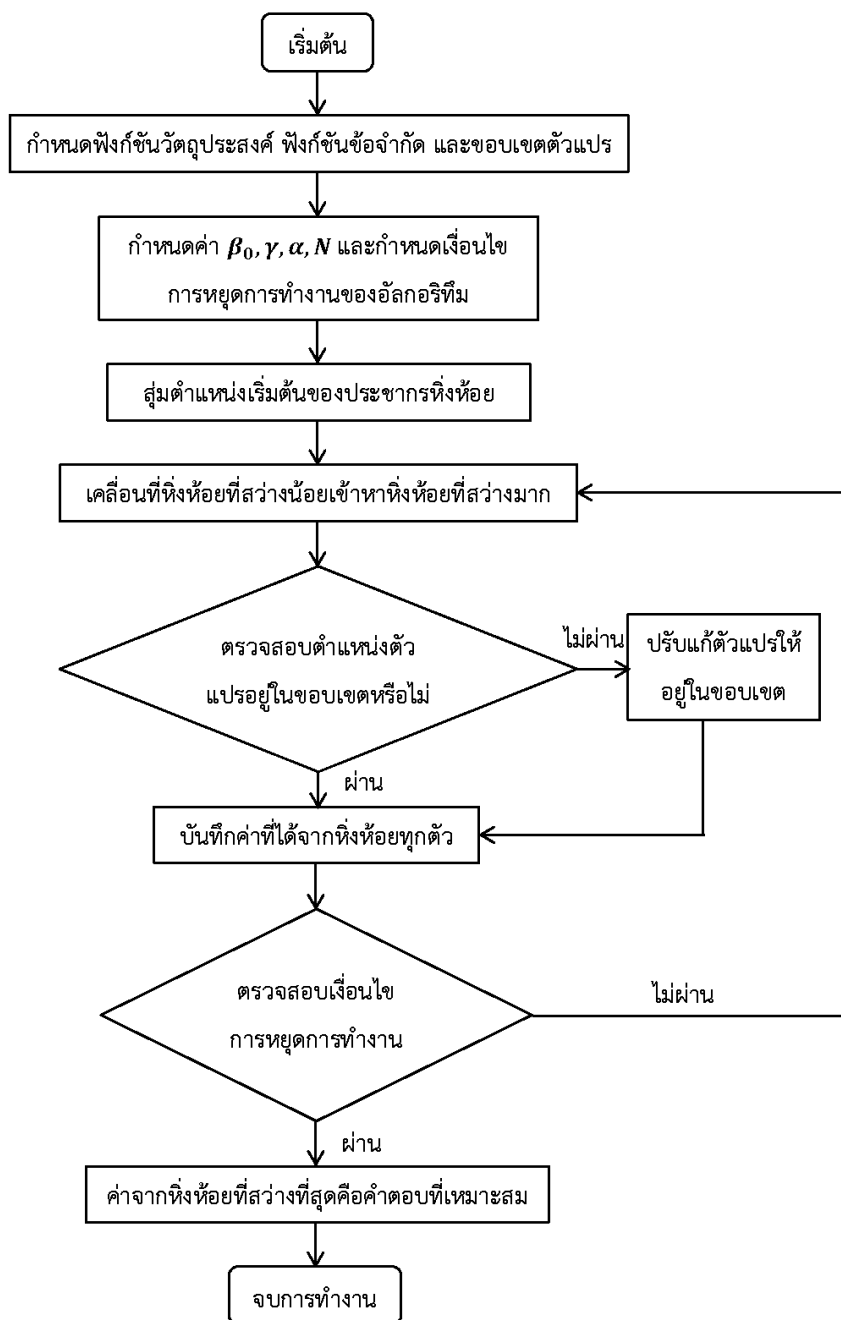
การลู่เข้าของคำตอบขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์การสุ่ม (α) หากพารามิเตอร์การสุ่มมีค่ามาก ($\alpha \rightarrow \infty$) ระยะทางการเคลื่อนที่ของหิ่งห้อยในแต่ละครั้งก็จะมากขึ้น ทำให้หิ่งห้อยสามารถสำรวจพื้นที่ของฟังก์ชันได้รวดเร็ว แต่ถ้าพารามิเตอร์การสุ่มมีค่ามากเกินไป ทำให้หิ่งห้อยมีการเคลื่อนที่ที่รวดเร็วเกินกว่าที่จะถูกดึงดูดจากแสงสว่างของหิ่งห้อยตัวอื่น ส่งผลให้หิ่งห้อยมีการเคลื่อนที่แบบสุ่มและไม่ลู่เข้าคำตอบ ถ้าหากพารามิเตอร์การสุ่มมีค่าน้อย ($\alpha \rightarrow 0$) หิ่งห้อยจะทำการเคลื่อนที่ถี่ขึ้น ทำให้หิ่งห้อยสามารถสำรวจพื้นที่ของ

ฟังก์ชันได้มีความละเอียดขึ้น แต่ถ้าพารามิเตอร์การสุ่มมีค่าน้อยเกินไปฟังก์ชันจะลู่เข้าหาคำตอบช้า ทำให้ต้องใช้เวลาอย่างมากขึ้นในการหาคำตอบ

2.5.2 ขั้นตอนการดำเนินการอัลกอริทึมหึ่งห้อย

ขั้นตอนการดำเนินการหาค่าเหมาะสมของอัลกอริทึมหึ่งห้อย มีดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ฟังก์ชันข้อจำกัด และขอบเขตของตัวแปร
- ขั้นตอนที่ 2 กำหนดประชากรหึ่งห้อย (N) ความน่าดึงดูดของหึ่งห้อย (β_0) สัมประสิทธิ์การกรองแสงของตัวกลาง (γ) พารามิเตอร์การสุ่ม (α) และกำหนดเงื่อนไขการหยุดการทำงานของอัลกอริทึม
- ขั้นตอนที่ 3 สุ่มตำแหน่งเริ่มต้นของประชากรหึ่งห้อยกระจายลงพื้นที่ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยสุ่มตัวแปรให้อยู่ภายในขอบเขตและข้อจำกัดที่กำหนด แล้วทำการเก็บค่าตำแหน่งเริ่มต้นของหึ่งห้อยทุกตัว
- ขั้นตอนที่ 4 เริ่มทำการเคลื่อนที่หึ่งห้อยทุกตัวที่สว่างน้อยกว่าเข้าหาหึ่งห้อยตัวที่สว่างมากกว่าด้วยสมการที่ (2.5.4)
- ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบตรวจแปรทุกตัวว่าอยู่ในขอบเขตหรือไม่ ถ้าไม่ให้ดำเนินการปรับแก้ให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด
- ขั้นตอนที่ 6 ตรวจสอบตำแหน่งของหึ่งห้อยทุกตัวว่าอยู่ในฟังก์ชันข้อจำกัดหรือไม่ ถ้าไม่ให้ดำเนินการปรับแก้ให้อยู่ในฟังก์ชันข้อจำกัด แล้วบันทึกค่า
- ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดการทำงานของอัลกอริทึม ถ้าผ่านให้ดำเนินขั้นตอนต่อไป ถ้าไม่ผ่านให้ดำเนินการซ้ำในขั้นตอนที่ 4
- ขั้นตอนที่ 8 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากหึ่งห้อยทุกตัว เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด
- ขั้นตอนที่ 9 บันทึกค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 8 เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุด และจบการทำงานของอัลกอริทึม



รูปภาพที่ 2.11 แผนภาพการทำงานของอัลกอริทึมหิ่งห้อย

2.6 วิธีการแบ่งกลุ่มย่อย

กระบวนการแบ่งกลุ่มย่อย คือ กระบวนการจับกลุ่มประชากรทั้งหมดที่ตัวแปรบางตัวมีค่าเท่ากันมารวมกลุ่มกันแล้วทำการเปรียบเทียบค่าตัวแปรอื่นภายในกลุ่ม เพื่อที่จะได้ค่าที่น้อยที่สุดของกลุ่มมาเป็นตัวแทนกลุ่ม ยกตัวอย่างเช่น มีเซต $S = \{A, B, C, A, C, D, A\}$ และเซต $Z = \{1, 2, 4, 5, 3, 7, 6\}$ ซึ่งค่าในเซต S สัมพันธ์กับเซต Z แบบหนึ่งต่อหนึ่ง เมื่อเริ่มพิจารณาจะเริ่มจากค่าในเซต S ที่มีค่าเหมือนกันนำมาอยู่ในกลุ่มเดียวกันดังรูปภาพที่ 2.12



รูปภาพที่ 2.12 ตัวอย่างการจับกลุ่มของค่าในเซต S

ดังนั้นเซต Z ที่มีความสัมพันธ์กับค่าในเซต S จึงอยู่ในกลุ่มเดียวกันด้วยดังรูปภาพที่ 2.13



รูปภาพที่ 2.13 ตัวอย่างการจับกลุ่มเซต Z ที่มีความสัมพันธ์กับค่าในเซต S

จากนั้นนำค่าของเซต Z ภายในกลุ่มเดียวกันมาเปรียบเทียบกันหาค่าน้อยที่สุดเพื่อจะนำมาเป็นตัวแทนของกลุ่มนั้น เช่น กลุ่มของ A มีค่า $1, 5$ และ 6 ตามลำดับและนำค่าในกลุ่ม A มาเปรียบเทียบกัน โดยที่ $1 < 5 < 6$ ดังนั้นค่าน้อยที่สุดของกลุ่ม A คือ 1 ส่งผลให้ 1 เป็นตัวแทนของกลุ่ม A

งานวิจัยนี้ได้นำวิธีการแบบกลุ่มย่อยมาประยุกต์ใช้กับอัลกอริทึมหึ่งห้อยในการแก้ปัญหาการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งวิธีการนี้จะช่วยให้อัลกอริทึมหึ่งห้อยสามารถค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Global Optimum) ได้ดีขึ้นและมีความเสถียร โดยหลังจากการเคลื่อนที่และตรวจสอบการรับกำลังของโครงสร้างจะทำการจับกลุ่มข้อมูลที่เหมือนหรือคล้ายกันมาอยู่ภายในกลุ่มเดียวกันจากนั้นเปรียบเทียบค่าภายในกลุ่มและนำค่าที่น้อยที่สุดไปเป็นตัวแทนของกลุ่ม หลังจากนั้นคำนวณราคาของโครงสร้างแต่ละโครงสร้างแล้วทำการเปรียบเทียบหาราคาที่ต่ำที่สุด จากนั้นตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด ถ้าผ่านเงื่อนไขการหยุดก็จะได้โครงสร้างราคาต่ำที่สุดเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Global Optimum) ถ้าไม่ผ่านก็ไปเคลื่อนที่หึ่งห้อยและทำการวนการซ้ำเดิมจนผ่านเงื่อนไขการหยุด

บทที่ 3

ขั้นตอนการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการออกแบบโครงสร้างแผ่นพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้นตัวแปรที่จะใช้ในการคำนวณขนาดของโครงสร้างนั้นประกอบด้วย ความหนาของแผ่นพื้น ขนาดเสา เหล็กเสริมรับแรงดัด และเหล็กปลอกรับแรงเฉือน แสดงดังตารางที่ 3.1 ส่วนตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณราคาของโครงสร้างได้แก่ ราคาของคอนกรีต ราคาของเหล็กเสริม และราคาของไม้แบบ ซึ่งราคาวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นราคาวัสดุก่อสร้างจากส่วนกลางกรุงเทพมหานครของกระทรวงพาณิชย์ ประจำเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2560 (ไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่มและไม่รวมค่าขนส่ง) แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ขอบเขตของตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัย

ตัวแปร	ขอบเขต	หน่วย	หมายเหตุ
กำลังอัดคอนกรีต	28	MPa	ค่าคงที่
กำลังของเหล็กเสริม	420	MPa	ค่าคงที่
กำลังของเหล็กปลอก	280	MPa	ค่าคงที่
แผ่นพื้นท้องเรียบ			
ความหนาแผ่นพื้น	ตั้งแต่ 125 ถึง 300	มม.	ปรับขึ้น/ลงครั้งละ 5 มม.
ความกว้างของเสา	ตั้งแต่ 300 ถึง 600	มม.	ปรับขึ้น/ลงครั้งละ 50 มม.
ความลึกของเสา	ตั้งแต่ 300 ถึง 600	มม.	ปรับขึ้น/ลงครั้งละ 50 มม.
ระยะหุ้มคอนกรีต	20	มม.	-
ขนาดเหล็กเสริมหลัก	DB12	-	-
ขนาดเหล็กปลอก	DB12	-	-
ปริมาณเหล็กเสริม	ตั้งแต่ 1 ถึง 60	เส้น	-

ตารางที่ 3.2 ราคาวัสดุก่อสร้างต่อหน่วย

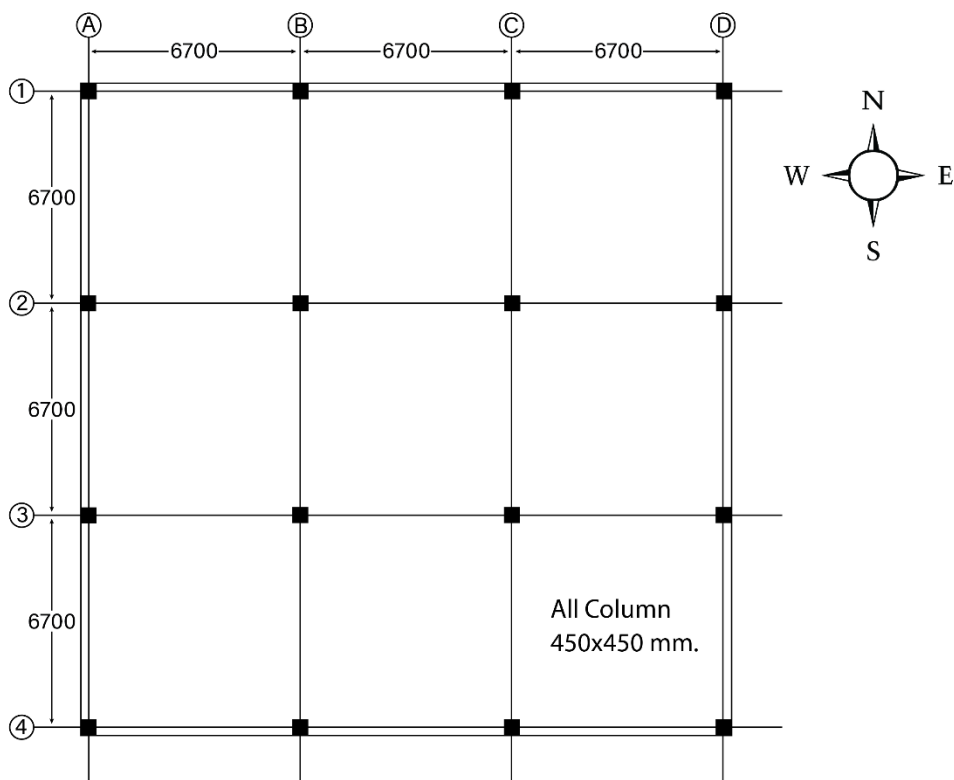
วัสดุ	ราคาต่อหน่วย	หน่วย
คอนกรีต	2,193	บาท/ลูกบาศก์เมตร
เหล็กเสริมหลัก	18.90	บาท/กิโลกรัม
เหล็กปลอก	18.20	บาท/กิโลกรัม
ไม้แบบ	170.14	บาท/ตารางเมตร

3.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการออกแบบที่เหมาะสม

งานวิจัยนี้มีกรณีศึกษาเป็นแผ่นพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็กดังนี้

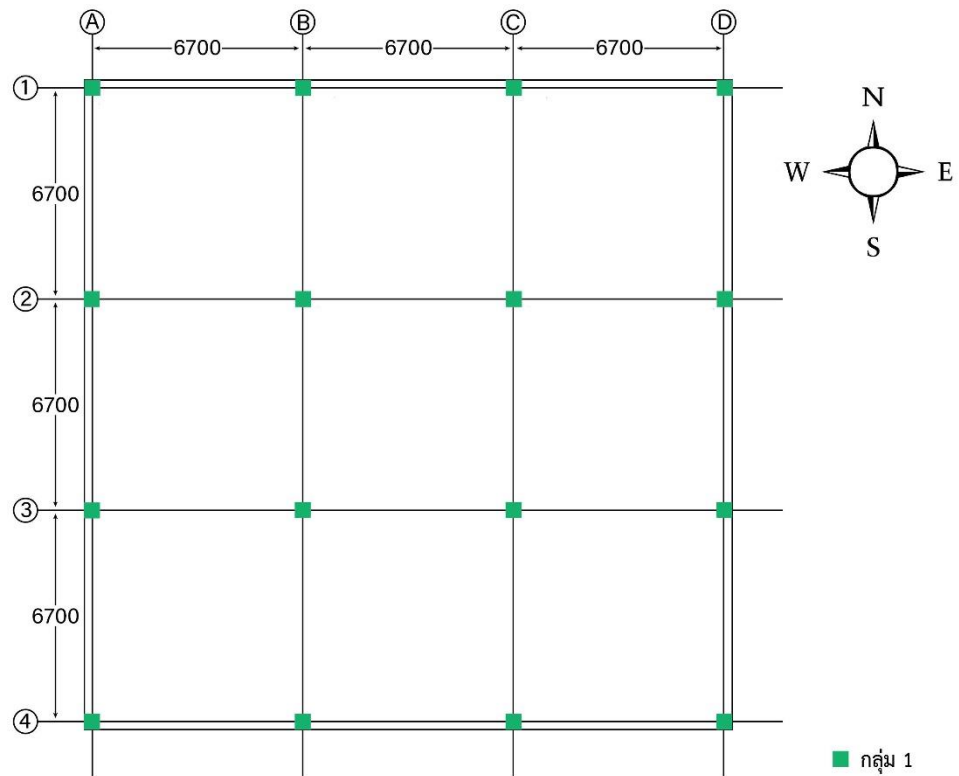
- 1) แผ่นพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็กสามช่วง ขนาดเสา 45×45 ซม. ทั้งหมด ดังรูปภาพที่ 3.1 มีตัวแปรรูปแบบทั้งหมด 29 ตัวแปร
 - ความหนาของพื้น
 - จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบเสา Grid line A1 ในทิศ W - E
 - จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบบาง Grid line A1 ในทิศ W - E
 - จำนวนเหล็กเสริมล่างในแถบบางบริเวณช่วงกลางระหว่าง Grid line A1 - B1 ในทิศ W - E
 - จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบเสา Grid line B1 ในทิศ W - E
 - จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบบาง Grid line B1 ในทิศ W - E
 - จำนวนเหล็กเสริมล่างในแถบบางบริเวณช่วงกลางระหว่าง Grid line B1 - C1 ในทิศ W - E
 - จำนวนเหล็กเสริมล่างในแถบบางบริเวณช่วงกลางระหว่าง Grid line A1 - B1 ในทิศ W - E
 - จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบเสา Grid line A2 ในทิศ W - E
 - จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบบาง Grid line A2 ในทิศ W - E
 - จำนวนเหล็กเสริมล่างในแถบบางบริเวณช่วงกลางระหว่าง Grid line A2 - B2 ในทิศ W - E
 - จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบเสา Grid line B2 ในทิศ W - E

- จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบกลาง Grid line B2 ในทิศ W - E
- จำนวนเหล็กเสริมล่างในแถบกลางบริเวณช่วงกลางระหว่าง Grid line B2 – C2 ในทิศ W - E
- จำนวนเหล็กเสริมล่างในแถบเสาบริเวณช่วงกลางระหว่าง Grid line A2 – B2 ในทิศ W - E
- จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบเสา Grid line A1 ในทิศ N - S
- จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบกลาง Grid line A1 ในทิศ N - S
- จำนวนเหล็กเสริมล่างในแถบกลางบริเวณช่วงกลางระหว่าง Grid line A1 – A2 ในทิศ N - S
- จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบเสา Grid line B1 ในทิศ N - S
- จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบกลาง Grid line B1 ในทิศ N - S
- จำนวนเหล็กเสริมล่างในแถบกลางบริเวณช่วงกลางระหว่าง Grid line A2 – A3 ในทิศ N - S
- จำนวนเหล็กเสริมล่างในแถบเสาบริเวณช่วงกลางระหว่าง Grid line A1 – A2 ในทิศ N - S
- จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบเสา Grid line A2 ในทิศ N - S
- จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบกลาง Grid line A2 ในทิศ N - S
- จำนวนเหล็กเสริมล่างในแถบกลางบริเวณช่วงกลางระหว่าง Grid line B1 – B2 ในทิศ N - S
- จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบเสาของ Grid line B2 ในทิศ N - S
- จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบกลางของ Grid line B2 ในทิศ N - S
- จำนวนเหล็กเสริมล่างในแถบกลางบริเวณช่วงกลางระหว่าง Grid line B2 – B3 ในทิศ N - S
- จำนวนเหล็กเสริมล่างในแถบเสาบริเวณช่วงกลางระหว่าง Grid line B1 – B2 ในทิศ N - S



รูปภาพที่ 3.1 แผ่นพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็กสามช่วง ขนาดเสา 45×45 ซม.

- 2) แผ่นพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็กสามช่วง แบ่งกลุ่มขนาดเสาเป็น 1 กลุ่ม โดยสามารถเปลี่ยนแปลงความกว้าง และความลึกของเสาได้ แต่ความกว้างกับความลึกของเสามีขนาดเท่ากัน ดังรูปภาพที่ 3.2 มีตัวแปรออกแบบทั้งหมด 30 ตัวแปร
- ความหนาของพื้น
 - ขนาดหน้าตัดของเสา
 - จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบเสา Grid line A1 ในทิศ W - E
 - จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบบาง Grid line A1 ในทิศ W - E
 - จำนวนเหล็กเสริมล่างในแถบบางบริเวณช่วงกลางระหว่าง Grid line A1 - B1 ในทิศ W - E
 - จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบเสา Grid line B1 ในทิศ W - E
 - จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบบาง Grid line B1 ในทิศ W - E
 - จำนวนเหล็กเสริมล่างในแถบบางบริเวณช่วงกลางระหว่าง Grid line B1 - C1 ในทิศ W - E
 - จำนวนเหล็กเสริมล่างในแถบบางบริเวณช่วงกลางระหว่าง Grid line A1 - B1 ในทิศ W - E

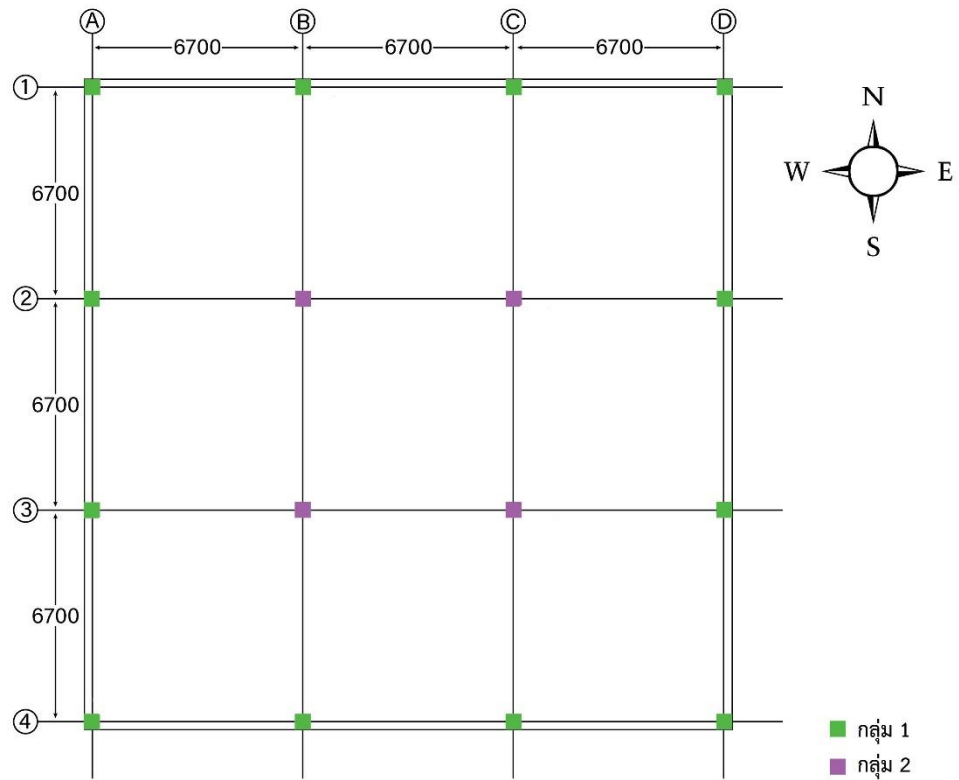


รูปภาพที่ 3.2 แผ่นพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็กสามช่วง แบ่งกลุ่มขนาดเสาเป็น 1 กลุ่ม

3) แผ่นพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็กสามช่วง แบ่งกลุ่มขนาดเสาเป็น 2 กลุ่ม โดยสามารถเปลี่ยนแปลงความกว้าง และความลึกของเสาได้ แต่ความกว้างกับความลึกของเสาเป็นอิสระต่อกัน ดังรูปภาพที่ 3.3 มีตัวแปรออกแบบทั้งหมด 33 ตัวแปร

- ความหนาของพื้น
- ความกว้างของเสา Grid line A1
- ความกว้างของเสา Grid line B2
- ความลึกของเสา Grid line A1
- ความลึกของเสา Grid line B2
- จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบเสา Grid line A1 ในทิศ W - E
- จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบกลาง Grid line A1 ในทิศ W - E
- จำนวนเหล็กเสริมล่างในแถบกลางบริเวณช่วงกลางระหว่าง Grid line A1 - B1 ในทิศ W - E
- จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบเสา Grid line B1 ในทิศ W - E

- จำนวนเหล็กเสริมล่างในแถบกลางบริเวณช่วงกลางระหว่าง Grid line B2 – B3 ในทิศ N - S
- จำนวนเหล็กเสริมล่างในแถบเสาบริเวณช่วงกลางระหว่าง Grid line B1 – B2 ในทิศ N - S



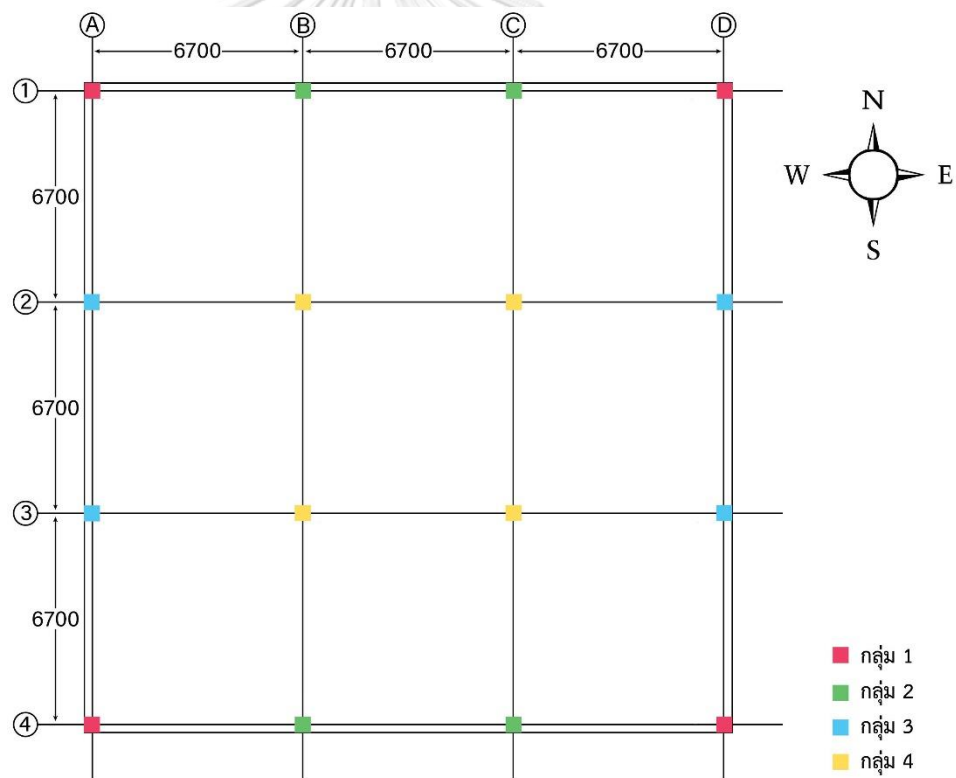
รูปภาพที่ 3.3 แผ่นพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็กสามช่วง แบ่งกลุ่มขนาดเสาเป็น 2 กลุ่ม

- 4) แผ่นพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็กสามช่วง แบ่งกลุ่มขนาดเสาเป็น 4 กลุ่ม โดยสามารถเปลี่ยนแปลงความกว้าง และความลึกของเสาได้ แต่ความกว้างกับความลึกของเสาเป็นอิสระต่อกัน ดังรูปภาพที่ 3.4 มีตัวแปรออกแบบทั้งหมด 37 ตัวแปร

- ความหนาของพื้น
- ความกว้างของเสา Grid line A1
- ความกว้างของเสา Grid line B2
- ความกว้างของเสา Grid line A2
- ความกว้างของเสา Grid line B2
- ความลึกของเสา Grid line A1
- ความลึกของเสา Grid line B2

- ความลึกของเสา Grid line A2
- ความลึกของเสา Grid line B2
- จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบเสา Grid line A1 ในทิศ W - E
- จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบบกลาง Grid line A1 ในทิศ W - E
- จำนวนเหล็กเสริมล่างในแถบบกลางบริเวณช่วงกลางระหว่าง Grid line A1 - B1 ในทิศ W - E
- จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบเสา Grid line B1 ในทิศ W - E
- จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบบกลาง Grid line B1 ในทิศ W - E
- จำนวนเหล็กเสริมล่างในแถบบกลางบริเวณช่วงกลางระหว่าง Grid line B1 - C1 ในทิศ W - E
- จำนวนเหล็กเสริมล่างในแถบบเสาบริเวณช่วงกลางระหว่าง Grid line A1 - B1 ในทิศ W - E
- จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบเสา Grid line A2 ในทิศ W - E
- จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบบกลาง Grid line A2 ในทิศ W - E
- จำนวนเหล็กเสริมล่างในแถบบกลางบริเวณช่วงกลางระหว่าง Grid line A2 - B2 ในทิศ W - E
- จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบเสา Grid line B2 ในทิศ W - E
- จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบบกลาง Grid line B2 ในทิศ W - E
- จำนวนเหล็กเสริมล่างในแถบบกลางบริเวณช่วงกลางระหว่าง Grid line B2 - C2 ในทิศ W - E
- จำนวนเหล็กเสริมล่างในแถบบเสาบริเวณช่วงกลางระหว่าง Grid line A2 - B2 ในทิศ W - E
- จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบเสา Grid line A1 ในทิศ N - S
- จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบบกลาง Grid line A1 ในทิศ N - S
- จำนวนเหล็กเสริมล่างในแถบบกลางบริเวณช่วงกลางระหว่าง Grid line A1 - A2 ในทิศ N - S
- จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบเสา Grid line B1 ในทิศ N - S
- จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบบกลาง Grid line B1 ในทิศ N - S
- จำนวนเหล็กเสริมล่างในแถบบกลางบริเวณช่วงกลางระหว่าง Grid line A2 - A3 ในทิศ N - S

- จำนวนเหล็กเสริมล่างในแถบเสาบริเวณช่วงกลางระหว่าง Grid line A1 – A2 ในทิศ N - S
- จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบเสา Grid line A2 ในทิศ N - S
- จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบกลาง Grid line A2 ในทิศ N - S
- จำนวนเหล็กเสริมล่างในแถบกลางบริเวณช่วงกลางระหว่าง Grid line B1 – B2 ในทิศ N - S
- จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบเสาของ Grid line B2 ในทิศ N - S
- จำนวนเหล็กเสริมบนในแถบกลางของ Grid line B2 ในทิศ N - S
- จำนวนเหล็กเสริมล่างในแถบกลางบริเวณช่วงกลางระหว่าง Grid line B2 – B3 ในทิศ N - S
- จำนวนเหล็กเสริมล่างในแถบเสาบริเวณช่วงกลางระหว่าง Grid line B1 – B2 ในทิศ N - S



รูปภาพที่ 3.4 แผ่นพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็กสามช่วง แบ่งกลุ่มขนาดเสาเป็น 4 กลุ่ม

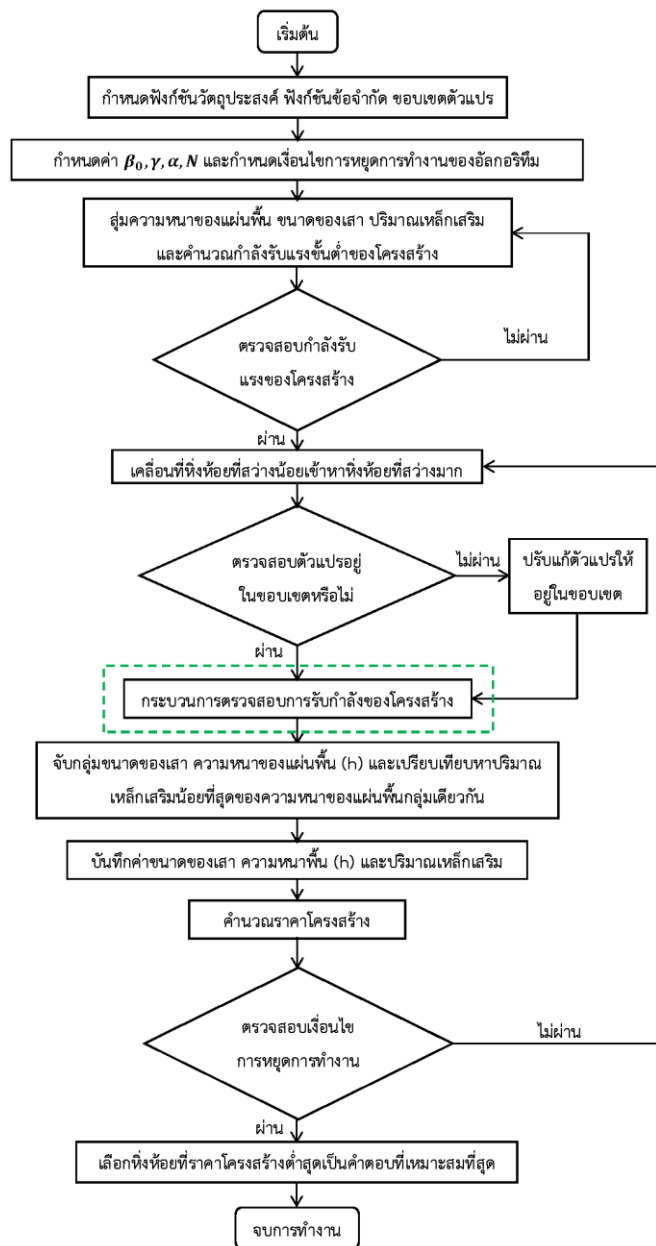
งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้ภาษา JAVA ในการพัฒนาโปรแกรมออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับพื้นที่ท้องเรียบ โดยใช้อัลกอริทึมหึ่งห้อยแบบแบ่งกลุ่มย่อย ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการดังต่อไปนี้

3.2 ขั้นตอนการออกแบบอย่างเหมาะสมของอัลกอริทึมหึ่งห้อยแบบแบ่งกลุ่มย่อย

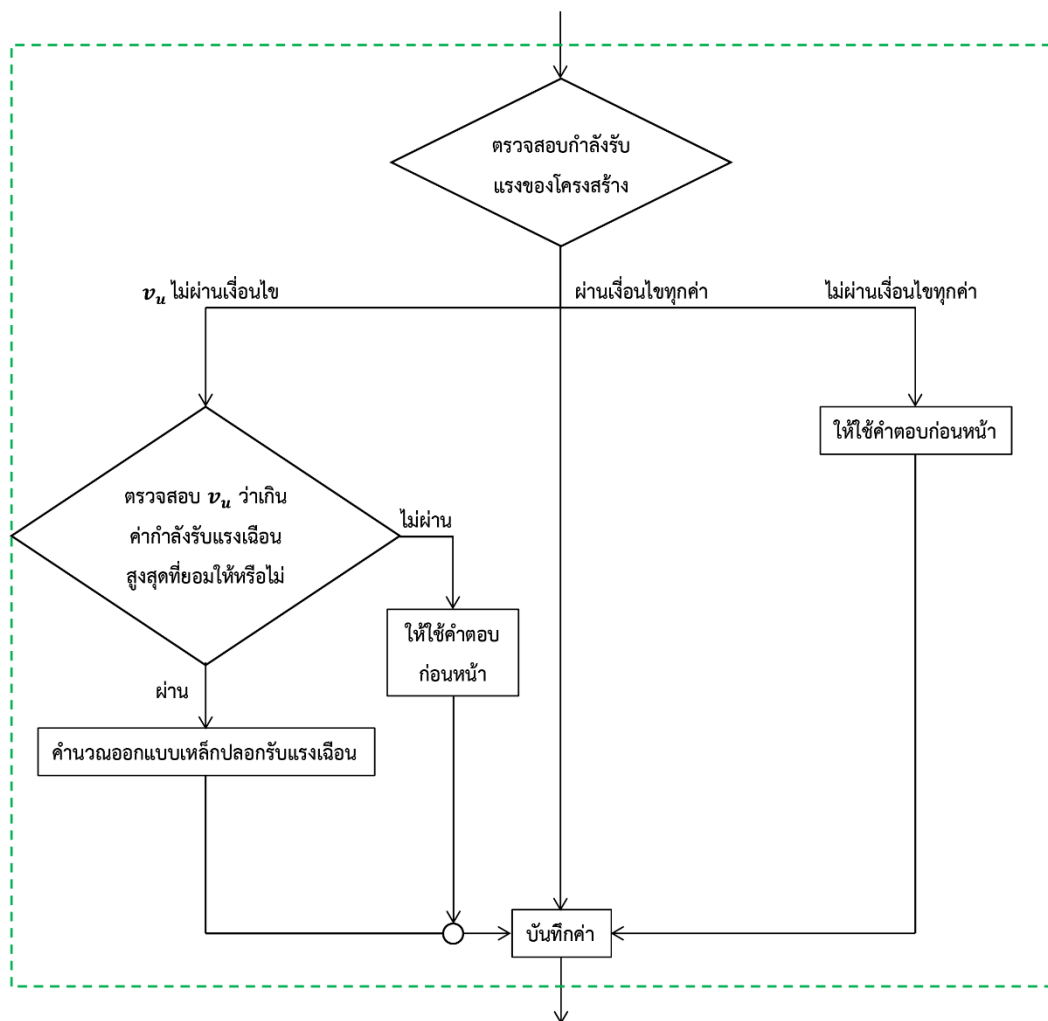
การออกแบบอย่างเหมาะสมของแผ่นพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีอัลกอริทึมหึ่งห้อยแบบแบ่งกลุ่มย่อย ในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการคำนวณออกแบบดังต่อไปนี้ (ดูรูปภาพที่ 3.5 และ รูปภาพที่ 3.6 ประกอบ)

- | | |
|---------------|---|
| ขั้นตอนที่ 1 | กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ขอบเขตของตัวแปร และข้อจำกัดฟังก์ชัน |
| ขั้นตอนที่ 2 | กำหนดประชากรหึ่งห้อย (N) ความน่าดึงดูดของหึ่งห้อย (β_0) สัมประสิทธิ์การกรองแสงของตัวกลาง (γ) พารามิเตอร์การสุ่ม (α) และกำหนดเงื่อนไขการหยุดการทำงานของอัลกอริทึม |
| ขั้นตอนที่ 3 | สุ่มความหนาของแผ่นพื้น ขนาดเสา ปริมาณเหล็กเสริม โดยสุ่มให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด และคำนวณกำลังรับแรงขั้นต่ำของโครงสร้าง |
| ขั้นตอนที่ 4 | ตรวจสอบแผ่นพื้นทั้งหมดว่าสามารถรับกำลังได้ตามที่กำหนดหรือไม่ หากไม่ได้ให้ทำการสุ่มในขั้นตอนที่ 3 อีกครั้งจนกว่าแผ่นพื้นทั้งหมดจะสามารถรับกำลังตามที่กำหนดได้ และบันทึกเก็บไว้ |
| ขั้นตอนที่ 5 | ทำการเคลื่อนที่หึ่งห้อยตัวที่สว่างน้อยเข้าหาตัวที่สว่างมากกว่า โดยให้หึ่งห้อยที่อยู่บริเวณตำแหน่งที่โครงสร้างราคาถูกสว่างมากกว่าตัวที่ราคาโครงสร้างแพง |
| ขั้นตอนที่ 6 | ตรวจสอบตัวแปรทั้งหมดว่าอยู่ในขอบเขตที่กำหนดหรือไม่ ถ้าไม่ให้ปรับให้อยู่ในขอบเขต |
| ขั้นตอนที่ 7 | ตรวจสอบโครงสร้างที่ได้ว่าสามารถรับโมเมนต์ดัด โมเมนต์ดัดไม่สมดุล แรงเฉือนทางเดียว และแรงเฉือนสองทางที่เกิดได้หรือไม่ ถ้าสามารถรับได้ทั้งหมดให้ดำเนินขั้นตอนที่ 10 ต่อไป ถ้าไม่สามารถรับแรงเฉือนสองทางได้ให้พิจารณาเสริมเหล็กรับแรงเฉือนในขั้นตอนที่ 8 แต่ถ้าไม่สามารถรับทั้งหมดได้ให้ใช้คำตอบก่อนหน้าแล้วดำเนินการต่อในขั้นตอนที่ 10 |
| ขั้นตอนที่ 8 | ตรวจสอบแรงเฉือนประลัยว่าเกินค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดที่ยอมให้หรือไม่ หากเกินให้ใช้คำตอบก่อนหน้าแล้วดำเนินขั้นตอนที่ 10 ถ้าหากไม่เกินให้ดำเนินขั้นตอนที่ 9 |
| ขั้นตอนที่ 9 | ทำการออกแบบเหล็กปลอกรับแรงเฉือน แล้วดำเนินการต่อในขั้นตอนที่ 10 |
| ขั้นตอนที่ 10 | จับกลุ่มขนาดเสา ความหนาพื้น (h) และทำการเปรียบเทียบปริมาณเหล็กเสริมภายในกลุ่มหาจำนวนเหล็กเสริมที่น้อยที่สุดมาเป็นคำตอบของความหนาพื้นกลุ่มนั้น แล้วดำเนินการต่อในขั้นตอนที่ 11 |

- ขั้นตอนที่ 11 คำนวณราคาโครงสร้างทั้งหมด
- ขั้นตอนที่ 12 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดการทำงาน ถ้าผ่านก็ให้ดำเนินการขั้นที่ 13 แต่ถ้าไม่ผ่านให้ดำเนินการในขั้นตอนที่ 5
- ขั้นตอนที่ 13 เปรียบเทียบราคาโครงสร้างที่ได้จากหิ้งห้อยทุกตัว เพื่อหาราคาโครงสร้างที่ต่ำที่สุด แล้วบันทึกค่าและจบการทำงานของอัลกอริทึม



รูปภาพที่ 3.5 แผนภาพของอัลกอริทึมหิ้งห้อยแบบแบ่งกลุ่มย่อย



รูปภาพที่ 3.6 แผนภาพกระบวนการตรวจสอบการรับกำลังของโครงสร้าง

บทที่ 4

กรณีศึกษา

งานวิจัยนี้มีกรณีศึกษาเป็นแผ่นพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งหมด 4 กรณี ซึ่งประกอบด้วย

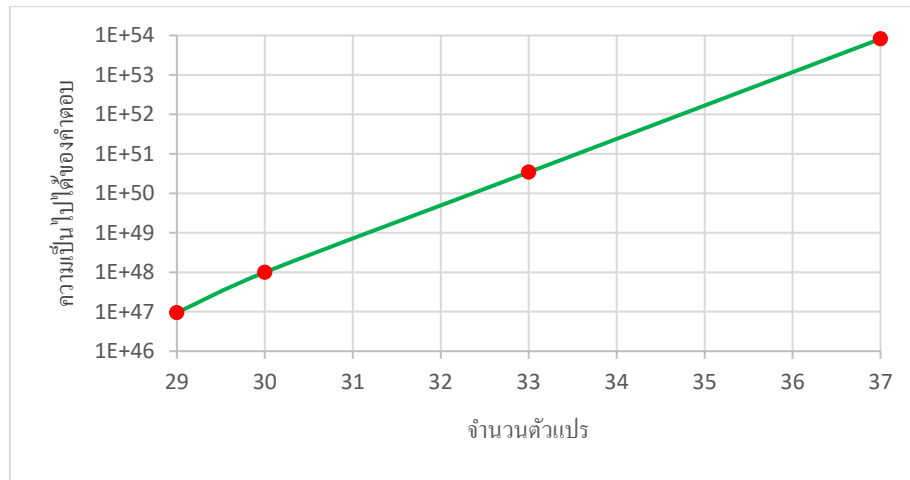
- 1) แผ่นพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาด 3 x 3 ช่วง ขนาดเสา 45 x 45 เซนติเมตร
- 2) แผ่นพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาด 3 x 3 ช่วง แบ่งกลุ่มขนาดเสา 1 กลุ่ม ขนาดเสามีการเปลี่ยนแปลง โดยที่ความกว้างและความลึกของเสามีขนาดเท่ากัน
- 3) แผ่นพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาด 3 x 3 ช่วง แบ่งกลุ่มเสา 2 กลุ่ม ขนาดเสามีการเปลี่ยนแปลง โดยที่ความกว้างและความลึกของเสาเป็นอิสระต่อกัน
- 4) แผ่นพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาด 3 x 3 ช่วง แบ่งกลุ่มเสา 4 กลุ่ม ขนาดเสามีการเปลี่ยนแปลง โดยที่ความกว้างและความลึกของเสาเป็นอิสระต่อกัน

น้ำหนักบรรทุก ความสูงระหว่างชั้น และขนาดช่วงพื้นที่ใช้ในกรณีศึกษาทั้งหมดมีดังต่อไปนี้ [19]

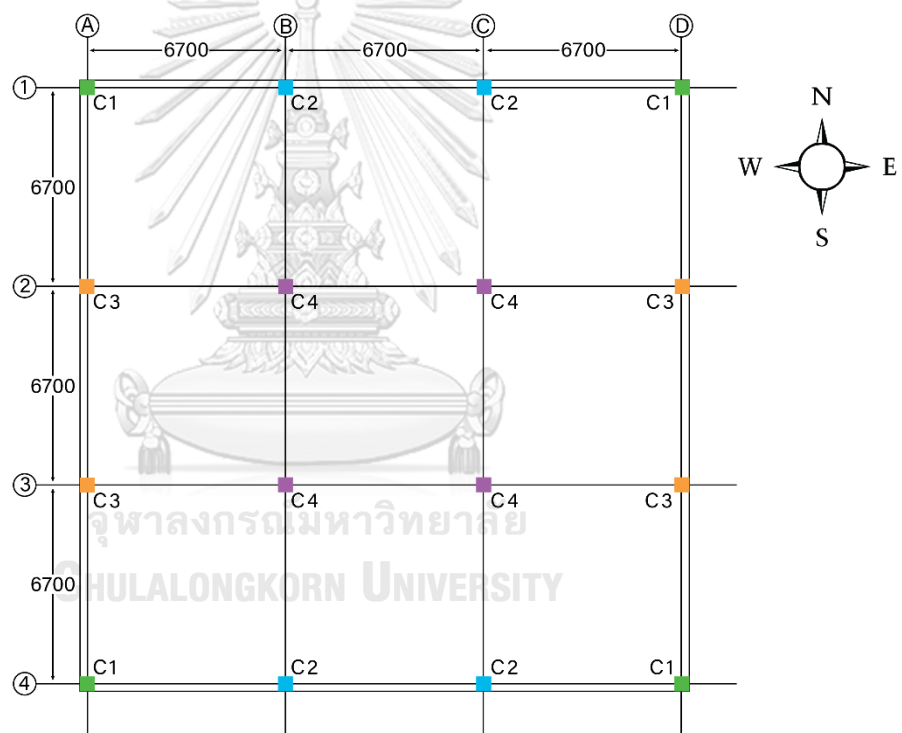
- 1) น้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติม (Super-imposed dead load) เท่ากับ 1.0 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร
- 2) น้ำหนักบรรทุกจร (Live load) เท่ากับ 4.9 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร
- 3) ความสูงระหว่างชั้นเท่ากับ 3.6 เมตร
- 4) ความกว้างของช่วงพื้นเท่ากับ 6.7 เมตร ทั้งแนวตั้งและแนวนอน

4.1 การวิเคราะห์พารามิเตอร์และจำนวนตัวแปรในการออกแบบ

การออกแบบแผ่นพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีจำนวนตัวแปรในการออกแบบที่มาก ซึ่งทำให้การลู่เข้าหาคำตอบนั้นเป็นไปได้ยากและใช้เวลานานในการลู่เข้าหาคำตอบ เนื่องจากตัวแปรที่มีจำนวนมากส่งผลให้มีคำตอบที่เป็นได้มาก ดังรูปภาพที่ 4.1 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการแบ่งกลุ่มเสาที่ใช้ออกแบบเป็น 4 กลุ่ม ดังรูปภาพที่ 4.2 เพื่อลดจำนวนตัวแปรในการออกแบบ และลดจำนวนคำตอบที่เป็นได้



รูปภาพที่ 4.1 ความเป็นไปได้ของคำตอบ

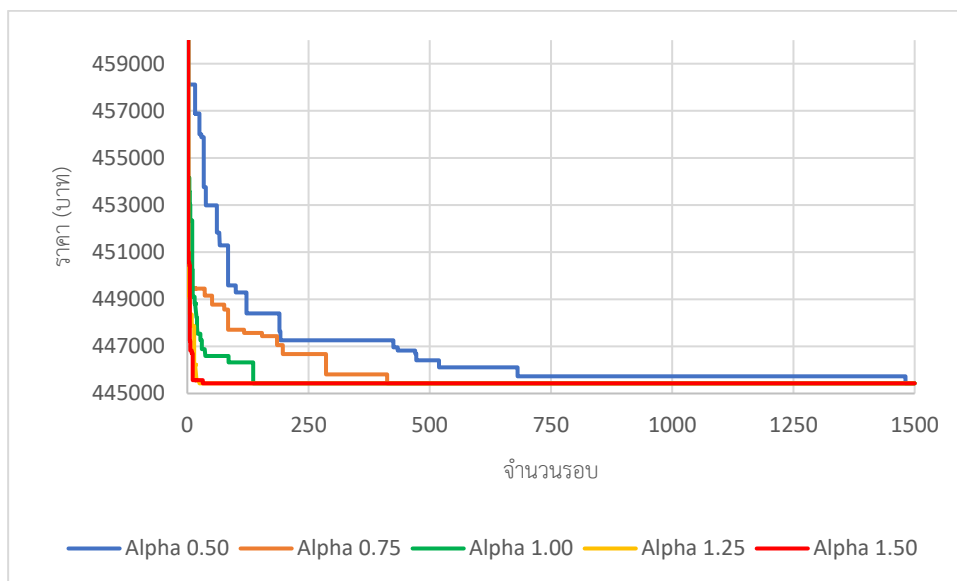


รูปภาพที่ 4.2 แผนผังโครงสร้างกรณีศึกษา

งานวิจัยนี้มีพารามิเตอร์ที่มีผลต่ออัลกอริทึมหึ่งห้อยแบบแบ่งกลุ่มย่อย ได้แก่ พารามิเตอร์การสุ่ม (α) สัมประสิทธิ์การกรองแสงของตัวกลาง (γ) และประชากรหึ่งห้อย (N)

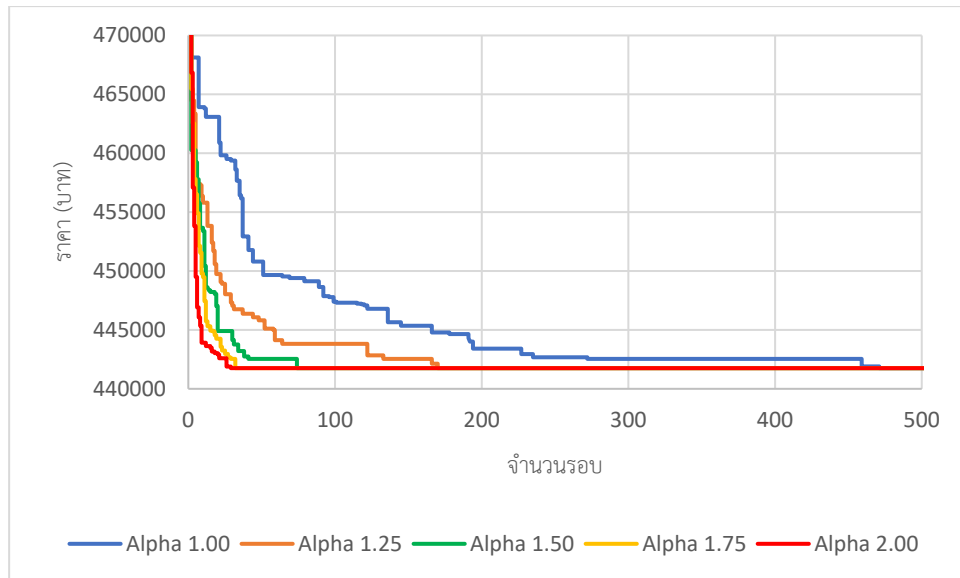
พารามิเตอร์สุ่ม (α) จะส่งผลกระทบต่อระยะการเคลื่อนที่สุ่ม จากการทดสอบพบว่าในกรณีศึกษาที่ 1 ซึ่งกำหนดค่า $\gamma = 1 \times 10^{-6}$, $N = 800$ และค่าของพารามิเตอร์สุ่มมีการเปลี่ยนแปลงเป็น 1.5 1.25 1.00 0.75 และ 0.50 ตามลำดับ พบว่าถ้ามีค่าพารามิเตอร์สุ่มมากระยะการเคลื่อนที่ก็จะกว้างส่งผลให้การลู่เข้าหา

คำตอบจะทำได้รวดเร็ว ถ้าค่าของพารามิเตอร์สุ่มมีค่าน้อยระยะเวลาการเคลื่อนที่จะละเอียดขึ้นจึงใช้เวลาในการลู่เข้าหาคำตอบนานมากขึ้น ดังรูปภาพที่ 4.3 แต่ถ้าต้องการพบคำตอบเฉพาะที่ดีที่สุด (Local Optimum) ทั้งหมด จะต้องปรับค่าพารามิเตอร์สุ่มให้ใกล้เคียงกับระยะห่างของตัวแปร เพื่อให้หิ้งห้อยทำการสำรวจพื้นที่ปัญหาให้ละเอียดมากขึ้นและไม่กระโดดข้ามคำตอบที่เป็นไปได้ไปมากนัก



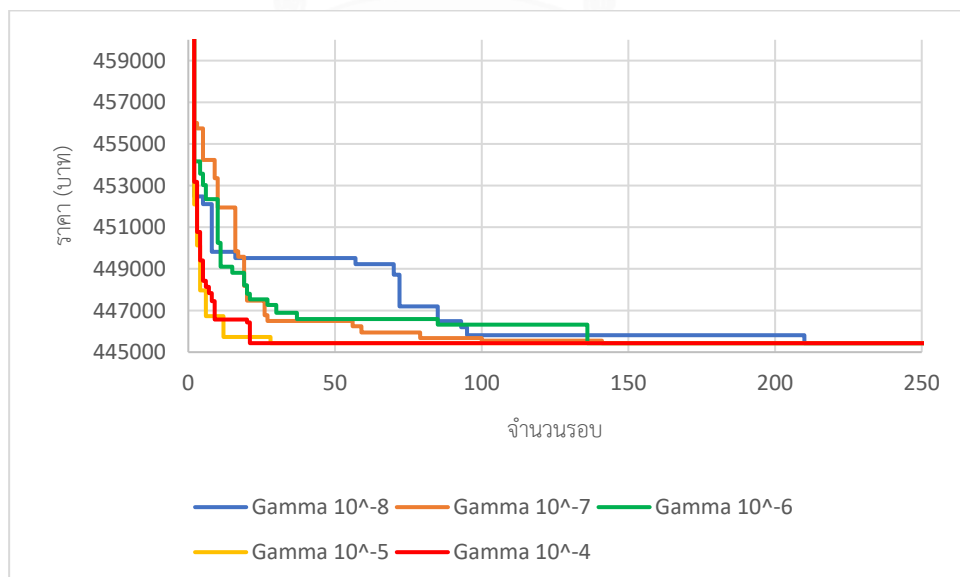
รูปภาพที่ 4.3 การลู่หาคำตอบของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์การสุ่มกรณีที่ 1

กรณีศึกษาที่ 2 กำหนดค่า $\gamma = 1 \times 10^{-6}$, $N = 1500$ และค่าของพารามิเตอร์สุ่มมีการเปลี่ยนแปลงเป็น 2.00 1.75 1.50 1.25 และ 1.00 ตามลำดับ พบว่าความเร็วในการลู่เข้าหาคำตอบจะเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับกรณีศึกษาที่ 1 แต่จำนวนตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบที่มากขึ้นทำให้คำตอบที่มีความเป็นไปได้มากขึ้น ถ้าใช้พารามิเตอร์สุ่มที่มีค่าน้อยก็จะส่งผลให้ระยะเวลาในการลู่เข้าหาคำตอบจะเพิ่มขึ้นมาก ดังรูปภาพที่ 4.4 ดังนั้นถ้าจำนวนตัวแปรการออกแบบเพิ่มขึ้นจึงควรปรับค่าพารามิเตอร์สุ่มเพิ่มขึ้นเพื่อที่จะได้ค้นพบคำตอบที่ดีที่สุด (Global Optimum) ได้รวดเร็วขึ้น แต่ถ้าต้องการพบคำตอบเฉพาะที่ดีที่สุด (Local Optimum) ทั้งหมด จะต้องปรับค่าพารามิเตอร์สุ่มให้ใกล้เคียงกับระยะห่างของตัวแปร เพื่อให้หิ้งห้อยทำการสำรวจพื้นที่ปัญหาให้ละเอียดมากขึ้นและไม่กระโดดข้ามคำตอบที่เป็นไปได้ไปมากนัก แต่ก็ต้องใช้ระยะเวลาในการลู่เข้าหาคำตอบนานมากขึ้น



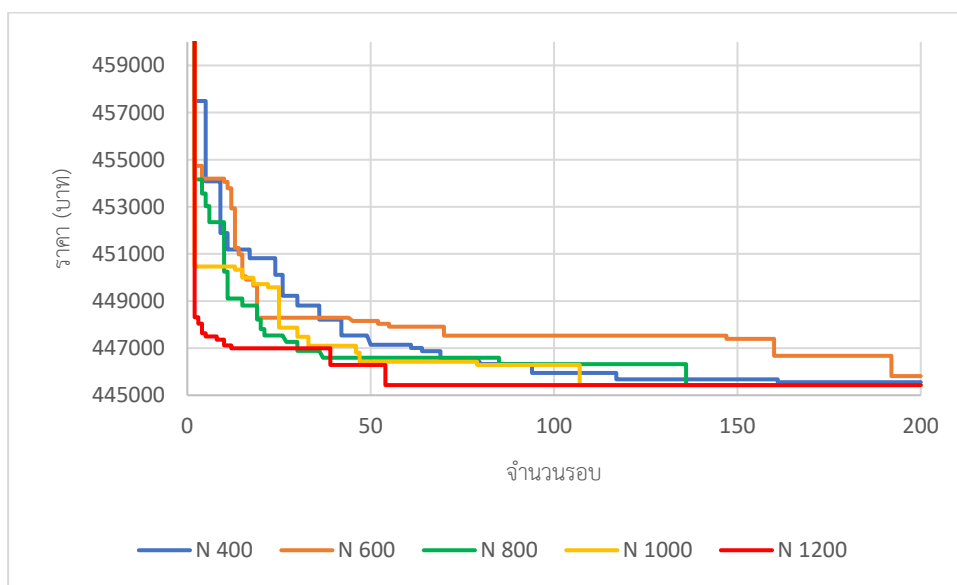
รูปภาพที่ 4.4 การหาค่าตอบของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์การสุ่มกรณีที่ 2

สัมประสิทธิ์การกรองแสงของตัวกลาง (γ) มีผลต่อระยะการมองเห็นของหิ่งห้อย จากการทดสอบในกรณีศึกษาที่ 1 ซึ่งกำหนดค่า $\alpha = 1.00, N = 800$ และค่าสัมประสิทธิ์การกรองแสงของตัวกลางมีการเปลี่ยนแปลงเป็น $10^{-4}, 10^{-5}, 10^{-6}, 10^{-7}$ และ 10^{-8} ตามลำดับ พบว่าไม่ว่าจะเพิ่มหรือลดค่าของสัมประสิทธิ์การกรองแสงของตัวกลางหิ่งห้อยก็ยังสามารถพบคำตอบที่ดีที่สุด (Global Optimum) ดังรูปภาพที่ 4.5 เนื่องจากตัวแปรในการออกแบบในงานวิจัยนี้แต่ละตัวแปรไม่ได้มีค่าต่างกันมากนัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์การกรองแสงของตัวกลางมีค่าเท่ากับ 10^{-6} ในทุกกรณีศึกษา



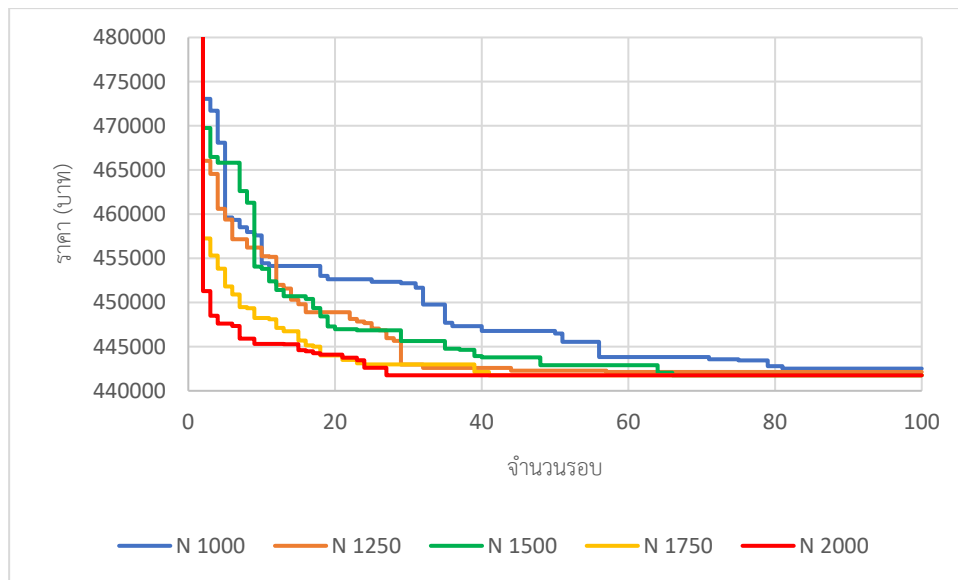
รูปภาพที่ 4.5 การหาค่าตอบของการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การกรองแสงของตัวกลาง

ประชากรหิ่งห้อย (N) มีผลต่อการกระจายตัวทั่วพื้นที่การค้นหาคำตอบของหิ่งห้อย จากการทดสอบพบว่าในกรณีศึกษาที่ 1 ซึ่งกำหนดค่า $\gamma = 1 \times 10^{-6}$, $\alpha = 1.00$ จำนวนรอบ 200 รอบ และประชากรหิ่งห้อยมีการเปลี่ยนแปลงเป็น 1200 1000 800 600 และ 400 ตัวตามลำดับ พบว่าถ้าประชากรหิ่งห้อยมีจำนวนน้อยการกระจายตัวของหิ่งห้อยก็จะกระจายตัวไม่ทั่วพื้นที่ของปัญหาโอกาสในการพบคำตอบที่ดีที่สุด (Global Optimum) ของปัญหาก็จะมีน้อย ถ้าประชากรหิ่งห้อยมีจำนวนมากการกระจายตัวของหิ่งห้อยก็จะทั่วพื้นที่ของปัญหาโอกาสในการพบคำตอบที่ดีที่สุด (Global Optimum) ของปัญหาก็จะมีมากขึ้น ดังรูปภาพที่ 4.6 แต่ถ้ามีประชากรมากก็จะใช้เวลาในการคำนวณในแต่ละรอบมากขึ้นด้วย



รูปภาพที่ 4.6 การลู่เข้าหาคำตอบของการเปลี่ยนแปลงประชากรหิ่งห้อยกรณีศึกษาที่ 1

กรณีศึกษาที่ 2 ซึ่งกำหนดค่า $\gamma = 1 \times 10^{-6}$, $\alpha = 1.50$ จำนวนรอบ 100 รอบ และประชากรหิ่งห้อยมีการเปลี่ยนแปลงเป็น 2000 1750 1500 1250 และ 1000 ตัวตามลำดับ พบว่าผลการกระจายตัวของหิ่งห้อยจะเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับกรณีศึกษาที่ 1 แต่จำนวนตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบที่มากขึ้นทำให้คำตอบที่มีความเป็นไปได้มากขึ้น ส่งผลให้ถ้าใช้ประชากรหิ่งห้อยน้อยโอกาสในการค้นพบคำตอบก็จะน้อย ดังรูปภาพที่ 4.7 ดังนั้นถ้าตัวแปรออกแบบเพิ่มขึ้นจึงควรปรับเพิ่มจำนวนประชากรหิ่งห้อยให้มากขึ้นเพื่อให้หิ่งห้อยสามารถกระจายทั่วพื้นที่ปัญหา



รูปภาพที่ 4.7 การรู้เข้าหาคำตอบของการเปลี่ยนแปลงประชากรหึ่งห้อยกรณีศึกษาที่ 2

จากการวิเคราะห์พารามิเตอร์ข้างต้นพบว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะต้องทดสอบในแต่ละปัญหา เนื่องจากปัญหาที่แตกต่างกันค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมก็จะแตกต่างกันออกไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จะกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังนี้

กรณีศึกษาที่ 1 กำหนดให้ $\alpha = 1.0$ $\gamma = 1 \times 10^{-6}$ และ $N = 800$

กรณีศึกษาที่ 2 กำหนดให้ $\alpha = 1.5$ $\gamma = 1 \times 10^{-6}$ และ $N = 1500$

กรณีศึกษาที่ 3 กำหนดให้ $\alpha = 1.5$ $\gamma = 1 \times 10^{-6}$ และ $N = 4000$

กรณีศึกษาที่ 4 กำหนดให้ $\alpha = 3.0$ $\gamma = 1 \times 10^{-6}$ และ $N = 10000$

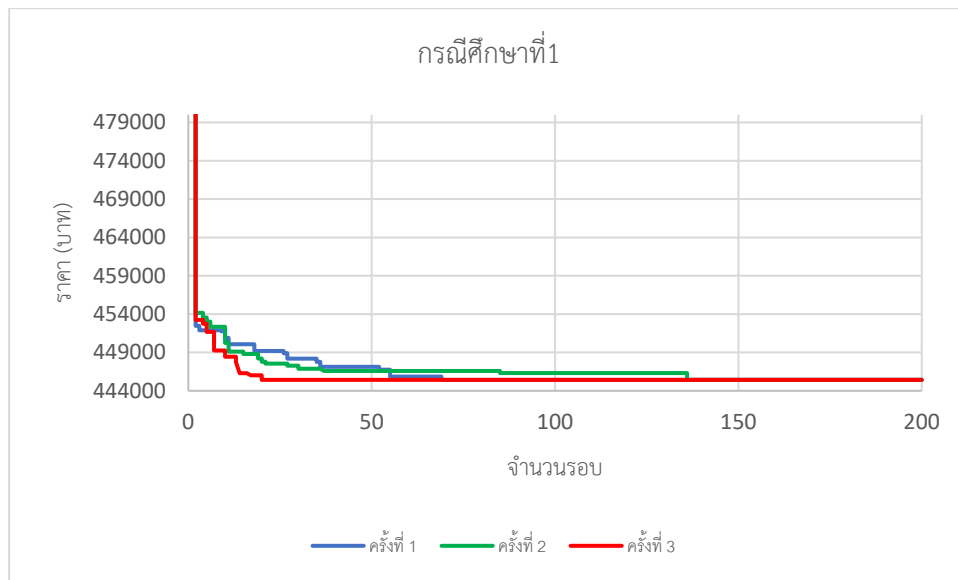
4.2 ผลการออกแบบอย่างเหมาะสม

จากการทดลองประยุกต์ใช้อัลกอริทึมหึ่งห้อยแบบแบ่งกลุ่มย่อยในการแก้ปัญหาการออกแบบแผ่นพื้นห้องเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กทั้ง 4 กรณี พบว่าทั้ง 4 กรณีได้ผลคำตอบที่ดีที่สุด (Global Optimum) แสดงดังตารางที่ 4.1 ตารางที่ 4.2 และมีความเสถียรในการรู้เข้าหาคำตอบจากการทดสอบทั้งหมดสามครั้ง ดังรูปภาพที่ 4.8 ถึง รูปภาพที่ 4.11 โดยที่กรณีศึกษาที่ 1 ใช้จำนวนรอบ 200 รอบ กรณีศึกษาที่ 2 ใช้จำนวนรอบ 100 รอบ กรณีศึกษาที่ 3 ใช้จำนวนรอบ 150 รอบ และกรณีศึกษาที่ 4 ใช้จำนวนรอบ 400 รอบ ในการค้นพบคำตอบ เนื่องจากใช้เวลาในการคำนวณและการรู้เข้าหาคำตอบที่รวดเร็ว นอกจากนั้นจะเห็นว่าถ้าเพิ่มจำนวนรอบมากขึ้นก็ไม่ค้นพบคำตอบที่ดีกว่าเดิมอีก

ตารางที่ 4.1 คำตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 1

ตัวแปร		ตำแหน่ง	หน่วย	คำตอบที่เหมาะสม
ความหนาพื้น		ทั้งหมด	เมตร	0.210
ทิศทาง W-E				
เสา C1	เหล็กเสริมบน	แถบเสา	-	15-DB12
		แถบกลาง	-	6-DB12
	เหล็กเสริมล่าง	แถบเสา	-	11-DB12
		แถบกลาง	-	8-DB12
เสา C2	เหล็กเสริมบน	แถบเสา	-	22-DB12
		แถบกลาง	-	8-DB12
	เหล็กเสริมล่าง	แถบเสา	-	11-DB12
		แถบกลาง	-	6-DB12
เสา C3	เหล็กเสริมบน	แถบเสา	-	12-DB12
		แถบกลาง	-	12-DB12
	เหล็กเสริมล่าง	แถบเสา	-	26-DB12
		แถบกลาง	-	17-DB12
เสา C4	เหล็กเสริมบน	แถบเสา	-	45-DB12
		แถบกลาง	-	15-DB12
	เหล็กเสริมล่าง	แถบเสา	-	26-DB12
		แถบกลาง	-	13-DB12

ทิศทาง N-S				
เสา C1	เหล็กเสริมบน	แถบเสา	-	15-DB12
		แถบกลาง	-	6-DB12
	เหล็กเสริมล่าง	แถบเสา	-	11-DB12
		แถบกลาง	-	8-DB12
เสา C2	เหล็กเสริมบน	แถบเสา	-	12-DB12
		แถบกลาง	-	12-DB12
	เหล็กเสริมล่าง	แถบเสา	-	26-DB12
		แถบกลาง	-	17-DB12
เสา C3	เหล็กเสริมบน	แถบเสา	-	22-DB12
		แถบกลาง	-	8-DB12
	เหล็กเสริมล่าง	แถบเสา	-	11-DB12
		แถบกลาง	-	6-DB12
เสา C4	เหล็กเสริมบน	แถบเสา	-	45-DB12
		แถบกลาง	-	15-DB12
	เหล็กเสริมล่าง	แถบเสา	-	26-DB12
		แถบกลาง	-	13-DB12
เสา C1	เหล็กปลอกรับแรง เฉือน	-	-	2-DB12
เสา C2		-	-	6-DB12
เสา C3		-	-	6-DB12
เสา C4		-	-	20-DB12
ราคารวมของโครงสร้าง		บาท		445,431.64



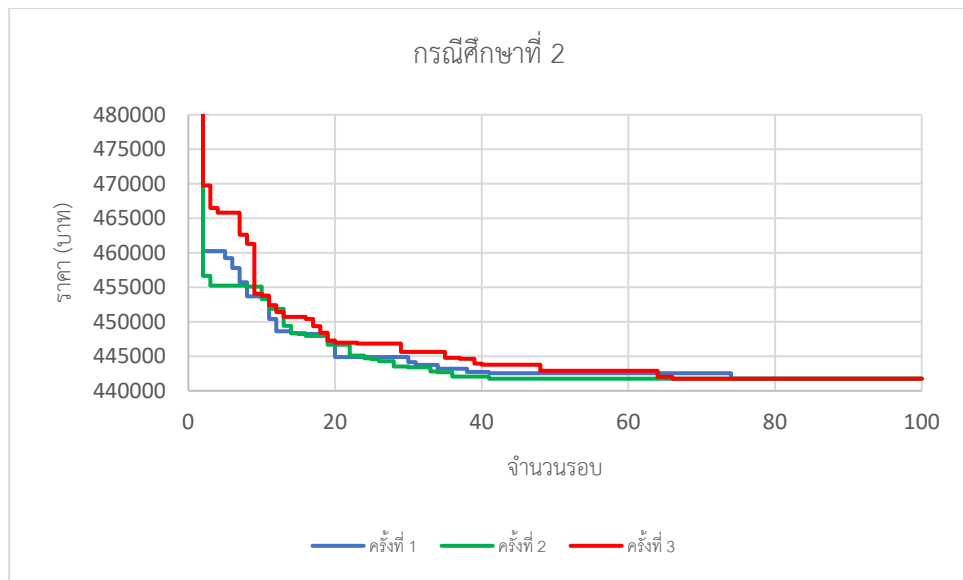
รูปภาพที่ 4.8 การลู่เข้าหาคำตอบของกรณีที่ 1



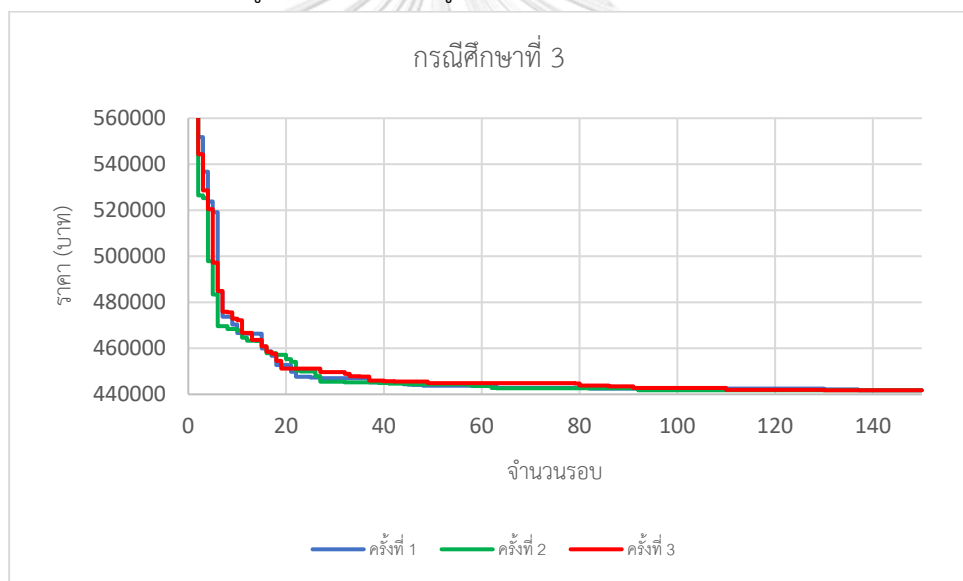
ตารางที่ 4.2 คำตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 - 4

ตัวแปร	ตำแหน่ง	หน่วย	คำตอบที่เหมาะสม	
ความหนาพื้น	ทั้งหมด	เมตร	0.205	
ความกว้างเสา	ทั้งหมด	เมตร	0.60	
ความลึกเสา	ทั้งหมด	เมตร	0.60	
ทิศทาง W-E				
เสา C1	เหล็กเสริมบน	แถบเสา	-	18-DB12
		แถบบกลาง	-	6-DB12
	เหล็กเสริมล่าง	แถบเสา	-	10-DB12
		แถบบกลาง	-	7-DB12
เสา C2	เหล็กเสริมบน	แถบเสา	-	21-DB12
		แถบบกลาง	-	7-DB12
	เหล็กเสริมล่าง	แถบเสา	-	10-DB12
		แถบบกลาง	-	6-DB12
เสา C3	เหล็กเสริมบน	แถบเสา	-	16-DB12
		แถบบกลาง	-	11-DB12
	เหล็กเสริมล่าง	แถบเสา	-	24-DB12
		แถบบกลาง	-	16-DB12
เสา C4	เหล็กเสริมบน	แถบเสา	-	43-DB12
		แถบบกลาง	-	14-DB12
	เหล็กเสริมล่าง	แถบเสา	-	24-DB12
		แถบบกลาง	-	12-DB12

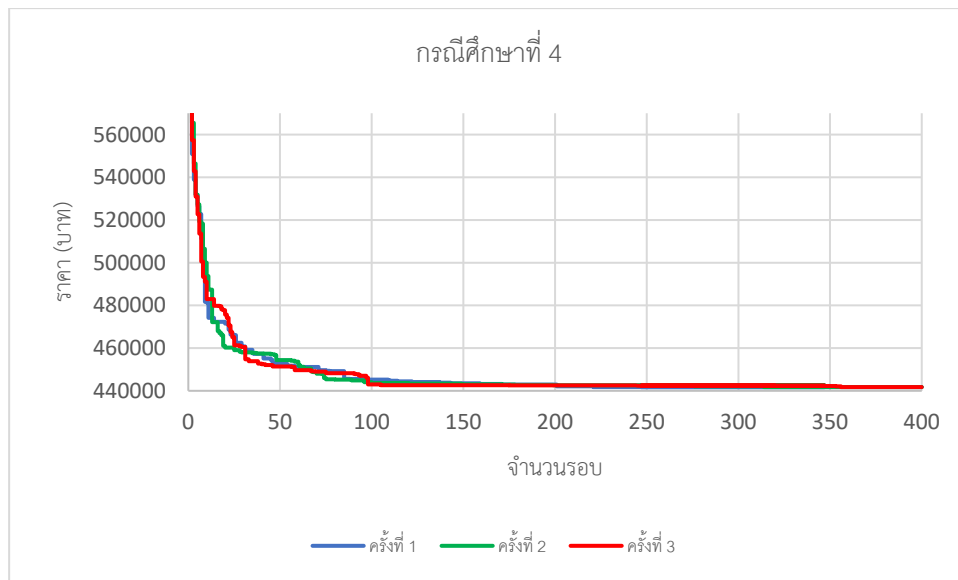
ทิศทาง N-S				
เสา C1	เหล็กเสริมบน	แถบเสา	-	18-DB12
		แถบกลาง	-	6-DB12
	เหล็กเสริมล่าง	แถบเสา	-	10-DB12
		แถบกลาง	-	7-DB12
เสา C2	เหล็กเสริมบน	แถบเสา	-	16-DB12
		แถบกลาง	-	11-DB12
	เหล็กเสริมล่าง	แถบเสา	-	24-DB12
		แถบกลาง	-	16-DB12
เสา C3	เหล็กเสริมบน	แถบเสา	-	21-DB12
		แถบกลาง	-	7-DB12
	เหล็กเสริมล่าง	แถบเสา	-	10-DB12
		แถบกลาง	-	6-DB12
เสา C4	เหล็กเสริมบน	แถบเสา	-	43-DB12
		แถบกลาง	-	14-DB12
	เหล็กเสริมล่าง	แถบเสา	-	24-DB12
		แถบกลาง	-	12-DB12
เสา C1	เหล็กปลอกรับแรง ฉีอน	-	-	2-DB12
เสา C2		-	-	9-DB12
เสา C3		-	-	9-DB12
เสา C4		-	-	16-DB12
ราคารวมของโครงสร้าง		บาท		441,756.52



รูปภาพที่ 4.9 การลู่เข้าหาคำตอบของกรณีที่ 2



รูปภาพที่ 4.10 การลู่เข้าหาคำตอบของกรณีที่ 3



รูปภาพที่ 4.11 การลู่เข้าค่าหาค่าตอบของกรณีศึกษาที่ 4

จากการเปรียบเทียบผลคำตอบที่ได้กับการออกแบบด้วยมือพบว่าการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมแบบแบ่งกลุ่มย่อยให้คำตอบเท่ากับการออกแบบด้วยมือ ดังตารางที่ 4.3 แต่อัลกอริทึมหึ่งห้อยแบบแบ่งกลุ่มย่อยสามารถยืนยันคำตอบที่ได้ว่าเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากการทำงานของอัลกอริทึมจะทำการค้นหาราคาของโครงสร้างแต่ละโครงสร้างนำมาเปรียบเทียบกันแล้วจึงเลือกราคาโครงสร้างที่ถูกที่สุดมาเป็นคำตอบของปัญหา

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบคำตอบของกรณีศึกษาที่ 1 กับการออกแบบทั่วไป

ตัวแปร	ตำแหน่ง	หน่วย	คำตอบที่เหมาะสม		
			ออกแบบอย่างเหมาะสม	ออกแบบทั่วไป	
ความหนาพื้น	ทั้งหมด	เมตร	0.210	0.210	
ทิศทาง W-E					
เสา C1	เหล็กเสริมบน	แถบเสา	-	15-DB12	15-DB12
		แถบกลาง	-	6-DB12	6-DB12
	เหล็กเสริมล่าง	แถบเสา	-	11-DB12	11-DB12
		แถบกลาง	-	8-DB12	8-DB12
เสา C2	เหล็กเสริมบน	แถบเสา	-	22-DB12	22-DB12
		แถบกลาง	-	8-DB12	8-DB12
	เหล็กเสริมล่าง	แถบเสา	-	11-DB12	11-DB12
		แถบกลาง	-	6-DB12	6-DB12
เสา C3	เหล็กเสริมบน	แถบเสา	-	12-DB12	12-DB12
		แถบกลาง	-	12-DB12	12-DB12
	เหล็กเสริมล่าง	แถบเสา	-	26-DB12	26-DB12
		แถบกลาง	-	17-DB12	17-DB12
เสา C4	เหล็กเสริมบน	แถบเสา	-	45-DB12	45-DB12
		แถบกลาง	-	15-DB12	15-DB12
	เหล็กเสริมล่าง	แถบเสา	-	26-DB12	26-DB12
		แถบกลาง	-	13-DB12	13-DB12

ทิศทาง N-S					
เสา C1	เหล็กเสริมบน	แถบเสา	-	18-DB12	18-DB12
		แถบกลาง	-	6-DB12	6-DB12
	เหล็กเสริมล่าง	แถบเสา	-	10-DB12	10-DB12
		แถบกลาง	-	7-DB12	7-DB12
เสา C2	เหล็กเสริมบน	แถบเสา	-	16-DB12	16-DB12
		แถบกลาง	-	11-DB12	11-DB12
	เหล็กเสริมล่าง	แถบเสา	-	24-DB12	24-DB12
		แถบกลาง	-	16-DB12	16-DB12
เสา C3	เหล็กเสริมบน	แถบเสา	-	21-DB12	21-DB12
		แถบกลาง	-	7-DB12	7-DB12
	เหล็กเสริมล่าง	แถบเสา	-	10-DB12	10-DB12
		แถบกลาง	-	6-DB12	6-DB12
เสา C4	เหล็กเสริมบน	แถบเสา	-	43-DB12	43-DB12
		แถบกลาง	-	14-DB12	14-DB12
	เหล็กเสริมล่าง	แถบเสา	-	24-DB12	24-DB12
		แถบกลาง	-	12-DB12	12-DB12
เสา C1	เหล็กปลอกรับ แรงเฉือน	-	-	2-DB12	2-DB12
เสา C2		-	-	6-DB12	6-DB12
เสา C3		-	-	6-DB12	6-DB12
เสา C4		-	-	20-DB12	20-DB12

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้ศึกษาการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมหึ่งห้อยแบบแบ่งกลุ่มย่อยในการออกแบบโครงสร้างแผ่นพื้นท้องเรียบคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมที่สุด เพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีราคาวัสดุต่ำที่สุดโดยที่โครงสร้างยังคงมีความแข็งแรงตามมาตรฐาน ACI 318M-14 อัลกอริทึมหึ่งห้อยแบบแบ่งกลุ่มย่อยให้ผลลัพธ์ออกมาเป็นที่น่าพอใจ เนื่องจากคำตอบของการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดทั้ง 4 กรณีจะเข้าสู่โครงสร้างที่มีราคาต่ำกว่าเสมอ และยังคงความแข็งแรงตามมาตรฐาน หากหึ่งห้อยพบโครงสร้างที่แข็งแรงไม่เพียงพอก็จะไม่ยอมรับโครงสร้างนั้นแล้วกลับไปใช้โครงสร้างเดิม ในกรณีที่มีคำตอบเฉพาะที่หลายคำตอบวิธีนี้สามารถหาคำตอบเหล่านั้นได้ แล้วนำมาเปรียบเทียบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Global Optimum)

จากการศึกษาพฤติกรรมการลู่เข้าคำตอบของการออกแบบโครงสร้างแผ่นพื้นท้องเรียบในกรณีต่าง ๆ พบว่าพารามิเตอร์ที่มีผลในการหาคำตอบที่ดีที่สุดคือ พารามิเตอร์การสุ่ม (α) สัมประสิทธิ์การกรองแสงของตัวกลาง (γ) และประชากรหึ่งห้อย (N) ดังนี้

- พารามิเตอร์การสุ่ม (α) จะมีผลต่อระยะการเคลื่อนที่สุ่มของหึ่งห้อย ถ้าพารามิเตอร์การสุ่มมีค่ามากส่งผลให้หึ่งห้อยมีระยะการเคลื่อนที่ไกล จะทำให้พบคำตอบที่ดีที่สุดได้รวดเร็ว ถ้าพารามิเตอร์การสุ่มมีค่าน้อยส่งผลให้หึ่งห้อยมีระยะการเคลื่อนที่ที่ละเอียดมากขึ้น ก็จะมีคำตอบที่ดีที่สุดช้า แต่ก็สามารถพบคำตอบเฉพาะที่ได้ทั้งหมด และจากการทดสอบยังพบว่า ถ้าค่าพารามิเตอร์การสุ่มมีค่าใกล้เคียงกับระยะห่างของตัวแปรจะสามารถหาค่าทั้งคำตอบเฉพาะที่และคำตอบที่ดีที่สุดได้ทั้งหมด แต่จะใช้เวลานาน
- สัมประสิทธิ์การกรองแสงของตัวกลาง (γ) จะมีผลต่อระยะการมองเห็นระหว่างหึ่งห้อย ถ้าสัมประสิทธิ์การกรองแสงมีค่ามากส่งผลให้หึ่งห้อยมองเห็นกันได้ยากจึงถูกดิ่งดุดได้ยาก ถ้าสัมประสิทธิ์การกรองแสงมีค่าน้อยเกินส่งผลให้หึ่งห้อยมองเห็นกันได้ชัดเจนขึ้นจึงถูกดิ่งดุดได้ง่าย จากการทดสอบพบว่าสัมประสิทธิ์ของตัวกลางไม่ส่งผลกระทบต่อการลู่เข้าหาคำตอบในงานวิจัยนี้มากนัก เนื่องจากระยะห่างของตัวแปรในการออกแบบแต่ละตัวห่างกันไม่มากนัก

- ประชากรหึ่งห้อย (N) มีผลต่อการกระจายตัวทั่วพื้นที่การค้นหาคำตอบของหึ่งห้อย มีค่ามากหรือน้อยตามขนาดของความเป็นไปได้ของคำตอบ เพื่อเพิ่มโอกาสในการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหานั้น หากมีประชากรหึ่งห้อยน้อยโอกาสที่หึ่งห้อยจะค้นพบคำตอบก็จะน้อย ถ้ามีประชากรหึ่งห้อยมากโอกาสที่หึ่งห้อยจะค้นพบคำตอบก็จะมาก นอกจากนี้จำนวนหึ่งห้อยที่มากยังลดจำนวนรอบในการค้นหาแต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณแต่ละรอบจะนานขึ้น

นอกจากการกำหนดพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับปัญหาแล้ว จำนวนตัวแปรในการออกแบบก็มีผลต่อประสิทธิภาพของอัลกอริทึมหึ่งห้อยแบบแบ่งกลุ่มเช่นกัน จากการทดสอบพบว่าถ้าจำนวนตัวแปรในการออกแบบมีมากจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้นั้นก็มากขึ้น ส่งผลให้การค้นหาคำตอบนั้นเป็นไปได้ยากและใช้เวลานานกว่าจะพบคำตอบที่ดีที่สุด

ผลจากการออกแบบของกรณีศึกษาต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้พบว่าการออกแบบให้ได้โครงสร้างมีราคาต่ำที่สุด มีแนวโน้มจะได้หน้าตัดเสาที่มีความกว้างและความลึกที่มาก เพื่อให้การเกิดโมเมนต์และแรงเฉือนลดลง ซึ่งจะมีผลต่อปริมาณเหล็กเสริมและความหนาพื้น นอกจากนี้จากการเปรียบเทียบคำตอบในกรณีศึกษาที่ 1 กับการออกแบบด้วยมือพบว่าคำตอบที่ได้มีค่าเท่ากัน แต่อัลกอริทึมหึ่งห้อยแบบแบ่งกลุ่มย่อยสามารถยืนยันคำตอบที่พบได้ว่าเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากการทำงานของอัลกอริทึมจะทำการหาค่าของโครงสร้างแต่ละโครงสร้างแล้วนำมาเปรียบเทียบกันเพื่อให้ได้ราคาโครงสร้างที่ต่ำที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยพบว่าอัลกอริทึมหึ่งห้อยแบบแบ่งกลุ่มย่อยสามารถค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาในงานวิจัยนี้ได้เป็นอย่างดี แต่ระยะเวลาในการค้นหาคำตอบยังควรได้รับการปรับปรุง ซึ่งกรณีศึกษาที่ 4 พบว่าต้องใช้เวลานานมากในการค้นพบคำตอบ สำหรับแนวทางพัฒนางานวิจัยต่อไปอาจทำได้ดังนี้

1. การคำนวณออกแบบเหล็กเสริมในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบโดยการสุ่มจำนวนเหล็กเสริมซึ่งทำให้คำตอบที่เป็นได้นั้นมีมาก ดังนั้นอาจจะเปลี่ยนจากการสุ่มจำนวนเหล็กเสริมเป็นการออกแบบหาพื้นที่หน้าเหล็กเสริมแทน อาจจะส่งผลให้ขอบเขตของคำตอบที่เป็นไปได้ลดลงและเพิ่มความเร็วให้อัลกอริทึม
2. งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ขนาดเหล็กเสริมเพียงขนาดเดียว แต่ถ้าให้ขนาดเหล็กเสริมมีการเปลี่ยนแปลงขนาดได้ก็อาจจะทำให้คำตอบที่ได้เหมาะสมขึ้นกว่าเดิม

3. งานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาราคาของเสาในการคำนวณราคารวมของโครงสร้าง ดังนั้นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดทำให้เสามีขนาดใหญ่ ถ้าหากนำเอาราคาของเสามาพิจารณาร่วมด้วยอาจจะทำให้ได้ขนาดเสาที่เหมาะสมและราคารวมของโครงสร้างอาจจะลดลง
4. งานวิจัยนี้ยังสามารถพัฒนาเพิ่มเติมได้ โดยการเพิ่มให้โปรแกรมสามารถปรับเปลี่ยนจำนวนช่วงและความยาวช่วงของแผ่นพื้น



บรรณานุกรม

1. บุญเจริญ ศิริเนาวกุล, ปัญญาประดิษฐ์ : ปัญญาเชิงกลุ่ม. 2012: สำนักพิมพ์ท็อป.
2. Sahab, M., A. Ashour, and V. Toropov, Cost optimisation of reinforced concrete flat slab buildings. *Engineering Structures*, 2005. 27(3): p. 313-322.
3. Kaveh, A. and O. Sabzi, A comparative study of two meta-heuristic algorithms for optimum design of reinforced concrete frames. *Int J Civil Eng*, 2011. 9(3): p. 193-206.
4. Jahjouh, M., M. Arafa, and M. Alqedra, Artificial Bee Colony (ABC) algorithm in the design optimization of RC continuous beams. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2013. 47(6): p. 963-979.
5. อัศนัย ทาภา จักรพันธ์ วงษ์พา อลงกรณ์ ละม่อม และ เรืองรุชดี ซีระโรจน์, การออกแบบที่เหมาะสมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ารับแรงดัดสองทางด้วยอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, 2013: p. 33-50.
6. อัศนัย ทาภา และ เรืองรุชดี ซีระโรจน์, การออกแบบหน้าตัดที่เหมาะสมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสี่เหลี่ยมผืนผ้ารับแรงดัดสองทางด้วยวิธีอานานิคมผึ้งประดิษฐ์. *วิศวกรรมลาดกระบัง*, 2015: p. 49-54.
7. Gheytratmand, C., S. Gholizadeh, and B. Vababzadeh, Optimization of RC frames by an improved artificial bee colony algorithm. *Int. J. Optim. Civil Eng*, 2015. 5(2): p. 189-203.
8. เอกราช ประกอบกิจ, การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมหิ่งห้อยในการออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก, in *คณะวิศวกรรมศาสตร์*. 2015, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ.
9. อัศนัย ทาภา และ เรืองรุชดี ซีระโรจน์, การออกแบบโครงสร้างข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงอนุภาคตามมาตรฐาน ACI318-08. *วิศวกรรมลาดกระบัง*, 2016: p. 117-124.
10. Tapao, A. and R. Cheerarot, Optimal parameters and performance of artificial bee colony algorithm for minimum cost design of reinforced concrete frames. *Engineering Structures*, 2017. 151: p. 802-820.
11. American Concrete Institute, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-14). 2014: ACI Committee 318.
12. วินิต ช่อวิเชียร และ วรนิติ ช่อวิเชียร, การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีกำลัง. 5th ed. 2011.
13. สถาพร โภคา, การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก (วิธีกำลัง). 2545: ไสยบุรี นาย.
14. สุธรรม สุริยะมงคล, การวิเคราะห์คานคอนกรีตเสริมเหล็กต่อเนื่อง. 1992.
15. McCormac, J.C. and R.H. Brown, Design of reinforced concrete. 9th ed. 2014: John Wiley & Sons.

16. Wight, J.K. and J.G. Macgregor, Reinforced concrete : mechanics and design. 6th ed. 2012: Pearson.
17. Yang, X.-S. Firefly algorithms for multimodal optimization. in International symposium on stochastic algorithms. 2009. Springer.
18. Yang, X.-S., Engineering Optimization: an introduction with metaheuristic applications. 2010: John Wiley & Sons.
19. Nilson, A.H., D. Darwin, and C.W. Dolan, Design of concrete structures. 14th ed. 2010: McGraw-Hill.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก.1 คำนวณโมเมนต์และแรงเฉือนของแผ่นพื้นในกรณีที่ 1 ด้วยวิธีออกแบบด้วยมือ

กำหนดค่า									
วัสดุ	f'_c	28	Mpa	ขนาดของแปลนพื้น	c_1	450	mm.		
	f_y	420	Mpa		c_2	450	mm.		
	f_{yv}	280	Mpa		l_1	6700	mm.		
ตัวคูณลดกำลัง	ϕ_c	0.90			l_2	6700	mm.		
	ϕ_v	0.75			L_c	3600	mm.		
น้ำหนักบรรทุก	DL	1.00	KN/m^2	น้ำหนักบรรทุก	LL	4.90	KN/m^2		
ความหนาแผ่นพื้นจากการคำนวณ			210			mm.			
ทิศทาง W-E					ทิศทาง N-S				
คำนวณโมเมนต์ลบประลัย									
เสา C1	แถบเสา	M_u	104.85	$KN - m$	เสา C1	แถบเสา	M_u	104.85	$KN - m$
	แถบกลาง	M_u	0.00	$KN - m$		แถบกลาง	M_u	0.00	$KN - m$
เสา C2	แถบเสา	M_u	156.06	$KN - m$	เสา C2	แถบเสา	M_u	81.98	$KN - m$
	แถบกลาง	M_u	52.02	$KN - m$		แถบกลาง	M_u	0.00	$KN - m$
เสา C3	แถบเสา	M_u	81.98	$KN - m$	เสา C3	แถบเสา	M_u	156.06	$KN - m$
	แถบกลาง	M_u	0.00	$KN - m$		แถบกลาง	M_u	52.02	$KN - m$
เสา C4	แถบเสา	M_u	314.10	$KN - m$	เสา C4	แถบเสา	M_u	314.10	$KN - m$
	แถบกลาง	M_u	104.70	$KN - m$		แถบกลาง	M_u	104.70	$KN - m$

ทิศทาง W-E					ทิศทาง N-S				
คำนวณโมเมนต์บวกประลัย									
เสา C1	แถบเสา	M_u	79.29	$KN - m$	เสา C1	แถบเสา	M_u	79.29	$KN - m$
	แถบกลาง	M_u	52.86	$KN - m$		แถบกลาง	M_u	52.86	$KN - m$
เสา C2	แถบเสา	M_u	66.79	$KN - m$	เสา C2	แถบเสา	M_u	186.43	$KN - m$
	แถบกลาง	M_u	44.53	$KN - m$		แถบกลาง	M_u	124.27	$KN - m$
เสา C3	แถบเสา	M_u	186.43	$KN - m$	เสา C3	แถบเสา	M_u	66.79	$KN - m$
	แถบกลาง	M_u	124.29	$KN - m$		แถบกลาง	M_u	44.53	$KN - m$
เสา C4	แถบเสา	M_u	136.24	$KN - m$	เสา C4	แถบเสา	M_u	136.24	$KN - m$
	แถบกลาง	M_u	90.83	$KN - m$		แถบกลาง	M_u	90.83	$KN - m$
คำนวณโมเมนต์ที่ส่งถ่ายด้วยการดัด									
เสา C1	แถบเสา	$\gamma_f M_{sc}$	62.91	$KN - m$	เสา C1	แถบเสา	$\gamma_f M_{sc}$	62.91	$KN - m$
เสา C2	แถบเสา	$\gamma_f M_{sc}$	8.04	$KN - m$	เสา C2	แถบเสา	$\gamma_f M_{sc}$	50.75	$KN - m$
เสา C3	แถบเสา	$\gamma_f M_{sc}$	50.75	$KN - m$	เสา C3	แถบเสา	$\gamma_f M_{sc}$	8.04	$KN - m$
เสา C4	แถบเสา	$\gamma_f M_{sc}$	12.13	$KN - m$	เสา C4	แถบเสา	$\gamma_f M_{sc}$	12.13	$KN - m$

ทิศทาง W-E				ทิศทาง N-S			
คำนวณแรงเฉือนทางเดียว							
เสา C1	V_u	158.96	<i>KN</i>	เสา C1	V_u	158.96	<i>KN</i>
	ϕV_n	429.32	<i>KN</i>		ϕV_n	429.32	<i>KN</i>
เสา C2	V_u	186.07	<i>KN</i>	เสา C2	V_u	320.26	<i>KN</i>
	ϕV_n	429.32	<i>KN</i>		ϕV_n	804.61	<i>KN</i>
เสา C3	V_u	320.26	<i>KN</i>	เสา C3	V_u	186.07	<i>KN</i>
	ϕV_n	804.61	<i>KN</i>		ϕV_n	429.32	<i>KN</i>
เสา C4	V_u	374.87	<i>KN</i>	เสา C4	V_u	374.87	<i>KN</i>
	ϕV_n	804.61	<i>KN</i>		ϕV_n	804.61	<i>KN</i>
คำนวณหน่วยแรงเฉือนสองทาง							
เสา C1	v_u	1.9147		<i>KN/m²</i>			
	ϕv_n	1.3096		<i>KN/m²</i>			
เสา C2	v_u	1.7799		<i>KN/m²</i>			
	ϕv_n	1.3096		<i>KN/m²</i>			
เสา C3	v_u	1.7799		<i>KN/m²</i>			
	ϕv_n	1.3096		<i>KN/m²</i>			
เสา C4	v_u	1.8348		<i>KN/m²</i>			
	ϕv_n	1.3096		<i>KN/m²</i>			

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	อรรณวุฒิ สุขสรรควณิช
วัน เดือน ปี เกิด	24 ธันวาคม 2534
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม จากมหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2557 และเข้ารับการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2559 และเข้ารับการศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2562



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY