



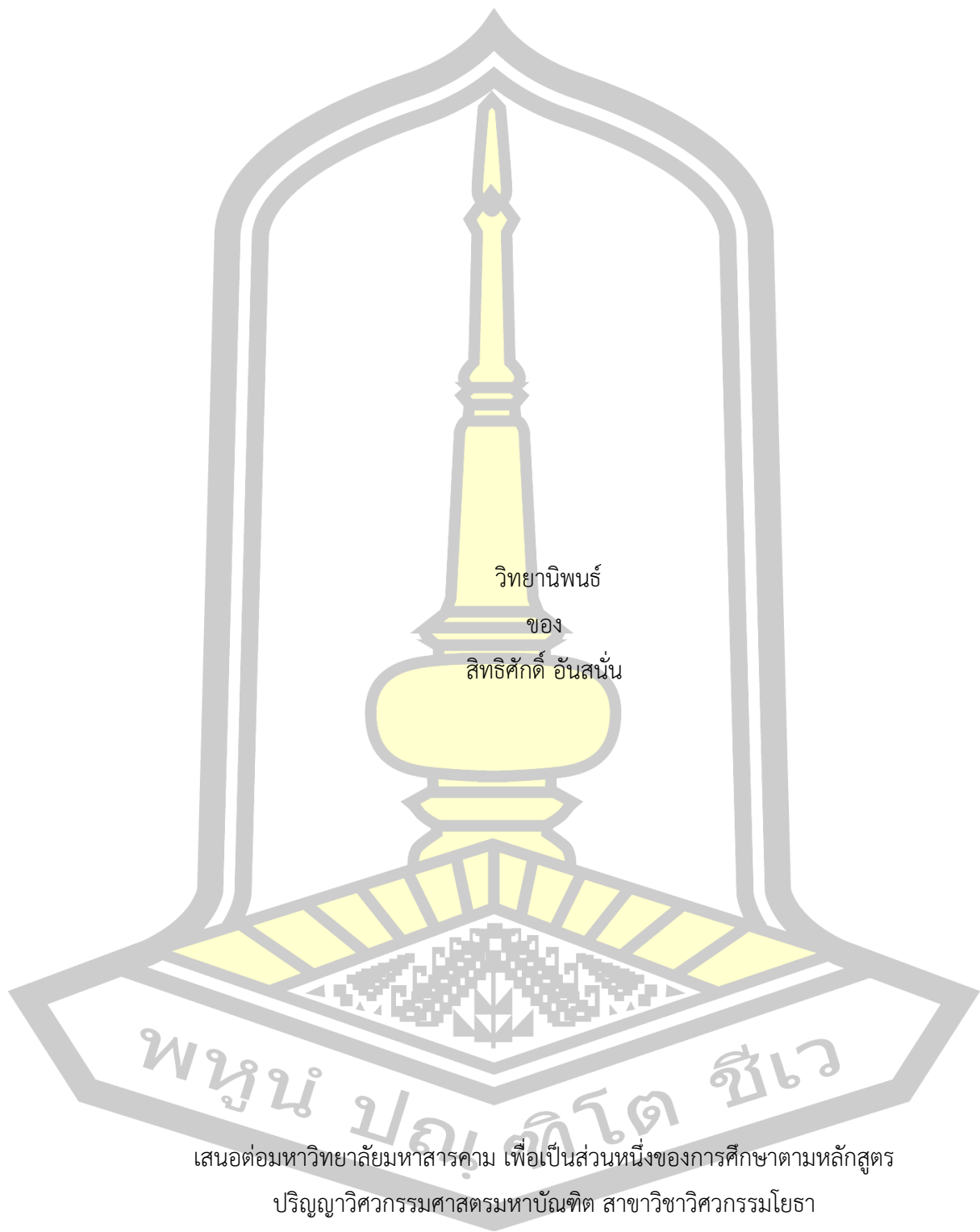
การออกแบบโครงสร้างเหล็กที่เหมาะสมด้วยเมตาฮิวริสติกอัลกอริทึม

วิทยานิพนธ์
ของ
สิทธิศักดิ์ อันสนั่น

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
พฤษภาคม 2563

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

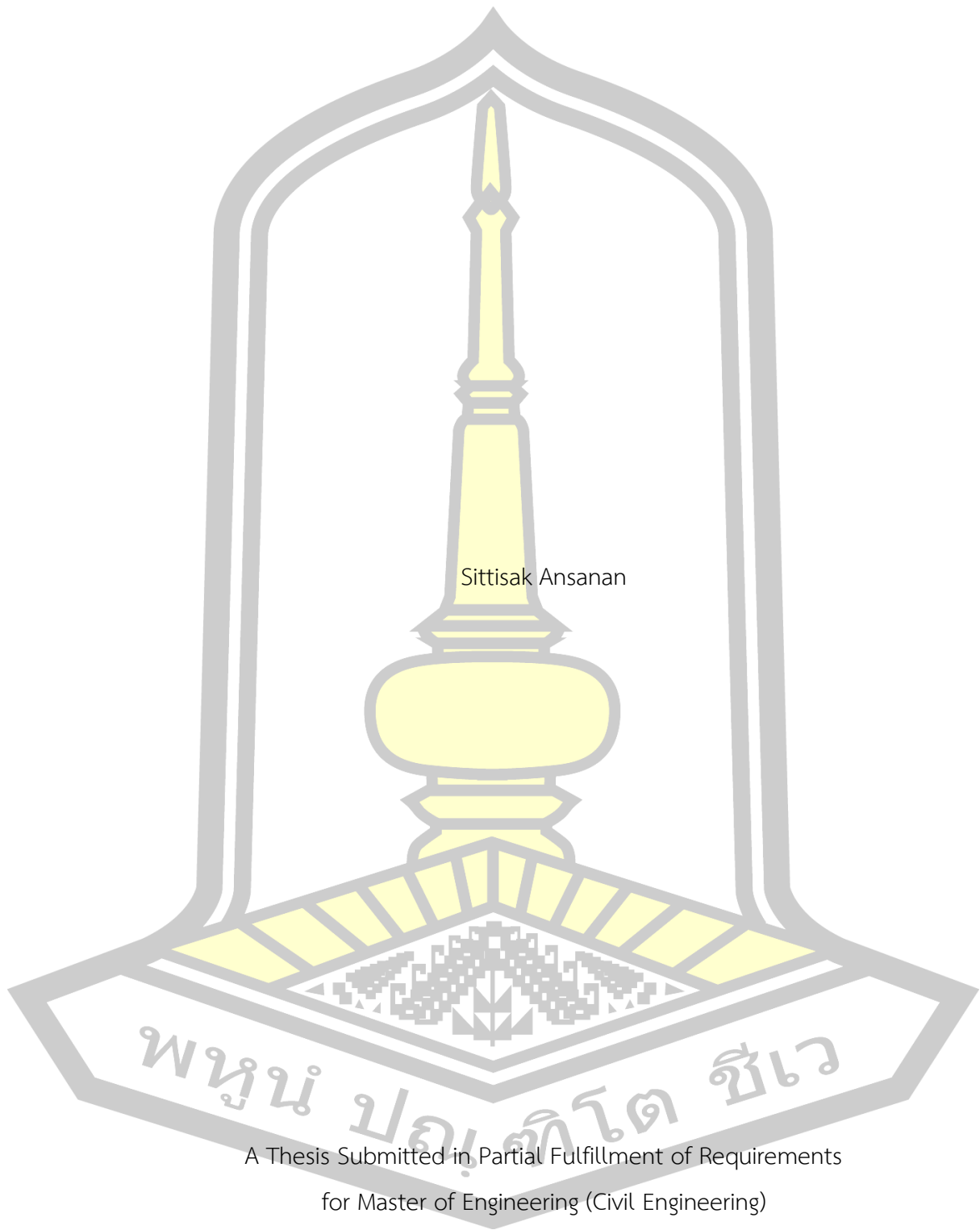
การออกแบบโครงสร้างหลักที่เหมาะสมด้วยเมตาดิวิรติกอัลกอริทึม



พฤษภาคม 2563

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Optimum Design of Steel Structures using Meta-Heuristic Algorithm



Sittisak Ansanan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Engineering (Civil Engineering)

May 2020

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายสิทธิศักดิ์ อันสนั่น
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. วันชัย สะตะ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. เรืองรุชต์ ชีระโรจน์)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. อลงกรณ์ ละม่อม)

.....กรรมการ

(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง การออกแบบโครงสร้างเหล็กที่เหมาะสมด้วยเมตาฮิวริสติกอัลกอริทึม
 ผู้วิจัย สิทธิศักดิ์ อันสนั่น
 อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. เรืองรุชดี ชีระโรจน์
 ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
 มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่พิมพ์ 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้เมตาฮิวริสติกอัลกอริทึมจำนวน 3 อัลกอริทึม ได้แก่ อัลกอริทึมการค้นหาแบบฮิลล์ อัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสีเทา และอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของวฬ สำหรับออกแบบโครงสร้างเหล็กที่เหมาะสมตามมาตรฐาน AISC วิธี LRFD ซึ่งในการออกแบบเลือกใช้หน้าตัดเหล็กจากตารางเหล็กมาตรฐานที่ระบุโดย AISC โดยอัลกอริทึมเหล่านี้ถูกพัฒนาโดยโปรแกรม Visual Studio 2015 สำหรับการตรวจสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมจะใช้ตัวอย่างการทดสอบทั้งหมดจำนวน 4 ตัวอย่าง ประกอบด้วย โครงข้อแข็ง 2 มิติ และ โครงข้อหมุน 2 มิติอย่างละ 2 ตัวอย่าง ซึ่งแต่ละอัลกอริทึมจะถูกทดสอบออกแบบตัวอย่างละ 10 ครั้ง และประสิทธิภาพของแต่ละวิธีการจะถูกเปรียบเทียบกับผลการทดสอบทางสถิติ จากผลการทดสอบทางสถิติพบว่า อัลกอริทึมการค้นหาแบบฮิลล์ เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพในการออกแบบโครงสร้างเหล็กที่เหมาะสมมากที่สุด เมื่อเทียบกับอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสีเทา และอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของวฬ

คำสำคัญ : อัลกอริทึมการค้นหาแบบฮิลล์, อัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสีเทา, อัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของวฬ

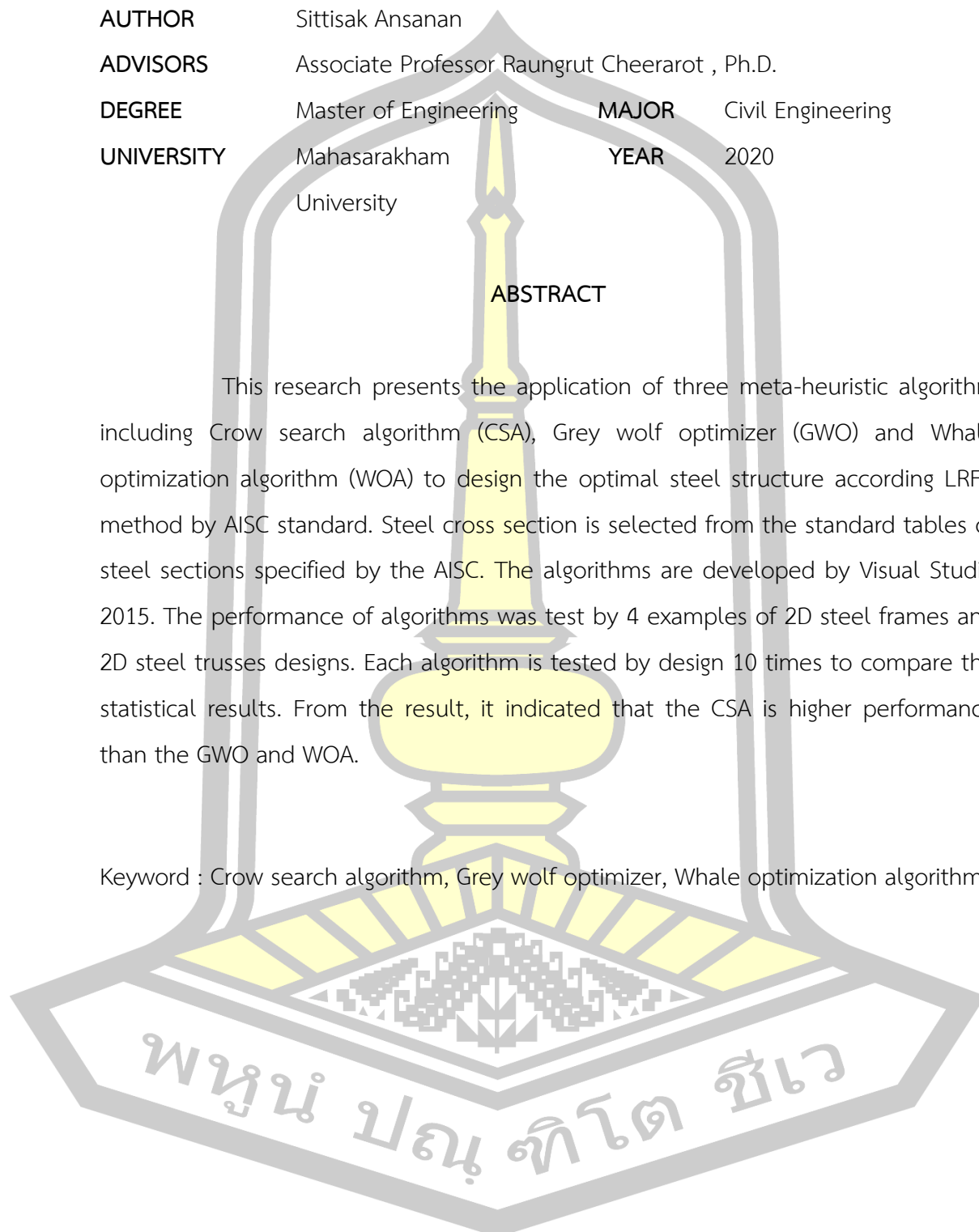
พูน ปณ สกิต ชีเว

TITLE Optimum Design of Steel Structures using Meta-Heuristic Algorithm
AUTHOR Sittisak Ansanan
ADVISORS Associate Professor Raungrut Cheerarot , Ph.D.
DEGREE Master of Engineering **MAJOR** Civil Engineering
UNIVERSITY Mahasarakham University **YEAR** 2020

ABSTRACT

This research presents the application of three meta-heuristic algorithm including Crow search algorithm (CSA), Grey wolf optimizer (GWO) and Whale optimization algorithm (WOA) to design the optimal steel structure according LRFD method by AISC standard. Steel cross section is selected from the standard tables of steel sections specified by the AISC. The algorithms are developed by Visual Studio 2015. The performance of algorithms was test by 4 examples of 2D steel frames and 2D steel trusses designs. Each algorithm is tested by design 10 times to compare the statistical results. From the result, it indicated that the CSA is higher performance than the GWO and WOA.

Keyword : Crow search algorithm, Grey wolf optimizer, Whale optimization algorithm



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถดำเนินการจนสำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.เรืองรุชดี ชีระโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์นิพนธ์ที่ช่วยแนะนำให้คำชี้แนะข้อมูลในการทำงานวิจัย ช่วยให้ข้อคิดข้อเสนอแนะในการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ และให้ความดูแลเอาใจใส่ในการศึกษางานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย สะตะ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ ละม่อม และรองศาสตราจารย์ ดร.กริสน์ ชัยมูล คณะกรรมการสอบที่ให้ความกรุณาและให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ซึ่งจะนำไปปรับปรุงแก้ไขงานวิจัยให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ซึ่งผู้วิจัยรู้สึกเป็นเกียรติอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. อัศนัย ทาเกา ที่คอยช่วยให้ข้อแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ซึ่งเป็นสถานที่ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของผู้จัดทำ ที่ได้ช่วยส่งเสริมสนับสนุน คอยเอาใจใส่ดูแล ให้กำลังใจและทุนทรัพย์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ ด้วยดี ตลอดมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณา และปรารถนาดีของทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

สิทธิศักดิ์ อันสนั่น

พูน ปณ ภิโต ชีเว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีเมทริกซ์.....	4
2.2 ทฤษฎีการออกแบบโครงสร้างเหล็กรับแรงดึง.....	8
2.3 ทฤษฎีการออกแบบโครงสร้างเหล็กรับแรงอัด	9
2.4 ทฤษฎีการออกแบบโครงสร้างเหล็กรับแรงดัด	11
2.5 ทฤษฎีการออกแบบโครงสร้างเหล็กรับแรงอัดและแรงดัดพร้อมกัน	16
2.6 อัลกอริทึมการค้นหาแบบอีกา (Crow search algorithm).....	18
2.7 อัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสีเทา (Grey wolf optimizer).....	20
2.8 อัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของวาฬ (The Whale optimization algorithm)	24
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	30

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	30
3.2 สมการเป้าหมาย	30
3.3 ขอบเขตการทำงานของโปรแกรม	31
3.4 ขั้นตอนการหาคำตอบที่เหมาะสมด้วยอัลกอริทึมการค้นหาแบบของอีกา	31
3.5 ขั้นตอนการหาคำตอบที่เหมาะสมด้วยอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสีเทา.....	34
3.6 ขั้นตอนการหาคำตอบที่เหมาะสมด้วยอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของวาฬ	36
3.7 ตัวอย่างที่ใช้และวิธีการทดสอบ	38
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	43
4.1 คำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการค้นหาแบบอีกา	43
4.2 คำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสีเทา.....	63
4.3 คำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของวาฬ	79
4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม	95
4.5 การเปรียบเทียบผลการออกแบบที่เหมาะสมกับงานวิจัยที่ผ่านมา	107
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	109
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	109
5.2 ข้อเสนอแนะ	111
บรรณานุกรม.....	111
ภาคผนวก.....	115
ประวัติผู้เขียน.....	149

พูน ปณ ภัโต ชีเว

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 อัตราส่วนความกว้างต่อความหนาขึ้นส่วนสำหรับเหล็กรูปตัว I ตามมาตรฐาน AISC.....	12
ตาราง 2 กลุ่มของขึ้นส่วนในตัวอย่างที่ 3 โครงข้อหมุน 10 ขึ้นส่วน.....	41
ตาราง 3 กลุ่มของขึ้นส่วนในตัวอย่างที่ 4 โครงข้อหมุน 18 ขึ้นส่วน.....	42
ตาราง 4 ผลการทดสอบการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 2 (โครงข้อแข็ง)	44
ตาราง 5 ผลการทดสอบการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 3 (โครงข้อหมุน)	45
ตาราง 6 ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 1.....	47
ตาราง 7 หน้าตัดที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 1.....	48
ตาราง 8 ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 2.....	49
ตาราง 9 หน้าตัดที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 2.....	50
ตาราง 10 ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดท่อ สี่เหลี่ยม	51
ตาราง 11 หน้าตัดที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม.....	52
ตาราง 12 ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดท่อ กลม.....	53
ตาราง 13 หน้าตัดที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดท่อกลม.....	54
ตาราง 14 ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดปีก กว้าง.....	55
ตาราง 15 หน้าตัดที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดปีกกว้าง.....	56
ตาราง 16 ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าตัดท่อ สี่เหลี่ยม	57
ตาราง 17 หน้าตัดที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม.....	58

ตาราง 54 คะแนนในด้านเวลาที่ใช้ในการออกแบบที่เหมาะสมของแต่ละอัลกอริทึม.....	102
ตาราง 55 สรุปคะแนนโดยรวมของแต่ละอัลกอริทึม.....	106
ตาราง 56 ผลการเปรียบเทียบคำตอบที่เหมาะสมของโครงข้อแข็งตัวอย่างที่ 1 กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	107
ตาราง 57 ผลการเปรียบเทียบคำตอบที่เหมาะสมของโครงข้อแข็งตัวอย่างที่ 2 กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	108



สารบัญภาพประกอบ

หน้า

ภาพประกอบ 1 แรงแยกในและระยะเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนโครงข้อหมุนในระนาบ 2 มิติ	5
ภาพประกอบ 2 แรงแยกในและระยะเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนโครงข้อแข็งในระนาบ 2 มิติ.....	7
ภาพประกอบ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแรงดัดระดับกับอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาชิ้นส่วน	11
ภาพประกอบ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแรงดัดระดับกับความยาวปราศจากการค้ำยันด้านข้าง ...	13
ภาพประกอบ 5 ผลของพารามิเตอร์ f_l กับระยะทางในการบินของอีกา.....	19
ภาพประกอบ 6 ลำดับชั้นทางสังคมของหมาป่าสีเทา	20
ภาพประกอบ 7 ตำแหน่งที่เป็นได้สำหรับการล้อมเหยื่อของหมาป่าสีเทาในปริภูมิการค้นหา 2 มิติและ 3 มิติ	22
ภาพประกอบ 8 การปรับปรุงตำแหน่งของหมาป่าสีเทา.....	23
ภาพประกอบ 9 การโจมตีเหยื่อและการค้นหาเหยื่อ.....	24
ภาพประกอบ 10 พฤติกรรมการฟั่นฟ่องอากาศของวาฬหลังค่อม	25
ภาพประกอบ 11 กลไกการล้อมเหยื่อแบบหัตถ์	26
ภาพประกอบ 12 กลไกการปรับปรุงตำแหน่งแบบเกลียว	27
ภาพประกอบ 13 แผนผังการหาคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการค้นหาแบบของอีกา	33
ภาพประกอบ 14 แผนผังการหาคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสีเทา.....	35
ภาพประกอบ 15 แผนผังการหาคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของวาฬ.....	37
ภาพประกอบ 16 โครงข้อแข็ง 2 ช่วงจำนวน 3 ชิ้น	39
ภาพประกอบ 17 โครงข้อแข็ง 1 ช่วงจำนวน 10 ชิ้น.....	40
ภาพประกอบ 18 ภาพประกอบ 3.6 โครงข้อหมุนจำนวนชิ้นส่วน 10 ชิ้นส่วน.....	41
ภาพประกอบ 19 โครงข้อหมุนจำนวนชิ้นส่วน 18 ชิ้นส่วน.....	42

ภาพประกอบ 20 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ CSA สำหรับโครงข้อแข็ง.....	46
ภาพประกอบ 21 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ CSA สำหรับโครงข้อหมุน	46
ภาพประกอบ 22 ลักษณะของการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 1 โครงข้อ แข็ง 2 ช่วง 3 ชั้น.....	48
ภาพประกอบ 23 ลักษณะของการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 2 โครงข้อ แข็ง 1 ช่วง 10 ชั้น	50
ภาพประกอบ 24 ลักษณะของการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 3 โครงข้อ หมุน 10 ชั้นส่วน โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม	52
ภาพประกอบ 25 ลักษณะของการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 3 โครงข้อ หมุน 10 ชั้นส่วน โดยใช้หน้าตัดท่อกกลม	54
ภาพประกอบ 26 ลักษณะของการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 3 โครงข้อ หมุน 10 ชั้นส่วน โดยใช้หน้าตัดปีกกว้าง	56
ภาพประกอบ 27 ลักษณะของการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 4 โครงข้อ หมุน 18 ชั้นส่วน โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม	58
ภาพประกอบ 28 ลักษณะของการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 4 โครงข้อ หมุน 18 ชั้นส่วน โดยใช้หน้าตัดท่อกกลม	60
ภาพประกอบ 29 ลักษณะของการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 4 โครงข้อ หมุน 18 ชั้นส่วน โดยใช้หน้าตัดท่อกกลม	62
ภาพประกอบ 30 ลักษณะของการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 1 โครงข้อ แข็ง 2 ช่วง 3 ชั้น.....	64
ภาพประกอบ 31 ลักษณะของการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 2 โครงข้อ แข็ง 1 ช่วง 10 ชั้น	66
ภาพประกอบ 32 ลักษณะของการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 3 โครงข้อ หมุน 10 ชั้นส่วน โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม	68
ภาพประกอบ 33 ลักษณะของการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 3 โครงข้อ หมุน 10 ชั้นส่วน โดยใช้หน้าตัดท่อกกลม	70

ภาพประกอบ 49 แผนภูมิคำตอบที่เหมาะสมของแต่ละอัลกอริทึมสำหรับตัวอย่างที่ 4	97
ภาพประกอบ 50 แผนภูมิเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการออกแบบที่เหมาะสมในแต่ละอัลกอริทึมสำหรับ	98
ภาพประกอบ 51 แผนภูมิเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการออกแบบที่เหมาะสมในแต่ละอัลกอริทึมสำหรับ	98
ภาพประกอบ 52 แผนภูมิเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการออกแบบที่เหมาะสมในแต่ละอัลกอริทึมสำหรับ ตัวอย่างที่ 3 สำหรับหน้าต่างท่อสี่เหลี่ยม	99
ภาพประกอบ 53 แผนภูมิเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการออกแบบที่เหมาะสมในแต่ละอัลกอริทึมสำหรับ ตัวอย่างที่ 3 สำหรับหน้าต่างกลม	99
ภาพประกอบ 54 แผนภูมิเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการออกแบบที่เหมาะสมในแต่ละอัลกอริทึมสำหรับ ตัวอย่างที่ 3 สำหรับหน้าต่างปีกกว้าง	100
ภาพประกอบ 55 แผนภูมิเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการออกแบบที่เหมาะสมในแต่ละอัลกอริทึมสำหรับ ตัวอย่างที่ 4 สำหรับหน้าต่างท่อสี่เหลี่ยม	100
ภาพประกอบ 56 แผนภูมิเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการออกแบบที่เหมาะสมในแต่ละอัลกอริทึมสำหรับ ตัวอย่างที่ 4 สำหรับหน้าต่างกลม	101
ภาพประกอบ 57 แผนภูมิเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการออกแบบที่เหมาะสมในแต่ละอัลกอริทึมสำหรับ ตัวอย่างที่ 4 สำหรับหน้าต่างปีกกว้าง	101



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเหล็กรูปพรรณถูกนำมาใช้ในการก่อสร้างอย่างแพร่หลาย ซึ่งวิศวกรโครงสร้างใช้เหล็กในการก่อสร้างอาคาร สะพาน หอถังสูง และโครงสร้างอื่นๆอีกมากมาย เนื่องจากความสะดวกและรวดเร็วเพราะไม่ต้องเสียเวลาในการตั้งแบบหล่อเสาและคาน นอกจากที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว โครงสร้างเหล็กยังมีข้อดีกว่าโครงสร้างประเภทอื่นอีกคือ มีกำลังต้านทานแรงอัดและแรงดึงสูงกว่า มีความยืดหยุ่นและทนต่อแรงกระแทกได้ดีกว่า อีกทั้งภายหลังจากการรื้อถอนสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และสุดท้ายโครงสร้างเหล็กมีน้ำหนักที่เบากว่าวัสดุอื่นเช่น คอนกรีต เมื่อต้องรับน้ำหนักบรรทุกเท่ากัน ซึ่งเหล็กโครงสร้างที่ใช้กันทั่วไปเป็นเหล็กผสมคาร์บอนและมีธาตุชนิดอื่นผสมอยู่เพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านต่างๆ เช่น แมงกานีส ซิลิคอน ทองแดง และอื่นๆ เป็นต้น ซึ่งธาตุเหล่านี้ช่วยเพิ่มกำลังในการรับแรง ความทนทานต่อการผุกร่อน ทำให้มีความเหนียวและมีความยืดหยุ่นมากขึ้น ซึ่งการออกแบบโครงสร้างเหล็กตามมาตรฐาน AISC สามารถแบ่งเป็น 3 วิธี คือ 1) วิธีกำลังที่ยอมให้ (Allowable stress design, ASD) เป็นวิธีการคำนวณออกแบบที่สภาวะใช้งาน กล่าวคือ ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน แรงต่างๆที่คำนวณได้จากการวิเคราะห์โดยทฤษฎีelasติกต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับความต้านทานขององค์อาคาร 2) วิธีอินelasติก (Inelastic design, ID) เป็นวิธีการออกแบบที่ใช้สภาวะการวิบัติ กล่าวคือ ภายใต้น้ำหนักบรรทุกประลัย แรงต่างๆที่คำนวณได้จากการวิเคราะห์โดยทฤษฎีอินelasติกต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับความต้านทานระบุขององค์อาคารคูณกับตัวคูณความต้านทาน และ 3) วิธีตัวคูณต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (Load and resistance factor design, LRFD) เป็นวิธีการออกแบบที่ใช้สภาวะจำกัด (Limit state) กล่าวคือ ภายใต้น้ำหนักบรรทุกประลัย แรงต่างๆที่คำนวณได้จากการวิเคราะห์โดยทฤษฎีelasติกจะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับความต้านทานระบุขององค์อาคารคูณกับตัวคูณความต้านทาน (ทักษิณ เทพชาตรี และอัศววัชร เล่นวารี, 2553) ซึ่งในการออกแบบวิศวกรโครงสร้างอาจสุ่มหน้าตัดของเหล็กขึ้นมา แล้วนำมาตรวจสอบว่าสามารถรับแรงได้ตามที่มาตรฐานกำหนดหรือไม่ ซึ่งวิธีนี้จะคำนึงถึงความปลอดภัยเพียงอย่างเดียว ดังนั้นเพื่อให้ผลออกมาประหยัดและสามารถรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการออกแบบอย่างเหมาะสมโดยใช้ เมตาฮิวริสติกอัลกอริทึม (Metaheuristic algorithm) เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ

การหาค่าที่เหมาะสมแบบเมตาฮิวริสติก (Metaheuristic optimization) ในช่วง 2 ทศวรรษที่ผ่านมาเป็นที่นิยมมาก เนื่องจากมีแนวคิดที่ค่อนข้างง่าย และมีความสามารถในการหลบหลีกค่าที่เหมาะสมเฉพาะแห่ง (Local optimum) ได้ดีซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะการค้นหาที่เป็นแบบสุ่ม (Mirjalili, Mirjalili, & Lewis, 2014) โดยอัลกอริทึมที่ทันสมัยและได้แรงบันดาลใจจากธรรมชาติจะเรียกว่า เมตาฮิวริสติก (Glover, 1986) ซึ่งเมตาฮิวริสติกที่เป็นที่นิยมสำหรับการนำมาแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมได้แก่ อัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมแบบอาณานิคมมด (Ant colony optimization, ACO) (C. V. Camp, Bichon, & Stovall, 2005; A Kaveh & Talatahari, 2010) อัลกอริทึมฮาร์โมนีเซิร์ช (Harmony search, HS) (S. O. Degertekin, 2008) อัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาค (Particle swarm optimization, PSO) (Doğan & Saka, 2012) อัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมแบบการระเบิดของจักรวาล (Big bang–big crunch optimization, BB–BC) (Erol & Eksin, 2006) และอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมแบบอาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ (Artificial bee colony optimization, ABC) (Sonmez, 2011) เป็นต้น สำหรับในงานวิจัยนี้จะใช้เมตาฮิวริสติกอัลกอริทึมซึ่งถูกนำเสนอเมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมาประกอบด้วย อัลกอริทึมการค้นหาแบบอีกา (Crow search algorithm, CSA) อัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสีเทา (Grey wolf optimizer, GWO) และอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของวาฬ (The Whale optimization algorithm, WOA)

อัลกอริทึมการค้นหาแบบอีกา (Askarzadeh, 2016) ซึ่งเป็นการจำลองพฤติกรรมที่ชาญฉลาดของอีกา โดยอีกาจะซ่อนอาหารที่เหลือของพวกมันไว้ในบางตำแหน่ง (สถานที่ซ่อน) และจะเอาอาหารที่เก็บไว้มากำหนดเมื่อจำเป็น ซึ่งอีกาเป็นนกที่โกล่กล่อมเนื่องจากพวกมันจะติดตามกันเพื่อที่จะได้แหล่งอาหารที่ดีขึ้น การหาแหล่งอาหารที่ซ่อนไว้โดยอีกาอีกตัวนั้นไม่ใช่เรื่องง่าย เพราะหากมันพบว่าอีกาตัวอื่นกำลังตามมา มันจะพยายามหาอาหารโดยไปยังตำแหน่งอื่นของสภาพแวดล้อม สำหรับอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสีเทา (Mirjalili et al., 2014) เป็นการจำลองการล่าเหยื่อแบบกลุ่มของหมาป่าสีเทา ซึ่งหมาป่าสีเทาจะล่าเหยื่อ (Hunting) และล้อมเหยื่อ (Encircling prey) จากนั้นจึงทำการโจมตีเหยื่อ (Attacking prey) ส่วนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของวาฬ (Mirjalili & Lewis, 2016) จำลองมาจากการล่าเหยื่อ (ฝูงกุ้งและฝูงปลาเล็ก) ของปลาวาฬหลังค่อม (Humpback whales) ซึ่งวาฬหลังค่อมจะใช้วิธีการล่าที่พิเศษ เรียกว่าการพ่นฟองอากาศ (Bubble-net) กล่าวคือเป็นการสร้างฟองอากาศที่มีลักษณะเฉพาะเป็นรูปเกลียว ซึ่งวาฬหลังค่อมจะว่ายน้ำลงไปที่ประมาณ 12 เมตรจากนั้นจึงเริ่มสร้างฟองอากาศที่มีลักษณะเป็นรูปเกลียวรอบฝูงเหยื่อเพื่อต้อนให้เหยื่อมารวมกัน และจากนั้นพวกมันจะว่ายน้ำขึ้นไปที่เหยื่อ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าอัลกอริทึมที่กล่าวมามีประสิทธิภาพในการหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันต่างๆ ดังนั้นในการศึกษานี้จะประยุกต์

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีเมทริกซ์ การออกแบบโครงสร้างเหล็ก (แรงอัด แรงดัด และแรงอัดและแรงดัดพร้อมกัน) อัลกอริทึมต่างๆที่ใช้หาคำตอบที่เหมาะสม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

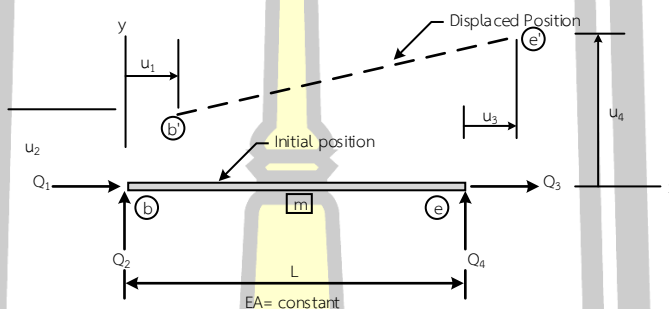
- 2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีเมทริกซ์
- 2.2 ทฤษฎีการออกแบบโครงสร้างเหล็กรับแรงดัด
- 2.3 ทฤษฎีการออกแบบโครงสร้างเหล็กรับแรงอัด
- 2.4 ทฤษฎีการออกแบบโครงสร้างเหล็กรับแรงดัด
- 2.5 ทฤษฎีการออกแบบโครงสร้างเหล็กรับแรงอัดและแรงดัดพร้อมกัน
- 2.6 อัลกอริทึมการค้นหาค่าที่เหมาะสม
- 2.7 อัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสี่ขา
- 2.8 อัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของวาฬ
- 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีเมทริกซ์

เมื่อพิจารณาโครงสร้างอาคาร จะเห็นได้ว่าชิ้นส่วนของอาคารจำนวนมากเช่น คานและเสา ถูกนำมาต่อเข้าด้วยกัน ซึ่งมีดีกรีอิสระ (Degree of freedom) เป็นอนันต์ จึงเป็นสิ่งที่ยุ่งยากมากในการวิเคราะห์แรงภายในในทุกชิ้นส่วน ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าวจึงมีการพัฒนาระบบการวิเคราะห์โครงสร้างขึ้น ซึ่งเรียกว่าวิธีเมทริกซ์สติฟเนส (Matrix stiffness method) โดยจะกำหนดให้การเคลื่อนที่ (Displacement) ของชิ้นส่วนเป็นตัวไม่รู้ค่า (Unknown) แล้วจึงใช้ความสัมพันธ์ระหว่างเมทริกซ์สติฟเนสกับการเคลื่อนที่คำนวณหาแรงภายในของชิ้นส่วน (Member forces) ซึ่งการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนในระนาบ 2 มิติจะขึ้นอยู่กับ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, E) และค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia, I) โดยแรงภายในและระยะเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนของโครงข้อหมุนและโครงข้อแข็งในระนาบ 2 มิติ สามารถวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้

2.1.1 โครงข้อหมุน (Plane trusses)

เมื่อชิ้นส่วนของโครงสร้างถูกแรงกระทำ จะทำความเครียดและความเค้นของชิ้นส่วน โครงสร้างแสดงออกมาในรูปแบบของการเคลื่อนที่ (Displacements) ซึ่งเราสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่มากกระทำ (Q) และการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วน (u) ได้โดยใช้หลักการของงานเสมือนสำหรับวัตถุที่สามารถเปลี่ยนรูปได้ เมื่อพิจารณาชิ้นส่วนของโครงข้อหมุนภายใต้แรง Q_1 ถึง Q_4 จะสมมุติให้ชิ้นส่วนเกิดการเคลื่อนที่ u_1 ถึง u_4 ดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 แรงภายในและระยะเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนโครงข้อหมุนในระนาบ 2 มิติ

เมื่อชิ้นส่วนของโครงสร้างถูกรวมเข้าด้วยกัน ชิ้นส่วนแต่ละชิ้นจะมีทิศทางที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องเปลี่ยนค่าสติฟเนสจากระบบ Local มาเป็น Global ทั้งหมด ซึ่งขั้นตอนในการวิเคราะห์โครงข้อหมุนมีดังนี้

1. คำนวณ Global stiffness ของแต่ละชิ้นส่วนด้วยสมการที่ (2.1)

$$K = T^T k T \quad (2.1)$$

เมื่อ k = Local stiffness matrix คำนวณได้ดังสมการที่ (2.2)

T = Transformation matrix คำนวณดังสมการที่ (2.3)

$$k = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$T = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

2. คำนวณหา Global displacement จากสมการที่ (2.4)

$$P = Sd \quad (2.4)$$

เมื่อ P = เมทริกซ์แรงภายนอกที่กระทำ

d = Global displacement matrix

S = Stiffness matrix

3. คำนวณค่า Local displacement จากสมการที่ (2.5)

$$u = Tv \quad (2.5)$$

เมื่อ u = เมทริกซ์ระยะการเคลื่อนที่ของโหนดในระบบ Local

V = เมทริกซ์ระยะการเคลื่อนที่ของโหนดในระบบ Global

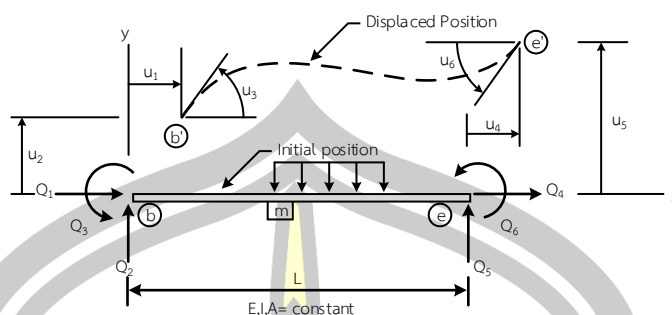
4. คำนวณแรงภายในจากสมการที่ (2.6)

$$Q = ku \quad (2.6)$$

เมื่อ Q = เมทริกซ์แรงภายในของชิ้นส่วน

2.1.2 โครงข้อแข็ง (Plane frames)

เมื่อชิ้นส่วนของโครงข้อแข็งถูกแรงภายนอกกระทำ ชิ้นส่วนจะเกิดการเสียรูปและแรงภายใน (แรงตามแนวแกน แรงเฉือน และโมเมนต์) จะเกิดขึ้น ซึ่งตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งสุดท้ายของชิ้นส่วนแสดงดังภาพประกอบ 2 ซึ่งเราสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่มากระทำ (Q) และการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วน (u) ได้โดยใช้หลักการเดียวกับโครงข้อหมุน กล่าวคือเมื่อพิจารณาชิ้นส่วนของโครงข้อหมุนภายใต้แรง Q_1 ถึง Q_6 จะสมมุติให้ชิ้นส่วนเกิดการเคลื่อนที่ u_1 ถึง u_6



ภาพประกอบ 2 แรงภายในและระยะเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนโครงข้อแข็งในระนาบ 2 มิติ

ลักษณะของโครงสร้างโครงข้อแข็งจะคล้ายกับโครงข้อหมุนคือ เมื่อชิ้นส่วนโครงสร้างถูกต่อเข้าด้วยกันจะมีทิศทางที่ต่างกัน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนความสัมพันธ์ของค่าสตีเฟนสากระบบ Local ไปยังระบบ Global เพื่อที่จะนำค่าสตีเฟนสมารวมเข้าด้วยกันแล้วทำการคำนวณค่าระยะการเคลื่อนที่ในระบบ Global ของแต่ละโหนด โดยขั้นตอนในการวิเคราะห์โครงข้อแข็งมีดังนี้

1. คำนวณ Global stiffness ของแต่ละชิ้นส่วนด้วยสมการที่ (2.7)

$$K = T^T k T \quad (2.7)$$

เมื่อ k = Local stiffness คำนวณได้ดังสมการที่ (2.8)

T = Transformation matrix คำนวณดังสมการที่ (2.9)

$$k = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} \frac{AL^2}{12} & 0 & 0 & -\frac{AL^2}{12} & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 6L & 0 & -12 & 6L \\ 0 & 6L & 4L^2 & 0 & -6L & 2L^2 \\ -\frac{AL^2}{12} & 0 & 0 & \frac{AL^2}{12} & 0 & 0 \\ 0 & -12 & -6L & 0 & 12 & -6L \\ 0 & 6L & 2L^2 & 0 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$T = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

2. คำนวณหา Global displacement จากสมการที่ (2.10)

$$P - P_f = Sd \quad (2.10)$$

เมื่อ P_f = Fix end moment

3. คำนวณค่า Local displacement จากสมการที่ (2.11)

$$u = Tv \quad (2.11)$$

4. คำนวณแรงภายในจากสมการที่ (2.12)

$$Q = ku \quad (2.12)$$

2.2 ทฤษฎีการออกแบบโครงสร้างเหล็กรับแรงดึง

การวิบัติเนื่องจากแรงดึงในองค์อาคารรับแรงดึงอาจเกิดขึ้นได้จาก 2 กรณี คือ การคราก (Yielding) บนพื้นที่หน้าตัดรวม และการขาด (Rupture) บนหน้าตัดสุทธิประสิทธิภาพ ณ จุดต่อ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะการวิบัติเนื่องจากการคราก โดยกำลังแรงดึงระบุ ที่นำไปใช้ในการออกแบบคำนวณได้จากสมการที่ (2.13)

$$\phi_{T_n} = \phi_{F_y} A_g \quad (2.13)$$

เมื่อ T_n = แรงดึงระบุ
 A_g = พื้นที่หน้าตัดรวม

F_y = หน่วยแรงคราก

ϕ = ตัวคูณความต้านทานมีค่าเท่ากับ 0.9

แม้ว่าในองค์อาคารรับแรงดึงไม่ต้องระวังเรื่องการโก่งเดาะ แต่เมื่อองค์อาคารมีค่าสติเฟนสน้อยหรือมีรูปร่างชะลูด มันอาจจะตกท้องช้างเนื่องจากน้ำหนักของมันเองหรือไหวตัวได้ง่ายภายใต้แรงกระทำด้านข้าง หรือการสั่นสะเทือน ดังนั้นมาตรฐาน AISC จึงแนะนำให้ใช้อัตราส่วนความชะลูด (Slenderness ratio) ขององค์อาคารรับแรงดึงดังสมการที่ (2.14)

$$\frac{KL}{r} \leq 300 \quad (2.14)$$

เมื่อ K = ค่าสัมประสิทธิ์ความยาวประสิทธิผล (มีค่าเท่ากับ 1)

L = ความยาวขององค์อาคารรับแรงดึง

r = รัศมีไจเรชั่นที่น้อยที่สุด = $\sqrt{I/A}$

I = โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัด

A = พื้นที่หน้าตัด

2.3 ทฤษฎีการออกแบบโครงสร้างเหล็กรับแรงอัด

องค์อาคารรับแรงอัดในงานวิจัยนี้ ขึ้นส่วนรับแรงตามแนวแกน และเสา ซึ่งมีมิติความยาวมากกว่ามิติของหน้าตัด ดังนั้นในการออกแบบองค์อาคารรับแรงอัดจะค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากกำลังรับน้ำหนักของเสาจะขึ้นอยู่กับ การโก่งเดาะ ลักษณะของการยิดที่ปลายเสา

2.3.1 การออกแบบองค์อาคารรับแรงอัด

กำลังรับแรงอัดระบุขององค์อาคารรับแรงอัดสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.15) ซึ่งมาตรฐาน AISC กำหนดให้ค่าอัตราส่วนชะลูด KL/r มีค่าไม่มากกว่า 200

$$\phi P_n = \phi F_c A_g \quad (2.15)$$

เมื่อ P_n = แรงอัดตามแนวแกนระบุ

F_{cr} = หน่วยแรงอัดวิกฤต โดยที่ F_{cr} พิจารณาจากสมการ (2.16) และ (2.17)

A_g = พื้นที่หน้าตัดรวม

ϕ = ตัวคูณความต้านทานมีค่าเท่ากับ 0.9

ในกรณีที่ $\lambda_c > 1.5$ เสาจะมีพฤติกรรมการโก่งเดาะในช่วงอีลาสติก แต่ถ้า $\lambda_c \leq 1.5$ เสาจะมีพฤติกรรมการโก่งเดาะในช่วงอีลาสติก ซึ่งมาตรฐาน AISC กำหนดให้ใช้หน่วยแรงอัดวิกฤตดังสมการที่ (2.16) และ (2.17) ตามลำดับ

$$F_{cr} = 0.877F_e \quad (2.16)$$

$$F_{cr} = 0.658^{F_y/F_e} F_y \quad (2.17)$$

เมื่อ λ_c = พารามิเตอร์ความชะลุดของเสา $= \sqrt{F_y/F_e}$

F_e = หน่วยแรงอัดอีลาสติกจากสมการของออยเลอร์ $= \pi^2 E / (KL/r)^2$

F_y = หน่วยแรงคราก

E = โมดูลัสยืดหยุ่น

K = สัมประสิทธิ์ความยาวประสิทธิผล

2.3.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความยาวประสิทธิผล

ค่าสัมประสิทธิ์ความยาวประสิทธิผลของโครงข้อแข็งที่มีการเคลื่อนที่ด้านข้างและไม่มี การเคลื่อนที่ด้านข้างสามารถประมาณได้ดังสมการที่ (2.18) และ (2.19) ตามลำดับ สมการนี้ พัฒนาขึ้นโดย Dumonteil (1993) ซึ่งมีความแม่นยำตั้งแต่ร้อยละ -1 ถึง 2 ของค่าที่ได้จาก Alignment charts ตามมาตรฐาน AISC

$$K = \sqrt{\frac{1.6G_A G_B + 4.0(G_A + G_B) + 7.5}{G_A + G_B + 7.5}} \quad (2.18)$$

$$K = \frac{3G_A G_B + 1.4(G_A + G_B) + 0.64}{3G_A G_B + 2.0(G_A + G_B) + 1.28} \quad (2.19)$$

ซึ่ง G_A และ G_B เป็นอัตราส่วนระหว่างผลรวมสติฟเนสของเสากับผลรวมสติฟเนสของคาน โดย สัญลักษณ์ A และ B ใช้แทนตำแหน่งปลายเสาทั้งสองข้าง คำนวณได้จากสมการที่ (2.20) นอกจากนี้

ในกรณีที่จตุรรองรับเป็นแบบยึดหมุนค่า G ที่คำนวณได้จะมีค่าเป็นอนันต์ (Infinity) ดังนั้นในทางปฏิบัติให้ใช้ค่า $G=10$ และในทำนองเดียวกัน เมื่อปลายเสามีจตุรรองรับแบบยึดแน่นค่า G จะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นในทางปฏิบัติให้ใช้ค่า $G=1$

$$G = \frac{\sum (EI/L)_c}{\sum (EI/L)_b} \quad (2.20)$$

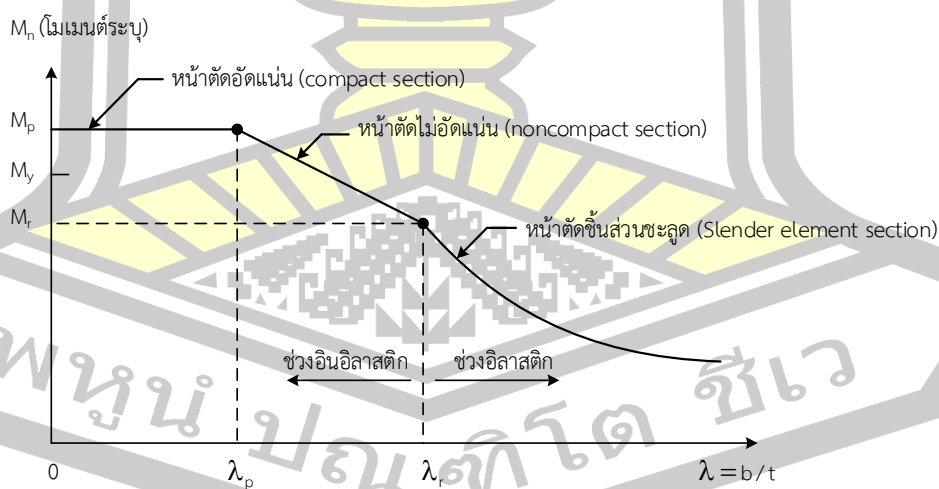
เมื่อ I = โมเมนต์อินเนอร์เซียของเสาและคาน

L = ความยาวของเสาและคาน

2.4 ทฤษฎีการออกแบบโครงสร้างเหล็กรับแรงดัด

2.4.1 กำลังรับแรงดัดระบุภายใต้การดัดในระนาบ

การจำแนกประเภทของคานสามารถจำแนกตามคุณสมบัติของหน้าตัดได้ 3 ประเภท คือ หน้าตัดอัดแน่น (Compact section) หน้าตัดไม่อัดแน่น (Noncompact section) และหน้าตัดชิ้นส่วนชะลูด (Slender element section) ซึ่งจำแนกได้โดยใช้อัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของชิ้นส่วน $\lambda = b/t$ ดังภาพประกอบ 3



ภาพประกอบ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดระบุกับอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาชิ้นส่วน

ตาราง 1 อัตราส่วนความกว้างต่อความหนาชิ้นส่วนสำหรับเหล็กโปรไฟล์ I ตามมาตรฐาน AISI

ชิ้นส่วน	λ	λ_p compact	λ_r noncompact
ปีกของหน้าตัด	$b_f / 2t_f$	$0.38 \sqrt{E/F_y}$	$1.0 \sqrt{E/F_y}$
เอวของหน้าตัด	h / t_w	$3.76 \sqrt{E/F_y}$	$5.70 \sqrt{E/F_y}$

2.4.1.1 คานหน้าตัดอัดแน่น (Compact section)

คานเหล็กรูปพรรณจะเป็นหน้าตัดอัดแน่นเมื่อ $\lambda_f \leq \lambda_{pf}$ และ $\lambda_w \leq \lambda_{pw}$ ซึ่งค่า λ_p ของหน้าตัดแสดงในตาราง 1 ซึ่งสามารถคำนวณกำลังรับแรงดัดระบุได้ดังสมการที่ (2.21)

$$M_n = M_p = F_y Z_x \quad (2.21)$$

เมื่อ M_n = กำลังแรงดัดระบุ
 M_p = โมเมนต์พลาสติก
 F_y = หน่วยแรงคราก
 Z_x = โมดูลัสพลาสติก

2.4.1.2 คานหน้าตัดไม่อัดแน่น (Noncompact section)

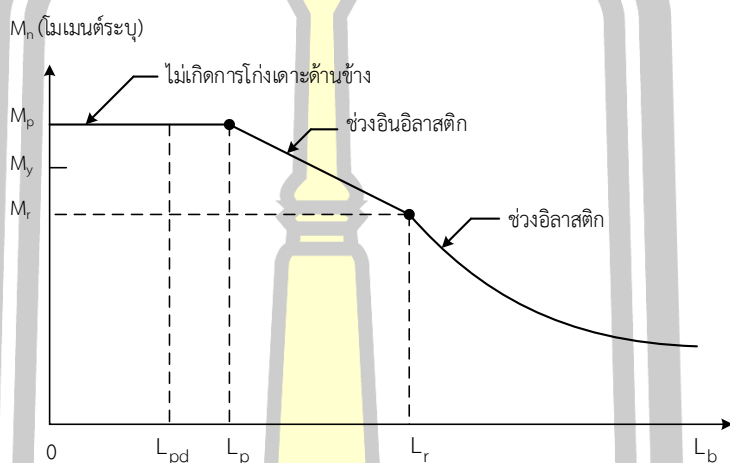
คานเหล็กรูปพรรณจะเป็นหน้าตัดอัดแน่นเมื่อ $\lambda_{pf} < \lambda_f \leq \lambda_{rf}$ หรือ $\lambda_{pw} < \lambda_w \leq \lambda_{rw}$ ซึ่งค่า λ_p ของหน้าตัดแสดงในตาราง 1 เนื่องจากทั้งปีกและเอวอาจเป็นหน้าตัดแบบไม่อัดแน่น ดังนั้นต้องทำการตรวจสอบกำลังรับแรงดัดของปีกและเอว โดยเลือกใช้ค่า M_n ที่น้อยกว่า ดังสมการที่ (2.22) และ M_r เป็นกำลังรับแรงดัดระบุเมื่อคานเปลี่ยนพฤติกรรมการดัดจากอีลาสติกเป็นอินอีลาสติก สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.23)

$$M_n = \left[M_p - (M_p - M_r) \left(\frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \right] \quad (2.22)$$

$$M_r = 0.7 F_y S_x \quad (2.23)$$

2.4.2 การโก่งดัดด้านข้างเนื่องจากการบิด

คานภายใต้การดัดในระนาบอาจการโก่งเดาะด้านข้างได้ เพราะมีแรงอัดเกิดขึ้นในปีกคาน ซึ่งจะเกิดขึ้นกับคานที่มีโมเมนต์อินเนอร์เซียรอบแกนรองน้อย และการยึดรั้งด้านข้างที่ไม่เพียงพอ โดยสามารถจำแนกพฤติกรรมของคานออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงพลาสติก ช่วงอินอีลาสติก และช่วงอีลาสติก ดังภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแรงดัดระบุกับความยาวปราศจากการค้ำยันด้านข้าง

2.4.2.1 กำลังแรงดัดระบุในช่วงอีลาสติก

กำลังแรงดัดระบุในช่วงอินอีลาสติกเกิดขึ้นเมื่อ $L_b > L_r$ โดยมาตรฐาน AISI กำหนดให้กำลังแรงดัดระบุเนื่องจากการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิดคำนวณได้ดังสมการที่ (2.24) ถึง (2.29)

$$L_r = 1.95 r_{ts} \frac{E}{0.7 F_y} \sqrt{A + \sqrt{A^2 + 6.76 \left(\frac{0.70 F_y}{E} \right)^2}} \quad (2.24)$$

$$M_n = F_{cr} S_x \quad (2.25)$$

โดยที่

$$F_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{(L_b / r_{ts})^2} \sqrt{1 + 0.078 A \left(\frac{L_b}{r_{ts}} \right)^2} \quad (2.26)$$

$$C_w = \frac{h_o^2 I_y}{4} \quad (2.27)$$

$$A = \frac{J_c}{S_x h_o} \quad (2.28)$$

$$r_{ts}^2 = \frac{\sqrt{I_y C_w}}{S_x} \quad (2.29)$$

เมื่อ h_o = ระยะระหว่างแกนศูนย์กลางของปีกบนและปีกล่าง
 $c = 1$

2.4.2.2 กำลังแรงดัดระบุในช่วงอินอีลาสติก

กำลังแรงดัดระบุในช่วงอินอีลาสติกเกิดขึ้นเมื่อ $L_p < L_b \leq L_r$ โดยมาตรฐาน AISC กำหนดให้กำลังแรงดัดระบุเนื่องจากการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิดแปรเปลี่ยนเป็นเส้นตรง ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.30) โดยที่ M_r มีค่าดังสมการที่ (2.31)

$$M_n = C_b \left[M_p - (M_p - M_r) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \quad (2.30)$$

$$M_r = 0.70 F_y S_x \quad (2.31)$$

โดยที่

$$C_b = \frac{15.2 M_{\max}}{5.2 M_{\max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C} R_m \leq 3.0 \quad (2.32)$$

เมื่อ C_b = ตัวคูณปรับค่าสำหรับการโก่งเดาะด้านข้าง

$M_{\max}$ = ค่าสัมบูรณ์ของโมเมนต์สูงสุดในช่วงความยาวที่ปราศจากการยึดรั้ง

M_A = ค่าสัมบูรณ์ของโมเมนต์ที่จุก 1/4 ของความยาว

M_B = ค่าสัมบูรณ์ของโมเมนต์ที่จุก 1/2 ของความยาว

M_C = ค่าสัมบูรณ์ของโมเมนต์ที่จุก 3/4 ของความยาว

R_m = พารามิเตอร์ความสมมาตรเท่ากับ 1.0 สำหรับหน้าตัดสมมาตรสอง

แกน

สำหรับค่า L_p คำนวณได้ดังสมการที่ (2.33) ในกรณีที่หน้าตัดอัดแน่น และสมการที่ (2.34) ในกรณีที่

ชิ้นส่วนเอวไม่อัดแน่น

$$L_p = 1.76r_y \sqrt{E/F_y} \quad (2.33)$$

$$L_p = 1.1r_t \sqrt{E/F_y} \quad (2.34)$$

โดยที่

$$r_t = \frac{b_{fc}}{\sqrt{12 \left(\frac{h_o}{d} + \frac{1}{6} a_w \frac{h^2}{h_o d} \right)}} \quad (2.35)$$

$$a_w = h_c t_w / b_{fc} t_{fc} \quad (2.36)$$

เมื่อ b_{fc} = ความกว้างของปีกรับแรงอัด

t_{fc} = ความหนาของปีกรับแรงอัด

h_c = สองเท่าของระยะจากแกนศูนย์ถ่วงของหน้าตัดถึงผิวของคอนกรีต

รับแรงอัด ลบด้วยระยะรัศมีของมุมโค้ง

2.4.3 กำลังแรงเฉือน

กำลังแรงเฉือนของหน้าตัดคานสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.37)

$$V_n = 0.60 F_y A_w C_v \quad (2.37)$$

เมื่อ V_n = กำลังแรงเฉือนระบุ

A_w = พื้นที่หน้าตัดเอวส่วนที่รับแรงเฉือน

C_v = ค่าสัมประสิทธิ์การเฉือนของเอว

โดยค่าสัมประสิทธิ์การเฉือนของหน้าตัดรูปตัว I ที่มีค่า $h/t_w \leq 2.24 \sqrt{E/F_y}$ จะมี

ค่า $C_v = 1$ $\phi_v = 1$

2.5 ทฤษฎีการออกแบบโครงสร้างเหล็กรับแรงอัดและแรงดัดพร้อมกัน

โครงสร้างคาน-เสา เป็นการรวมโครงสร้างที่รับแรงตามแนวแกนและโครงสร้างรับแรงดัดเข้าด้วยกัน ดังนั้นพฤติกรรมการรับแรงจะมีการรวมผลของโมเมนต์ลำดับสอง ($P\Delta$ effect) ดังนั้นการวิบัติของคาน-เสาส่วนใหญ่ จึงเป็นแบบการโก่งตัวด้านข้าง ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างนั้นต้องรับโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิม ดังนั้นมาตรฐาน AISC จึงกำหนดสมการสำหรับการคำนวณออกแบบโครงสร้างคาน-เสา ดังสมการที่ (2.38) และ (2.39)

$$\frac{P_r}{P_c} \geq 0.2; \frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (2.38)$$

$$\frac{P_r}{P_c} < 0.2; \frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (2.39)$$

เมื่อ P_r = กำลังแรงอัดตามแนวแกนที่ต้องการ
 P_c = กำลังแรงอัดตามแนวแกนที่สามารถรับได้
 M_r = กำลังแรงดัดที่ต้องการ
 M_c = กำลังแรงดัดที่สามารถรับได้

ในการวิเคราะห์ความเสถียร มาตรฐาน AISC กำหนดให้ใช้วิธีการวิเคราะห์ลำดับสองซึ่งทำได้ 2 วิธีได้แก่ วิธีวิเคราะห์ฮิสตริกโดยตรงที่รวมผลของ $P\delta$ และ $P\Delta$ ในขั้นตอนการวิเคราะห์แล้ว โดยได้จากการขยายผลจากการวิเคราะห์ฮิสตริกลำดับหนึ่ง เนื่องจากการวิเคราะห์ฮิสตริกลำดับที่หนึ่งไม่ได้คิดถึงผลของ $P\delta$ และ $P\Delta$ ดังนั้นจึงต้องคูณ B_1 และ B_2 กับแรงที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้าง ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ (2.40) และ (2.41)

$$M_r = B_1 M_{nt} + B_2 M_{lt} \quad (2.40)$$

$$P_r = P_{nt} + B_2 P_{lt} \quad (2.41)$$

เมื่อ M_{nt} = กำลังแรงดัดปรับค่าลำดับหนึ่งเมื่อโครงอาคารไม่มีการเคลื่อนตัวด้านข้าง

M_{lt} = กำลังแรงดัดปรับค่าลำดับหนึ่งเมื่อโครงอาคารมีการเคลื่อนตัวด้านข้าง

P_{nt} = กำลังแรงอัดตามแนวแกนปรับค่าลำดับหนึ่งเมื่อโครงอาคารไม่มีการเคลื่อนตัวด้านข้าง

P_{lt} = กำลังแรงอัดตามแนวแกนปรับค่าลำดับหนึ่งเมื่อโครงอาคารมีการเคลื่อนตัวด้านข้าง

สำหรับค่า B_1 และ B_2 คำนวณได้ดังสมการที่ (2.42) และ (2.43)

$$B_1 = \frac{C_m}{1 - \alpha P_r / P_{e1}} \geq 1 \quad (2.42)$$

$$B_2 = \frac{1}{1 - \alpha P_{story} / P_{estory}} \geq 1 \quad (2.43)$$

เมื่อ P_{story} = ผลรวมของน้ำหนักกระทำในแนวดิ่งของเสาทุกต้นในชั้น

P_{estory} = ผลรวมการโก่งเดาะอิลาสติกของเสาทุกต้นในชั้น = $\sum P_{e2}$

$$P_{e1} = \frac{\pi EA}{(K_1 L / r)^2} \quad (2.44)$$

$$\sum P_{e2} = \sum \frac{\pi EA}{(K_2 L / r)^2} = R_M \times HL / \Delta_H \quad (2.45)$$

โดยที่ $K_1 \leq 1$ ซึ่งคำนวณจากกรณีไม่มีการเคลื่อนที่ที่ปลาย และ $K_2 \geq 1$ ซึ่งคำนวณจากกรณีมีการเคลื่อนที่ที่ปลาย

เมื่อ H = แรงเฉือนในทิศทางการเคลื่อนที่ของชั้นที่ใช้ในการคำนวณ

$$R_M = 1 - 0.15(P_{mf} / P_{story})$$

P_{mf} = ผลรวมของน้ำหนักกระทำในแนวดิ่งของเสาทุกต้นในชั้นที่เป็นส่วนหนึ่งของโครงข้อแข็ง จะมีค่าเท่า 0 สำหรับโครงสร้างที่มีการยึดตั้ง

Δ_H = ระยะเคลื่อนที่ในแนวราบระหว่างชั้นลำดับหนึ่ง (first-order inter-story drift)

$$\alpha = 1.00$$

ซึ่ง C_m คือ สัมประสิทธิ์ที่ใช้คูณกับโมเมนต์ค่านวนได้ดังสมการที่ (2.46) และมีค่าเป็น 1.00 เมื่อปลายหมุนได้และมีน้ำหนักกระทำในช่วงความยาวเสา และมีค่าเท่ากับ 0.85 เมื่อปลายถูกยึดไม่ให้หมุน

$$C_m = 0.6 - 0.4 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) \quad (2.46)$$

โดยที่ $M_1 \leq M_2$ และ $\frac{M_1}{M_2}$ มีค่าเป็นบวกเมื่อคานเกิดความโค้ง

2.6 อัลกอริทึมการค้นหาแบบอีกา (Crow search algorithm)

อัลกอริทึมการค้นหาแบบอีกา (Crow search algorithm, CSA) นำเสนอครั้งแรกโดย Askarzadeh (2016) ซึ่งเป็นการจำลองพฤติกรรมที่ชาญฉลาดของอีกา โดยในฝูงอีกานั้นมีพฤติกรรมซึ่งคล้ายคลึงกับกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมอย่างมาก กล่าวคืออีกาจะซ่อนอาหารที่เหลือของพวกมันไว้ในบางตำแหน่ง (สถานที่ซ่อน) และจะนำเอาอาหารที่เก็บไว้มาใช้เมื่อยามจำเป็น ซึ่งอีกาเป็นนกที่โลภมากเนื่องจากพวกมันจะติดตามกันเพื่อที่จะได้แหล่งอาหารที่ดี การหาแหล่งอาหารที่ซ่อนไว้โดยอีกานั้นไม่ใช่เรื่องง่าย เพราะหากมันพบว่าอีกาตัวอื่นกำลังตามมา มันจะพยายามหาอาหารโดยไปที่ตำแหน่งอื่นของสภาพแวดล้อม

อีกาถือว่าเป็นสัตว์ที่ฉลาดที่สุดในโลก พวกมันมีสมองที่ใหญ่ที่สุดเมื่อเทียบกับขนาดตัวของมัน ซึ่งมันสามารถจดจำใบหน้าและเตือนภัยซึ่งกันและกันเมื่อมีสิ่งที่ไม่เป็นมิตรเข้ามา นอกจากนี้พวกมันยังสามารถสื่อสารกันด้วยวิธีการที่ซับซ้อน และจดจำที่สถานที่เก็บซ่อนอาหารของพวกมันได้ ซึ่งอีกาจะคอยสังเกตดูนกตัวอื่นเพื่อที่จะซ่อนอาหารของมันและจะขโมยอาหารเมื่อเจ้าของออกไป ซึ่งอีกาจะใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษ เช่น การย้ายสถานที่ซ่อนอาหารของพวกมันเพื่อหลีกเลี่ยงการตกเป็นเหยื่อของอีกาตัวอื่นในอนาคต โดยพวกมันจะใช้ประสบการณ์ของพวกมันในการทำนายพฤติกรรมของอีกาตัวอื่นๆที่จะมาขโมยอาหารและสามารถกำหนดเส้นทางที่ปลอดภัยที่สุดเพื่อป้องกันสถานที่เก็บอาหารของพวกมันจากการถูกขโมย โดยอัลกอริทึมการค้นหาแบบอีกามีขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.6.1 การสร้างตำแหน่งและหน่วยความจำของการเริ่มต้น

ตำแหน่งเริ่มต้นของกาจะถูกสร้างโดยการสุ่มทั่วพื้นที่การค้นหา โดยกาแต่ละตัวจะถือว่าเป็นคำตอบที่เป็นไปได้ของปัญหา และมีจำนวนของตัวแปรการตัดสินใจ d ซึ่งในรอบการทำซ้ำเริ่มต้นกาจะไม่มีประสบการณ์ในการเก็บอาหาร จึงสมมุติให้พวกมันเก็บซ่อนอาหารไว้ในตำแหน่งเริ่มต้น

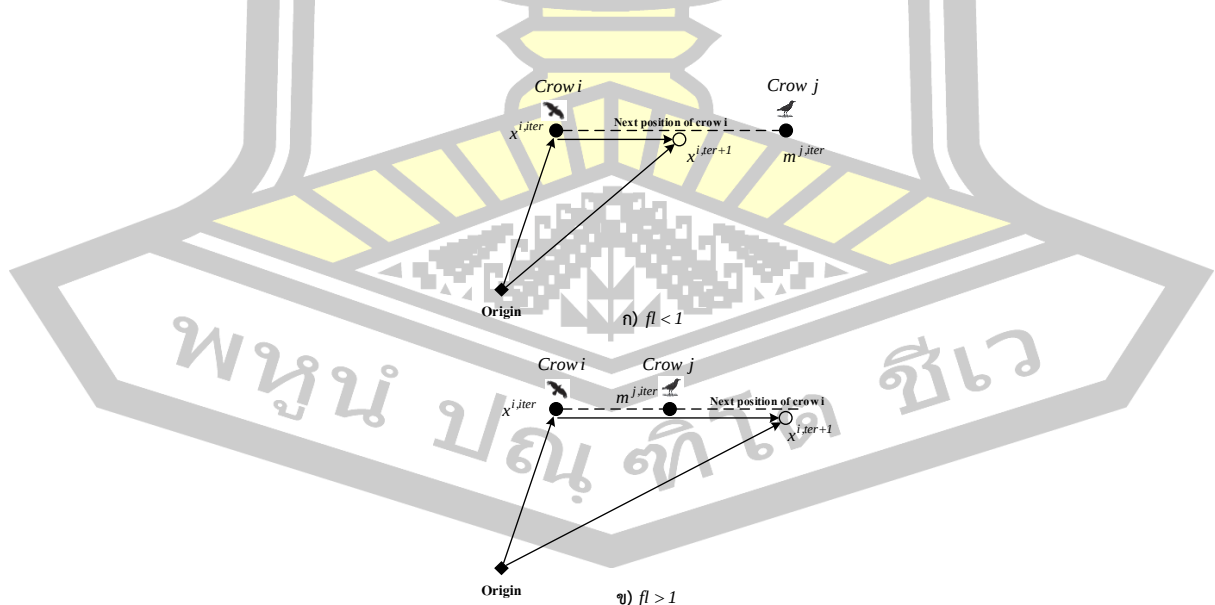
2.6.2 การสร้างตำแหน่งใหม่

ตำแหน่งใหม่ของกาจะมี 2 กรณี คือ ในกรณีที่ 1 อีกาตัวที่ j ไม่รู้ว่าอีกาตัวที่ i ตามมา ดังนั้นทำให้อีกาตัวที่ i ขยับเข้าใกล้สถานที่เก็บซ่อนอาหารของอีกาตัวที่ j สำหรับกรณีที่ 2 อีกาตัวที่ j รู้ว่าอีกาตัวที่ i ตามมา ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันสถานที่เก็บซ่อนอาหารของมันไม่ให้อีกาตัวที่ i มาขโมยอาหาร อีกาตัวที่ j จะหลอกให้อีกาตัวที่ i ไปยังตำแหน่งอื่น ซึ่งทั้ง 2 กรณีที่กล่าวมานี้จะถูกแบ่งโดยใช้พารามิเตอร์ความรู้ของอีกา (AP) หาก $AP \geq \text{random } [0,1]$ ตำแหน่งใหม่ของอีกาตัวที่ i จะถูกสร้างโดยใช้สมการที่ (2.47) ซึ่งหมายถึง อีกาตัวที่ j ไม่รู้ว่าอีกาตัวที่ i ตามมา (กรณีที่ 1) แต่ถ้านอกเหนือจากนี้ ตำแหน่งใหม่ของอีกาตัวที่ i จะถูกสร้างโดยการสุ่มดังสมการที่ (2.48)

$$x^{i, \text{iter}+1} = x^{i, \text{iter}} + r \cdot fl^{i, \text{iter}} (m^{j, \text{iter}} - x^{i, \text{iter}}) \quad (2.47)$$

$$x^{i, \text{iter}+1} = \text{a random position} \quad (2.48)$$

เมื่อ $x^{i, \text{iter}+1}$ คือ ตำแหน่งใหม่ของอีกาตัวที่ i $x^{i, \text{iter}}$ คือ ตำแหน่งปัจจุบันของอีกาตัวที่ i r คือ ค่าสุ่มแบบกระจายมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 $m^{j, \text{iter}}$ คือ ตำแหน่งที่อีกาตัวที่ j เก็บซ่อนอาหารของมันเอาไว้ $fl^{i, \text{iter}}$ คือ ค่าพารามิเตอร์ระยะทางในการบินของอีกาตัวที่ i ถ้า $fl^{i, \text{iter}} < 1$ ตำแหน่งใหม่ของอีกาตัวที่ i จะอยู่บนเส้นประระหว่าง $x^{i, \text{iter}}$ และ $m^{j, \text{iter}}$ ดังภาพประกอบ 5(ก) แต่ถ้าหาก $fl^{i, \text{iter}} > 1$ ตำแหน่งใหม่ของอีกาตัวที่ i จะเป็นดังภาพประกอบ 5(ข)



ภาพประกอบ 5 ผลของพารามิเตอร์ fl กับระยะทางในการบินของอีกา

2.6.3 การปรับปรุงหน่วยความจำของอีกา

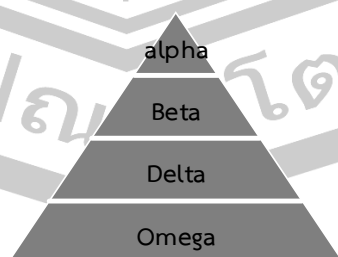
ถ้าหากกาตัวที่ i พบแหล่งอาหารใหม่ที่ดีกว่าแหล่งเดิมโดยพิจารณาจากค่าความเหมาะสม (Fitness) หน่วยความจำของอีกาจะถูกปรับปรุงดังสมการที่ (2.49)

$$\begin{aligned} m^{i,iter+1} &= x^{i,iter+1}, \text{ if } f(x^{i,iter+1}) \text{ is better than } f(m^{i,iter}) \\ m^{i,iter+1} &= m^{i,iter}, \text{ otherwise} \end{aligned} \quad (2.49)$$

เมื่อ $f(x^{i,iter+1})$ คือ ค่าความเหมาะสมเฉพาะตัวของอีกาตัวที่ i ณ ตำแหน่งใหม่ $f(m^{i,iter})$ คือ ค่าความเหมาะสมเฉพาะตัวของหน่วยความจำของอีกาตัวที่ i

2.7 อัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสีเทา (Grey wolf optimizer)

อัลกอริทึมหมาป่าสีเทานำเสนอครั้งแรกโดย Mirjalili et al. (2014) โดยหมาป่าสีเทา (Canis lupus) จัดอยู่ในวงศ์ Canidae ซึ่งถือเป็นนักล่าส่วนปลาย กล่าวคือหมาป่าสีเทาอยู่บนสุดของห่วงโซ่อาหาร ซึ่งจะอยู่รวมกันเป็นฝูงโดยมีขนาดของฝูงเฉลี่ยอยู่ที่ 5-12 ตัว สิ่งที่น่าสนใจเป็นพิเศษคือ พวกมันมีลำดับชั้นทางสังคมที่เคร่งครัดมากดังแสดงในภาพประกอบ 6 โดยผู้นำตัวผู้และตัวเมียจะเรียกว่า แอลฟา (alpha) ซึ่งจะรับผิดชอบในการตัดสินใจเกี่ยวกับการล่าเหยื่อ สถานที่นอน เวลาตื่นนอน และอื่นๆ ลำดับที่ 2 ในลำดับชั้นทางสังคมของหมาป่าสีเทาจะเรียกว่า เบต้า (Beta) ซึ่งอยู่ใต้บังคับบัญชาของแอลฟา โดยจะช่วยตัดสินใจหรือช่วยกิจกรรมของฝูงด้านอื่นๆ หมาป่าเบต้าสามารถเป็นได้ทั้งตัวผู้และตัวเมีย และอาจเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดในการเป็นแอลฟาในกรณีที่ แอลฟาตัวหนึ่งตายไปหรือแก่ตัวมาก อันดับต่ำสุดคือ โอเมก้า (Omega) เป็นหมาป่าตัวสุดท้ายที่จะได้กินอาหาร หมาป่าเดลต้า (Delta) จะอยู่เหนือโอเมก้าและอยู่ต่ำกว่าแอลฟาและเบต้า ซึ่งหมาป่าเดลต้าจะเป็นหมาป่าสอดแนม ฝ้าดูอาณาเขตและแจ้งเตือนอันตรายให้กับฝูง



ภาพประกอบ 6 ลำดับชั้นทางสังคมของหมาป่าสีเทา

นอกเหนือจากลำดับชั้นทางสังคมของหมาป่าสีแล้ว การล่าเหยื่อแบบกลุ่มเป็นอีกหนึ่งพฤติกรรมทางสังคมที่น่าสนใจ โดยขั้นตอนการล่าเหยื่อของหมาป่าสีเทาจะเริ่มจากการติดตามและการเข้าหาเหยื่อ จากนั้นจะไล่ตาม ล้อมเหยื่อ และก่อกวนเหยื่อจนกว่าเหยื่อจะหยุดเคลื่อนไหว และนำไปสู่การโจมตีเหยื่อ

2.7.1 ลำดับชั้นทางสังคม (Social hierarchy)

พิจารณาให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเป็นหมาป่าแอลฟา ดังนั้นคำตอบที่ดีที่สุดอันดับสองและสามจะพิจารณาให้เป็นหมาป่าเบต้าและเดลต้าตามลำดับ ซึ่งในอัลกอริทึมนี้การล่าเหยื่อของฝูงจะถูกชี้นำโดยหมาป่าทั้งสามลำดับชั้นที่กล่าวมา

2.7.2 การล้อมเหยื่อ (Encircling prey)

พฤติกรรมการล้อมเหยื่อของฝูงหมาป่าสีเทาในทางคณิตศาสตร์สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.50) และ (2.51)

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (2.50)$$

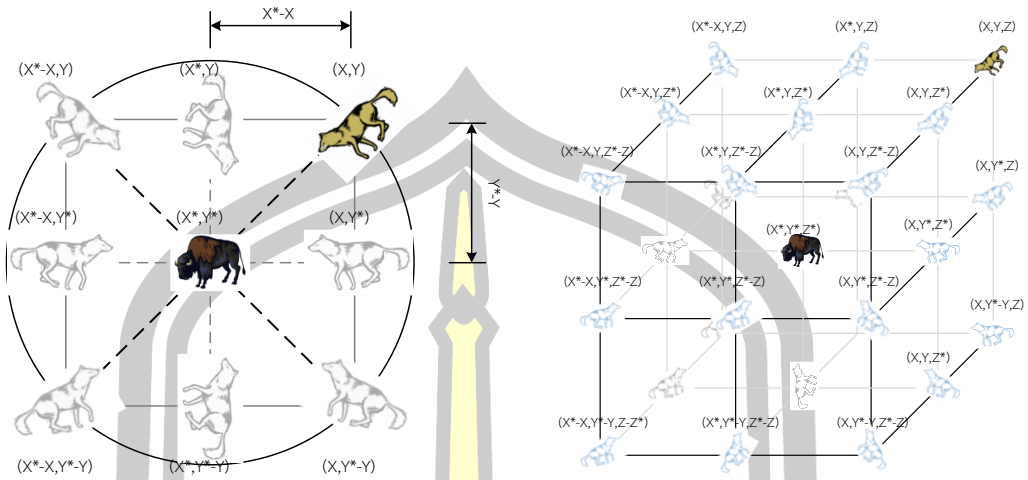
$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (2.51)$$

เมื่อ t คือ จำนวนรอบการทำงานปัจจุบัน $\vec{X}_p$ คือ ตำแหน่งของเหยื่อ $\vec{X}$ คือ ตำแหน่งของหมาป่าสีเทา $\vec{D}$ คือระยะทางระหว่างเหยื่อและหมาป่าสีเทา $\vec{A}$ และ $\vec{C}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์เวกเตอร์ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ (2.52) และ (2.53) โดยที่ $\vec{a}$ คือ ค่าที่ลดลงเชิงเส้นจาก 2 ถึง 0 ในรอบการทำงาน $\vec{r}_1, \vec{r}_2$ คือ ค่าสุ่มในช่วง $[0,1]$

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (2.52)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r}_2 \quad (2.53)$$

หมาป่าสีเทาสามารถปรับปรุงตำแหน่งของมันเองรอบเหยื่อในตำแหน่งสุ่มใดๆ โดยใช้สมการที่ (2.50) และ (2.51) ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจรูปแบบของสมการ มากขึ้น ตำแหน่งของหมาป่าสีเทาและตำแหน่งใกล้เคียงที่เป็นไปได้จะแสดงดังภาพประกอบ 7 เมื่อ (X,Y) และ (X,Y,Z) คือตำแหน่งของหมาป่าสีเทาในปริภูมิการค้นหา 2 มิติ และ 3 มิติ ตามลำดับ



ภาพประกอบ 7 ตำแหน่งที่เป็นได้สำหรับการล้อมเหยื่อของหมาป่าสีเทาในปริภูมิการค้นหา 2 มิติและ 3 มิติ

2.7.3 การล่าเหยื่อ (Hunting)

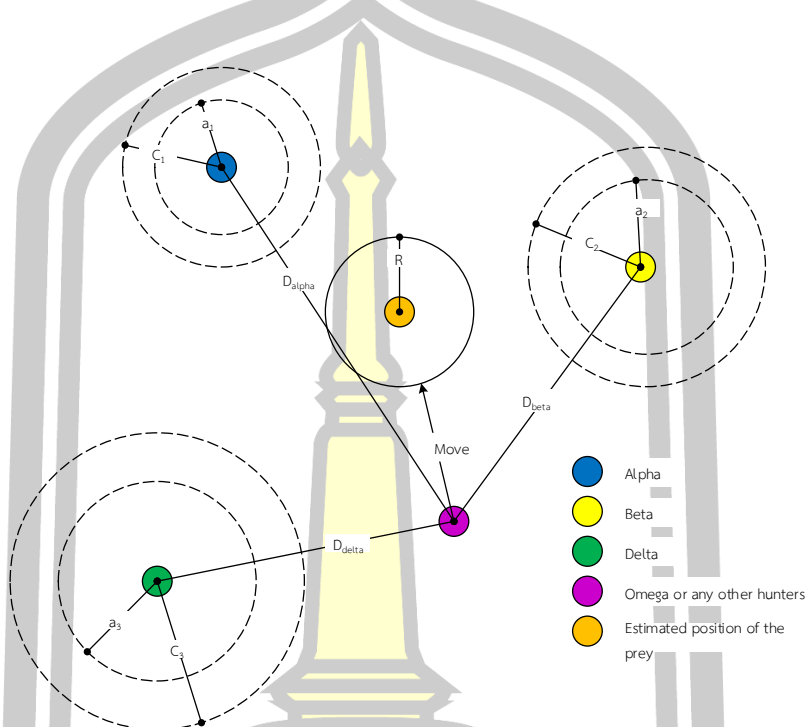
หมาป่าสีเทามีความสามารถในการระบุตำแหน่งของเหยื่อและล้อมเหยื่อพวกนั้นไว้ โดยในการล่าแต่ละครั้งจะถูกนำโดยหมาป่าแอลฟาและในบางครั้งหมาป่าเบต้าและเดลต้าอาจจะมีส่วนร่วมด้วย และในการจำลองพฤติกรรมการล่าเหยื่อของหมาป่าสีเทาทางคณิตศาสตร์ จะสมมุติว่าหมาป่าแอลฟา (คำตอบที่ดีที่สุด) เบต้า และ เดลต้า รู้ตำแหน่งของเหยื่อเป็นอย่างดี ดังนั้นจึงทำการบันทึกคำตอบที่ดีที่สุดสามอันดับแรก และให้ตัวแทนการค้นหาค้นหาอื่น (รวมถึงหมาป่าโอเมก้า) ปรับปรุงตำแหน่งของตนตามตำแหน่งของตัวแทนการค้นหาค้นหาที่ดีที่สุด ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.54) ถึง (2.56)

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (2.54)$$

โดยที่ $\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot \vec{D}_\alpha, \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot \vec{D}_\beta, \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot \vec{D}_\delta \quad (2.55)$

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}|, \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}|, \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}| \quad (2.56)$$

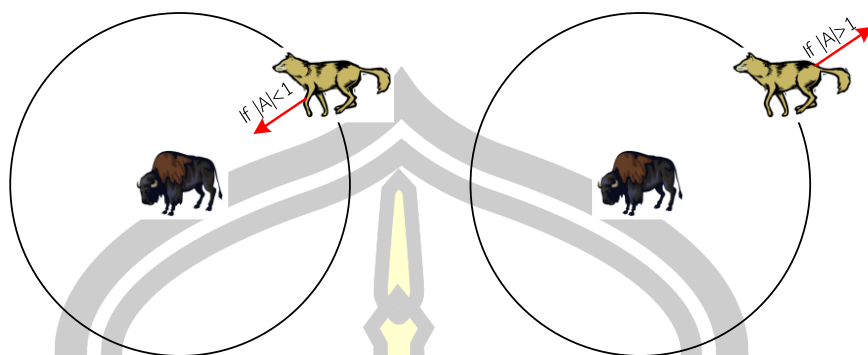
ภาพประกอบ 8 แสดงการปรับปรุงตำแหน่งของตัวแทนการค้นหาตามหมาป่าแอลฟา เบต้า และเดลต้า ในปริภูมิการค้นหา 2 มิติ โดยตำแหน่งของหมาป่าโอเมก้าจะขยับเข้าหาเหยื่อ ซึ่งถูกล้อมรอบด้วยตำแหน่งของหมาป่า แอลฟา เบต้า และเดลต้า



ภาพประกอบ 8 การปรับปรุงตำแหน่งของหมาป่าสีเทา

2.7.4 การโจมตีเหยื่อ (Attacking prey)

ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น หมาป่าสีเทาจะโจมตีเหยื่อเมื่อเหยื่อหยุดเคลื่อนไหว และเพื่อให้หมาป่าสีเทาในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เคลื่อนที่เข้าหาเหยื่อ จะทำการลดค่าของ $\vec{a}$ ซึ่งกระบวนการนี้จะทำให้ค่าความผันผวนของสัมประสิทธิ์ $\vec{A}$ ลดลงด้วย กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ $\vec{A}$ คือ ค่าสุ่มในช่วง $[-2a, 2a]$ เมื่อ $\vec{a}$ คือ ค่าที่ลดลงเชิงเส้นจาก 2 ถึง 0 ในแต่ละรอบการทำซ้ำ และเมื่อ $\vec{A}$ มีค่าอยู่ในช่วง $[-1, 1]$ ตำแหน่งต่อไปของตัวแทนการค้นหาวงจะอยู่ตำแหน่งใดก็ได้ระหว่างตำแหน่งปัจจุบันและตำแหน่งของเหยื่อดังภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 การโจมตีเหยื่อและการค้นหาเหยื่อ

2.7.5 การค้นหาเหยื่อ (Search for prey)

หมาป่าสีเทาจะค้นหาตามตำแหน่งของแอลฟา เบต้า และเดลต้า ซึ่งพวกมันจะแยกกันไปค้นหาเหยื่อแล้วจะมารวมกันเพื่อโจมตีเหยื่อ ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตัวแทนการค้นหาจะออกห่างจากเหยื่อเมื่อ A มีค่ามากกว่า 1 หรือน้อยกว่า -1

ส่วนประกอบของอัลกอริทึมหมาป่าสีเทาที่ช่วยในการค้นหาคือเวกเตอร์ C เมื่อ C คือค่าสุ่มระหว่าง 0 ถึง 2 ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ (2.53) โดยส่วนประกอบนี้จะให้น้ำหนักกับเหยื่อโดยการสุ่ม ถ้า $C > 1$ จะให้น้ำหนักกับเหยื่อ แต่ถ้า $C < 1$ จะไม่ให้น้ำหนักกับเหยื่อ ซึ่งจะมีผลในการกำหนดทิศทางดังสมการที่ (2.51) วิธีนี้จะทำให้ อัลกอริทึมหมาป่าสีเทามีพฤติกรรมแบบสุ่มเพื่อหลีกเลี่ยงคำตอบที่เหมาะสมเฉพาะแห่ง (Local optimum)

2.8 อัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของวาฬ (The Whale optimization algorithm)

Mirjalili และ Lewis (2016) ได้นำเสนออัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของวาฬในปี ค.ศ. 2016 ซึ่งวาฬเป็นสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่ใหญ่ที่สุดในโลก วาฬตัวที่โตเต็มวัยมีความยาวประมาณ 30 เมตร และหนัก 180 ตัน โดยมีสายพันธุ์หลักอยู่ 7 สายพันธุ์ วาฬส่วนใหญ่จะเป็นผู้ล่า พวกมันไม่เคยนอนเพราะต้องหายใจบนผิวน้ำตลอดเวลา แต่ในความเป็นจริงแล้วในเวลาที่พวกมันหลับมันจะใช้สมองครึ่งเดียว สิ่งที่น่าสนใจของวาฬคือ พวกมันเป็นสัตว์ที่ฉลาดและมีอารมณ์ เพราะวาฬมีเซลล์สมองในบางพื้นที่คล้ายกับของมนุษย์ เรียกว่า Spindle cell ซึ่งเซลล์เหล่านี้จะมีหน้าที่รับผิดชอบในด้านการตัดสินใจ อารมณ์ และพฤติกรรมทางสังคมของมนุษย์ สำหรับวาฬนั้นจะมีเซลล์เหล่านี้มากกว่าของมนุษย์ 2 เท่า ซึ่งเป็นสาเหตุหลักในความฉลาดของพวกมัน และได้รับการพิสูจน์แล้วว่าวาฬสามารถ

คิด เรียนรู้ ตัดสินใจ สื่อสาร และมีอารมณ์เหมือนมนุษย์ แต่วาฬมีความฉลาดน้อยกว่ามาก และวาฬสามารถพัฒนาภาษาของตนเองได้ (ซึ่งโดยส่วนใหญ่เป็นการสังเกตจากวาฬเพชรฆาต)

อีกประเด็นที่น่าสนใจคือ พฤติกรรมทางสังคมของวาฬ ซึ่งพวกมันอาจจะอยู่ตัวเดียวหรืออาจอยู่กันเป็นกลุ่ม หนึ่งในวาฬที่ใหญ่ที่สุดคือ วาฬหลังค่อม (Humpback whales) ซึ่งตัวที่โตเต็มวัยมีขนาดใหญ่เกือบเท่ากับรถโรงเรียน และเหยื่อที่พวกมันชอบคือฝูงกุ้งและฝูงปลาขนาดเล็ก โดยวาฬหลังค่อมมีวิธีการล่าที่พิเศษที่เรียกว่า การพ่นฟองอากาศ (Bubble-net) ซึ่งพวกมันชอบล่าฝูงกุ้งและฝูงปลาบริเวณผิวน้ำ โดยพบว่าการหาอาหารวิธีนี้ทำได้โดยการสร้างฟองอากาศที่มีลักษณะเฉพาะตามแนววงกลมเพื่อต้อนฝูงปลาและกุ้งให้มาอยู่รวมกันดังภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 พฤติกรรมการพ่นฟองอากาศของวาฬหลังค่อม

2.8.1 การล้อมเหยื่อ (Encircling prey)

อัลกอริทึมวาฬจะสมมุติว่าคำตอบที่ดีที่สุดในปัจจุบันคือ เหยื่อที่เป็นเป้าหมายหรือค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสม โดยหลังจากการกำหนดตัวแทนการค้นหาค่าที่ดีที่สุดแล้ว ตัวแทนการค้นหาอื่นจะพยายามปรับปรุงตำแหน่งของตนไปยังตัวแทนการค้นหาค่าที่ดีที่สุด ซึ่งพฤติกรรมที่กล่าวมาสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2.57) และ (2.58)

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (2.57)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (2.58)$$

เมื่อ $\vec{X}^*$ คือ ตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุด

$\vec{X}$ คือ ตำแหน่งปัจจุบัน

t คือ รอบการทำซ้ำปัจจุบัน

$\vec{A}, \vec{D}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งหาได้จากสมการที่ (2.59) และ (2.60)

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \quad (2.59)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r} \quad (2.60)$$

เมื่อ $\vec{a}$ คือ ค่าที่ลดลงเป็นเส้นตรงจาก 2 ถึง 0 ทุกๆรอบการทำซ้ำ

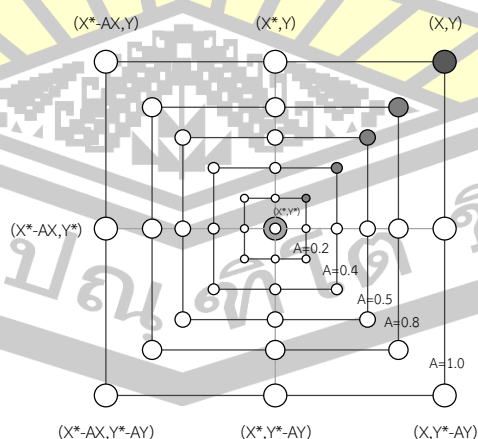
$\vec{r}$ คือ ค่าสุ่มระหว่าง 0 ถึง 1

2.8.2 วิธีการโจมตีโดยการพันพองอากาศ (Bubble-net attacking method)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพฤติกรรมการบินพองอากาศของวาฬหลังค่อมมีการออกแบบให้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงไว้ 2 วิธีดังนี้

2.8.2.1 กลไกการล้อมเหยื่อแบบหดตัว (Shrinking encircling mechanism)

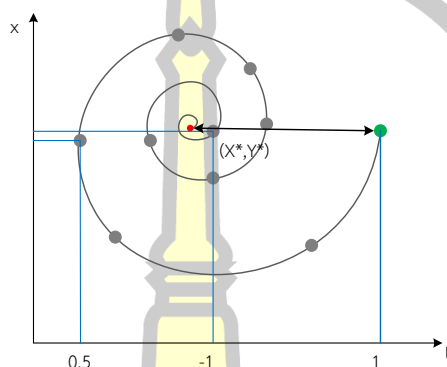
วิธีนี้สามารถทำได้โดยการลดค่า $\vec{a}$ ในสมการที่ (2.59) โดยช่วงความผันผวนของค่าสัมประสิทธิ์ $\vec{A}$ จะลดลงด้วย ซึ่งกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ $\vec{A}$ คือค่าสุ่มในช่วง $[-a, a]$ โดยที่ $\vec{a}$ จะลดลงจาก 2 ถึง 0 ในทุกรอบการทำซ้ำ และค่าสัมประสิทธิ์ $\vec{A}$ มีค่าอยู่ในช่วง $[-1, 1]$ ซึ่งตำแหน่งใหม่ของตัวแทนการค้นหาคำนวณได้ทุกทีระหว่างตำแหน่งเดิมกับตำแหน่งที่ดีที่สุดในปัจจุบัน ดังภาพประกอบ 11 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งที่เป็นไปได้จาก (X, Y) ไปยัง (X^*, Y^*) เมื่อ $\vec{A}$ มีค่าอยู่ในช่วง



ภาพประกอบ 11 กลไกการล้อมเหยื่อแบบหดตัว

2.8.2.2 การปรับปรุงตำแหน่งแบบเกลียว (Spiral updating position)

โดยขั้นตอนแรกจะคำนวณระยะห่างและสร้างสมการแบบเกลียว ระหว่างตำแหน่งของวาฬ (X,Y) และเหยื่อ (X*,Y*) เพื่อเลียนแบบการเคลื่อนที่แบบเกลียวของวาฬหลังค่อมซึ่งแสดงดังภาพประกอบ 12 และคำนวณได้ดังสมการที่ (2.61)



ภาพประกอบ 12 กลไกการปรับปรุงตำแหน่งแบบเกลียว

$$\vec{X}(t+1) = \vec{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) \quad (2.61)$$

$$\vec{D}' = |\vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (2.62)$$

โดยที่ b คือ ค่าคงที่สำหรับกำหนดรูปร่างของเกลียวลอการิทึม (Logarithm)

l คือ ค่าสุ่มระหว่าง -1 ถึง 1

วาฬหลังค่อมว่ายน้ำรอบเหยื่อเป็นวงกลมที่ค่อยๆ หดตัวและว่ายน้ำเป็นเกลียวในเวลาเดียวกัน ซึ่งในการสร้างแบบจำลองที่เกิดขึ้นพร้อมกันนี้ เราจะคิดว่ามีความเป็นไปได้ร้อยละ 50 ที่จะเลือกระหว่างกลไกการล้อมเหยื่อแบบหดตัวกับการปรับปรุงตำแหน่งแบบเกลียว ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (2.63)

$$\begin{aligned} \vec{X}(t+1) &= \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} & \text{If } p < 0.5 \\ \vec{X}(t+1) &= \vec{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) & \text{If } p \geq 0.5 \end{aligned} \quad (2.63)$$

เมื่อ p คือ ค่าสุ่มระหว่าง 0 ถึง 1

2.8.2.3 การค้นหาเหยื่อ (Search for prey)

วาทหลังค่อมจะค้นหาเหยื่อแบบสุ่มตามตำแหน่งของมันและกัน โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.65) ซึ่งกลไกนี้เป็นกลไกสำหรับการค้นหาวางกว้าง (Global search) ของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของวาท

$$\vec{D} = \vec{C} \cdot \vec{X}_{rand} - \vec{X} \quad (2.64)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_{rand} - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (2.65)$$

เมื่อ $\vec{X}_{rand}$ คือ ตำแหน่งที่ได้จากการสุ่ม

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Toğan (2012) ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้อัลกอริทึม Teaching–Learning based optimization (TLBO) สำหรับหาค่าที่เหมาะสมของโครงข้อแข็งเหล็ก ซึ่ง TLBO เป็นการจำลองปฏิสัมพันธ์ทางสังคมของครูและนักเรียนในชั้นเรียน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาน้ำหนักที่น้อยที่สุดของโครงสร้าง โดยเป็นไปตามมาตรฐาน AISC วิธี LRFD สำหรับการออกแบบโครงสร้างเหล็กจะใช้เหล็กหน้าตัด W จากตารางเหล็กตามที่มาตรฐาน AISC กำหนดไว้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างในการทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่างจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำผลการออกแบบมาเปรียบเทียบกับผลการออกแบบที่เหมาะสมด้วยอัลกอริทึม GA ACO HS และ IACO ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ TLBO ที่มีเหนือกว่าอัลกอริทึมข้างต้นที่นำมาเปรียบเทียบ

Farshchin และคณะ (2018) ได้นำอัลกอริทึม School based optimization (SBO) มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงข้อแข็งเหล็กเพื่อหาน้ำหนักที่น้อยที่สุด โดยออกแบบตามมาตรฐาน AISC วิธี LRFD สำหรับ SBO เป็นอัลกอริทึมแบบเมตาฮิวริสติกที่จำลองมาจากระบบการเรียนการสอนที่มีห้องเรียนจำนวนมากในโรงเรียน โดยประสิทธิภาพของ SBO ถูกทดสอบโดยใช้ตัวอย่างโครงข้อแข็งที่ได้รับความนิยมหลายตัวอย่างจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า SBO สามารถออกแบบโครงสร้างที่มีน้ำหนักน้อยกว่าเมื่อเทียบกับอัลกอริทึมอื่นๆ ที่ถูกนำมาเปรียบเทียบ

Hasançebi และ Carbas (2014) ทำการทดสอบอัลกอริทึม Bat inspired (BI) กับโครงสร้างเหล็ก 3 มิติที่มีตัวแปรแบบไม่ต่อเนื่องเพื่อหาน้ำหนักที่ต่ำที่สุดของโครงสร้าง สำหรับการเลือกใช้ขนาดของเหล็กจะเลือกใช้จากตารางเหล็กมาตรฐานที่ AISC กำหนด และการออกแบบจะเป็นไปตามมาตรฐาน AISC วิธี LRFD ในการทดสอบจะเลือกใช้ตัวอย่างโครงข้อแข็งเหล็กจำนวน 3

ตัวอย่าง ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ BI เมื่อเทียบกับอัลกอริทึมอื่นๆ โดยช่วงที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์การปรับความดัง อยู่ในช่วง 0.95 ถึง 0.99 พารามิเตอร์อัตราการเดินของหัวใจ เท่ากับ 0.99 และพารามิเตอร์ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จะมีค่าเท่ากับ 2 สำหรับโครงสร้างขนาดเล็กและขนาดกลางและมีค่าเท่ากับ 3 สำหรับโครงสร้างขนาดใหญ่

Kaveh และ Talatahari (2010) นำเสนอการปรับปรุงอัลกอริทึม ant colony optimization (IACO) สำหรับการออกแบบโครงสร้างข้อแข็งเหล็ก ซึ่ง IACO ประกอบด้วย 2 ระยะ คือ ระยะการค้นหาวางกว้าง (global search) และระยะการค้นหาเฉพาะแห่ง (local search) ซึ่งทดสอบประสิทธิภาพโดยใช้ตัวอย่างโครงสร้างข้อแข็งเหล็ก 3 ตัวอย่างจากวรรณกรรมและได้นำผลการออกแบบมาเปรียบเทียบกับ GA HS และ ACO มาตรฐาน โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า IACO มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมมากกว่าอัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบและยังพบว่า เวลาในการคำนวณลดลงอย่างมาก

Bekdas และคณะ (2015) นำเสนอการใช้อัลกอริทึม flower pollination algorithm (FPA) สำหรับหาน้ำหนักรวมที่น้อยที่สุดของโครงข้อหมุน ซึ่ง FPA ได้แรงบันดาลใจจากการผสมเกสรแบบข้ามต้น (cross-pollination) และการผสมเกสรแบบตัวเอง (self-pollination) ซึ่งทำการทดสอบประสิทธิภาพของ FPA โดยใช้ตัวอย่างโครงข้อหมุน 2D และ 3D และนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมที่ถูกนำเสนอในวรรณกรรม โดยผลการทดสอบพบว่า FPA สามารถค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่มีน้ำหนักน้อยกว่าอัลกอริทึมอื่น และจำนวนรอบของการวิเคราะห์ที่จำเป็นในกระบวนการค้นหาค่าที่เหมาะสมของตัวอย่างที่ 1 ถึง 3 คือ 1618 422 และ 2088 รอบ ตามลำดับ

Dogan และ Saka (2012) นำเสนอการออกแบบที่เหมาะสมของโครงข้อแข็งเหล็กที่ไม่มีการยึดรั้งโดยอัลกอริทึมฝูงอนุภาค (Particle Swarm optimization ; PSO) ซึ่ง PSO เป็นวิธีที่เลียนแบบพฤติกรรมทางสังคมของนก ปลา และแมลงในการหาอาหารและการหลบหนีจากนักล่า สำหรับการออกแบบจะเป็นไปตามมาตรฐาน AISC วิธี LRFD ซึ่งพิจารณาความแข็งแรงและการโก่งเดาะด้านข้างของชิ้นส่วน โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้เหล็กหน้าตัด W จำนวน 272 หน้าตัดตามที่ AISC กำหนดสำหรับโครงสร้างคานและเสา โดยประสิทธิภาพของ PSO ถูกทดสอบโดยใช้ตัวอย่างโครงข้อแข็งเหล็ก 3 ตัวอย่างและนำผลการออกแบบที่เหมาะสมมาเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมอื่นๆที่นำเสนอในวรรณกรรม ซึ่งจากผลการทดสอบสรุปได้ว่า PSO เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพและสามารถนำไปใช้ในการออกแบบโครงข้อแข็งเหล็กได้

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอัลกอริทึมในการหาคำตอบที่เหมาะสมสำหรับออกแบบโครงสร้างหลัก โดยพิจารณาถึงเรื่องของน้ำหนักเป็นเป้าหมายหลัก สำหรับเนื้อหาที่จะกล่าวถึงในบทนี้ ประกอบด้วย

- 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
- 3.2 สมการเป้าหมาย
- 3.3 ขอบเขตการทำงานของโปรแกรม
- 3.4 ขั้นตอนการหาคำตอบที่เหมาะสมด้วยอัลกอริทึมการค้นหาแบบฮิลล์
- 3.5 ขั้นตอนการหาคำตอบที่เหมาะสมด้วยอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสีเทา
- 3.6 ขั้นตอนการหาคำตอบที่เหมาะสมด้วยอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของวาฬ
- 3.7 ตัวอย่างที่ใช้และวิธีการทดสอบ

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้เครื่องมือในการดำเนินงานวิจัยคือ เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์และโปรแกรมสำหรับใช้พัฒนาขั้นตอนการหาคำตอบที่เหมาะสม โดยที่เครื่องคอมพิวเตอร์มีคุณสมบัติดังนี้

- 1) ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 10 (Microsoft window 10)
- 2) หน่วยประมวลผลกลาง Intel Core i5-760 2.80 GHz
- 3) หน่วยความจำแรม 4.00 GB
- 4) ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการพัฒนากระบวนการหาคำตอบคือ Visual studio 2015

3.2 สมการเป้าหมาย

ในการออกแบบโครงสร้างหลักจะต้องพิจารณากำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างให้เป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบและสำหรับการออกแบบที่เหมาะสมสิ่งสำคัญอีกหนึ่งอย่าง คือ น้ำหนัก

ของโครงสร้าง ซึ่งสมการเป้าหมายของการศึกษานี้คือ ผลรวมของน้ำหนักของโครงสร้างที่น้อยที่สุด ซึ่งมีค่าเป็นไปตามสมการที่ (3.1)

$$\text{minimize } W = \sum_{i=1}^{nm} A_i \rho_i L_i \quad (3.1)$$

เมื่อ W คือ น้ำหนักรวมของโครงสร้าง
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กรูปพรรณ
 ρ คือ หน่วยน้ำหนักของเหล็กรูปพรรณ
 L คือ ความยาวของเหล็กรูปพรรณ
 nm คือ จำนวนกลุ่มของเหล็กรูปพรรณในโครงสร้าง

3.3 ขอบเขตการทำงานของโปรแกรม

โปรแกรมสำหรับการออกแบบโครงสร้างเหล็กที่เหมาะสมได้รับการพัฒนาโดยใช้โปรแกรม Visual studio 2015 ซึ่งใช้ภาษา Visual basic ในการเขียน โดยจะเลือกขนาดของเหล็กหน้าตัดปีกกว้าง หน้าตัดท่อนกลม และหน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม จากฐานข้อมูลที่ AISC

3.4 ขั้นตอนการหาคำตอบที่เหมาะสมด้วยอัลกอริทึมการค้นหาแบบของอีกา

การหาคำตอบที่เหมาะสมด้วยอัลกอริทึมการค้นหาแบบของอีกาแสดงดังภาพประกอบ 13 ซึ่งสามารถอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1. ทำการกำหนดจำนวนของอีกาเริ่มต้น จำนวนรอบสูงสุด รวมทั้งพารามิเตอร์ fl และ AP
2. สุ่มตำแหน่งของอีกาเริ่มต้น ซึ่งหมายถึงการสุ่มตัวแปรการออกแบบที่อยู่ภายในขอบเขตการค้นหา
3. คำนวณกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างและฟังก์ชันวัตถุประสงค์
4. ตรวจสอบจำนวนของคำตอบว่าครบตามจำนวนอีกาที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้าไม่ครบให้ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2 อีกครั้ง
5. กำหนดคำตอบที่ได้ให้เป็นตำแหน่งและหน่วยความจำปัจจุบัน
6. ทำการสุ่มค่าระหว่าง 0 ถึง 1

7. ถ้าค่าสุ่มในขั้นตอนที่ 6 ไม่น้อยกว่าพารามิเตอร์ AP จะสร้างตำแหน่งใหม่ของอีกาโดยใช้สมการที่ (2.47)

8. ในกรณีที่ค่าสุ่มในขั้นตอนที่ 6 น้อยกว่าพารามิเตอร์ AP จะสร้างตำแหน่งใหม่ของอีกาโดยการสุ่มตัวแปรออกแบบขึ้นมาใหม่

9. คำนวณกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างและฟังก์ชันวัตถุประสงค์

10. ตรวจสอบว่าตำแหน่งใหม่ที่ได้ดีกว่าหน่วยความจำปัจจุบันหรือไม่

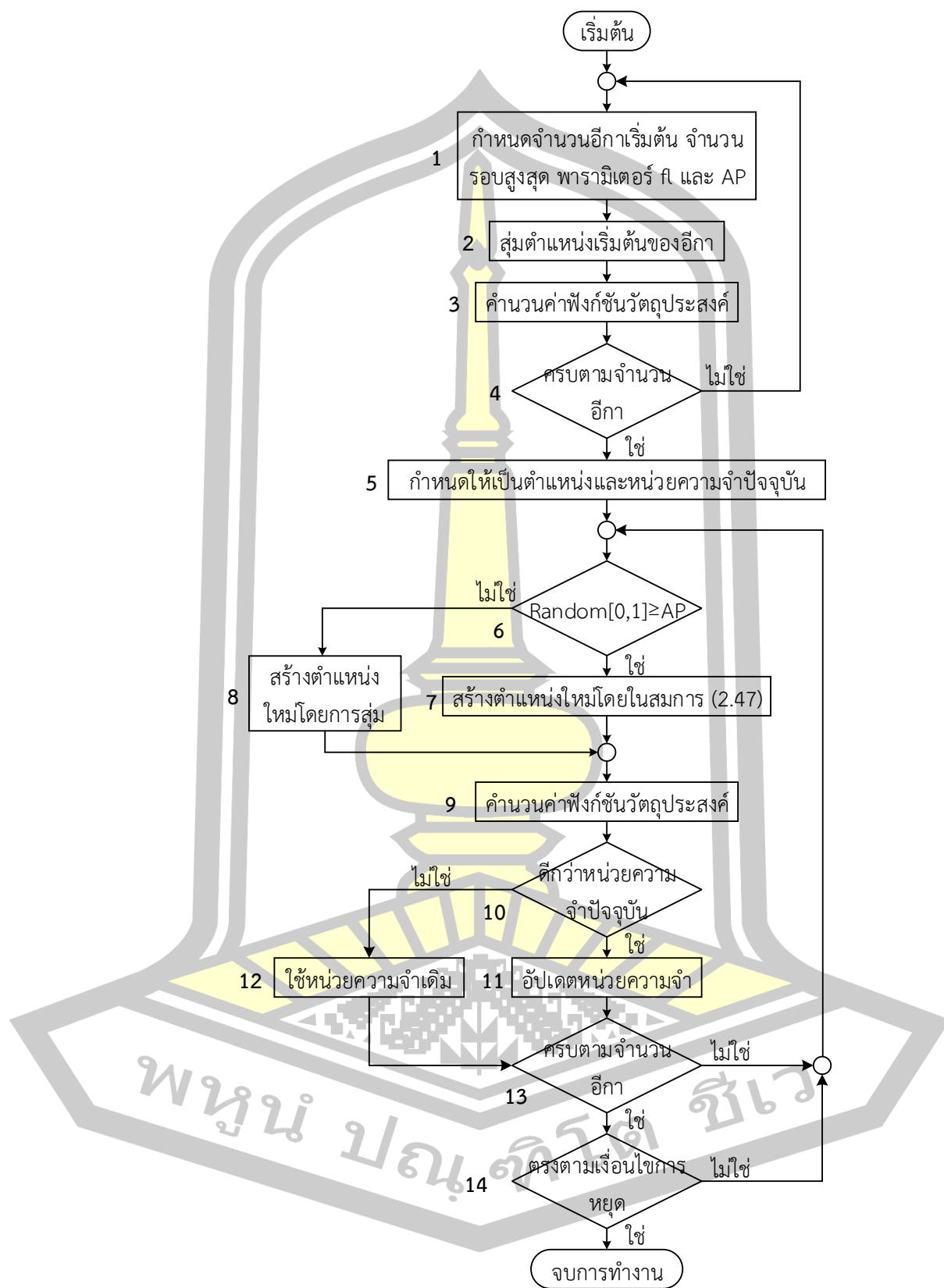
11. ถ้าตำแหน่งใหม่ที่ได้ดีกว่าหน่วยความจำปัจจุบัน จะทำการอัปเดตตำแหน่งปัจจุบันโดยการแทนที่ตำแหน่งปัจจุบันด้วยตำแหน่งใหม่

12. ถ้าตำแหน่งใหม่ที่ได้ไม่ดีกว่าหน่วยความจำปัจจุบัน จะใช้หน่วยความจำเดิม

13. ตรวจสอบจำนวนของคำตอบว่าครบตามจำนวนอีกาที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้าไม่ครบให้ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 6 อีกครั้ง

14. ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด ซึ่งอัลกอริทึมจะหยุดทำงานเมื่อครบตามจำนวนรอบสูงสุดที่กำหนด ถ้าไม่ครบให้ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 6 อีกครั้ง





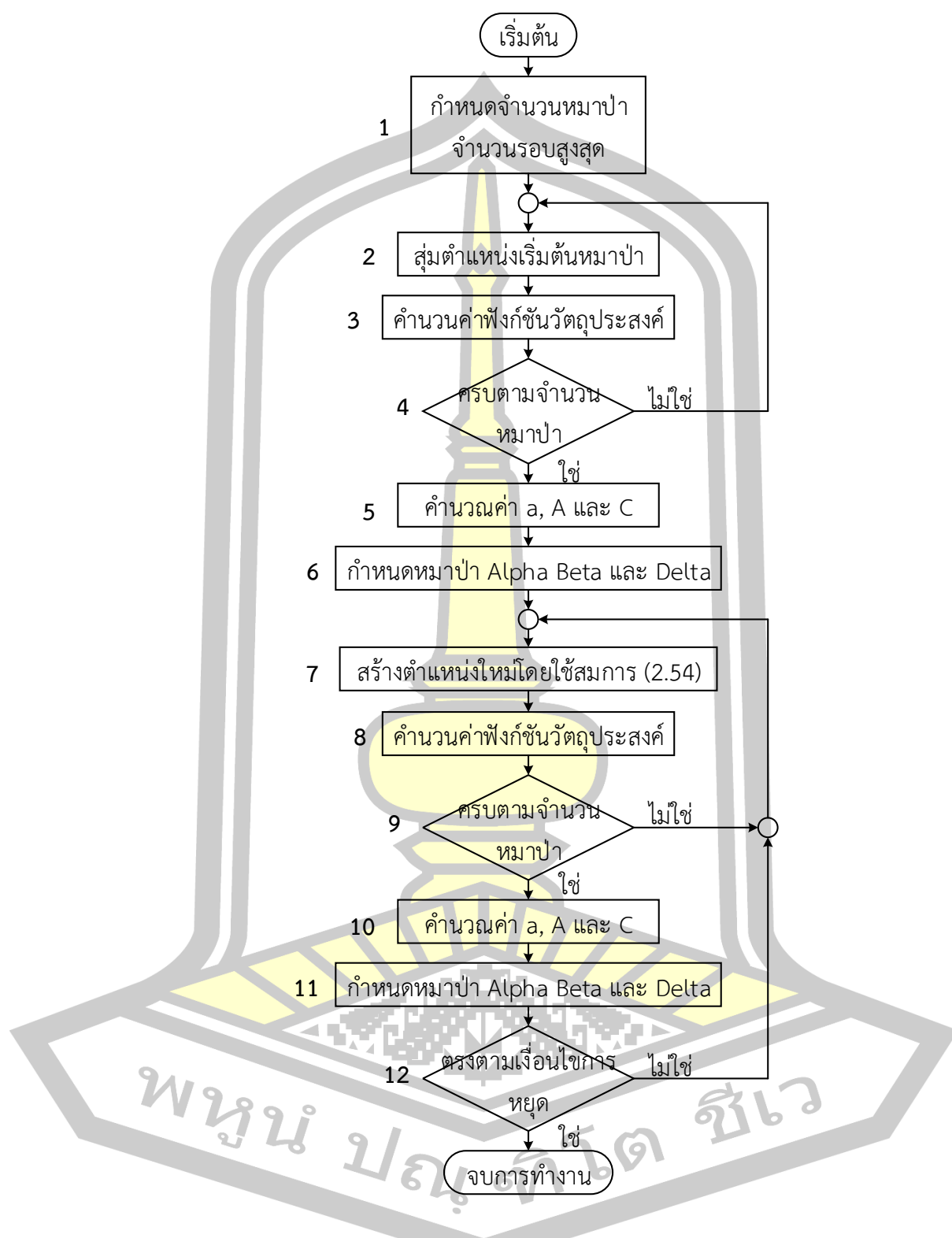
ภาพประกอบ 13 แผนผังการหาคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการค้นหาแบบของอีกา

3.5 ขั้นตอนการหาคำตอบที่เหมาะสมด้วยอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสี่เทา

การหาคำตอบที่เหมาะสมด้วยอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสี่เทาแสดงดังภาพประกอบ 14 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. กำหนดจำนวนหมาป่าเริ่มต้น และจำนวนรอบสูงสุด
2. สุ่มตำแหน่งเริ่มต้นของหมาป่าซึ่งหมายถึงสุ่มตัวแปรการออกแบบเริ่มต้นภายในขอบเขตของตัวแปร
3. คำนวณกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างและฟังก์ชันวัตถุประสงค์
4. ตรวจสอบจำนวนของคำตอบว่าครบตามจำนวนหมาป่าที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้าไม่ครบให้ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2 อีกครั้ง
5. คำนวณค่า a ซึ่งเป็นค่าที่ลดลงเชิงเส้นจาก 2 ถึง 0 และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์เวกเตอร์ A และ C จากสมการที่ (2.52) และ (2.53) ตามลำดับ
6. กำหนดหมาป่า Alpha Beta และ Delta ซึ่งเป็นคำตอบที่ดีที่สุดสามอันดับแรก
7. สร้างตำแหน่งใหม่และแทนที่ตำแหน่งเดิมของหมาป่าด้วยสมการที่ (2.54)
8. คำนวณกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างและฟังก์ชันวัตถุประสงค์
9. ตรวจสอบจำนวนของคำตอบว่าครบตามจำนวนหมาป่าที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้าไม่ครบให้ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 7 อีกครั้ง
10. คำนวณค่า a และสัมประสิทธิ์เวกเตอร์ A และ C
11. กำหนดหมาป่า Alpha Beta และ Delta ซึ่งเป็นคำตอบที่ดีที่สุดสามอันดับแรก
12. ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด โดยจะหยุดทำงานก็ต่อเมื่อครบตามจำนวนรอบสูงสุดที่กำหนดไว้ ถ้าหากไม่ครบให้ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 7 อีกครั้ง

พูน ปณ จิต ชีเว



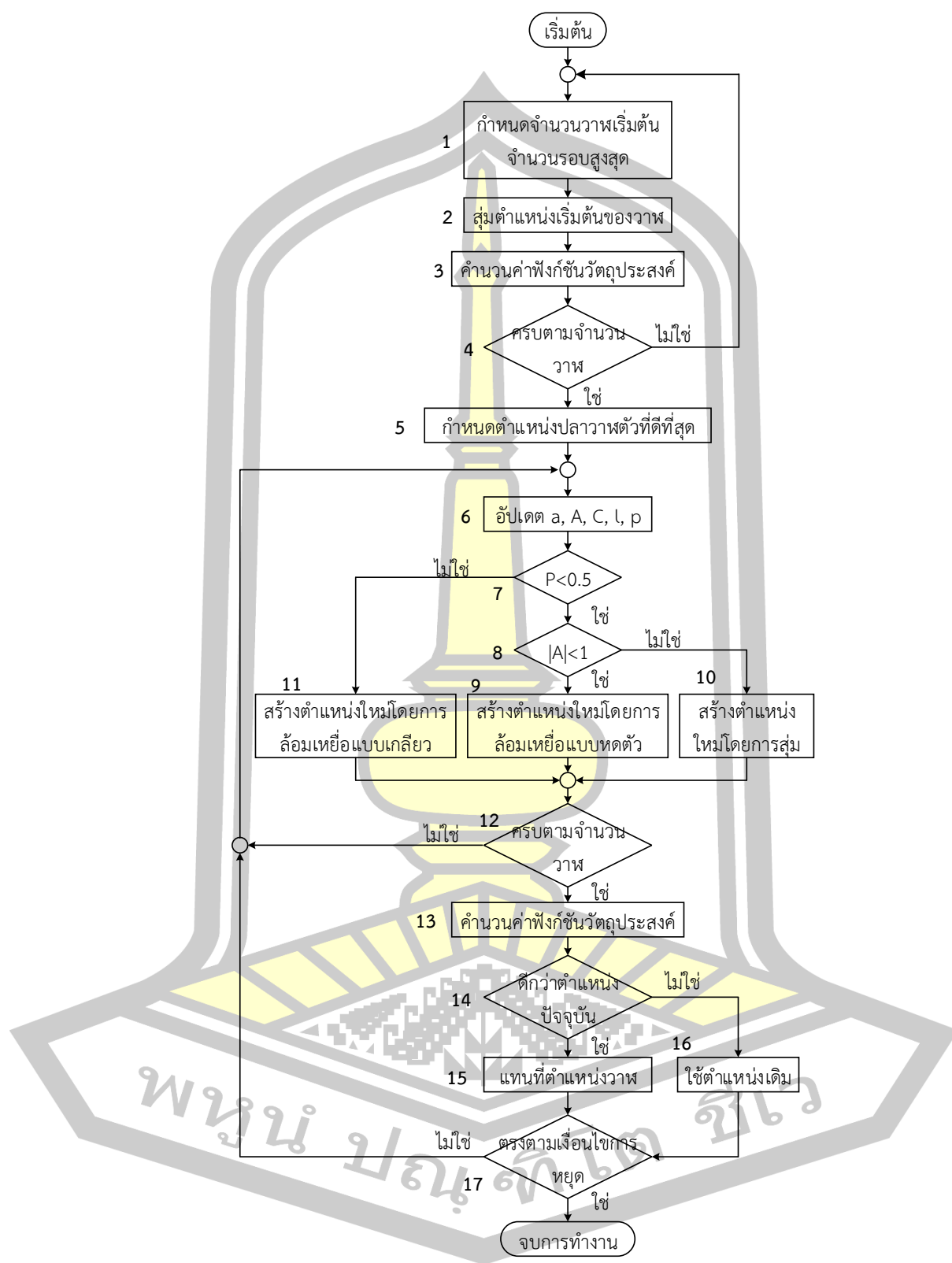
ภาพประกอบ 14 แผนผังการหาคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสี

เทา

3.6 ขั้นตอนการหาคำตอบที่เหมาะสมด้วยอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของวาท

การหาคำตอบที่เหมาะสมด้วยอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของวาทแสดงดังภาพประกอบ 15 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. กำหนดจำนวนวาทเริ่มต้น และจำนวนรอบสูงสุด
2. สุ่มตำแหน่งเริ่มต้นของวาทซึ่งอยู่ภายในขอบเขตของตัวแปร
3. คำนวณกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างและฟังก์ชันวัตถุประสงค์
4. ตรวจสอบจำนวนของคำตอบว่าครบตามจำนวนวาทที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้าไม่ครบให้ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2 อีกครั้ง
5. กำหนดให้วาทที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดีที่สุดเป็น วาทที่อยู่ในตำแหน่งที่ดีที่สุด
6. คำนวณค่า a , A , C , l , และ p
7. ตรวจสอบเงื่อนไข $p < 0.5$ หรือไม่ ถ้าใช่ให้ไปในขั้นตอนที่ 8 แต่ถ้าไม่ใช่ให้ไปในขั้นตอนที่ 11
8. ตรวจสอบเงื่อนไข $|A| < 1$ หรือไม่ ถ้าใช่ให้ไปในขั้นตอนที่ 9 แต่ถ้าไม่ใช่ให้ไปในขั้นตอนที่ 10
9. สร้างตำแหน่งใหม่ของวาทโดยใช้กลยุทธ์การล้อมเหยื่อแบบหัดตัวตามสมการที่ (2.58)
10. สร้างตำแหน่งใหม่ของวาทโดยใช้การสุ่มตัวแปลออกแบบขึ้นมาใหม่
11. สร้างตำแหน่งใหม่ของวาทโดยใช้กลยุทธ์การล้อมเหยื่อแบบเกลียวสมการที่ (2.61)
12. ตรวจสอบจำนวนของคำตอบว่าครบตามจำนวนวาทที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้าไม่ครบให้ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 6 อีกครั้ง
13. คำนวณกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างและฟังก์ชันวัตถุประสงค์
14. ตรวจสอบตำแหน่งของวาทว่าดีกว่าตำแหน่งที่ดีที่สุดตำแหน่งเดิมหรือไม่ ถ้าใช่ให้ไปในขั้นตอนที่ 15 แต่ถ้าไม่ใช่ให้ไปในขั้นตอนที่ 16
15. แทนที่ตำแหน่งเดิมด้วยตำแหน่งใหม่
16. ใช้ตำแหน่งเดิมของวาท
17. ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด โดยจะหยุดทำงานก็ต่อเมื่อครบตามจำนวนรอบสูงสุดที่กำหนดไว้ ถ้าหากไม่ครบให้ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 6 อีกครั้ง



ภาพประกอบ 15 แผนผังการหาคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของวาฟ

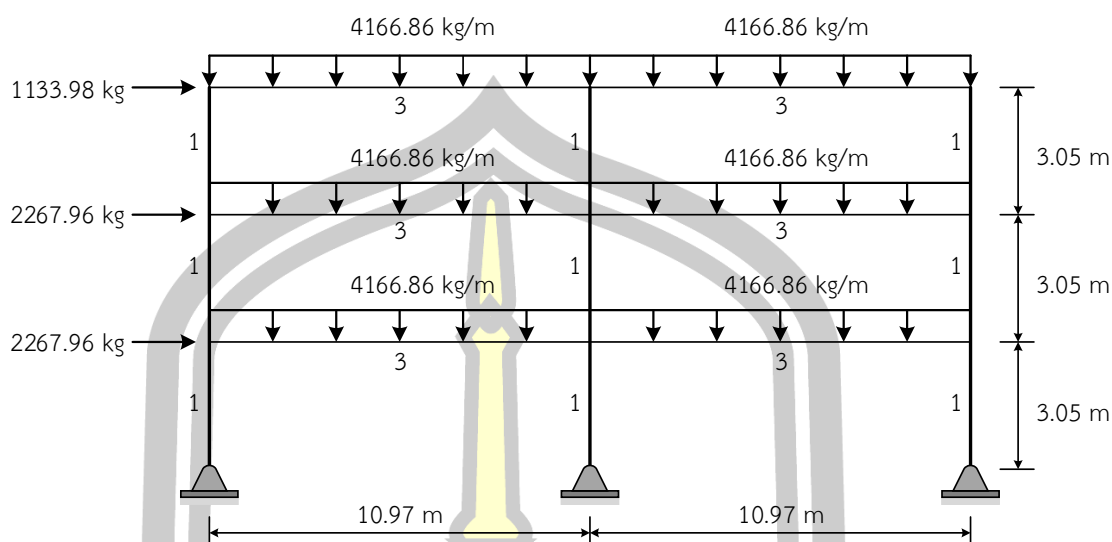
3.7 ตัวอย่างที่ใช้และวิธีการทดสอบ

ทำการทดสอบการออกแบบที่เหมาะสมกับตัวอย่างทดสอบจำนวน 4 ตัวอย่าง ประกอบด้วย โครงข้อแข็ง 2 ตัวอย่าง จากงานวิจัยของ Pezeshk และคณะ (Pezeshk et al., 2000) Camp และคณะ (C. V. Camp et al., 2005) และ Degertekin (S. O. Degertekin, 2008) และ โครงข้อหมุน 2 ตัวอย่าง จากงานวิจัยของ Mustafa (Sonmez, 2011) ซึ่งข้อจำกัดด้านการออกแบบ จะกำหนดตามตัวอย่างนั้นๆ โดยจำนวนประชากรของอัลกอริทึมถูกกำหนดให้เท่ากับ 20, 30, 40, และ 50 ตัว จำนวนรอบการทำงานซ้ำเท่ากับ 200 รอบ สำหรับตัวอย่างที่ 1 และเท่ากับ 700 รอบ สำหรับตัวอย่างที่ 2, 3 และ 4 โดยทำการทดสอบในแต่ละตัวอย่างจำนวน 10 ครั้ง เพื่อหาค่าสถิติของการออกแบบที่เหมาะสม ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ทำการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

3.7.1 ตัวอย่างที่ 1 โครงข้อแข็ง 2 ช่วง 3 ชั้น

ตัวอย่างที่ 1 เป็นการออกแบบโครงข้อแข็ง 2 ช่วง จำนวน 3 ชั้น ประกอบด้วยจำนวน ชั้นส่วน 15 ชั้น ความสูงทั้งหมด 9.15 ม. ความสูงของแต่ละชั้นเท่ากับ 3.05 ม. ระยะห่างของเสา เท่ากับ 10.97 ม. มีน้ำหนักกระจายกระทำกับชั้นส่วนคานเท่ากับ 4166.86 กก./ม. และมีแรงกระทำ ด้านข้างในแต่ละชั้นเท่ากับ 2267.96 2267.96 และ 1133.98 กก. ดังภาพประกอบ 16 โดยมีโมดูลัส ยืดหยุ่น (E) 2.04×10^6 กก./ตร.ซม. และ หน่วยแรงคราก 2531.05 กก./ตร.ซม. ซึ่งจัดกลุ่มเสาและ คานเป็นอย่างละ 1 กลุ่ม โดยกำหนดหน้าตัดสำหรับออกแบบคานจากตารางเหล็กปีกกว้าง (Wide flange) จำนวน 267 หน้าตัด และหน้าตัดสำหรับออกแบบเสาคือ W250 จำนวน 18 หน้าตัด สำหรับ ค่าสัมประสิทธิ์ความยาวประสิทธิผล (K_x) ที่มีการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสาแต่ละต้นคำนวณได้จาก สมการ Dumonteil และ กำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความยาวประสิทธิผลรอบแกน Y (K_y) เท่ากับ 1 เสา แต่ละต้นถูกกำหนดให้ไม่มีการยึดรั้งตลอดช่วงความยาวและสำหรับคานถูกกำหนดให้มีการยึดรั้ง ตลอดระยะ $1/6$ ของความยาว โดยมีคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด 4806 คำตอบ ซึ่งไม่คำนึงถึงข้อจำกัด การเคลื่อนตัวด้านข้าง

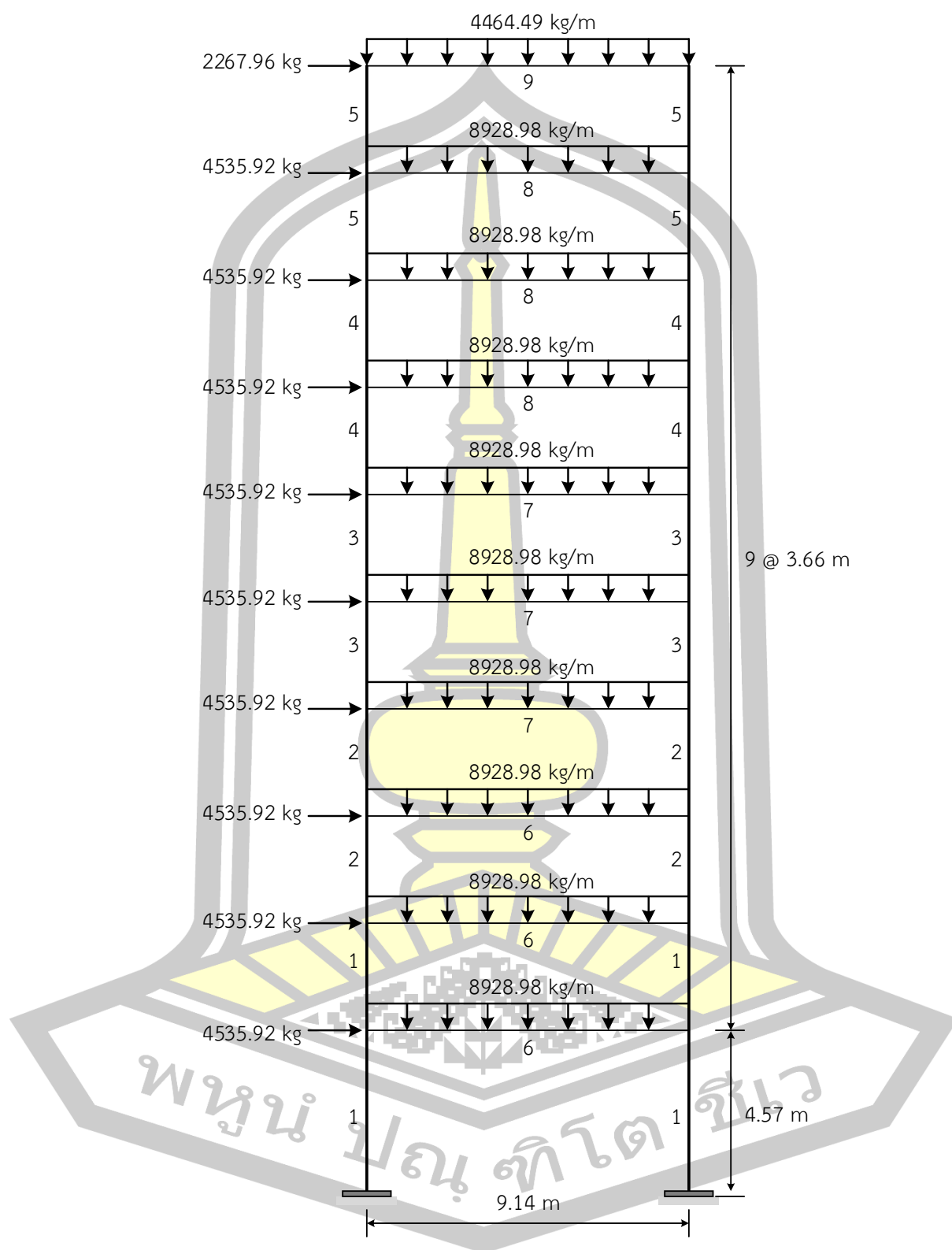
พูน ปณ จิต ชีเว



ภาพประกอบ 16 โครงข้อแข็ง 2 ช่วงจำนวน 3 ชั้น

3.7.2 ตัวอย่างที่ 2 โครงข้อแข็ง 1 ช่วง 10 ชั้น

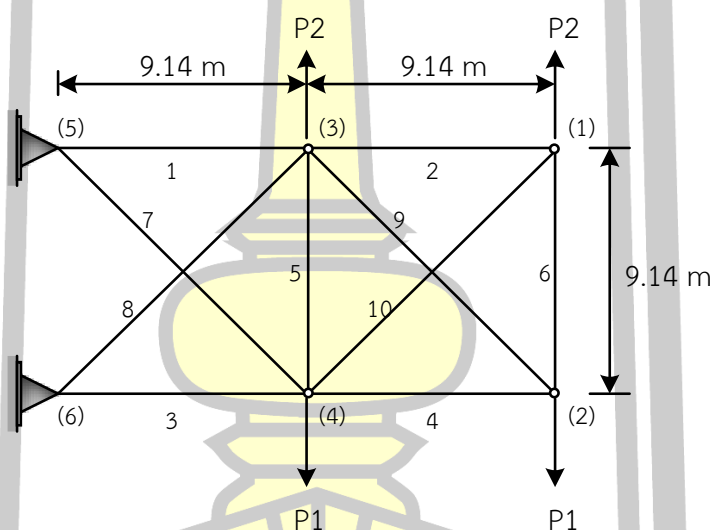
ตัวอย่างที่ 2 เป็นการออกแบบโครงข้อแข็ง 1 ช่วง จำนวน 10 ชั้น ประกอบด้วยจำนวนชั้นส่วน 30 ชั้น ความสูงทั้งหมด 35.99 ม. ความสูงในชั้นที่ 1 เท่ากับ 4.57 ม. และชั้น 2 ถึงชั้น 10 สูงชั้นละ 3.66 ม. ระยะห่างของเสาเท่ากับ 9.14 ม. มีน้ำหนักกระจายกระทำกับชั้นส่วนคาน และมีแรงกระทำด้านข้างในแต่ละชั้น ดังภาพประกอบ 17 โดยมีโมดูลัสยืดหยุ่น (E) 2.04×10^6 กก./ตร. ซม. และ หน่วยแรงคราก 2531.05 กก./ตร. ซม. ค่าสัมประสิทธิ์ความยาวประสิทธิผล (K_x) ที่มีการเคลื่อนที่ด้านข้างของของเสาแต่ละต้นมีค่าไม่น้อยกว่า 1 ซึ่งคำนวณได้จากสมการ Dumonteil และ กำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความยาวประสิทธิผลรอบแกน Y (K_y) เท่ากับ 1 เสาแต่ละต้นถูกกำหนดให้ไม่มีการยึดรั้งตลอดช่วงความยาวและสำหรับคานถูกกำหนดให้มีการยึดรั้งตลอดระยะ $1/5$ ของความยาว โดยจัดกลุ่มของโครงสร้างเสาและออกเป็น 5 และ 4 กลุ่ม ตามลำดับ ซึ่งกำหนดหน้าตัดสำหรับออกแบบคานทั้ง 4 กลุ่ม จากตารางเหล็กปีกกว้าง (Wide flange) จำนวน 267 หน้าตัด และกำหนดหน้าตัดสำหรับออกแบบเสาคือ W360 และ W310 จำนวน 66 หน้าตัด โดยมีคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด 6.36×10^{18} คำตอบ สำหรับข้อจำกัดด้านการเคลื่อนตัวด้านข้างของแต่ละชั้นต้องมีค่าน้อยกว่า ความสูงของชั้น/300



ภาพประกอบ 17 โครงข้อแข็ง 1 ช่วงจำนวน 10 ชิ้น

3.7.5 ตัวอย่างที่ 3 โครงข้อหมุน 10 ชิ้นส่วน

โครงข้อหมุนจำนวนชิ้นส่วนเท่ากับ 10 ชิ้นส่วน จำนวนจุดต่อเท่ากับ 6 โหนด และความยาวของชิ้นส่วนมีดังภาพประกอบ 18 โดยมีโมดูลัสยืดหยุ่น (E) 2.04×10^6 กก./ตร.ซม. ความหนาแน่นของเหล็กเท่ากับ 7850 กก./ลบ.ม. แรงภายนอกที่กระทำใน Case 1 มีเพียงแรง P1 เท่านั้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 45359.24 กก. สำหรับ Case 1 แรง $P1 = 68038.86$ กก. และ 22679.62 กก. โดยทำการแบ่งโครงสร้างออกเป็น 4 กลุ่ม ดังตาราง 2 สำหรับข้อจำกัดด้านการเคลื่อนตัวของโหนดตามแนวแกน X และ Y กำหนดให้มีค่าน้อยกว่า 5.08 ซม. โดยกำหนดใช้น้ำตัดเหล็กหน้าตัดปีกกว้าง (267 หน้าตัด) หน้าตัดท่อกลม (128 หน้าตัด) และหน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม (388 หน้าตัด) สำหรับออกแบบโครงข้อหมุนจากตารางเหล็ก ซึ่งมีคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด 5.08×10^9 , 2.27×10^{10} และ 2.68×10^8 คำตอบ ตามลำดับ



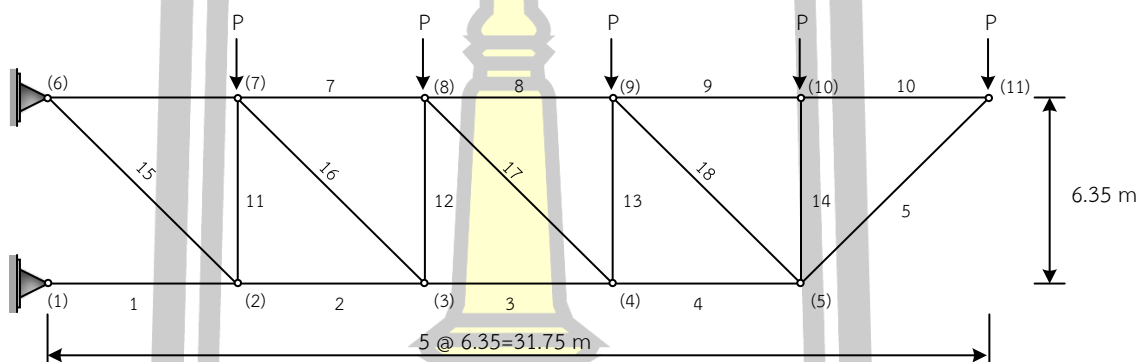
ภาพประกอบ 18 ภาพประกอบ 3.6 โครงข้อหมุนจำนวนชิ้นส่วน 10 ชิ้นส่วน

ตาราง 2 กลุ่มของชิ้นส่วนในตัวอย่างที่ 3 โครงข้อหมุน 10 ชิ้นส่วน

Group number	Member number
1	1, 2
2	3, 4
3	5, 6
4	7, 8, 9, 10

3.7.6 ตัวอย่างที่ 4 โครงข้อหมุน 18 ชิ้นส่วน

โครงข้อหมุนจำนวนชิ้นส่วนเท่ากับ 18 ชิ้นส่วน จำนวนจุดต่อเท่ากับ 11 โหนด และความยาวของชิ้นส่วนมีดังภาพประกอบ 19 โดยมีโมดูลัสยืดหยุ่น (E) 2.04×10^6 กก./ตร.ซม. ความหนาแน่นของเหล็กเท่ากับ 7850 กก./ลบ.ม. แรงภายนอกที่กระทำ P ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9071.85 กก. ซึ่งมีการแบ่งกลุ่มของชิ้นส่วนเป็น 4 กลุ่มดังตาราง 3 ซึ่งในตัวอย่างนี้จะไม่พิจารณาข้อจำกัดด้านการเคลื่อนตัวของโหนดโดยในตัวอย่างนี้กำหนดใช้หน้าตัดเหล็กหน้าตัดปีกกว้าง (267 หน้าตัด) หน้าตัดท่อกลม (128 หน้าตัด) และหน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม (388 หน้าตัด) สำหรับออกแบบโครงข้อหมุนจากตารางเหล็ก ซึ่งมีคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด 5.08×10^9 , 2.27×10^{10} และ 2.68×10^8 คำตอบตามลำดับ



ภาพประกอบ 19 โครงข้อหมุนจำนวนชิ้นส่วน 18 ชิ้นส่วน

ตาราง 3 กลุ่มของชิ้นส่วนในตัวอย่างที่ 4 โครงข้อหมุน 18 ชิ้นส่วน

Group number	Member number
1	6, 7, 8, 9, 10
2	1, 2, 3, 4, 5
3	11, 12, 13, 14
4	15, 16, 17, 18

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล ของการออกแบบโครงสร้างเหล็กที่เหมาะสม โดยใช้อัลกอริทึมแบบต่างๆ ดังต่อไปนี้

- 4.1 คำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการค้นหาแบบอีกา
- 4.2 คำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสีเทา
- 4.3 คำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของวาฬ
- 4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม
- 4.5 การเปรียบเทียบผลการออกแบบที่เหมาะสมกับงานวิจัยที่ผ่านมา

4.1 คำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการค้นหาแบบอีกา

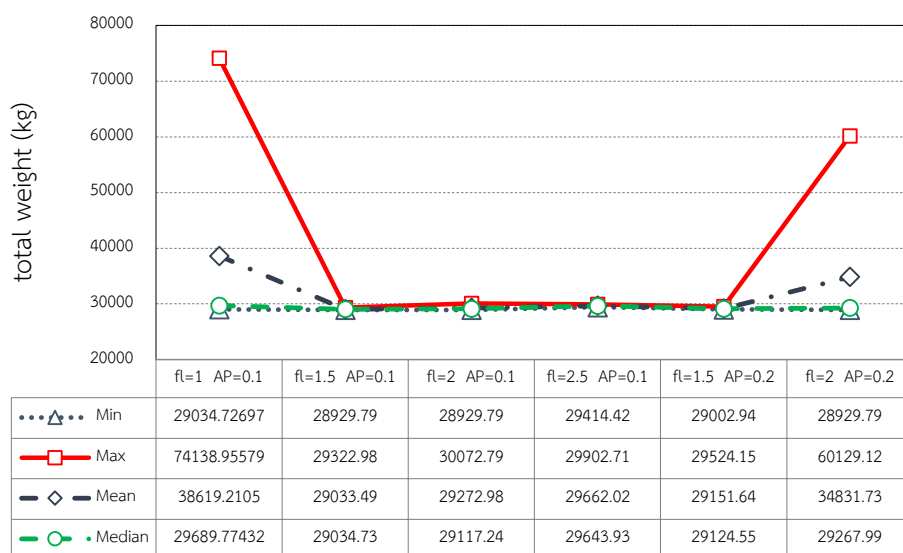
อัลกอริทึมการค้นหาแบบอีกามีพารามิเตอร์ที่สำคัญที่นอกเหนือจากจำนวนประชากรคือ พารามิเตอร์ระยะทางในการบินของอีกา (fl) และพารามิเตอร์ความรู้ของอีกา (AP) ซึ่งมีผลกับการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA ดังนั้นเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับออกแบบโครงสร้างเหล็กที่เหมาะสมแต่ละประเภท ได้ทำการทดสอบกับตัวอย่างโครงข้อแข็ง 1 ช่วง 10 ชั้น (ตัวอย่างที่ 2) และโครงข้อหมุน 10 ชั้นส่วน (ตัวอย่างที่ 3) โดยกำหนดพารามิเตอร์ fl เท่ากับ 1 1.5 2 และ 2.5 พารามิเตอร์ AP เท่ากับ 0.1 และ 0.2 จำนวนประชากรเท่ากับ 20 ตัว จำนวนรอบการทำซ้ำเท่ากับ 700 รอบ ซึ่งทำการทดสอบทั้งหมดจำนวน 10 ครั้ง จากผลการทดสอบพบว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการออกแบบโครงข้อแข็งคือ $fl = 1.5$ และ $AP = 0.1$ ดังภาพประกอบ 20 โดยมีคำตอบที่เหมาะสมที่สุด คำตอบที่เหมาะสมที่แย่ที่สุด คำตอบที่เหมาะสมเฉลี่ย และค่ามัธยฐาน เท่ากับ 28929.79, 29322.98, 29033.49 และ 29034.73 กก. ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบโดยละเอียดแสดงในตาราง 4 สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการออกแบบโครงข้อหมุนคือ $fl = 2$ และ $AP = 0.1$ ดังภาพประกอบ 21 โดยมีคำตอบที่เหมาะสมที่สุด คำตอบที่เหมาะสมที่แย่ที่สุด คำตอบที่เหมาะสมเฉลี่ย และค่ามัธยฐาน เท่ากับ 4094.94, 4105.18, 4100.06 และ 4100.06 กก. ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบโดยละเอียดแสดงในตาราง 5 โดยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมนี้ถูกนำไปใช้สำหรับออกแบบโครงสร้างเหล็กที่เหมาะสมในตัวอย่างที่ 1 (โครงข้อแข็ง 2 ช่วง 3 ชั้น) และตัวอย่างที่ 4 (โครงข้อหมุน 18 ชั้นส่วน) ด้วย

ตาราง 4 ผลการทดสอบการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 2 (โครงข้อแข็ง)

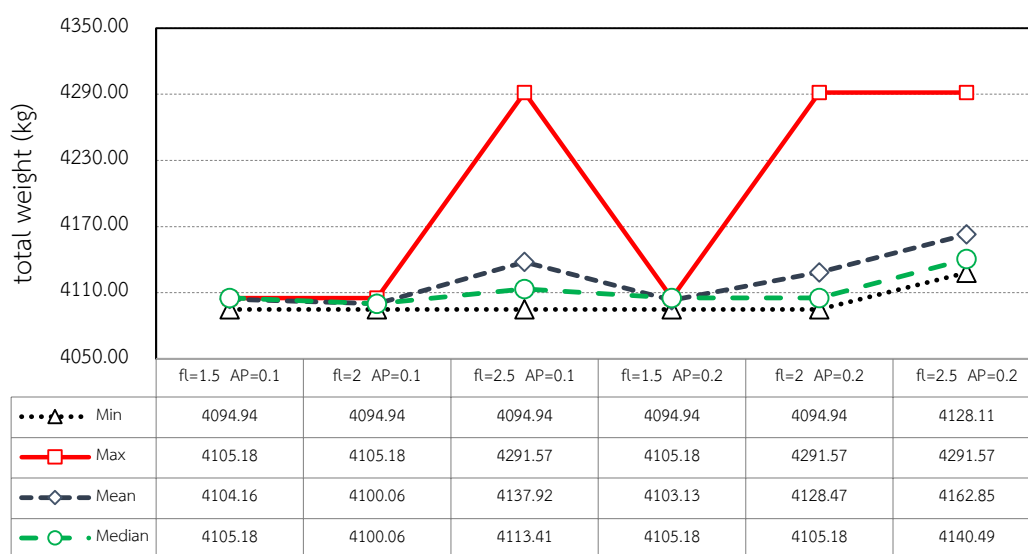
ครั้งที่	fl=1.0		fl=1.5		fl=2.0		fl=2.5		fl=1.5		fl=2.0	
	AP = 0.1		AP = 0.1		AP = 0.1		AP = 0.1		AP = 0.2		AP = 0.2	
	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)
1	29346.54	120.54	29140.10	109.95	29285.12	113.65	29414.42	127.30	29034.73	120.66	29108.92	143.74
2	54818.33	132.31	29034.73	110.56	29158.39	131.37	29502.20	133.11	29034.73	131.65	54329.99	157.33
3	29383.33	131.60	28929.79	110.24	28929.79	120.70	29902.71	143.59	29140.10	122.77	29359.31	146.98
4	74138.96	128.41	29034.73	122.92	29053.27	115.39	29639.36	128.28	29524.15	123.31	60129.12	128.71
5	31321.72	130.44	29322.98	111.27	29926.48	124.45	29648.51	133.39	29355.82	127.30	29524.15	115.71
6	29140.10	143.85	29034.73	110.62	29034.73	121.44	29502.20	121.12	29109.01	120.81	29167.53	134.50
7	29034.73	130.24	29034.73	110.89	29094.38	132.81	29767.38	118.73	29002.94	132.22	29034.73	142.86
8	29034.73	114.63	28943.53	110.12	30072.79	131.87	29900.88	126.27	29034.73	132.61	29557.07	129.89
9	29996.22	113.62	28929.79	116.23	29034.73	121.23	29887.92	125.48	29140.10	133.41	28929.79	135.19
10	49977.45	115.35	28929.79	121.96	29140.10	124.84	29454.65	124.32	29140.10	123.57	29176.68	131.54
Min	29034.73	113.62	28929.79	109.95	28929.79	113.65	29414.42	118.73	29002.94	120.66	28929.79	115.71
Max	74138.96	143.85	29322.98	122.92	30072.79	132.81	29902.71	143.59	29524.15	133.41	60129.12	157.33
Mean	38619.21	126.10	29033.49	113.48	29272.98	123.77	29662.02	128.16	29151.64	126.83	34831.73	136.64
Median	29689.77	129.33	29034.73	110.76	29117.24	122.94	29643.93	126.78	29124.55	125.43	29267.99	134.85
SD	15725.23	9.77	122.72	5.07	395.70	6.67	192.41	7.11	165.26	5.20	11885.24	11.56

ตาราง 5 ผลการทดสอบการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 3 (โครงข้อหมุน)

ครั้งที่	fl=1.5		fl=2		fl=2.5		fl=1.5		fl=2		fl=2.5	
	AP = 0.1		AP = 0.1		AP = 0.1		AP = 0.2		AP = 0.2		AP = 0.2	
	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)
1	4105.18	8.17	4105.18	9.41	4094.94	9.12	4105.18	8.77	4140.22	9.89	4140.49	8.81
2	4105.18	8.44	4094.94	9.33	4096.77	8.81	4105.18	9.15	4105.18	10.12	4128.11	8.44
3	4105.18	7.55	4094.94	8.95	4094.94	8.20	4105.18	9.17	4291.57	9.61	4140.49	8.37
4	4105.18	8.23	4105.18	9.45	4119.80	8.23	4094.94	8.70	4126.27	8.55	4140.49	8.43
5	4094.94	8.53	4105.18	8.37	4107.01	8.23	4105.18	8.55	4094.94	8.48	4140.22	8.39
6	4105.18	8.31	4105.18	8.48	4120.53	7.64	4105.18	8.30	4094.94	8.36	4291.57	8.30
7	4105.18	8.33	4105.18	8.75	4222.17	7.87	4105.18	8.31	4105.18	8.33	4140.49	8.45
8	4105.18	7.97	4094.94	8.36	4291.57	8.45	4105.18	8.58	4094.94	8.22	4222.35	7.70
9	4105.18	8.72	4094.94	8.47	4126.27	7.55	4094.94	8.77	4105.18	8.12	4143.75	7.53
10	4105.18	8.34	4094.94	8.29	4105.18	7.48	4105.18	8.77	4126.27	7.97	4140.49	7.91
Min	4094.94	7.55	4094.94	8.29	4094.94	7.48	4094.94	8.30	4094.94	7.97	4128.11	7.53
Max	4105.18	8.72	4105.18	9.45	4291.57	9.12	4105.18	9.17	4291.57	10.12	4291.57	8.81
Mean	4104.16	8.26	4100.06	8.79	4137.92	8.16	4103.13	8.71	4128.47	8.76	4162.85	8.23
Median	4105.18	8.32	4100.06	8.62	4113.41	8.22	4105.18	8.73	4105.18	8.42	4140.49	8.38
SD	3.24	0.32	5.40	0.46	65.73	0.54	4.32	0.30	59.39	0.79	52.38	0.39



ภาพประกอบ 20 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ CSA สำหรับโครงข้อแข็ง



ภาพประกอบ 21 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ CSA สำหรับโครงข้อหมุน

4.1.1 คำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการค้นหาแบบอีกาสำหรับตัวอย่างที่ 1 โครงข้อ แข็ง 2 ช่วง 3 ชั้น

ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการค้นหาแบบอีกาสำหรับตัวอย่างที่ 1 แสดงดังตาราง 6 โดยทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง และทำการกำหนดชุดการค้นหา คำตอบที่เหมาะสมของอีกาจำนวน 4 ชุด ประกอบด้วยอีกา 20 30 40 และ 50 ตัวซึ่งพบว่าทุกชุด การค้นหาของอีกาสามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 8256.96 กก. โดยมีจำนวนการซ้ำคำตอบ ที่เหมาะสมเท่ากับ 10 ครั้ง คิดเป็นโอกาสการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 100 และใช้ เวลาในการค้นหาเฉลี่ยเท่ากับ 5.73 8.15 11.68 และ 14.64 วินาที ตามลำดับ ซึ่งการกำหนดใช้ จำนวนอีกาเท่ากับ 20 ตัว ส่งผลให้เวลาในการค้นหาเฉลี่ยต่ำที่สุดเท่ากับ 5.73 วินาที โดยหน้าตัดที่ เหมาะสมแสดงดังตาราง 7 และลักษณะของการลู่ออกหาคำตอบที่เหมาะสมของชุดการค้นหาของอีกา แต่ละชุดแสดงดังภาพประกอบ 22

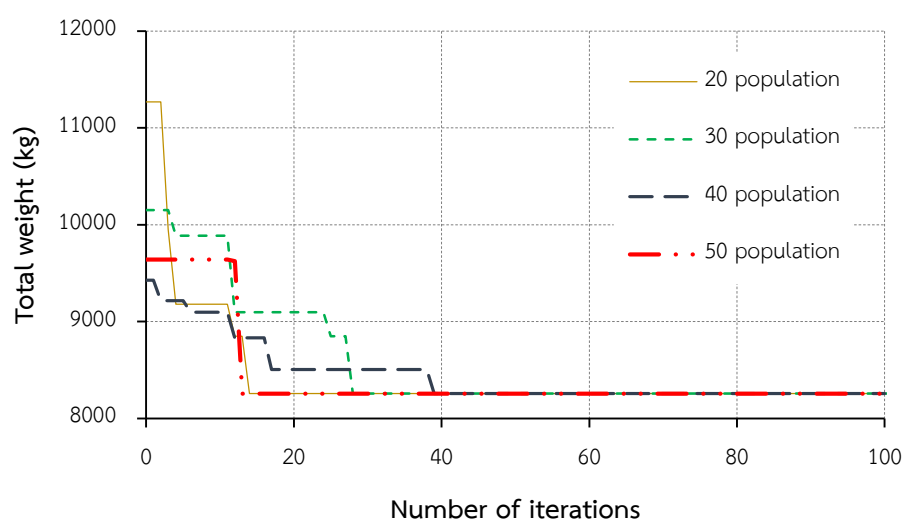
ตาราง 6 ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 1

ครั้งที่	อีกา 20 ตัว		อีกา 30 ตัว		อีกา 40 ตัว		อีกา 50 ตัว	
	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)
1	8256.96	6.09	8256.96	8.57	8256.96	11.92	8256.96	14.45
2	8256.96	6.26	8256.96	8.09	8256.96	11.50	8256.96	14.16
3	8256.96	5.68	8256.96	7.68	8256.96	11.58	8256.96	14.86
4	8256.96	5.70	8256.96	7.84	8256.96	11.89	8256.96	15.37
5	8256.96	5.69	8256.96	8.46	8256.96	11.79	8256.96	14.70
6	8256.96	5.76	8256.96	8.11	8256.96	11.69	8256.96	14.72
7	8256.96	5.72	8256.96	8.23	8256.96	11.59	8256.96	14.56
8	8256.96	5.71	8256.96	8.33	8256.96	11.45	8256.96	14.45
9	8256.96	5.75	8256.96	8.14	8256.96	11.66	8256.96	14.50
10	8256.96	5.76	8256.96	8.11	8256.96	11.70	8256.96	14.66
Min	8256.96	5.68	8256.96	7.68	8256.96	11.45	8256.96	14.16
Max	8256.96	6.26	8256.96	8.57	8256.96	11.92	8256.96	15.37
Mean	8256.96	5.81	8256.96	8.15	8256.96	11.68	8256.96	14.64
Median	8256.96	5.73	8256.96	8.12	8256.96	11.67	8256.96	14.61

SD	0.00	0.20	0.00	0.27	0.00	0.16	0.00	0.32
----	------	------	------	------	------	------	------	------

ตาราง 7 หน้าตัดที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 1

กลุ่มที่	หน้าตัด
1 (เสา)	W250X80
2 (คาน)	W610X92
น้ำหนักรวมของโครงสร้าง (กก.)	8256.96



ภาพประกอบ 22 ลักษณะของการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 1 โครงข้อ
แข็ง 2 ช่วง 3 ชั้น

จากภาพประกอบ 22 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมและจำนวนประชากร เมื่อจำนวนประชากรของอีกาเท่ากับ 20 30 40 และ 50 จะเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบการทำซ้ำที่ 14 28 39 และ 13 ตามลำดับ โดยพบว่าเมื่อจำนวนประชากรของอีกาเท่ากับ 50 ตัว มีลักษณะการลู่เข้าที่เร็วที่สุด ซึ่งเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบที่ 13

4.1.2 คำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการค้นหาแบบอีกาสำหรับตัวอย่างที่ 2 โครงข้อ แข็ง 1 ช่วง 10 ชั้น

ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการค้นหาแบบอีกาสำหรับตัวอย่างที่ 2 แสดงดังตาราง 8 โดยทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง และทำการกำหนดชุดการค้นหา คำตอบที่เหมาะสมของอีกาจำนวน 4 ชุด ประกอบด้วยอีกา 20 30 40 และ 50 ตัว ซึ่งพบว่าทุกชุด การค้นหาของอีกาสามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 28929.79 กก. โดยจำนวนการซ้ำคำตอบ ที่เหมาะสมเท่ากับ 3 3 5 และ 2 ครั้ง ตามลำดับ การกำหนดใช้จำนวนอีกาเท่ากับ 40 ตัว ส่งผลให้ ค่าเฉลี่ยต่ำที่สุดเท่ากับ 29003.33 กก. โดยค้นพบคำตอบที่เหมาะสม 5 ครั้ง คิดเป็นโอกาสการค้นพบ คำตอบที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 50 และใช้เวลาในการค้นหาเฉลี่ยเท่ากับ 249.21 วินาที ซึ่งหน้าตัด ที่เหมาะสมแสดงดังตาราง 9 และลักษณะของการลู่อู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของชุดการค้นหาของ อีกาแต่ละชุดแสดงดังภาพประกอบ 23

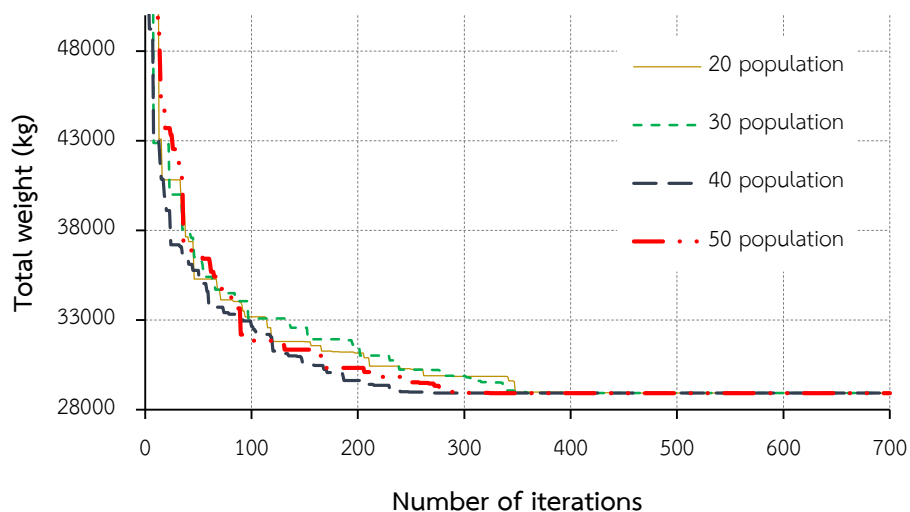
ตาราง 8 ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 2

ครั้งที่	อีกา 20 ตัว		อีกา 30 ตัว		อีกา 40 ตัว		อีกา 50 ตัว	
	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)
1	29140.10	109.95	29140.10	184.14	29140.10	241.99	29034.73	316.98
2	29034.73	110.56	28929.79	170.25	29140.10	240.59	29034.73	305.98
3	28929.79	110.24	28929.79	168.77	28929.79	243.90	28929.79	330.73
4	29034.73	122.92	28929.79	169.51	29034.73	246.32	28929.79	345.33
5	29322.98	111.27	29034.73	170.27	29034.73	256.34	29140.10	323.4
6	29034.73	110.62	29017.57	170.47	28929.79	247.76	29034.73	325.95
7	29034.73	110.89	28948.08	170.56	28929.79	241.88	29140.10	323.99
8	28943.53	110.12	29363.80	170.90	29034.73	241.91	29140.10	312.26
9	28929.79	116.23	29140.10	180.87	28929.79	276.88	29034.73	330.32
10	28929.79	121.96	29140.10	187.12	28929.79	254.52	29034.73	321.33
Min	28929.79	109.95	28929.79	168.77	28929.79	240.59	28929.79	305.98
Max	29322.98	122.92	29363.80	187.12	29140.10	276.88	29140.10	345.34
Mean	29033.49	113.48	29057.38	174.29	29003.33	249.21	29045.35	323.63
Median	29034.73	110.76	29026.15	170.51	28982.26	245.11	29034.73	323.70

SD	122.72	5.07	140.36	6.92	86.55	11.14	77.61	10.86
----	--------	------	--------	------	-------	-------	-------	-------

ตาราง 9 หน้าตัดที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 2

กลุ่มที่	หน้าตัด
1 (เสา)	W360X314
2 (เสา)	W360X262
3 (เสา)	W360X196
4 (เสา)	W360X147
5 (เสา)	W360X91
6 (คาน)	W920X201
7 (คาน)	W760X147
8 (คาน)	W690X125
9 (คาน)	W530X66
น้ำหนักรวมของโครงสร้าง (กก.)	28929.79



ภาพประกอบ 23 ลักษณะของการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 2 โครงข้อ
แข็ง 1 ช่วง 10 ชั้น

จากภาพประกอบ 23 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมและจำนวนประชากร ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเร็วในการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของทุก

ประชากรของอีกามีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยพบว่าเมื่อจำนวนประชากรของอีกาเท่ากับ 40 ตัว มีลักษณะการลู่เข้าที่เร็วที่สุด ซึ่งเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบที่ 272

4.1.3 คำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการค้นหาแบบอีกาสำหรับตัวอย่างที่ 3 โครงข้อหมุน 10 ชิ้นส่วน

4.1.3.1 คำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการค้นหาแบบอีกาสำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยมแสดงดังตาราง 10 โดยทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง และทำการกำหนดชุดการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมของอีกาจำนวน 4 ชุด ประกอบด้วยอีกา 20 30 40 และ 50 ตัวซึ่งพบว่าทุกชุดการค้นหาของอีกาสามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 4094.4 กก. โดยจำนวนการซ้ำคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 5 7 6 และ 6 ครั้งตามลำดับ การกำหนดใช้จำนวนอีกาเท่ากับ 30 ตัว ส่งผลให้ค้นพบคำตอบที่เหมาะสมมากที่สุดจำนวน 7 ครั้ง คิดเป็นโอกาสการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 70 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4100.12 และใช้เวลาในการค้นหาเฉลี่ยเท่ากับ 11.24 วินาที ซึ่งหน้าตัดที่เหมาะสมแสดงดังตาราง 11 และลักษณะของการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของชุดการค้นหาของอีกาแต่ละชุดแสดงดังภาพประกอบ 24

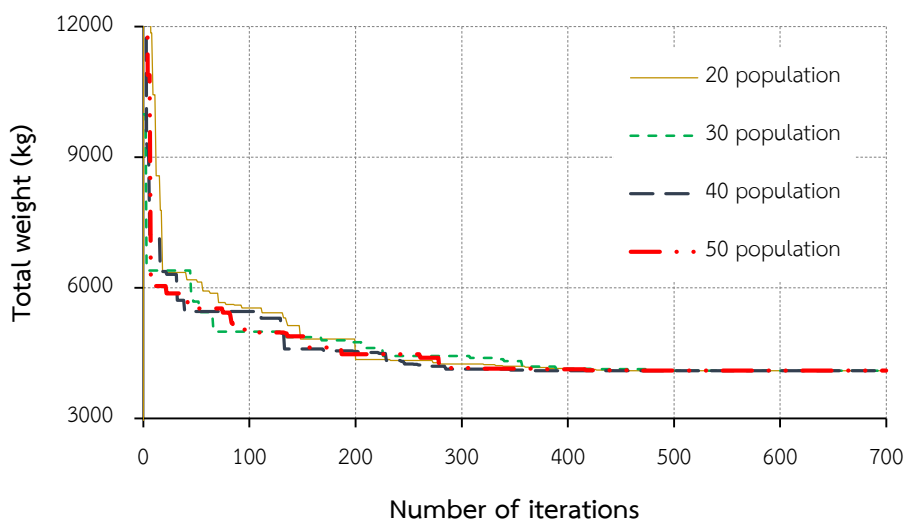
ตาราง 10 ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

ครั้งที่	อีกา 20 ตัว		อีกา 30 ตัว		อีกา 40 ตัว		อีกา 50 ตัว	
	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)
1	4105.18	9.41	4094.94	11.84	4105.18	15.67	4105.18	19.53
2	4094.94	9.33	4126.27	11.25	4094.94	15.48	4094.94	21.47
3	4094.94	8.95	4094.94	10.78	4094.94	14.80	4094.94	19.26
4	4105.18	9.45	4094.94	10.75	4094.94	13.86	4094.94	18.19
5	4105.18	8.37	4094.94	11.00	4105.18	14.56	4105.18	18.24
6	4105.18	8.48	4094.94	11.80	4094.94	14.91	4105.18	18.77
7	4105.18	8.75	4094.94	11.37	4094.94	14.87	4094.94	18.22
8	4094.94	8.36	4105.18	11.22	4105.18	13.86	4094.94	17.80
9	4094.94	8.47	4094.94	10.92	4094.94	14.52	4105.18	17.30
10	4094.94	8.29	4105.18	11.58	4105.18	14.69	4094.94	18.67

Min	4094.94	8.29	4094.94	10.75	4094.94	13.86	4094.94	17.30
Max	4105.18	9.45	4126.27	11.84	4105.18	15.67	4105.18	21.47
Mean	4100.06	8.79	4100.12	11.25	4099.04	14.72	4099.04	18.74
Median	4100.06	8.62	4094.94	11.23	4094.94	14.74	4094.94	18.45
SD	5.40	0.46	10.12	0.40	5.29	0.59	5.29	1.16

ตาราง 11 หน้าตัดที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

กลุ่มที่	หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม
1	HSS139.7X139.7X7.9
2	HSS304.8X304.8X6.4
3	HSS88.9X88.9X3.2
4	HSS304.8X304.8X4.8
น้ำหนักรวมของโครงสร้าง (กก.)	4094.94



ภาพประกอบ 24 ลักษณะของการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 3 โครงข้อหมุน 10 ชิ้นส่วน โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

จากภาพประกอบ 24 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมและจำนวนประชากร ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเร็วในการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของทุกประชากรของอีกามีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยพบว่าเมื่อจำนวนประชากรของอีกาเท่ากับ 40 ตัว มีลักษณะการลู่เข้าที่เร็วที่สุด ซึ่งเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบที่ 364

4.1.3.2 คำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดทอกลม

ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการค้นหาแบบอีกาสำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดทอกลมแสดงดังตาราง 12 โดยทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง และทำการกำหนดชุดการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมของอีกาจำนวน 4 ชุด ประกอบด้วยอีกา 20 30 40 และ 50 ตัว ซึ่งพบว่าทุกชุดการค้นหาของอีกาสามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 4287.99 กก. โดยมีจำนวนการเข้าคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 10 ครั้ง คิดเป็นโอกาสการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 100 และใช้เวลาในการค้นหาเฉลี่ยเท่ากับ 6.77 10.23 13.20 และ 16.08 วินาที ตามลำดับ ซึ่งการกำหนดใช้จำนวนอีกาเท่ากับ 20 ตัว ส่งผลให้เวลาในการค้นหาเฉลี่ยต่ำที่สุดเท่ากับ 6.77 วินาที ซึ่งหน้าตัดที่เหมาะสมแสดงดังตาราง 13 และลักษณะของการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของชุดการค้นหาของอีกาแต่ละชุดแสดงดังภาพประกอบ 25

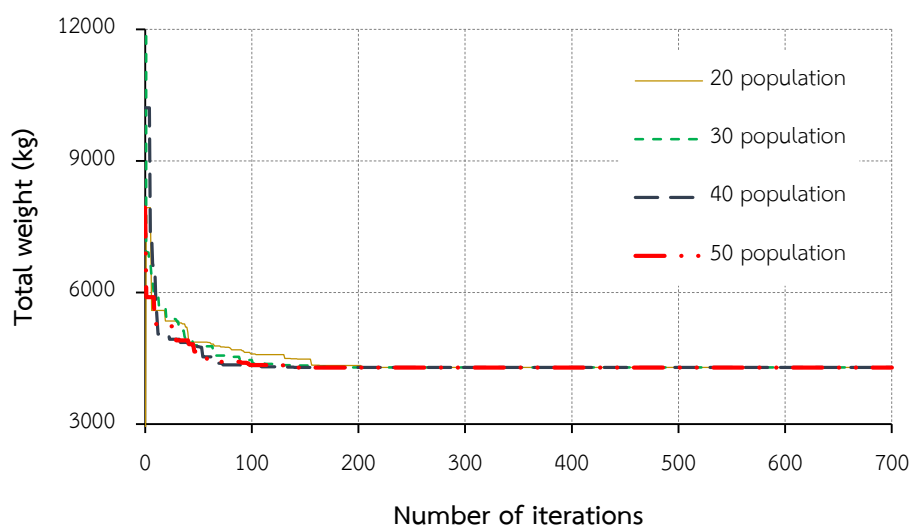
ตาราง 12 ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดทอกลม

ครั้งที่	อีกา 20 ตัว		อีกา 30 ตัว		อีกา 40 ตัว		อีกา 50 ตัว	
	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)
1	4287.99	6.78	4287.99	10.31	4287.99	13.15	4287.99	16.30
2	4287.99	6.77	4287.99	10.25	4287.99	12.97	4287.99	15.98
3	4287.99	6.73	4287.99	10.77	4287.99	13.62	4287.99	15.94
4	4287.99	6.78	4287.99	9.94	4287.99	13.00	4287.99	16.15
5	4287.99	6.81	4287.99	9.92	4287.99	13.15	4287.99	15.92
6	4287.99	6.75	4287.99	9.92	4287.99	12.94	4287.99	15.98
7	4287.99	6.78	4287.99	10.27	4287.99	13.15	4287.99	15.95
8	4287.99	6.80	4287.99	10.44	4287.99	13.11	4287.99	15.98
9	4287.99	6.76	4287.99	10.20	4287.99	12.94	4287.99	16.61
10	4287.99	6.75	4287.99	10.30	4287.99	13.93	4287.99	15.94
Min	4287.99	6.73	4287.99	9.92	4287.99	12.94	4287.99	15.92
Max	4287.99	6.81	4287.99	10.77	4287.99	13.93	4287.99	16.61
Mean	4287.99	6.77	4287.99	10.23	4287.99	13.20	4287.99	16.08
Median	4287.99	6.77	4287.99	10.26	4287.99	13.13	4287.99	15.98

SD	0.00	0.02	0.00	0.26	0.00	0.33	0.00	0.22
----	------	------	------	------	------	------	------	------

ตาราง 13 หน้าตัดที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดทอกลม

กลุ่มที่	หน้าตัดทอกลม
1	HSS139.7X9.5
2	HSS355.6X6.4
3	HSS114.3X3.2
4	HSS323.9X6.4
น้ำหนักรวมของโครงสร้าง (กก.)	4287.99



ภาพประกอบ 25 ลักษณะของการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 3 โครงข้อหมุน 10 ชิ้นส่วน โดยใช้หน้าตัดทอกลม

จากภาพประกอบ 25 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมและจำนวนประชากร ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเร็วในการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของทุกประชากรของอีกามีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยพบว่าเมื่อจำนวนประชากรของอีกาเพิ่มขึ้น จะเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมได้เร็วขึ้น ซึ่งเมื่อจำนวนอีกาเท่ากับ 50 ตัว มีลักษณะการลู่เข้าที่เร็วที่สุด ซึ่งเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบที่ 133

4.1.3.3 คำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดปีกกว้าง

ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการค้นหาแบบอีกาสำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดปีกกว้างแสดงดังตาราง 14 โดยทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง และทำการกำหนดชุดการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมของอีกาจำนวน 4 ชุด ประกอบด้วยอีกา 20 30 40 และ 50 ตัว ซึ่งพบว่าทุกชุดการค้นหาของอีกาสามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 4548.36 กก. โดยมีจำนวนการเข้าคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 8 4 4 และ 6 ครั้ง การกำหนดใช้จำนวนอีกาเท่ากับ 20 ตัว ส่งผลให้ค้นพบคำตอบที่เหมาะสมมากที่สุดจำนวน 8 ครั้ง คิดเป็นโอกาสการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 80 โดยมีค่าเฉลี่ย ค่ามัธยฐาน และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 7596.30 7548.36 และ 143.46 ตามลำดับ และใช้เวลาในการค้นหาเฉลี่ยเท่ากับ 6.99 วินาที ซึ่งหน้าตัดที่เหมาะสมแสดงดังตาราง 15 และลักษณะของการลู่ออกหาคำตอบที่เหมาะสมของชุดการค้นหาของอีกาแต่ละชุดแสดงดังภาพประกอบ 26

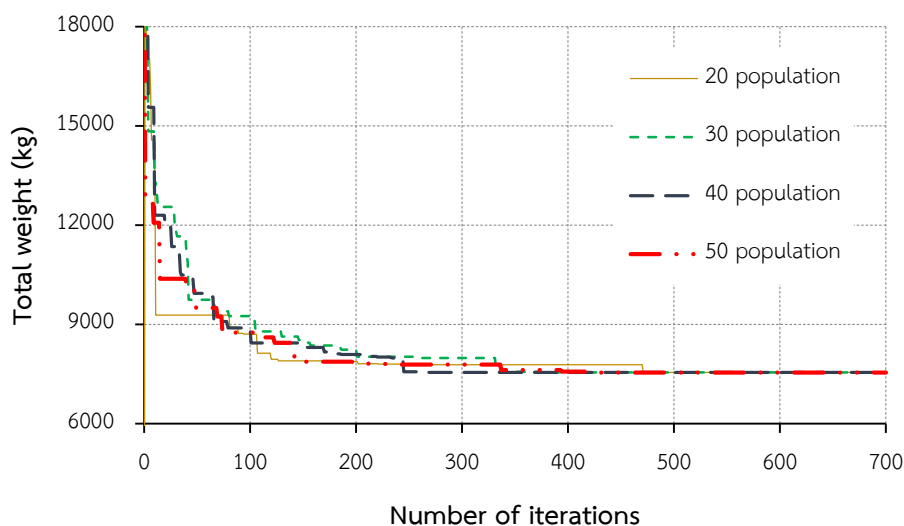
ตาราง 14 ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดปีกกว้าง

ครั้งที่	อีกา 20 ตัว		อีกา 30 ตัว		อีกา 40 ตัว		อีกา 50 ตัว	
	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)
1	8004.03	7.00	7595.89	10.67	7548.36	13.23	7548.36	16.17
2	7548.36	7.11	7548.36	10.44	7548.36	13.16	7985.75	16.36
3	7548.36	7.00	7782.34	10.39	7548.36	13.45	7548.36	16.58
4	7548.36	7.14	7548.36	10.15	7814.86	13.14	7548.36	16.93
5	7548.36	7.12	7782.34	10.15	8004.03	13.12	7548.36	16.11
6	7548.36	6.98	8004.03	10.00	8004.03	13.93	7782.34	16.11
7	7572.12	6.78	8004.03	10.15	7782.34	13.93	7782.34	16.14
8	7548.36	6.83	7548.36	10.30	7782.34	13.11	7548.36	16.14
9	7548.36	6.81	7548.36	10.15	7548.36	13.14	7548.36	16.93
10	7548.36	6.84	7798.88	10.30	7782.34	13.12	7782.34	16.23
Min	7548.36	6.78	7548.36	10.00	7548.36	13.11	7548.36	16.11
Max	8004.03	7.14	8004.03	10.67	8004.03	13.93	7985.75	16.93
Mean	7596.30	6.96	7716.10	10.27	7736.34	13.33	7662.30	16.37

Median	7548.36	6.99	7689.12	10.23	7782.34	13.15	7548.36	16.20
SD	143.46	0.14	185.12	0.19	181.71	0.33	158.38	0.33

ตาราง 15 หน้าตัดที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดปีกกว้าง

กลุ่มที่	หน้าตัดปีกกว้าง
1	W200X41.7
2	W310X97
3	W150X22.5
4	W250X89
น้ำหนักรวมของโครงสร้าง (กก.)	7548.36



ภาพประกอบ 26 ลักษณะของการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 3 โครงข้อหมุน 10 ชั้นส่วน โดยใช้หน้าตัดปีกกว้าง

จากภาพประกอบ 26 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมและจำนวนประชากร ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเร็วในการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของทุกประชากรของอีกามีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยพบว่าเมื่อจำนวนประชากรของอีกาเท่ากับ 40 ตัว มีลักษณะการลู่เข้าที่เร็วที่สุด ซึ่งเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบที่ 259

4.1.3 คำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการค้นหาแบบอีกาสำหรับตัวอย่างที่ 4 โครงข้อ
หมูน 18 ชิ้นส่วน

4.1.3.3 คำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการค้นหาแบบอีกาสำหรับ
ตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยมแสดงดังตาราง 16 โดยทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง และทำ
การกำหนดชุดการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมของอีกาจำนวน 4 ชุด ประกอบด้วยอีกา 20 30 40 และ
50 ตัว ซึ่งพบว่าทุกชุดการค้นหาของอีกาสามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 4515.27 กก. โดย
มีจำนวนการเข้าคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 8 7 10 และ 9 ครั้ง ตามลำดับ การกำหนดใช้จำนวนอีกา
เท่ากับ 40 ตัว ส่งผลให้ค้นพบคำตอบที่เหมาะสมมากที่สุดจำนวน 10 ครั้ง คิดเป็นโอกาสการค้นพบ
คำตอบที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 100 และใช้เวลาในการค้นหาเฉลี่ยเท่ากับ 25.02 วินาที ซึ่งหน้าตัด
ที่เหมาะสมแสดงดังตาราง 17 และลักษณะของการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของชุดการค้นหาของ
อีกาแต่ละชุดแสดงดังภาพประกอบ 27

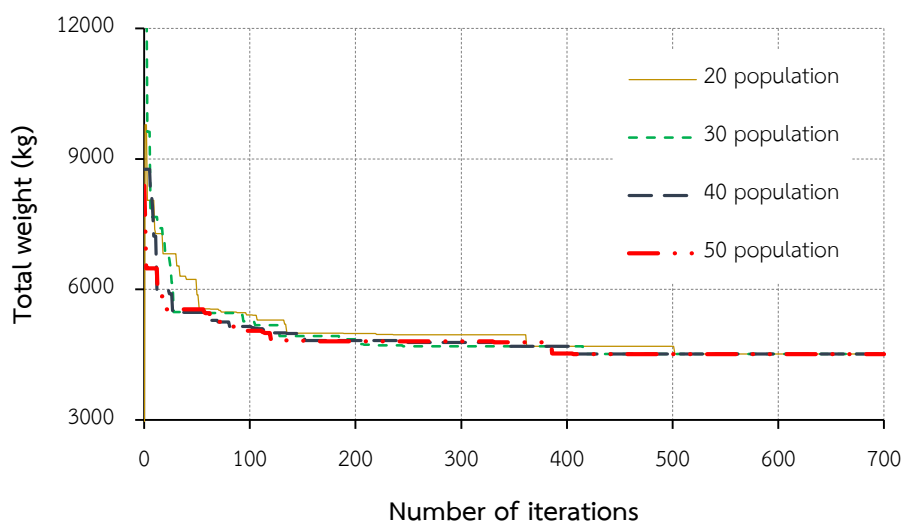
ตาราง 16 ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าตัดท่อ
สี่เหลี่ยม

ครั้งที่	อีกา 20 ตัว		อีกา 30 ตัว		อีกา 40 ตัว		อีกา 50 ตัว	
	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)
1	4515.27	13.00	4515.27	22.87	4515.27	25.33	4690.53	30.86
2	4515.27	13.15	4515.27	19.72	4515.27	24.97	4515.27	30.85
3	4515.27	13.78	4515.27	19.00	4515.27	24.93	4515.27	30.81
4	4515.27	17.14	4515.27	18.89	4515.27	25.23	4515.27	30.89
5	4690.53	13.98	4515.27	18.97	4515.27	25.14	4515.27	30.87
6	4515.27	13.14	4783.43	18.92	4515.27	24.97	4515.27	30.87
7	4515.27	12.98	4515.27	19.38	4515.27	24.97	4515.27	30.92
8	4515.27	13.56	4515.27	19.39	4515.27	24.86	4515.27	30.84
9	4690.53	13.15	4690.53	18.94	4515.27	24.86	4515.27	31.14
10	4515.27	13.15	4690.53	18.94	4515.27	24.92	4515.27	30.84
Min	4515.27	12.98	4515.27	18.89	4515.27	24.86	4515.27	30.81
Max	4690.53	17.14	4783.43	22.87	4515.27	25.33	4690.53	31.14

Mean	4550.32	13.70	4577.14	19.50	4515.27	25.02	4532.79	30.89
Median	4515.27	13.15	4515.27	18.98	4515.27	24.97	4515.27	30.87
SD	73.90	1.25	102.78	1.22	0.00	0.16	55.42	0.09

ตาราง 17 หน้าตัดที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

กลุ่มที่	หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม
1	HSS152.4X101.6X9.5
2	HSS304.8X304.8X6.4
3	HSS228.6X228.6X3.2
4	HSS254X88.9X4.8
น้ำหนักรวมของโครงสร้าง (กก.)	4515.27



ภาพประกอบ 27 ลักษณะของการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 4 โครงข้อหมุน 18 ชิ้นส่วน โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

จากภาพประกอบ 27 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมและจำนวนประชากร ซึ่งจะเห็นได้ถึงความเร็วในการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของทุกประชากรของอีกามีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยพบว่าเมื่อจำนวนประชากรของอีกาเท่ากับ 40 และ 50 ตัว มีลักษณะการรู้เข้าที่เร็วที่สุด ซึ่งเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบที่ 406 เท่ากัน

4.1.3.3 คำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าตัดท่อกลม

ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการค้นหาแบบอีกาสำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าตัดท่อกลมแสดงดังตาราง 18 โดยทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง และทำการกำหนดชุดการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมของอีกาจำนวน 4 ชุด ประกอบด้วยอีกา 20 30 40 และ 50 ตัวซึ่งพบว่าทุกชุดการค้นหาของอีกาสามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 4742.74 กก. โดยมีจำนวนการเข้าคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 10 ครั้ง คิดเป็นโอกาสการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 100 และใช้เวลาในการค้นหาเฉลี่ยเท่ากับ 13.66 19.27 25.41 และ 31.63 วินาที ตามลำดับ ซึ่งการกำหนดใช้จำนวนอีกาเท่ากับ 20 ตัว ส่งผลให้เวลาในการค้นหาเฉลี่ยต่ำที่สุดเท่ากับ 13.66 วินาที โดยหน้าตัดที่เหมาะสมแสดงดังตาราง 19 และลักษณะของการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของชุดการค้นหาของอีกาแต่ละชุดแสดงดังภาพประกอบ 28

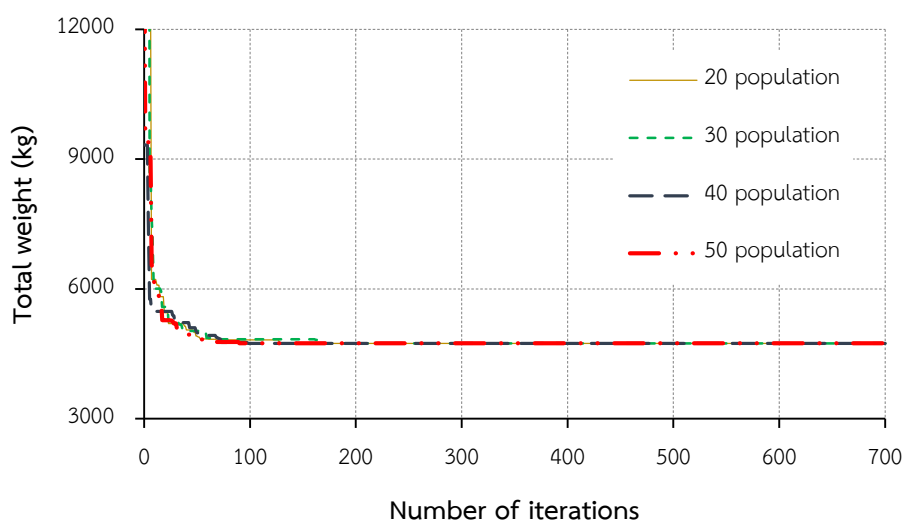
ตาราง 18 ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าตัดท่อกลม

ครั้งที่	อีกา 20 ตัว		อีกา 30 ตัว		อีกา 40 ตัว		อีกา 50 ตัว	
	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)
1	4742.74	16.55	4742.74	19.32	4742.74	25.37	4742.74	32.62
2	4742.74	13.53	4742.74	19.19	4742.74	25.37	4742.74	31.55
3	4742.74	13.25	4742.74	19.23	4742.74	25.33	4742.74	31.47
4	4742.74	13.28	4742.74	19.33	4742.74	25.50	4742.74	31.47
5	4742.74	13.22	4742.74	19.28	4742.74	25.44	4742.74	31.64
6	4742.74	13.28	4742.74	19.20	4742.74	25.64	4742.74	31.47
7	4742.74	13.31	4742.74	19.30	4742.74	25.36	4742.74	31.39
8	4742.74	13.25	4742.74	19.26	4742.74	25.34	4742.74	31.53
9	4742.74	13.80	4742.74	19.30	4742.74	25.37	4742.74	31.73
10	4742.74	13.36	4742.74	19.28	4742.74	25.34	4742.74	31.44
Min	4742.74	13.22	4742.74	19.19	4742.74	25.33	4742.74	31.39
Max	4742.74	16.55	4742.74	19.33	4742.74	25.64	4742.74	32.62
Mean	4742.74	13.68	4742.74	19.27	4742.74	25.41	4742.74	31.63
Median	4742.74	13.30	4742.74	19.28	4742.74	25.37	4742.74	31.50

SD	0.00	1.02	0.00	0.05	0.00	0.10	0.00	0.36
----	------	------	------	------	------	------	------	------

ตาราง 19 หน้าตัดที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าตัดทอกลม

กลุ่มที่	หน้าตัดทอกลม
1	HSS152.4X9.5
2	HSS406.4X6.4
3	HSS219.1X4.8
4	HSS114.3X9.5
น้ำหนักรวมของโครงสร้าง (กก.)	4742.74



ภาพประกอบ 28 ลักษณะของการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 4 โครงข้อหมุน 18 ชิ้นส่วน โดยใช้หน้าตัดทอกลม

จากภาพประกอบ 28 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมและจำนวนประชากร ซึ่งจะเห็นได้ถึงความเร็วในการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของทุกประชากรของอีกามีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยพบว่าเมื่อจำนวนประชากรของอีกาเท่ากับ 20 ตัว มีลักษณะการลู่เข้าที่เร็วที่สุด ซึ่งเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบที่ 128

4.1.3.3 คำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าตัดปีกกว้าง

ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการค้นหาแบบอีกาสำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าตัดปีกกว้างแสดงดังตาราง 20 โดยทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง และทำการกำหนดชุดการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมของอีกาจำนวน 4 ชุด ประกอบด้วยอีกา 20 30 40 และ 50

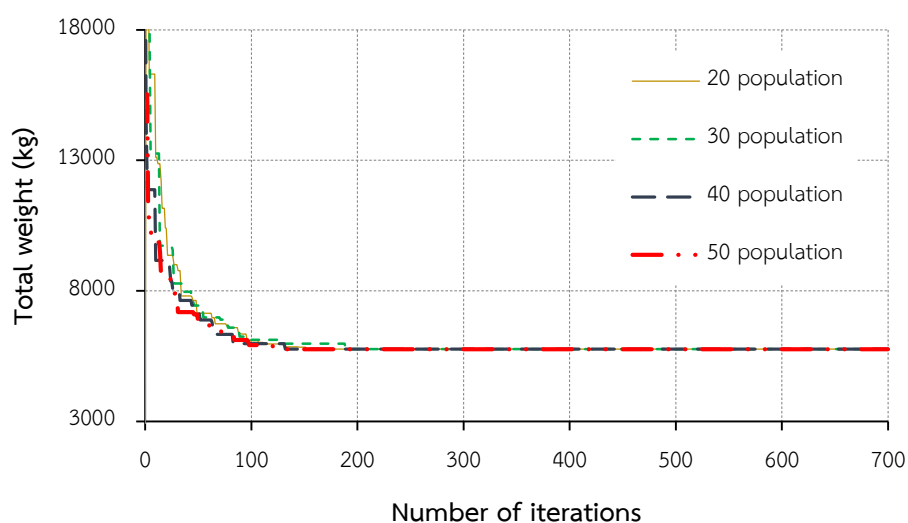
ตัว ซึ่งพบว่าทุกชุดการค้นหาของอีกาสามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 5767.81 กก. โดยมีจำนวนการเข้าคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 10 ครั้ง คิดเป็นโอกาสการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 100 และใช้เวลาในการค้นหาเฉลี่ยเท่ากับ 13.08 19.29 25.21 และ 30.97 วินาที ตามลำดับ ซึ่งการกำหนดใช้จำนวนอีกาเท่ากับ 20 ตัว ส่งผลให้เวลาในการค้นหาเฉลี่ยต่ำที่สุดเท่ากับ 13.08 วินาที โดยหน้าตัดที่เหมาะสมแสดงดังตาราง 21 และลักษณะของการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของชุดการค้นหาของอีกาแต่ละชุดแสดงดังภาพประกอบ 29

ตาราง 20 ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าตัดปีกกว้าง

ครั้งที่	อีกา 20 ตัว		อีกา 30 ตัว		อีกา 40 ตัว		อีกา 50 ตัว	
	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)
1	5767.81	13.00	5767.81	19.93	5767.81	25.46	5767.81	31.30
2	5767.81	13.00	5767.81	19.00	5767.81	24.98	5767.81	30.90
3	5767.81	12.97	5767.81	19.30	5767.81	25.14	5767.81	30.86
4	5767.81	13.15	5767.81	19.14	5767.81	24.98	5767.81	30.94
5	5767.81	12.98	5767.81	19.50	5767.81	24.98	5767.81	30.87
6	5767.81	12.94	5767.81	19.46	5767.81	24.97	5767.81	31.00
7	5767.81	13.28	5767.81	19.00	5767.81	24.91	5767.81	30.84
8	5767.81	13.47	5767.81	19.61	5767.81	24.97	5767.81	30.95
9	5767.81	12.97	5767.81	18.97	5767.81	25.77	5767.81	31.20
10	5767.81	13.00	5767.81	18.95	5767.81	24.98	5767.81	30.89
Min	5767.81	12.94	5767.81	18.95	5767.81	24.91	5767.81	30.84
Max	5767.81	13.47	5767.81	19.93	5767.81	25.77	5767.81	31.30
Mean	5767.81	13.08	5767.81	19.29	5767.81	25.12	5767.81	30.97
Median	5767.81	13.00	5767.81	19.22	5767.81	24.98	5767.81	30.92
SD	0.00	0.17	0.00	0.33	0.00	0.28	0.00	0.15

ตาราง 21 หน้าตัดที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าตัดปีกกว้าง

กลุ่มที่	หน้าตัดปีกกว้าง
1	W310X32.7
2	W250X80
3	W200X46.1
4	W150X22.5
น้ำหนักรวมของโครงสร้าง (กก.)	5767.81



ภาพประกอบ 29 ลักษณะของการหาคำตอบที่เหมาะสมของ CSA สำหรับตัวอย่างที่ 4 โครงข้อ
หมุน 18 ชิ้นส่วน โดยใช้หน้าตัดท่อกลม

จากภาพประกอบ 29 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหาคำตอบที่เหมาะสมและจำนวนประชากร ซึ่งจะเห็นได้ถึงความเร็วในการหาคำตอบที่เหมาะสมของทุกประชากรของอีกามีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยพบว่าเมื่อจำนวนประชากรของอีกาเท่ากับ 50 ตัว มีลักษณะการหาคำตอบที่เร็วที่สุด ซึ่งเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบที่ 121

4.2 คำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสีเทา

4.2.1 คำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสีเทาสำหรับตัวอย่างที่ 1 โครงข้อแข็ง 2 ช่วง 3 ชั้น

ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสีเทาสำหรับตัวอย่างที่ 1 แสดงดังตาราง 22 โดยทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง และทำการกำหนดชุดการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมของหมาป่าสีเทาจำนวน 4 ชุด ประกอบด้วยหมาป่าสีเทา 20 30 40 และ 50 ตัว ซึ่งพบว่าทุกชุดการค้นหาสามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 8256.96 กก. โดยจำนวนการหาคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 4 6 6 และ 7 ครั้ง ตามลำดับ การกำหนดใช้จำนวนหมาป่าสีเทาเท่ากับ 50 ตัว ส่งผลให้ค้นพบคำตอบที่เหมาะสมมากที่สุดจำนวน 7 ครั้ง คิดเป็นโอกาสการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 70 โดยมีค่าเฉลี่ย ค่ามัธยฐาน และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 8400.25 8256.96 และ 249.18 ตามลำดับและใช้เวลาในการค้นหาเฉลี่ยเท่ากับ 14.87 วินาที ซึ่งหน้าตัดที่เหมาะสมแสดงดังตาราง 23 และลักษณะของการลู่อับหาคำตอบที่เหมาะสมของชุดการค้นหาของหมาป่าสีเทาแต่ละชุดแสดงดังภาพประกอบ 30

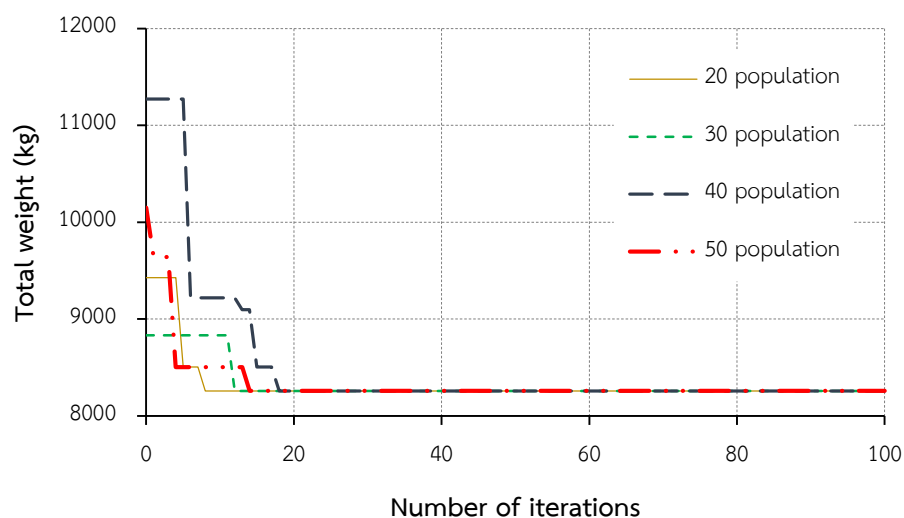
ตาราง 22 ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 1

ครั้งที่	หมาป่า 20 ตัว		หมาป่า 30 ตัว		หมาป่า 40 ตัว		หมาป่า 50 ตัว	
	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)
1	8504.01	6.15	8256.96	9.77	8256.96	11.73	8256.96	15.13
2	8849.88	6.37	8256.96	8.78	8849.88	11.84	8849.88	16.31
3	8256.96	6.20	8256.96	9.93	8256.96	12.17	8504.01	16.78
4	8849.88	8.69	8256.96	8.83	8256.96	11.91	8849.88	14.98
5	8256.96	6.40	8256.96	9.30	8849.88	11.77	8256.96	14.11
6	8256.96	6.20	8256.96	9.15	8849.88	11.64	8256.96	14.21
7	8849.88	6.23	10299.24	8.91	8256.96	11.69	8256.96	14.23
8	8849.88	6.25	8849.88	8.92	8849.88	12.52	8256.96	14.19
9	8256.96	7.17	8849.88	8.84	8256.96	13.61	8256.96	14.31
10	8849.88	6.25	8849.88	8.78	8256.96	11.74	8256.96	14.41
Min	8256.96	6.15	8256.96	8.78	8256.96	11.64	8256.96	14.11

Max	8849.88	8.69	10299.24	9.93	8849.88	13.61	8849.88	16.78
Mean	8578.13	6.59	8639.06	9.12	8494.13	12.06	8400.25	14.87
Median	8676.95	6.25	8256.96	8.91	8256.96	11.80	8256.96	14.36
SD	295.77	0.79	646.83	0.42	306.18	0.61	249.18	0.96

ตาราง 23 หน้าตัดที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 1

กลุ่มที่	หน้าตัด
1 (เสา)	W250X80
2 (คาน)	W610X92
น้ำหนักรวมของโครงสร้าง (กก.)	8256.96



ภาพประกอบ 30 ลักษณะของการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 1 โครงข้อ
แข็ง 2 ช่วง 3 ชั้น

จากภาพประกอบ 30 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมและจำนวนประชากร ซึ่งจะเห็นได้ถึงความเร็วในการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของทุกประชากรของหมาป่าสีเทาที่มีค่าใกล้เคียงกัน โดยพบว่าเมื่อจำนวนประชากรของหมาป่าสีเทาเท่ากับ 20 ตัว มีลักษณะการลู่เข้าที่เร็วที่สุด ซึ่งเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบที่ 8

4.2.2 คำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสี่เทาสำหรับตัวอย่างที่ 2 โครงข้อแข็ง 1 ช่วง 10 ชั้น

ผลการทดสอบการหาค่าตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสี่เทาสำหรับตัวอย่างที่ 2 แสดงดังตาราง 24 โดยทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง และทำการกำหนดชุดการค้นหาค่าตอบที่เหมาะสมของหมาป่าสี่เทาจำนวน 4 ชุด ประกอบด้วยหมาป่าสี่เทา 20 30 40 และ 50 ตัว ซึ่งสามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 40365.27 39165.58 36656.47 และ 36579.66 กก. ตามลำดับ โดยจำนวนการเข้าคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 1 ครั้ง คิดเป็นโอกาสการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 10 การกำหนดใช้จำนวนหมาป่าสี่เทาเท่ากับ 50 ตัว ส่งผลให้ค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 36579.66 กก. โดยมีค่าเฉลี่ย ค่ามัธยฐาน และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 42549.78 41285.16 และ 5637.01 กก. ตามลำดับและใช้เวลาในการค้นหาเฉลี่ยเท่ากับ 270.70 วินาที ซึ่งหน้าตัดที่เหมาะสมแสดงดังตาราง 25 และลักษณะของการลู่อู่เข้าหาค่าตอบที่เหมาะสมของชุดการค้นหาของหมาป่าสี่เทาแต่ละชุดแสดงดังภาพประกอบ 31

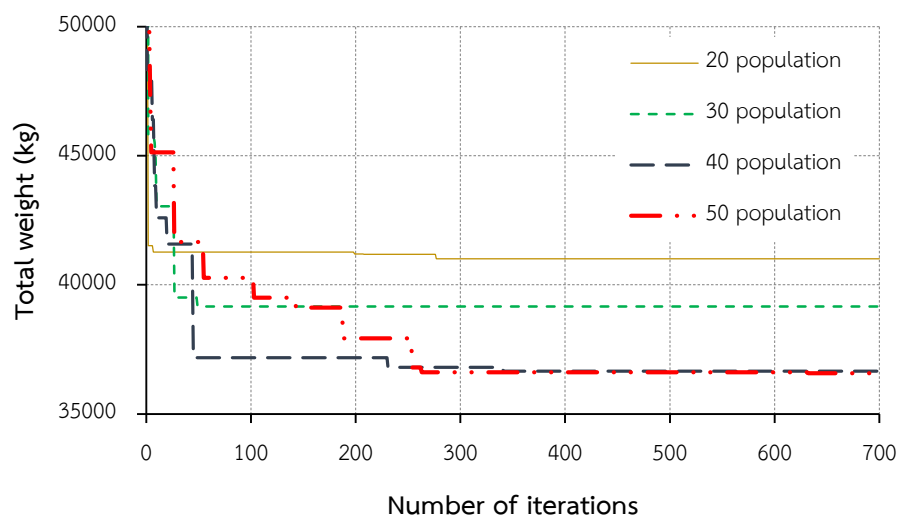
ตาราง 24 ผลการทดสอบการหาค่าตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 2

ครั้งที่	หมาป่า 20 ตัว		หมาป่า 30 ตัว		หมาป่า 40 ตัว		หมาป่า 50 ตัว	
	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)
1	49512.93	110.76	52773.68	197.37	44536.77	273.80	36579.66	271.12
2	44606.26	128.88	42865.24	189.81	40162.28	274.65	39403.32	272.95
3	52142.75	135.27	51493.52	190.92	52215.90	272.79	40191.54	268.94
4	40365.27	126.45	39165.58	194.74	38194.49	284.35	53049.83	270.48
5	41012.67	121.11	51041.81	194.91	50633.99	218.94	42378.78	270.84
6	45858.99	120.52	46522.84	192.27	46477.12	237.65	42437.30	268.80
7	49103.28	124.49	45341.44	162.25	37386.16	240.76	45666.96	266.97
8	47082.46	122.95	48496.12	202.95	45061.63	213.63	36724.13	268.20
9	46555.76	120.96	49416.00	186.29	49840.29	216.53	50577.29	268.37
10	44973.85	134.13	49139.86	183.10	36656.47	292.59	38488.92	280.38
Min	40365.27	110.76	39165.58	162.25	36656.47	213.63	36579.66	266.97
Max	52142.75	135.27	52773.68	202.95	52215.90	292.59	53049.83	280.38
Mean	46121.42	124.55	47625.61	189.46	44116.51	252.57	42549.78	270.70

Median	46207.38	123.72	48817.99	191.59	44799.20	256.78	41285.16	269.71
SD	3661.76	7.17	4217.12	11.07	5765.20	30.31	5637.01	3.82

ตาราง 25 หน้าตัดที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 2

กลุ่มที่	หน้าตัด
1 (เสา)	W360X314
2 (เสา)	W360X287
3 (เสา)	W360X237
4 (เสา)	W310X226
5 (เสา)	W310X202
6 (คาน)	W840X226
7 (คาน)	W690X170
8 (คาน)	W610X153
9 (คาน)	W690X265
น้ำหนักรวมของโครงสร้าง (กก.)	36579.66



ภาพประกอบ 31 ลักษณะของการหาคำตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 2 โครงข้อ
แข็ง 1 ช่วง 10 ชั้น

จากภาพประกอบ 31 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมและจำนวนประชากร โดยพบว่าเมื่อจำนวนประชากรของหมาป่าสีเทาเท่ากับ 30 ตัว มีลักษณะการรู้เข้าที่เร็วที่สุด ซึ่งเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบที่ 49

4.2.3 คำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการค้นหาแบบฮิวริสติกสำหรับตัวอย่างที่ 3 โครงข่ายหมุน 10 ชั้นส่วน

4.2.3.1 คำตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสีเทาสำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยมแสดงดังตาราง 26 โดยทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง และทำการกำหนดชุดการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมของหมาป่าสีเทาจำนวน 4 ชุด ประกอบด้วยหมาป่าสีเทา 20 30 40 และ 50 ตัว ซึ่งสามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 4891.80 4576.99 4575.16 และ 4960.80 กก. ตามลำดับ โดยจำนวนการเข้าคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 1 ครั้ง คิดเป็นโอกาสการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 10 การกำหนดใช้จำนวนหมาป่าสีเทาเท่ากับ 40 ตัว ส่งผลให้ค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 4575.16 กก. โดยมีค่าเฉลี่ย ค่ามัธยฐาน และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 5314.72 5415.38 และ 312.55 กก. ตามลำดับ และใช้เวลาในการค้นหาเฉลี่ยเท่ากับ 13.45 วินาที ซึ่งหน้าตัดที่เหมาะสมแสดงดังตาราง 27 และลักษณะของการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของชุดการค้นหาของหมาป่าสีเทาแต่ละชุดแสดงดังภาพประกอบ 32

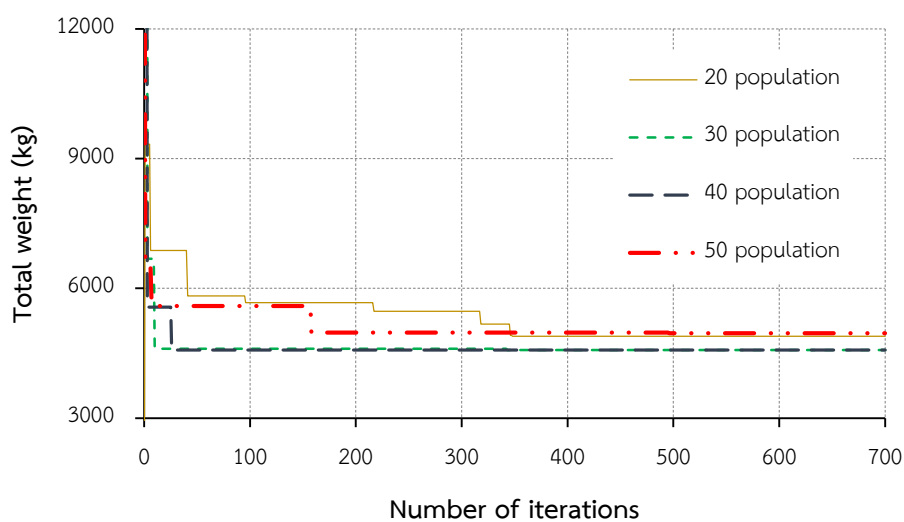
ตาราง 26 ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

ครั้งที่	หมาป่า 20 ตัว		หมาป่า 30 ตัว		หมาป่า 40 ตัว		หมาป่า 50 ตัว	
	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)
1	5409.12	8.16	4803.41	11.17	5528.71	13.77	5869.15	16.86
2	5410.95	8.27	5659.56	10.67	5155.80	13.77	5409.12	16.11
3	5685.15	8.33	5685.15	10.28	5316.35	13.11	5529.66	16.62
4	5602.38	7.22	5601.06	10.19	5609.60	13.63	5571.81	16.16
5	4891.80	7.20	4576.99	10.86	5464.86	13.16	4960.80	16.12
6	5772.97	7.25	5590.09	10.17	5585.88	13.14	5877.65	16.16
7	5385.36	7.62	4843.81	10.45	4575.16	13.93	5542.95	16.45
8	4941.15	7.16	4759.79	10.48	5452.99	13.46	5685.15	16.12

9	5604.21	7.28	5594.52	10.52	5377.76	13.44	5528.71	16.55
10	5659.56	7.20	5119.90	10.45	5080.08	13.14	5502.35	16.14
Min	4891.80	7.16	4576.99	10.17	4575.16	13.11	4960.80	16.11
Max	5772.97	8.33	5685.15	11.17	5609.60	13.93	5877.65	16.86
Mean	5436.26	7.57	5223.43	10.52	5314.72	13.45	5547.73	16.33
Median	5506.66	7.26	5355.00	10.47	5415.38	13.45	5536.31	16.16
SD	303.04	0.49	445.00	0.31	312.55	0.31	257.79	0.27

ตาราง 27 หน้าตัดที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

กลุ่มที่	หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม
1	HSS355.6X101.6X4.8
2	HSS355.6X254X6.4
3	HSS254X203.2X4.8
4	HSS304.8X304.8X4.8
น้ำหนักรวมของโครงสร้าง (กก.)	4575.16



ภาพประกอบ 32 ลักษณะของการลู่ออกค่าคำตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 3 โครงข้อหมุน 10 ชิ้นส่วน โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

จากภาพประกอบ 32 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมและจำนวนประชากร โดยพบว่าเมื่อจำนวนประชากรของหมาป่าสีเทาเท่ากับ 30 ตัว มีลักษณะการรู้เข้าที่เร็วที่สุด ซึ่งเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบที่ 343

4.2.3.1 คำตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าต่างต่อกลม

ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสีเทาสำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าต่างต่อกลมแสดงดังตาราง 28 โดยทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง และทำการกำหนดชุดการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมของหมาป่าสีเทาจำนวน 4 ชุด ประกอบด้วยหมาป่าสีเทา 20 30 40 และ 50 ตัว ซึ่งสามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 4960.70 4655.24 4708.43 และ 4748.65 กก. ตามลำดับ โดยจำนวนการเข้าหาคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 1 ครั้ง คิดเป็นโอกาสการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 10 การกำหนดใช้จำนวนหมาป่าสีเทาเท่ากับ 30 ตัว ส่งผลให้ค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 4655.24 กก. โดยมีค่าเฉลี่ย ค่ามัธยฐาน และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 5081.57 5155.33 และ 198.72 กก. ตามลำดับ และใช้เวลาในการค้นหาเฉลี่ยเท่ากับ 13.45 วินาที ซึ่งหน้าต่างที่เหมาะสมแสดงดังตาราง 29 และลักษณะของการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของชุดการค้นหาของหมาป่าสีเทาแต่ละชุดแสดงดังภาพประกอบ 33

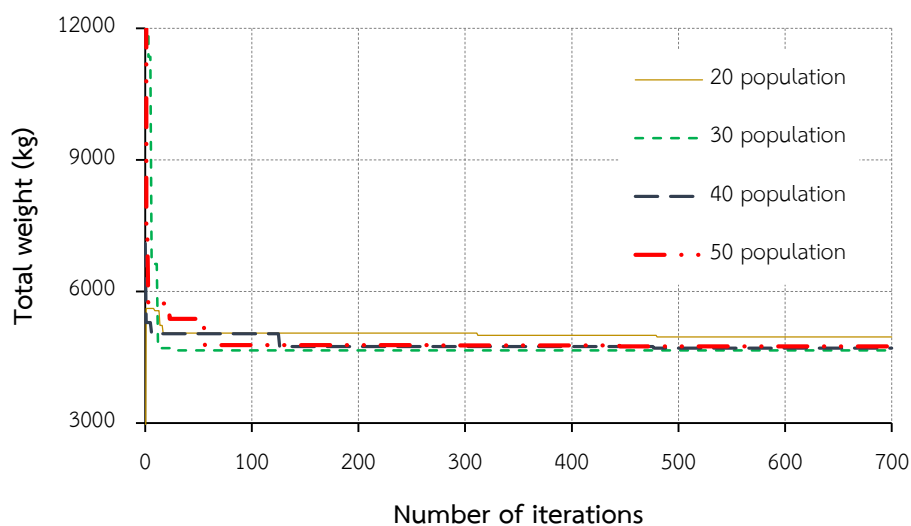
ตาราง 28 ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าต่างต่อกลม

ครั้งที่	หมาป่า 20 ตัว		หมาป่า 30 ตัว		หมาป่า 40 ตัว		หมาป่า 50 ตัว	
	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)
1	5141.67	6.86	5295.22	10.00	5209.29	13.12	5276.94	16.33
2	5256.83	6.87	5147.16	10.15	5276.94	12.98	4973.49	16.15
3	5093.02	9.30	5169.89	9.94	5166.88	12.97	4975.32	16.54
4	5025.45	7.22	5163.50	9.92	5265.97	13.00	5182.97	15.94
5	5256.83	7.58	4655.24	9.94	4708.43	12.98	4748.65	15.95
6	4960.70	7.31	5247.69	9.84	5150.81	13.15	5177.44	16.93
7	5122.12	8.77	5112.42	9.91	4730.37	13.22	5176.40	15.97
8	5124.96	6.72	5041.13	9.86	5139.96	12.97	4945.01	15.95
9	5276.94	6.97	5169.04	9.98	5093.29	12.97	4768.76	15.94
10	5163.60	6.77	4814.46	10.52	5166.20	13.00	5295.22	15.94

Min	4960.70	6.72	4655.24	9.84	4708.43	12.97	4748.65	15.94
Max	5276.94	9.30	5295.22	10.52	5276.94	13.22	5295.22	16.93
Mean	5142.21	7.44	5081.57	10.01	5090.81	13.04	5052.02	16.16
Median	5133.31	7.09	5155.33	9.94	5158.50	12.99	5075.86	15.96
SD	102.52	0.89	198.72	0.20	203.58	0.09	198.29	0.34

ตาราง 29 หน้าตัดที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดท่อกลม

กลุ่มที่	หน้าตัดท่อกลม
1	HSS323.9X6.4
2	HSS355.6X6.4
3	HSS127X3.2
4	HSS323.9X6.4
น้ำหนักรวมของโครงสร้าง (กก.)	4655.24



ภาพประกอบ 33 ลักษณะของการลู่ออกค่าตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 3 โครงสร้างหมุน 10 ชิ้นส่วน โดยใช้หน้าตัดท่อกลม

จากภาพประกอบ 33 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมและจำนวนประชากร ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเร็วในการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของทุกประชากรของหมาป่าสีเทามีค่าใกล้เคียงกัน โดยพบว่าเมื่อจำนวนประชากรของหมาป่าสีเทาเท่ากับ 30 ตัว มีลักษณะการรู้เข้าที่เร็วที่สุด ซึ่งเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบที่ 26

4.2.3.1 คำตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าต่างดัดปีกกว้าง

ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสีเทาสำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าต่างดัดปีกกว้างแสดงดังตาราง 30 โดยทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง และทำการกำหนดชุดการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมของหมาป่าสีเทาจำนวน 4 ชุด ประกอบด้วยหมาป่าสีเทา 20 30 40 และ 50 ตัว ซึ่งสามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 8543.29 8150.58 8585.73 และ 8581.18 กก. ตามลำดับ โดยจำนวนการเข้าคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 1 ครั้ง คิดเป็นโอกาสการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 10 การกำหนดใช้จำนวนหมาป่าสีเทาเท่ากับ 30 ตัว ส่งผลให้ค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 8150.58 กก. โดยมีค่าเฉลี่ย ค่ามัธยฐาน และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 9411.72 9008.52 และ 1028.64 กก. ตามลำดับ และใช้เวลาในการค้นหาเฉลี่ยเท่ากับ 10.23 วินาที ซึ่งหน้าต่างที่เหมาะสมแสดงดังตาราง 31 และลักษณะของการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของชุดการค้นหาของหมาป่าสีเทาแต่ละชุดแสดงดังภาพประกอบ 34

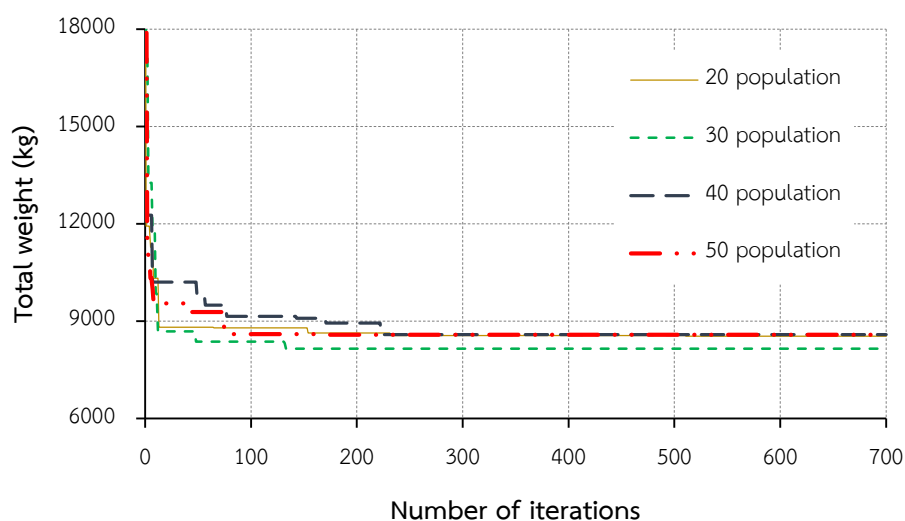
ตาราง 30 ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าต่างดัดปีกกว้าง

ครั้งที่	หมาป่า 20 ตัว		หมาป่า 30 ตัว		หมาป่า 40 ตัว		หมาป่า 50 ตัว	
	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)
1	9985.08	7.53	9347.61	10.30	9566.69	13.17	8815.67	17.61
2	9676.65	9.54	8683.67	10.00	10060.19	13.93	9709.56	16.11
3	8543.29	7.39	9713.21	10.62	10115.37	13.11	9219.65	16.27
4	11102.49	7.48	8970.54	10.15	8813.84	13.12	9111.80	16.20
5	9896.01	7.84	11321.85	9.98	9585.25	13.77	9311.05	16.14
6	10413.05	7.67	11084.21	9.98	9585.50	13.41	9581.60	16.16
7	9246.57	6.84	9036.85	10.15	8585.73	13.12	9210.01	16.12
8	11486.37	6.83	8828.46	10.77	11139.05	13.10	8581.18	16.93
9	10316.45	6.81	8980.19	9.98	9822.89	13.16	8671.25	16.12

10	10170.21	6.89	8150.58	10.31	11596.05	13.16	9676.65	16.14
Min	8543.29	6.81	8150.58	9.98	8585.73	13.10	8581.18	16.11
Max	11486.37	9.54	11321.85	10.77	11596.05	13.93	9709.56	17.61
Mean	10083.62	7.48	9411.72	10.23	9887.06	13.30	9188.84	16.38
Median	10077.65	7.44	9008.52	10.15	9704.20	13.16	9214.83	16.15
SD	847.21	0.82	1028.64	0.28	925.22	0.30	403.05	0.50

ตาราง 31 หน้าตัดที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดปีกกว้าง

กลุ่มที่	หน้าตัดปีกกว้าง
1	W200X26.6
2	W310X107
3	W200X86
4	W250X80
น้ำหนักรวมของโครงสร้าง (กก.)	8150.58



ภาพประกอบ 34 ลักษณะของการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 3 โครงข้อ
หมุน 10 ชิ้นส่วน โดยใช้หน้าตัดปีกกว้าง

จากภาพประกอบ 34 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมและจำนวนประชากร ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเร็วในการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของทุกประชากรของหมาป่าสี่เทามีค่าใกล้เคียงกัน โดยพบว่าเมื่อจำนวนประชากรของหมาป่าสี่เทเท่ากับ 30 ตัว มีลักษณะการรู้เข้าที่เร็วที่สุด ซึ่งเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบที่ 133

4.2.4 คำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการค้นหาแบบอีกาสำหรับตัวอย่างที่ 4 โครงข้อหมุน 18 ชิ้นส่วน

4.2.4.1 คำตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสี่เทสำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยมแสดงดังตาราง 32 โดยทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง และทำการกำหนดชุดการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมของหมาป่าสี่เทจำนวน 4 ชุด ประกอบด้วยหมาป่าสี่เท 20 30 40 และ 50 ตัว ซึ่งสามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 5154.96 5274.34 5204.16 และ 5357.91 กก. ตามลำดับ โดยจำนวนการเข้าคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 1 ครั้ง คิดเป็นโอกาสการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 10 การกำหนดใช้จำนวนหมาป่าสี่เทเท่ากับ 20 ตัว ส่งผลให้ค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 5154.96 กก. โดยมีค่าเฉลี่ย ค่ามัธยฐาน และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 6199.43 6178.72 และ 818.94 กก. ตามลำดับ และใช้เวลาในการค้นหาเฉลี่ยเท่ากับ 13.21 วินาที ซึ่งหน้าตัดที่เหมาะสมแสดงดังตาราง 33 และลักษณะของการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของชุดการค้นหาของหมาป่าสี่เทแต่ละชุดแสดงดังภาพประกอบ 35

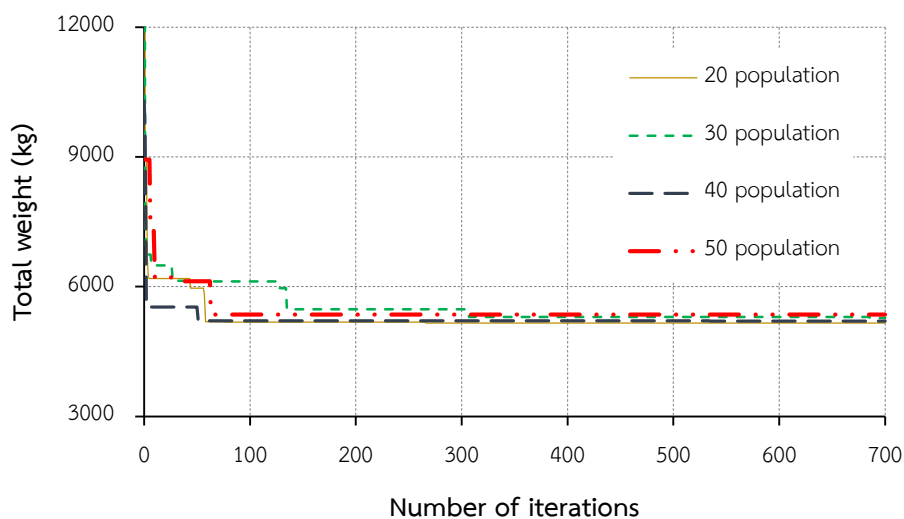
ตาราง 32 ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

ครั้งที่	หมาป่า 20 ตัว		หมาป่า 30 ตัว		หมาป่า 40 ตัว		หมาป่า 50 ตัว	
	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)
1	5480.47	14.22	5714.40	18.94	5567.07	24.94	6023.02	30.94
2	7226.66	12.98	5860.24	18.94	6606.71	24.92	6219.69	30.91
3	6654.99	12.92	6340.94	18.92	5950.61	25.45	5397.20	30.86
4	6135.24	12.97	5274.34	18.92	5204.16	24.92	5631.69	31.25
5	7104.28	13.00	7226.66	19.77	5386.42	24.98	5787.81	30.95
6	6222.19	12.92	6416.45	18.94	5868.79	24.95	5364.14	30.97
7	7203.00	13.30	7192.20	18.92	5611.16	24.92	5951.07	30.95

8	5601.97	13.25	6516.82	18.97	5797.43	25.20	5674.34	30.89
9	5210.54	12.92	6421.29	18.98	5751.05	24.89	5357.91	31.45
10	5154.96	13.62	6346.86	18.95	6174.57	24.97	6247.69	31.38
Min	5154.96	12.92	5274.34	18.92	5204.16	24.89	5357.91	30.86
Max	7226.66	14.22	7226.66	19.77	6606.71	25.45	6247.69	31.45
Mean	6199.43	13.21	6331.02	19.02	5791.80	25.01	5765.46	31.05
Median	6178.72	12.99	6381.66	18.94	5774.24	24.94	5731.07	30.95
SD	818.94	0.42	606.68	0.26	399.47	0.18	338.15	0.22

ตาราง 33 หน้าตัดที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

กลุ่มที่	หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม
1	HSS203.2X101.6X7.9
2	HSS304.8X304.8X6.4
3	HSS355.6X152.4X4.8
4	HSS254X76.2X6.4
น้ำหนักรวมของโครงสร้าง (กก.)	5154.96



ภาพประกอบ 35 ลักษณะของการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 4 โครงข้อหมุน 18 ชิ้นส่วน โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

จากภาพประกอบ 35 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมและจำนวนประชากร โดยพบว่าเมื่อจำนวนประชากรของหมาป่าสีเทาเท่ากับ 20 ตัว มีลักษณะการรู้เข้าที่เร็วที่สุด ซึ่งเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบที่ 266

4.2.4.2 คำตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าต่างต่อกลม

ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสีเทาสำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าต่างต่อกลมแสดงดังตาราง 34 โดยทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง และทำการกำหนดชุดการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมของหมาป่าสีเทาจำนวน 4 ชุด ประกอบด้วยหมาป่าสีเทา 20 30 40 และ 50 ตัว ซึ่งสามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 5606.98 5197.05 4846.88 และ 5480.98 กก. ตามลำดับ โดยจำนวนการเข้าคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 1 ครั้ง คิดเป็นโอกาสการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 10 การกำหนดใช้จำนวนหมาป่าสีเทาเท่ากับ 40 ตัว ส่งผลให้ค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 4846.88 กก. โดยมีค่าเฉลี่ย ค่ามัธยฐาน และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 5814.77 5723.96 และ 685.11 กก. ตามลำดับ และใช้เวลาในการค้นหาเฉลี่ยเท่ากับ 25.04 วินาที ซึ่งหน้าต่างที่เหมาะสมแสดงดังตาราง 35 และลักษณะของการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของชุดการค้นหาของหมาป่าสีเทาแต่ละชุดแสดงดังภาพประกอบ 36

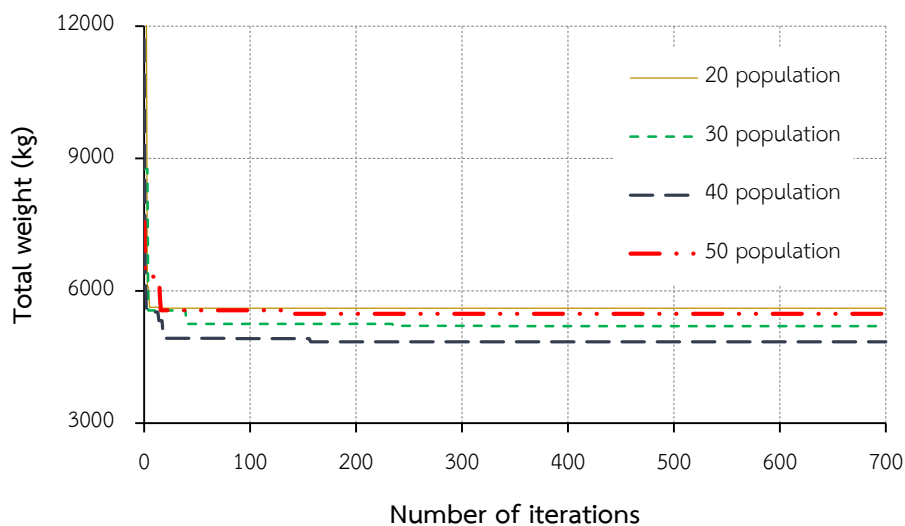
ตาราง 34 ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าต่างต่อกลม

ครั้งที่	หมาป่า 20 ตัว		หมาป่า 30 ตัว		หมาป่า 40 ตัว		หมาป่า 50 ตัว	
	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)
1	6753.86	13.15	7320.59	19.17	6559.85	25.46	5619.78	37.22
2	6647.39	12.97	5826.95	18.97	5876.53	24.97	6109.69	35.30
3	5873.92	12.94	6068.89	18.87	5762.64	24.92	6176.30	34.23
4	6320.80	12.95	6548.60	18.94	7303.29	24.94	5726.36	30.84
5	5606.98	13.62	6478.31	19.46	5685.27	24.84	5780.62	30.92
6	6665.71	13.46	6703.79	18.98	5397.69	25.00	6743.10	30.91
7	7190.42	13.27	6571.46	18.94	5477.38	24.94	6754.24	30.80
8	6541.87	13.16	5661.32	19.39	5365.04	24.92	6173.63	30.86

9	6271.27	12.94	6532.58	18.89	4846.88	24.89	5480.98	30.96
10	6929.87	12.95	5197.05	18.95	5873.12	25.52	6760.50	30.89
Min	5606.98	12.94	5197.05	18.87	4846.88	24.84	5480.98	30.80
Max	7190.42	13.62	7320.59	19.46	7303.29	25.52	6760.50	37.22
Mean	6480.21	13.14	6290.96	19.06	5814.77	25.04	6132.52	32.29
Median	6594.63	13.06	6505.44	18.96	5723.96	24.94	6141.66	30.91
SD	476.89	0.24	607.98	0.21	685.11	0.24	486.94	2.38

ตาราง 35 หน้าตัดที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าตัดท่อกลม

กลุ่มที่	หน้าตัดท่อกลม
1	HSS152.4X9.5
2	HSS406.4X6.4
3	HSS254X4.8
4	HSS114.3X9.5
น้ำหนักรวมของโครงสร้าง (กก.)	4846.88



ภาพประกอบ 36 ลักษณะของการลู่ออกหาคำตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 4 โครงข้อหมุน 18 ชิ้นส่วน โดยใช้หน้าตัดท่อกลม

จากภาพประกอบ 36 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมและจำนวนประชากร โดยพบว่าเมื่อจำนวนประชากรของหมาป่าสีเทาเท่ากับ 20 ตัว มีลักษณะการรู้เข้าที่เร็วที่สุด ซึ่งเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบที่ 14

4.2.4.2 คำตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าต่างปิดกว้าง

ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสีเทาสำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าต่างปิดกว้างแสดงดังตาราง 36 โดยทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง และทำการกำหนดชุดการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมของหมาป่าสีเทาจำนวน 4 ชุด ประกอบด้วยหมาป่าสีเทา 20 30 40 และ 50 ตัว ซึ่งสามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 6898.89 6663.77 6436.34 และ 6342.54 กก. ตามลำดับ โดยจำนวนการเข้าหาคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 1 ครั้ง คิดเป็นโอกาสการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 10 การกำหนดใช้จำนวนหมาป่าสีเทาเท่ากับ 50 ตัว ส่งผลให้ค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 6342.54 กก. โดยมีค่าเฉลี่ย ค่ามัธยฐาน และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 7232.40 6966.13 และ 833.99 กก. ตามลำดับ และใช้เวลาในการค้นหาเฉลี่ยเท่ากับ 31.17 วินาที ซึ่งหน้าต่างที่เหมาะสมแสดงดังตาราง 37 และลักษณะของการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของชุดการค้นหาของหมาป่าสีเทาแต่ละชุดแสดงดังภาพประกอบ 37

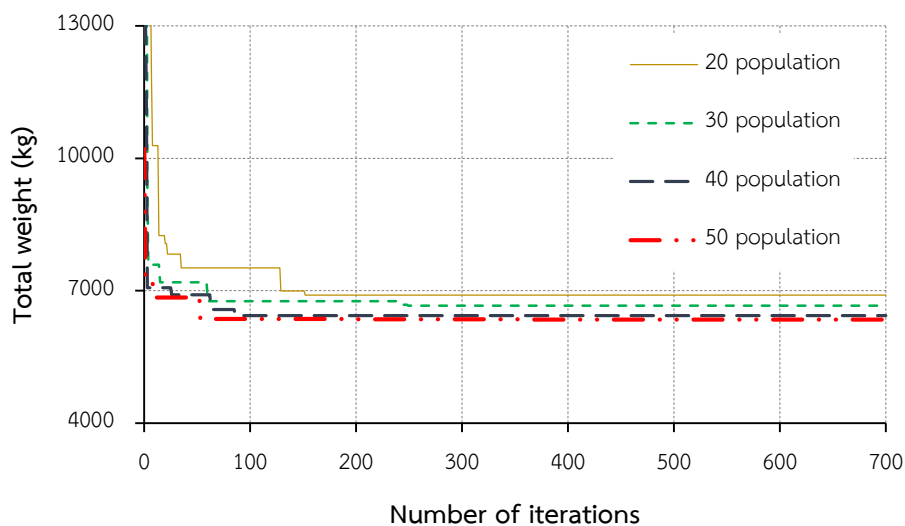
ตาราง 36 ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าต่างปิดกว้าง

ครั้งที่	หมาป่า 20 ตัว		หมาป่า 30 ตัว		หมาป่า 40 ตัว		หมาป่า 50 ตัว	
	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)
1	8350.50	13.57	8671.13	19.46	6775.18	24.95	6442.83	31.45
2	7402.79	12.95	9281.49	18.97	8955.36	25.26	6691.11	30.94
3	7572.58	12.94	8637.86	18.95	8148.60	24.98	8712.38	30.98
4	8405.71	12.95	9043.94	18.94	6988.35	24.97	6593.04	31.88
5	7856.88	12.95	6774.36	18.91	8279.09	24.95	6342.54	30.86
6	8893.10	12.98	6663.77	18.93	6644.80	24.92	8360.07	31.14
7	8726.72	12.95	7170.49	18.95	6436.34	24.98	7350.17	31.39
8	6898.89	13.37	6716.47	18.97	8884.58	24.91	7899.58	30.98
9	7549.83	12.97	6889.91	18.94	8410.15	24.94	7166.15	30.97
10	8352.11	13.15	7259.30	18.94	7560.79	25.62	6766.10	31.10

Min	6898.89	12.94	6663.77	18.91	6436.34	24.91	6342.54	30.86
Max	8893.10	13.57	9281.49	19.46	8955.36	25.62	8712.38	31.88
Mean	8000.91	13.08	7710.87	18.99	7708.33	25.05	7232.40	31.17
Median	8103.69	12.96	7214.90	18.94	7854.70	24.96	6966.13	31.04
SD	642.23	0.22	1062.36	0.16	949.31	0.22	833.99	0.32

ตาราง 37 หน้าตัดที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าตัดปีกกว้าง

กลุ่มที่	หน้าตัดปีกกว้าง
1	W310X32.7
2	W250X80
3	W200X46.1
4	W250X38.5
น้ำหนักรวมของโครงสร้าง (กก.)	6342.54



ภาพประกอบ 37 ลักษณะของการลูเข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 4 โครงข้อ
หมุน 18 ชิ้นส่วน โดยใช้หน้าตัดปีกกว้าง

จากภาพประกอบ 37 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมและจำนวนประชากร โดยพบว่าเมื่อจำนวนประชากรของหมาป่าสีเทาเท่ากับ 40 ตัว มีลักษณะการรู้เข้าที่เร็วที่สุด ซึ่งเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบที่ 86

4.3 คำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของวาว

4.3.1 คำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของวาวสำหรับตัวอย่างที่ 1 โครงข้อแข็ง 2 ช่วง 3 ชั้น

ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของวาวสำหรับตัวอย่างที่ 1 แสดงดังตาราง 38 โดยทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง และทำการกำหนดชุดการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมของวาวจำนวน 4 ชุด ประกอบด้วยวาว 20 30 40 และ 50 ตัว ซึ่งพบว่าทุกชุดการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 8256.96 กก. โดยจำนวนการเข้าคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 7 9 7 และ 9 ครั้งตามลำดับ การกำหนดใช้จำนวนของวาวเท่ากับ 40 และ 50 ตัว ส่งผลให้ค้นพบคำตอบที่เหมาะสมมากที่สุดจำนวน 9 ครั้ง คิดเป็นโอกาสการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 90 โดยจำนวนของวาวเท่ากับ 40 มีค่าเฉลี่ย ค่ามัธยฐาน และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 8435.39 8256.96 และ 333.00 ตามลำดับ และใช้เวลาในการค้นหาเฉลี่ยเท่ากับ 14.91 วินาที สำหรับจำนวนของวาวเท่ากับ 50 มีค่าเฉลี่ย ค่ามัธยฐาน และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 8281.67 8256.96 และ 78.12 ตามลำดับและใช้เวลาในการค้นหาเฉลี่ยเท่ากับ 16.11 วินาที ซึ่งหน้าตัดที่เหมาะสมแสดงดังตาราง 39 และลักษณะของการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของชุดการค้นหาวาวแต่ละชุดแสดงดังภาพประกอบ 38

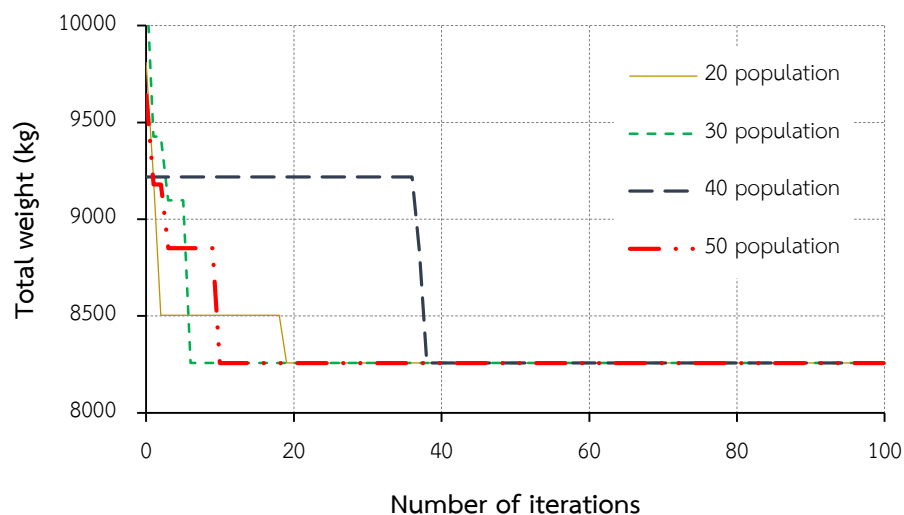
ตาราง 38 ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของ WOA สำหรับตัวอย่างที่ 1

ครั้งที่	วาว 20 ตัว		วาว 30 ตัว		วาว 40 ตัว		วาว 50 ตัว	
	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)
1	8833.41	6.11	8256.96	10.22	8833.41	18.12	8256.96	15.59
2	8256.96	6.62	8256.96	9.95	8256.96	18.27	8256.96	15.80
3	8256.96	6.70	8256.96	9.80	9217.71	17.89	8256.96	14.48
4	8504.01	7.61	8256.96	9.98	8256.96	13.19	8256.96	15.47
5	8256.96	6.70	8256.96	9.98	8256.96	13.48	8256.96	16.19
6	9179.28	6.15	8256.96	10.17	8256.96	13.44	8256.96	16.33

7	8256.96	5.91	8256.96	12.61	8256.96	13.72	8504.01	16.42
8	8256.96	6.17	8256.96	13.36	8256.96	13.80	8256.96	16.20
9	8256.96	6.77	8849.88	12.95	8504.01	14.28	8256.96	17.41
10	8256.96	6.11	8256.96	13.77	8256.96	12.87	8256.96	17.25
Min	8256.96	5.91	8256.96	9.80	8256.96	12.87	8256.96	14.48
Max	9179.28	7.61	8849.88	13.77	9217.71	18.27	8504.01	17.41
Mean	8431.54	6.49	8316.25	11.28	8435.39	14.91	8281.67	16.11
Median	8256.96	6.40	8256.96	10.19	8256.96	13.76	8256.96	16.19
SD	323.04	0.50	187.50	1.66	333.00	2.23	78.12	0.85

ตาราง 39 หน้าตัดที่เหมาะสมของ WOA สำหรับตัวอย่างที่ 1

กลุ่มที่	หน้าตัดปีกกว้าง
1 (เสา)	W250X80
2 (คาน)	W610X92
น้ำหนักรวมของโครงสร้าง (กก.)	8256.96



ภาพประกอบ 38 ลักษณะของการหาคำตอบที่เหมาะสมของ WOA สำหรับตัวอย่างที่ 1 โครงข้อ
แข็ง 2 ช่วง 3 ชั้น

จากภาพประกอบ 38 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมและจำนวนประชากร โดยพบว่าเมื่อจำนวนประชากรของวาฬเท่ากับ 30 ตัว มีลักษณะการรู้เข้าที่เร็วที่สุด ซึ่งเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบที่ 6

4.3.2 คำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของวาฬสำหรับตัวอย่างที่ 2 โครงข้อแข็ง 1 ช่วง 10 ชั้น

ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของวาฬสำหรับตัวอย่างที่ 2 แสดงดังตาราง 40 โดยทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง และทำการกำหนดชุดการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมของวาฬจำนวน 4 ชุด ประกอบด้วยวาฬ 20 30 40 และ 50 ตัว ซึ่งสามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 38909.55 37693.40 34363.15 และ 40339.67 กก. ตามลำดับ โดยจำนวนการเข้าคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 1 ครั้ง คิดเป็นโอกาสการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 10 การกำหนดใช้จำนวนวาฬเท่ากับ 40 ตัว ส่งผลให้ค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 34363.15 กก. โดยมีค่าเฉลี่ย ค่ามัธยฐาน และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 44717.09 45581.01 และ 3321.87 กก. ตามลำดับและใช้เวลาในการค้นหาเฉลี่ยเท่ากับ 242.90 วินาที ซึ่งหน้าตัดที่เหมาะสมแสดงดังตาราง 41 และลักษณะของการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของชุดการค้นหาของวาฬแต่ละชุดแสดงดังภาพประกอบ 39

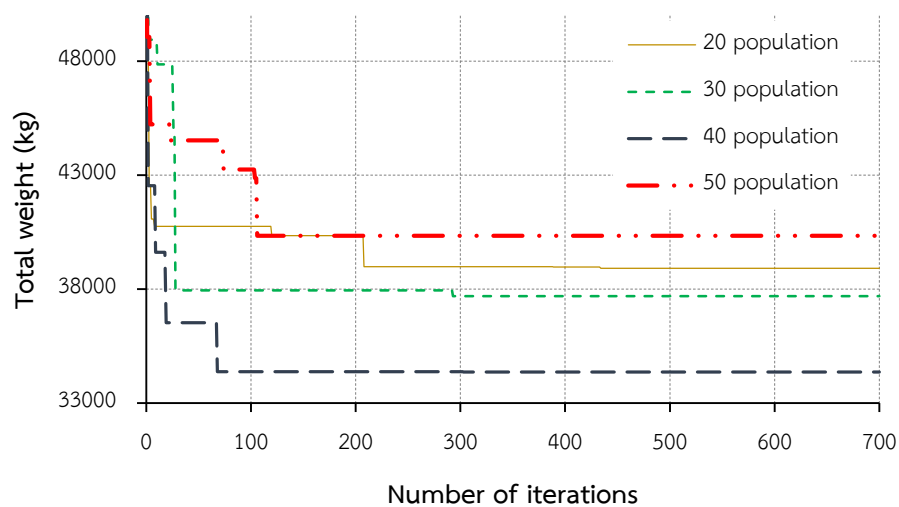
ตาราง 40 ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของ WOA สำหรับตัวอย่างที่ 2

ครั้งที่	วาฬ 20 ตัว		วาฬ 30 ตัว		วาฬ 40 ตัว		วาฬ 50 ตัว	
	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)
1	51892.20	135.67	48282.15	191.27	46226.58	245.51	43452.29	323.69
2	47373.24	128.83	53174.19	167.43	49019.16	242.23	46215.60	347.65
3	47285.45	123.45	50242.62	169.11	46255.84	257.72	48071.84	358.18
4	46268.64	125.49	39855.04	162.54	44898.87	245.95	40462.20	329.18
5	38909.55	120.90	37693.40	178.32	44240.50	233.47	46921.52	313.55
6	45416.42	113.00	41680.18	177.34	40432.94	237.14	40807.84	299.54
7	39119.86	108.68	40467.69	195.38	40955.98	230.53	49635.46	327.64
8	45557.24	109.91	49631.80	187.38	35690.86	234.68	44946.42	269.75
9	48011.49	108.91	51981.81	178.14	40418.31	251.36	40339.67	279.80
10	46118.68	108.16	52859.64	187.11	34363.15	250.46	46318.02	300.75

Min	38909.55	108.16	37693.40	162.54	34363.15	230.53	40339.67	269.75
Max	51892.20	135.67	53174.19	195.38	49019.16	257.72	49635.46	358.18
Mean	45595.28	118.30	46586.85	179.40	42250.22	242.90	44717.09	314.97
Median	46193.66	116.95	48956.98	178.23	42598.24	243.87	45581.01	318.62
SD	3928.50	9.89	5993.40	10.85	4740.09	8.87	3321.87	28.08

ตาราง 41 หน้าตัดที่เหมาะสมของ WOA สำหรับตัวอย่างที่ 2

กลุ่มที่	หน้าตัดปีกกว้าง
1 (เสา)	W360X314
2 (เสา)	W360X262
3 (เสา)	W360X216
4 (เสา)	W310X143
5 (เสา)	W360X147
6 (คาน)	W920X201
7 (คาน)	W920X253
8 (คาน)	W760X147
9 (คาน)	W760X161
น้ำหนักรวมของโครงสร้าง (กก.)	34363.15



ภาพประกอบ 39 ลักษณะของการหาคำตอบที่เหมาะสมของ WOA สำหรับตัวอย่างที่ 2 โครงข้อ
แข็ง 1 ช่วง 10 ชั้น

จากภาพประกอบ 39 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมและจำนวนประชากร โดยพบว่าเมื่อจำนวนประชากรของวาฬเท่ากับ 40 ตัว มีลักษณะการรู้เข้าที่เร็วที่สุด ซึ่งเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบที่ 303

4.3.3 คำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการค้นหาลำดับที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างที่ 3 โครงสร้าง 10 ชิ้นส่วน

4.3.3.1 คำตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการหาคำตอบที่เหมาะสมของวาฬสำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยมแสดงดังตาราง 42 โดยทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง และทำการกำหนดชุดการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมของวาฬจำนวน 4 ชุด ประกอบด้วยวาฬ 20 30 40 และ 50 ตัว ซึ่งสามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 4337.52 4981.37 4642.79 และ 5017.93 กก. ตามลำดับ โดยจำนวนการเข้าคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 1 ครั้ง คิดเป็นโอกาสการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 10 การกำหนดใช้จำนวนวาฬเท่ากับ 20 ตัว ส่งผลให้ค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 4337.52 กก. โดยมีค่าเฉลี่ย ค่ามัธยฐาน และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 7354.99 6103.21 และ 3833.30 กก. ตามลำดับและใช้เวลาในการค้นหาเฉลี่ยเท่ากับ 7.15 วินาที ซึ่งหน้าตัดที่เหมาะสมแสดงดังตาราง 43 และลักษณะของการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของชุดการค้นหาวาฬแต่ละชุดแสดงดังภาพประกอบ 40

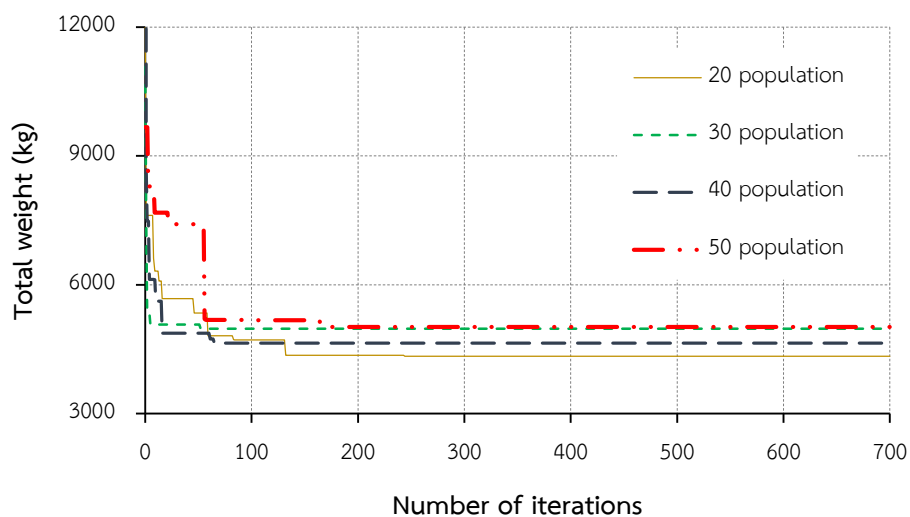
ตาราง 42 ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของ WOA สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

ครั้งที่	วาฬ 20 ตัว		วาฬ 30 ตัว		วาฬ 40 ตัว		วาฬ 50 ตัว	
	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)
1	7772.22	7.41	5220.84	10.46	5818.66	13.20	5414.13	16.28
2	8151.12	7.00	5024.08	10.12	4831.47	13.16	5518.83	16.55
3	5659.56	7.28	5481.18	9.97	5228.18	13.11	6057.77	16.12
4	8004.45	7.28	5689.99	10.46	5603.13	13.17	5471.34	16.16
5	4337.52	7.72	7678.77	9.97	4724.99	13.11	5427.19	16.77
6	4860.33	7.52	4981.37	10.46	5015.71	13.16	7277.32	16.16
7	6546.87	6.89	6131.21	10.00	9402.88	13.12	6441.51	16.14
8	5139.35	6.78	7032.25	10.30	6967.97	13.16	5017.93	16.77
9	17549.09	6.83	7098.43	10.24	4642.79	13.31	5448.94	16.16

10	5529.37	6.83	6083.22	10.30	5141.94	13.16	6274.98	16.19
Min	4337.52	6.78	4981.37	9.97	4642.79	13.11	5017.93	16.12
Max	17549.09	7.72	7678.77	10.46	9402.88	13.31	7277.32	16.77
Mean	7354.99	7.15	6042.13	10.23	5737.77	13.16	5834.99	16.33
Median	6103.21	7.14	5886.61	10.27	5185.06	13.16	5495.09	16.17
SD	3833.30	0.33	946.29	0.20	1458.81	0.06	673.60	0.26

ตาราง 43 หน้าตัดที่เหมาะสมของ WOA สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

กลุ่มที่	หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม
1	HSS304.8X76.2X6.4
2	HSS254X254X7.9
3	HSS127X101.6X4.8
4	HSS304.8X304.8X4.8
น้ำหนักรวมของโครงสร้าง (กก.)	4337.52



ภาพประกอบ 40 ลักษณะของการหาคำตอบที่เหมาะสมของ WOA สำหรับตัวอย่างที่ 3 โครงข้อ
หมุน 10 ชิ้นส่วน โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

จากภาพประกอบ 40 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมและจำนวนประชากร โดยพบว่าเมื่อจำนวนประชากรของวาฬเท่ากับ 30 ตัว มีลักษณะการรู้เข้าที่เร็วที่สุด ซึ่งเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบที่ 52

4.3.3.2 คำตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดท่อกลม

ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของวาฬสำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดท่อกลมแสดงดังตาราง 44 โดยทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง และทำการกำหนดชุดการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมของวาฬจำนวน 4 ชุด ประกอบด้วยวาฬ 20 30 40 และ 50 ตัว ซึ่งสามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 5090.48 4494.56 4947.90 และ 4710.26 กก. ตามลำดับ โดยจำนวนการเข้าคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 1 ครั้ง คิดเป็นโอกาสการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 10 การกำหนดใช้จำนวนวาฬเท่ากับ 30 ตัว ส่งผลให้ค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 4494.56 กก. โดยมีค่าเฉลี่ย ค่ามัธยฐาน และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 5761.71 5730.28 และ 906.23 กก. ตามลำดับ และใช้เวลาในการค้นหาเฉลี่ยเท่ากับ 9.99 วินาที ซึ่งหน้าตัดที่เหมาะสมแสดงดังตาราง 45 และลักษณะของการรู้เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของชุดการค้นหาของวาฬแต่ละชุดแสดงดังภาพประกอบ 41

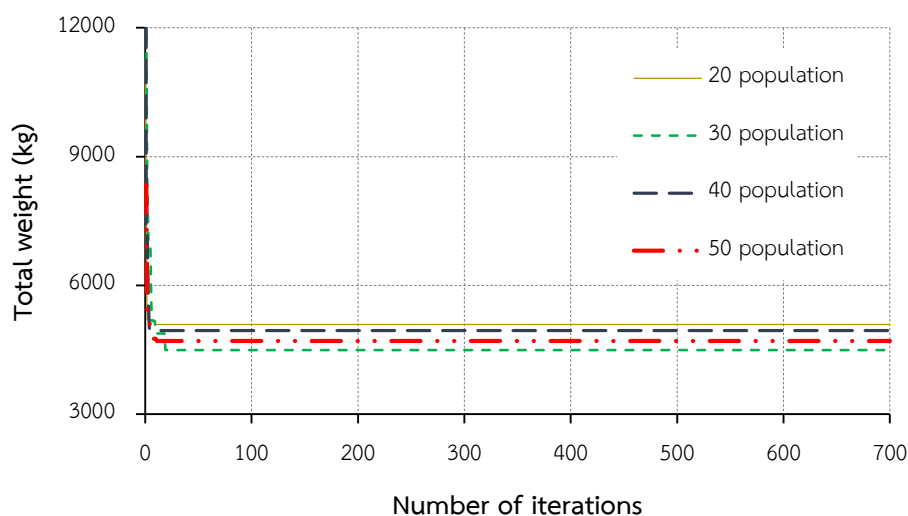
ตาราง 44 ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของ WOA สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดท่อกลม

ครั้งที่	วาฬ 20 ตัว		วาฬ 30 ตัว		วาฬ 40 ตัว		วาฬ 50 ตัว	
	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)
1	5090.48	7.70	6156.21	10.11	5809.01	13.62	4933.28	16.61
2	5551.91	7.37	6029.07	10.39	5063.19	13.77	5741.25	16.00
3	5476.10	7.37	5726.63	9.94	5931.36	13.42	5350.06	16.40
4	5185.44	7.93	5315.64	9.91	5655.34	12.94	6011.80	16.46
5	5603.05	6.77	4494.56	9.94	7028.16	13.15	5381.14	16.15
6	9944.79	6.77	5733.94	9.91	4947.90	13.15	6248.76	15.97
7	5491.40	6.75	7772.96	9.94	4950.75	12.98	4960.70	15.95
8	5094.14	6.73	4896.72	9.91	7324.06	13.00	4777.90	16.00
9	5331.54	6.77	6276.61	9.94	5350.18	13.30	4710.26	15.97
10	6480.53	6.75	5214.79	9.91	5041.13	13.11	5205.83	16.30

Min	5090.48	6.73	4494.56	9.91	4947.90	12.94	4710.26	15.95
Max	9944.79	7.93	7772.96	10.39	7324.06	13.77	6248.76	16.61
Mean	5924.94	7.09	5761.71	9.99	5710.11	13.24	5332.10	16.18
Median	5483.75	6.77	5730.28	9.94	5502.76	13.15	5277.94	16.07
SD	1467.64	0.46	906.23	0.15	853.56	0.28	524.84	0.24

ตาราง 45 หน้าตัดที่เหมาะสมของ WOA สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดทอกลม

กลุ่มที่	หน้าตัดทอสี่เหลี่ยม
1	HSS168.3X7.9
2	HSS406.4X6.4
3	HSS101.6X4.8
4	HSS323.9X6.4
น้ำหนักรวมของโครงสร้าง (กก.)	4494.56



ภาพประกอบ 41 ลักษณะของการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของ WOA สำหรับตัวอย่างที่ 3 โครงข้อหมุน 10 ชิ้นส่วน โดยใช้หน้าตัดทอกลม

จากภาพประกอบ 41 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมและจำนวนประชากร โดยพบว่าเมื่อจำนวนประชากรของวาฬเท่ากับ 40 และ 50 ตัว มีลักษณะการลู่เข้าที่เร็วที่สุด ซึ่งเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบที่ 11

4.3.3.3 คำตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าต่างปิดกว้าง

ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของ วาฟสำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าต่างปิดกว้างแสดงดังตาราง 46 โดยทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง และทำการกำหนดชุดการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมของวาฟจำนวน 4 ชุด ประกอบด้วยวาฟ 20 30 40 และ 50 ตัว ซึ่งสามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 8818.82 7782.34 8144.29 และ 8209.08 กก. ตามลำดับ โดยจำนวนการเข้าคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 1 ครั้ง คิดเป็นโอกาสการ ค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 10 การกำหนดใช้จำนวนวาฟเท่ากับ 30 ตัว ส่งผลให้ค้นพบ คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 7782.34 กก. โดยมีค่าเฉลี่ย ค่ามัธยฐาน และค่าส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานเท่ากับ 9436.80 9338.72 และ 1310.95 กก. ตามลำดับและใช้เวลาในการค้นหาเฉลี่ย เท่ากับ 10.24 วินาที ซึ่งหน้าต่างที่เหมาะสมแสดงดังตาราง 47 และลักษณะของการลู่ออกหาคำตอบที่ เหมาะสมของชุดการค้นหาของวาฟแต่ละชุดแสดงดังภาพประกอบ 42

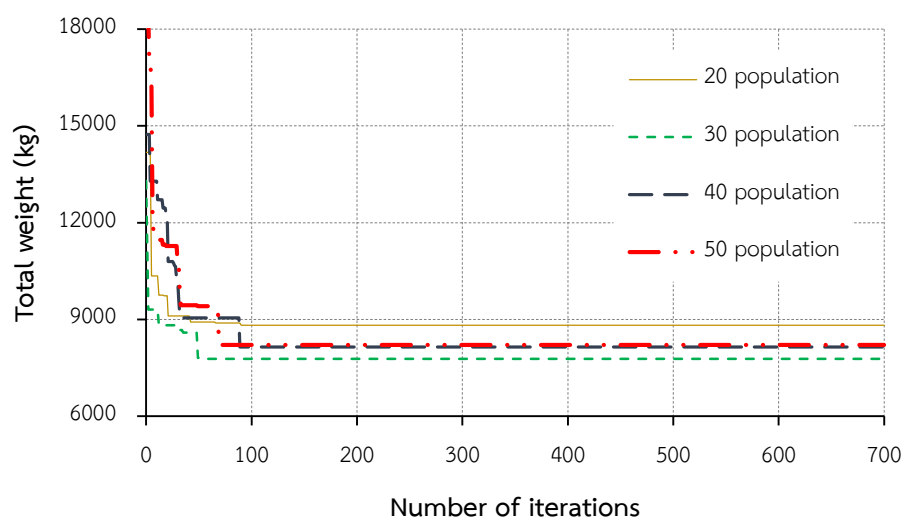
ตาราง 46 ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของ WOA สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าต่างปิด กว้าง

ครั้งที่	วาฟ 20 ตัว		วาฟ 30 ตัว		วาฟ 40 ตัว		วาฟ 50 ตัว	
	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)
1	10279.89	7.15	9737.98	10.92	11394.97	14.66	8209.08	16.20
2	15921.67	6.80	10028.63	10.39	9964.65	13.84	10045.57	16.22
3	10155.01	6.80	9252.56	10.30	8144.29	13.73	11838.83	16.16
4	9309.53	6.86	7971.44	10.00	9832.03	15.77	9192.23	16.16
5	13729.86	6.95	9310.23	10.00	13716.53	13.27	8530.00	16.19
6	9448.15	6.92	8892.69	10.15	14238.77	13.17	8424.47	16.14
7	9839.02	6.84	9367.22	9.98	11697.85	13.17	10358.21	16.19
8	12261.84	6.83	12565.79	10.15	9925.26	13.28	9283.06	16.17
9	15380.91	6.84	7782.34	10.20	10663.27	13.12	10012.50	16.12
10	8818.82	6.84	9459.12	10.33	8504.91	13.14	8665.48	16.21
Min	8818.82	6.80	7782.34	9.98	8144.29	13.12	8209.08	16.12
Max	15921.67	7.15	12565.79	10.92	14238.77	15.77	11838.83	16.22
Mean	11514.47	6.88	9436.80	10.24	10808.25	13.72	9455.94	16.18

Median	10217.45	6.84	9338.72	10.18	10313.96	13.27	9237.65	16.18
SD	2633.47	0.11	1310.95	0.28	2006.37	0.87	1122.99	0.03

ตาราง 47 หน้าตัดที่เหมาะสมของ WOA สำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้หน้าตัดปีกกว้าง

กลุ่มที่	หน้าตัดปีกกว้าง
1	W310X44.5
2	W310X107
3	W150X22.5
4	W250X89
น้ำหนักรวมของโครงสร้าง (กก.)	7782.34



ภาพประกอบ 42 ลักษณะของการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของ WOA สำหรับตัวอย่างที่ 3 โครงข้อ หมุน 10 ชิ้นส่วน โดยใช้หน้าตัดปีกกว้าง

จากภาพประกอบ 42 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมและจำนวนประชากร โดยพบว่าเมื่อจำนวนประชากรของวาทเท่ากับ 30 ตัว มีลักษณะการลู่เข้าที่เร็วที่สุด ซึ่งเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบที่ 51

4.3.4 คำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการค้นหาแบบอิก้าสำหรับตัวอย่างที่ 4 โครงข้อหมูน 18 ชิ้นส่วน

4.3.4.1 คำตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าต่างดัดทอสีเหลือง

ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของวาวสำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าต่างดัดทอสีเหลืองแสดงดังตาราง 48 โดยทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง และทำการกำหนดชุดการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมของวาวจำนวน 4 ชุด ประกอบด้วยวาว 20 30 40 และ 50 ตัว ซึ่งสามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 5542.70 5392.95 5432.43 และ 4953.98 กก. ตามลำดับ โดยจำนวนการเข้าคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 1 ครั้ง คิดเป็นโอกาสการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 10 การกำหนดใช้จำนวนวาวเท่ากับ 50 ตัว ส่งผลให้ค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 4953.98 กก. โดยมีค่าเฉลี่ย ค่ามัธยฐาน และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 5895.22 5571.55 และ 891.87 กก. ตามลำดับและใช้เวลาในการค้นหาเฉลี่ยเท่ากับ 31.13 วินาที ซึ่งหน้าต่างที่เหมาะสมแสดงดังตาราง 49 และลักษณะของการลู่อู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของชุดการค้นหาของวาวแต่ละชุดแสดงดังภาพประกอบ 43

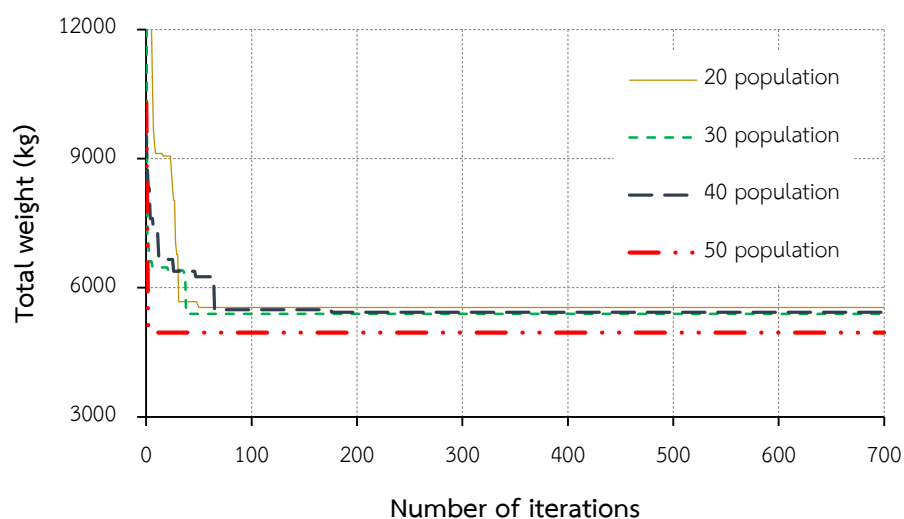
ตาราง 48 ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของ WOA สำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าต่างดัดทอสีเหลือง

ครั้งที่	วาว 20 ตัว		วาว 30 ตัว		วาว 40 ตัว		วาว 50 ตัว	
	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)
1	5542.70	14.84	6878.36	19.00	5742.82	25.61	5372.71	31.14
2	7112.36	15.30	6124.20	19.20	5737.19	25.61	4953.98	31.14
3	6916.61	12.97	6253.99	19.70	5536.35	25.23	7510.97	30.97
4	6528.85	13.15	5884.52	19.30	6004.77	25.00	5024.73	31.17
5	6459.96	13.30	5622.98	18.95	5846.32	25.46	7220.85	31.12
6	6496.46	12.98	5392.95	18.94	5432.43	24.95	5766.59	31.28
7	6533.38	13.00	6823.60	19.30	5716.16	25.00	6203.79	30.97
8	5594.50	13.19	6310.92	19.16	5787.05	25.46	5282.74	31.14
9	5621.93	12.98	5578.98	19.17	7671.28	24.98	6239.29	31.41
10	6730.72	12.94	5565.92	18.97	5523.31	24.98	5376.52	30.98
Min	5542.70	12.94	5392.95	18.94	5432.43	24.95	4953.98	30.97

Max	7112.36	15.30	6878.36	19.70	7671.28	25.61	7510.97	31.41
Mean	6353.75	13.46	6043.64	19.17	5899.77	25.23	5895.22	31.13
Median	6512.66	13.07	6004.36	19.16	5740.01	25.12	5571.55	31.14
SD	567.53	0.86	526.74	0.23	644.79	0.28	891.87	0.14

ตาราง 49 หน้าตัดที่เหมาะสมของ WOA สำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

กลุ่มที่	หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม
1	HSS152.4X76.2X12.7
2	HSS304.8X304.8X6.4
3	HSS228.6X228.6X74.8
4	HSS152.4X127X6.4
น้ำหนักรวมของโครงสร้าง (กก.)	4953.98



ภาพประกอบ 43 ลักษณะของการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของ WOA สำหรับตัวอย่างที่ 4 โครงสร้างหมุน 18 ชิ้นส่วน โดยใช้หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

จากภาพประกอบ 43 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมและจำนวนประชากร โดยพบว่าเมื่อจำนวนประชากรของวาทเท่ากับ 50 ตัว มีลักษณะการลู่เข้าที่เร็วที่สุด ซึ่งเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบที่ 5

4.3.4.2 คำตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าตัดท่อกลม

ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของ วาฟสำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าตัดท่อกลมแสดงดังตาราง 50 โดยทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง และทำการกำหนดชุดการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมของวาฟจำนวน 4 ชุด ประกอบด้วยวาฟ 20 30 40 และ 50 ตัว ซึ่งสามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 5352.98 4860.22 4844.92 และ 5009.44 กก. ตามลำดับ โดยจำนวนการเข้าคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 1 ครั้ง คิดเป็นโอกาสการ ค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 10 การกำหนดใช้จำนวนวาฟเท่ากับ 40 ตัว ส่งผลให้ค้นพบ คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 4844.92 กก. โดยมีค่าเฉลี่ย ค่ามัธยฐาน และค่าส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานเท่ากับ 5583.79 5349.43 และ 545.66 กก. ตามลำดับและใช้เวลาในการค้นหาเฉลี่ย เท่ากับ 31.05 วินาที ซึ่งหน้าตัดที่เหมาะสมแสดงดังตาราง 51 และลักษณะของการลู่อุ้หาคำตอบที่ เหมาะสมของชุดการค้นหาของวาฟแต่ละชุดแสดงดังภาพประกอบ 44

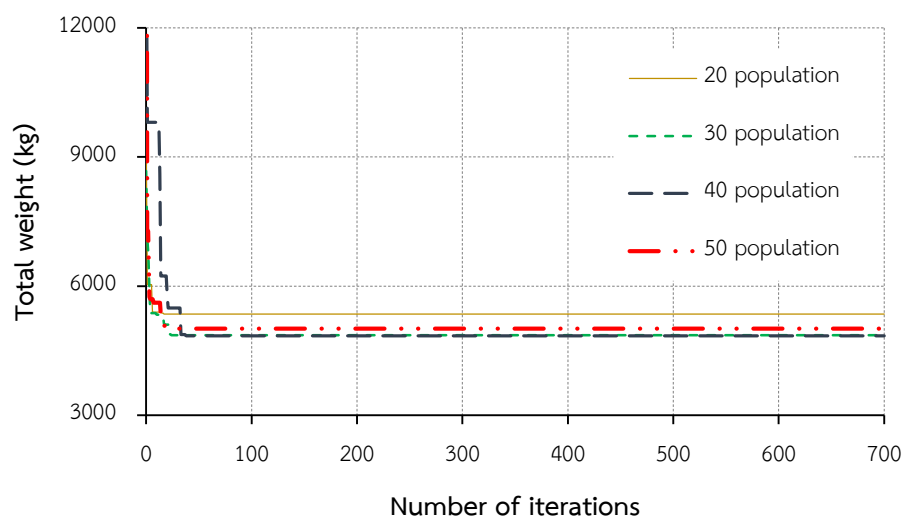
ตาราง 50 ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของ WOA สำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าตัดท่อกลม

ครั้งที่	วาฟ 20 ตัว		วาฟ 30 ตัว		วาฟ 40 ตัว		วาฟ 50 ตัว	
	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)
1	7534.58	16.16	6409.27	19.61	5529.77	25.11	5388.27	31.44
2	6997.17	13.73	5854.29	18.94	5989.80	25.37	6704.90	31.30
3	8028.29	14.16	5165.89	19.00	5315.19	25.12	5516.62	30.91
4	6001.26	13.83	5391.71	18.94	6441.37	25.00	5245.61	30.90
5	5352.98	13.53	4860.22	19.30	5261.91	24.98	6348.66	30.89
6	5425.95	13.46	5381.47	18.94	6527.09	25.30	5814.18	31.30
7	7329.43	13.46	5491.41	18.95	5379.91	25.00	5310.59	30.91
8	5751.06	12.98	5278.97	18.97	5218.07	25.00	5255.77	30.98
9	5890.55	13.00	6404.50	18.95	5164.34	24.94	5243.92	30.92
10	5827.32	13.46	6295.66	19.46	4844.92	24.93	5009.44	30.93
Min	5352.98	12.98	4860.22	18.94	4844.92	24.93	5009.44	30.89
Max	8028.29	16.16	6409.27	19.61	6527.09	25.37	6704.90	31.44
Mean	6413.86	13.78	5653.34	19.10	5567.24	25.07	5583.79	31.05

Median	5945.90	13.50	5441.56	18.96	5347.55	25.00	5349.43	30.92
SD	964.35	0.91	554.18	0.25	564.03	0.15	545.66	0.21

ตาราง 51 หน้าตัดที่เหมาะสมของ WOA สำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าตัดทอกลม

กลุ่มที่	หน้าตัดทอกลม
1	HSS127X12.7
2	HSS406.4X6.4
3	HSS219.1X4.8
4	HSS152.4X7.1
น้ำหนักรวมของโครงสร้าง (กก.)	4844.92



ภาพประกอบ 44 ลักษณะของการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของ WOA สำหรับตัวอย่างที่ 4 โครงข้อหมุน 18 ชิ้นส่วน โดยใช้หน้าตัดทอกลม

จากภาพประกอบ 44 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมและจำนวนประชากร โดยพบว่าเมื่อจำนวนประชากรของวาทเท่ากับ 20 ตัว มีลักษณะการลู่เข้าที่เร็วที่สุด ซึ่งเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบที่ 17

4.3.4.3 คำตอบที่เหมาะสมของ GWO สำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าตัดปีกกว้าง

ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของวาทสำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าตัดทอกลมแสดงดังตาราง 52 โดยทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง และทำการกำหนดชุดการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมของวาทจำนวน 4 ชุด ประกอบด้วยวาท 20 30

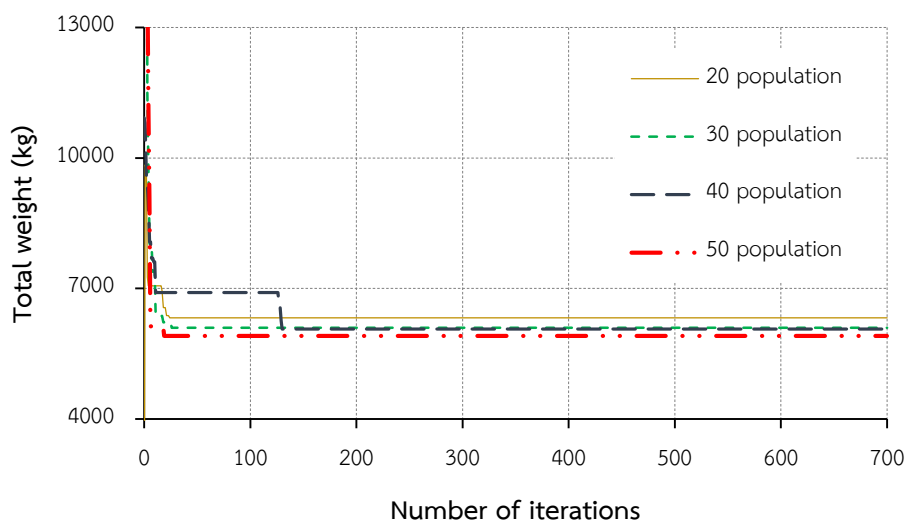
40 และ 50 ตัว ซึ่งสามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 6327.15 6095.47 6070.07 และ 5907.51 กก. ตามลำดับ โดยจำนวนการเข้าคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 1 ครั้ง คิดเป็นโอกาสการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 10 การกำหนดใช้จำนวนวาฟเท่ากับ 50 ตัว ส่งผลให้ค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 5907.51 กก. โดยมีค่าเฉลี่ย ค่ามัธยฐาน และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 6777.06 6914.96 และ 661.43 กก. ตามลำดับและใช้เวลาในการค้นหาเฉลี่ยเท่ากับ 31.18 วินาที ซึ่งหน้าตัดที่เหมาะสมแสดงดังตาราง 53 และลักษณะของการลู่ออกหาคำตอบที่เหมาะสมของชุดการค้นหาวาฟแต่ละชุดแสดงดังภาพประกอบ 45

ตาราง 52 ผลการทดสอบการหาคำตอบที่เหมาะสมของ WOA สำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าตัดปีกกว้าง

ครั้งที่	วาฟ 20 ตัว		วาฟ 30 ตัว		วาฟ 40 ตัว		วาฟ 50 ตัว	
	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กก.)	เวลา (วินาที)
1	8219.51	13.93	6400.27	19.61	6380.58	25.30	7267.04	31.45
2	8881.82	13.93	6930.53	19.00	6959.14	25.00	6070.07	31.30
3	9058.57	13.77	8470.85	19.77	7200.40	25.17	7248.77	31.45
4	7473.40	12.97	6750.74	18.98	8291.37	25.31	5907.51	31.45
5	6327.15	12.98	7162.18	19.14	6380.58	25.14	7617.74	30.98
6	8677.66	13.21	6095.47	19.30	6070.07	25.39	6233.77	30.99
7	7345.47	12.97	7802.45	19.14	6455.43	25.61	6581.16	31.19
8	12470.29	13.62	7730.05	19.14	6471.57	25.00	7380.44	30.92
9	11859.09	13.11	8904.62	19.00	7528.17	25.30	6095.47	31.14
10	10949.24	13.77	7364.04	19.00	6082.58	24.98	7368.64	30.95
Min	6327.15	12.97	6095.47	18.98	6070.07	24.98	5907.51	30.92
Max	12470.29	13.93	8904.62	19.77	8291.37	25.61	7617.74	31.45
Mean	9126.22	13.43	7361.12	19.21	6781.99	25.22	6777.06	31.18
Median	8779.74	13.42	7263.11	19.14	6463.50	25.24	6914.96	31.16
SD	2022.10	0.41	886.15	0.28	712.02	0.20	661.43	0.22

ตาราง 53 หน้าตัดที่เหมาะสมของ WOA สำหรับตัวอย่างที่ 4 โดยใช้หน้าตัดปีกกว้าง

กลุ่มที่	หน้าตัดปีกกว้าง
1	W150X37.1
2	W250X80
3	W200X46.1
4	W150X22.5
น้ำหนักรวมของโครงสร้าง (กก.)	5907.51



ภาพประกอบ 45 ลักษณะของการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมของ WOA สำหรับตัวอย่างที่ 4 โครงข้อหมุน 18 ชิ้นส่วน โดยใช้หน้าตัดปีกกว้าง

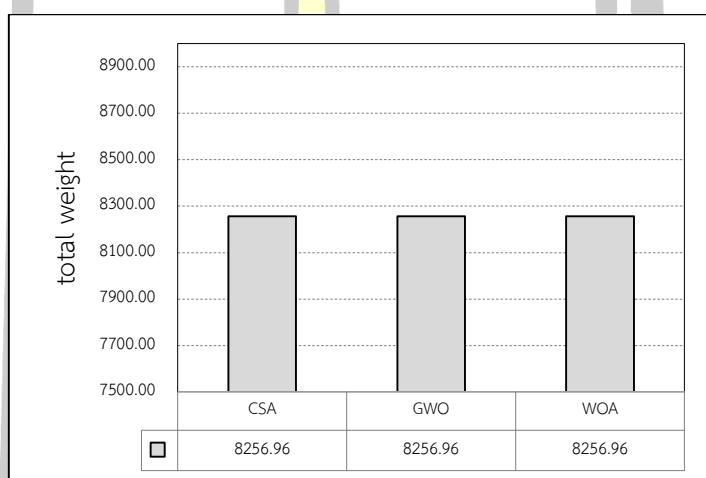
จากภาพประกอบ 45 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมและจำนวนประชากร โดยพบว่าเมื่อจำนวนประชากรของวาทเท่ากับ 50 ตัว มีลักษณะการลู่เข้าที่เร็วที่สุด ซึ่งเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบที่ 19

พูน ปณ จิต ชีเว

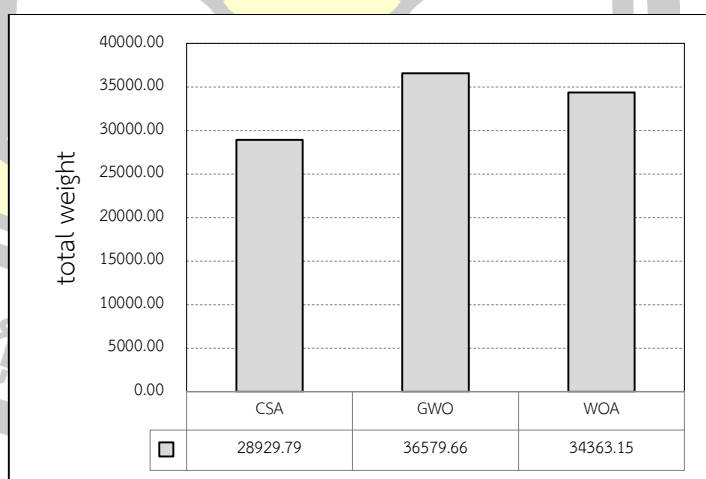
4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม

4.4.1 การเปรียบเทียบผลการออกแบบที่เหมาะสม

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการออกแบบที่เหมาะสมในตัวอย่างที่ 1 พบว่าอัลกอริทึม CSA GWO และ WOA สามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมได้เท่ากันซึ่งแสดงดังภาพประกอบ 46 สำหรับตัวอย่างที่ 2 พบว่าอัลกอริทึม CSA ให้ผลการออกแบบที่มีน้ำหนักที่น้อยที่สุดดังภาพประกอบ 47 โดยน้อยกว่า GWO ร้อยละ 20.91 และน้อยกว่า WOA ร้อยละ 15.81

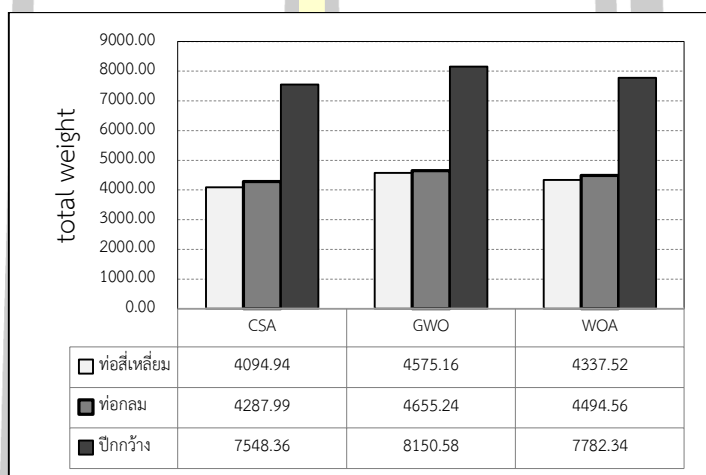


ภาพประกอบ 46 แผนภูมิคำตอบที่เหมาะสมของแต่ละอัลกอริทึมสำหรับตัวอย่างที่ 1



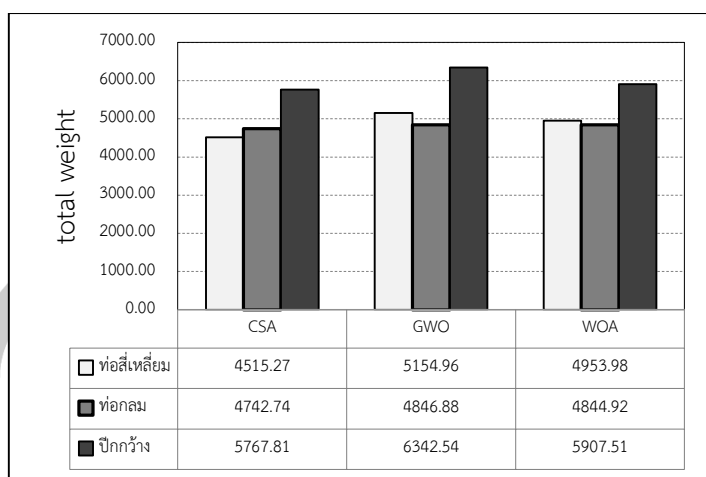
ภาพประกอบ 47 แผนภูมิคำตอบที่เหมาะสมของแต่ละอัลกอริทึมสำหรับตัวอย่างที่ 2

ตัวอย่างที่ 3 ได้ทำการทดสอบกับหน้าตัด 3 ชนิด ประกอบด้วย หน้าตัดทอสีเหลี่ยม ท่อกลม และหน้าตัดปีกกว้าง โดยผลการทดสอบพบว่า CSA สามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดซึ่งแสดงดังภาพประกอบ 48 โดยในกรณีหน้าตัดเหล็กทอสีเหลี่ยม คำตอบที่เหมาะสมของ CSA มีค่าน้อยกว่า GWO และ WOA ร้อยละ 10.50 5.59 ตามลำดับ สำหรับหน้าตัดเหล็กท่อกลม คำตอบที่เหมาะสมของ CSA มีค่าน้อยกว่า GWO และ WOA ร้อยละ 7.89 4.60 ตามลำดับ และหน้าตัดเหล็กปีกกว้าง คำตอบที่เหมาะสมของ CSA มีค่าน้อยกว่า GWO และ WOA ร้อยละ 7.39 3.01 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 48 แผนภูมิคำตอบที่เหมาะสมของแต่ละอัลกอริทึมสำหรับตัวอย่างที่ 3

ตัวอย่างที่ 4 ได้ทำการทดสอบกับหน้าตัด 3 ชนิด ประกอบด้วย หน้าตัดทอสีเหลี่ยม ท่อกลม และหน้าตัดปีกกว้าง โดยผลการทดสอบพบว่า CSA สามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดซึ่งแสดงดังภาพประกอบ 49 โดยในกรณีหน้าตัดเหล็กทอสีเหลี่ยม คำตอบที่เหมาะสมของ CSA มีค่าน้อยกว่า GWO และ WOA ร้อยละ 12.41 8.86 ตามลำดับ สำหรับหน้าตัดเหล็กท่อกลม คำตอบที่เหมาะสมของ CSA มีค่าน้อยกว่า GWO และ WOA ร้อยละ 2.15 2.11 ตามลำดับ และหน้าตัดเหล็กปีกกว้าง คำตอบที่เหมาะสมของ CSA มีค่าน้อยกว่า GWO และ WOA ร้อยละ 9.06 2.36 ตามลำดับ



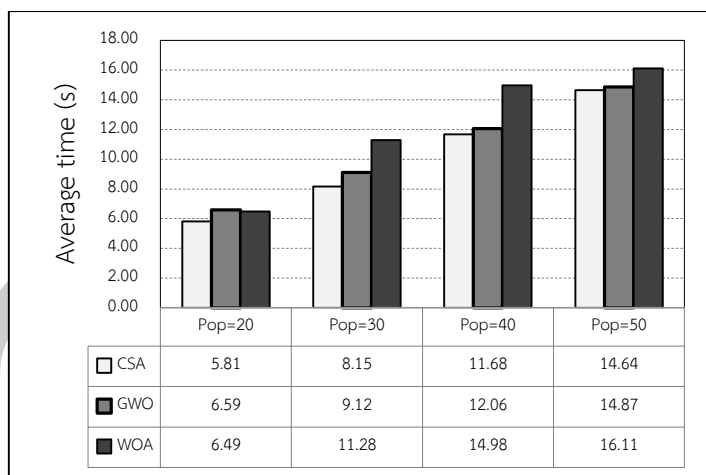
ภาพประกอบ 49 แผนภูมิคำตอบที่เหมาะสมของแต่ละอัลกอริทึมสำหรับตัวอย่างที่ 4

4.4.2 การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการออกแบบ

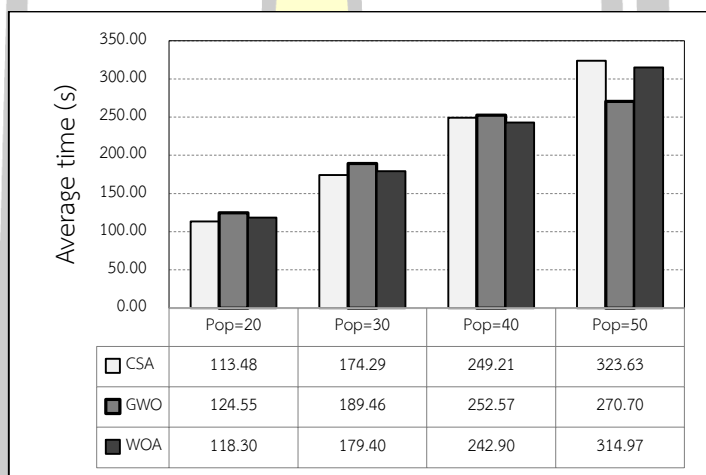
เวลาที่ใช้ในการออกแบบของแต่ละอัลกอริทึมแสดงดังภาพประกอบ 50 – 57 ซึ่งเป็นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนประชากร (X) และเวลาที่ใช้ในการออกแบบ (Y) และเพื่อที่จะทำการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการออกแบบ ได้นำเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการออกแบบของแต่ละอัลกอริทึมจัดแจงเป็นคะแนนดังตาราง 54 โดยแบ่งคะแนนออกเป็น 3 ระดับ ประกอบด้วยค่า 3 คือคะแนนที่ดีที่สุด ค่า 2 คือคะแนนระดับกลาง และค่า 1 คือคะแนนที่แย่ที่สุด

ซึ่งเมื่อรวมคะแนนของแต่ละอัลกอริทึมในแต่ละตัวอย่างแล้วพบว่าอัลกอริทึม GWO ใช้เวลาในการออกแบบที่เหมาะสมน้อยที่สุด ซึ่งได้คะแนนเท่ากับ 69 คะแนน CSA ใช้เวลาในการออกแบบที่เหมาะสมน้อยที่สุดเป็นอันดับ 2 รองจาก GWO ซึ่งได้คะแนนเท่ากับ 65 คะแนน และ WOA ใช้เวลาในการออกแบบที่เหมาะสมมากที่สุด ซึ่งได้คะแนนเท่ากับ 62 คะแนน

พูน ปณ ภิโต ชีเว

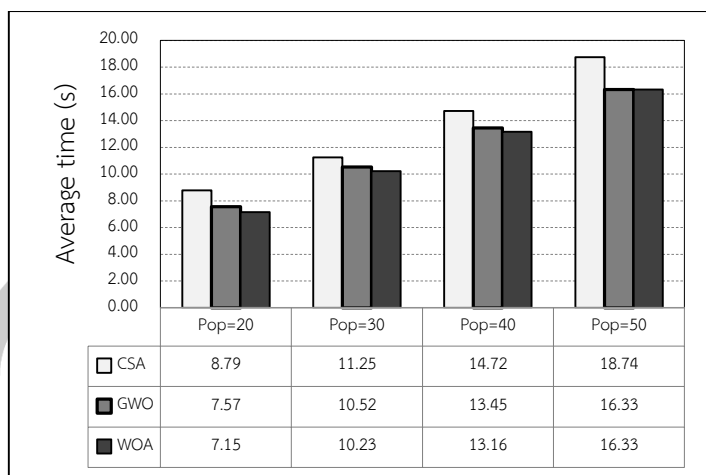


ภาพประกอบ 50 แผนภูมิเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการออกแบบที่เหมาะสมในแต่ละอัลกอริทึมสำหรับ
ตัวอย่างที่ 1

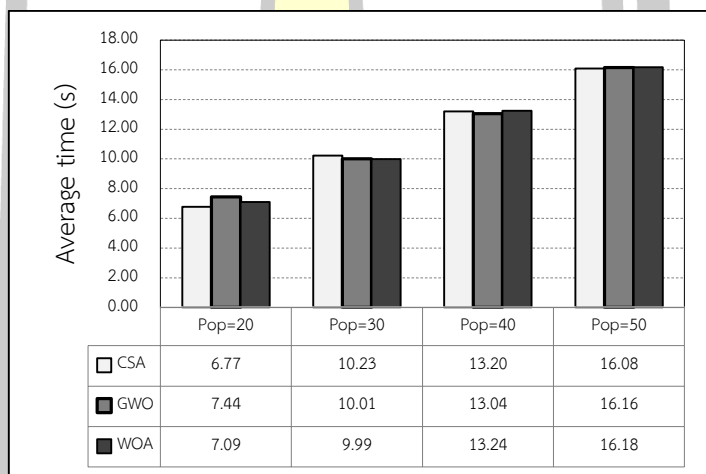


ภาพประกอบ 51 แผนภูมิเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการออกแบบที่เหมาะสมในแต่ละอัลกอริทึมสำหรับ
ตัวอย่างที่ 2

พหุ ประเด็น ชีว

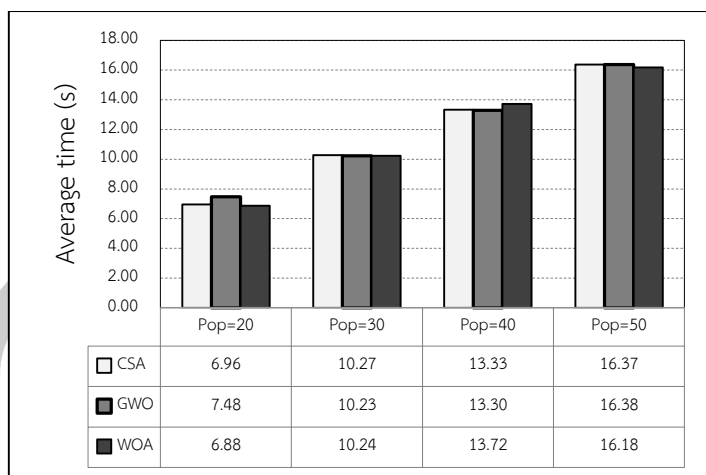


ภาพประกอบ 52 แผนภูมิเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการออกแบบที่เหมาะสมในแต่ละอัลกอริทึมสำหรับ
ตัวอย่างที่ 3 สำหรับหน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

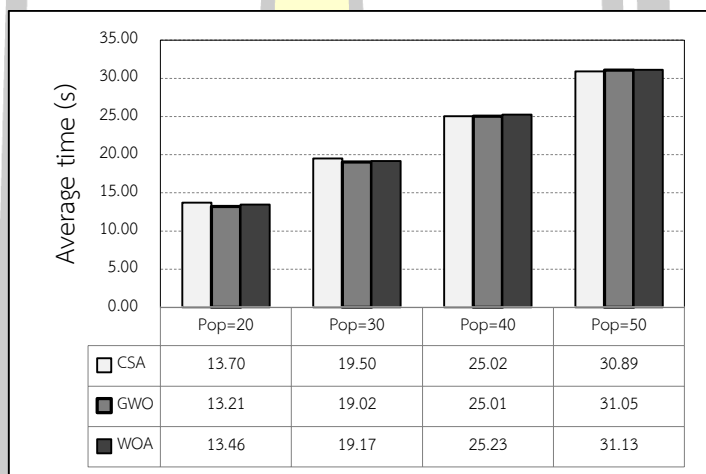


ภาพประกอบ 53 แผนภูมิเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการออกแบบที่เหมาะสมในแต่ละอัลกอริทึมสำหรับ
ตัวอย่างที่ 3 สำหรับหน้าตัดท่อกกลม

พหุ ประถมศึกษา

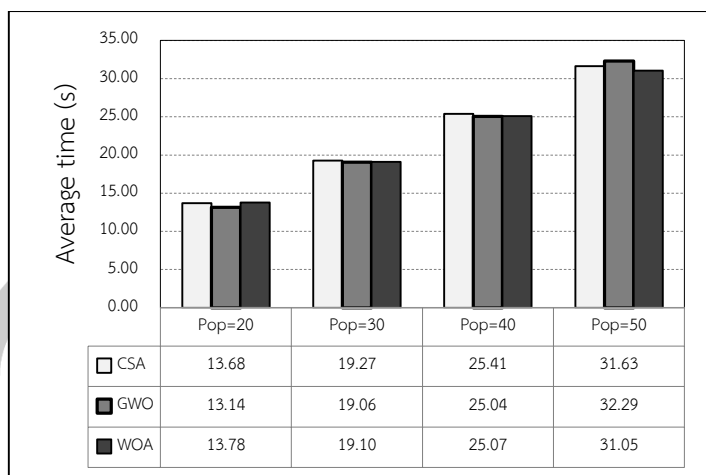


ภาพประกอบ 54 แผนภูมิเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการออกแบบที่เหมาะสมในแต่ละอัลกอริทึมสำหรับ
ตัวอย่างที่ 3 สำหรับหน้าตัดปีกกว้าง

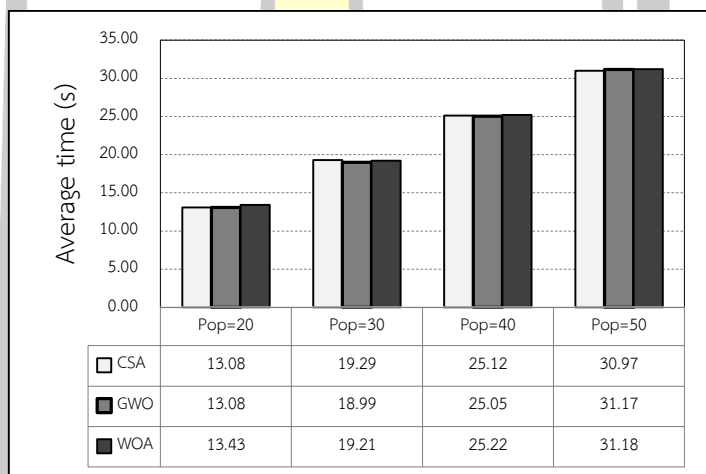


ภาพประกอบ 55 แผนภูมิเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการออกแบบที่เหมาะสมในแต่ละอัลกอริทึมสำหรับ
ตัวอย่างที่ 4 สำหรับหน้าตัดท่อนสี่เหลี่ยม

พหุ ประถมศึกษา



ภาพประกอบ 56 แผนภูมิเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการออกแบบที่เหมาะสมในแต่ละอัลกอริทึมสำหรับ
ตัวอย่างที่ 4 สำหรับหน้าตัดท่อกลม



ภาพประกอบ 57 แผนภูมิเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการออกแบบที่เหมาะสมในแต่ละอัลกอริทึมสำหรับ
ตัวอย่างที่ 4 สำหรับหน้าตัดปีกกว้าง

พหุ ประถมศึกษา

ตาราง 54 คะแนนในด้านเวลาที่ใช้ในการออกแบบที่เหมาะสมของแต่ละอัลกอริทึม

ตัวอย่างที่	วิธีการแก้ปัญหา	คะแนนในแต่ละการกำหนดจำนวนประชากร				คะแนนรวม
		20	30	40	50	
1	CSA	3	3	3	3	12
	GWO	1	2	2	2	7
	WOA	2	1	1	1	5
2	CSA	3	3	2	1	9
	GWO	1	1	1	3	6
	WOA	2	2	3	2	9
3 (หน้าตัดท่อ สี่เหลี่ยม)	CSA	1	1	1	2	5
	GWO	2	2	2	3	9
	WOA	3	3	3	3	12
3 (หน้าตัดท่อ กลม)	CSA	3	1	2	3	9
	GWO	1	2	3	2	8
	WOA	2	3	1	1	7
3 (หน้าตัดปีก กว้าง)	CSA	2	1	2	2	7
	GWO	1	3	3	1	8
	WOA	3	2	1	3	9
4 (หน้าตัดท่อ สี่เหลี่ยม)	CSA	1	1	3	3	8
	GWO	3	3	2	2	10
	WOA	2	2	1	1	6
4 (หน้าตัดท่อ กลม)	CSA	2	1	1	2	6
	GWO	3	3	3	1	10
	WOA	1	2	2	3	8
4 (หน้าตัดปีก กว้าง)	CSA	3	1	2	3	9
	GWO	3	3	3	2	11
	WOA	2	2	1	1	6

หมายเหตุ : 3 = ดีที่สุด 2 = ปานกลาง 1 = แย่ที่สุด

4.4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละอัลกอริทึมจากผลการทดสอบทางสถิติ

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละวิธีจะพิจารณาจากคะแนนที่ได้จากการทดสอบทางด้านสถิติได้แก่ ค่าตอบที่เหมาะสม ค่าเฉลี่ย ค่ามัธยฐาน ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จำนวนซ้ำ ค่าตอบที่เหมาะสม และเวลาเฉลี่ย โดยทำการแบ่งคะแนนออกเป็น 3 ระดับ ประกอบด้วยค่า 3 คือ คะแนนที่ดีที่สุด ค่า 2 คือคะแนนระดับกลาง และค่า 1 คือคะแนนที่แย่ที่สุด การแบ่งคะแนนทางสถิติ

นี้สามารถแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพโดยรวมของแต่ละอัลกอริทึม เมื่อรูปแบบของโครงสร้างหลักแตกต่างกัน และจำนวนของคำตอบที่เป็นไปได้ไม่เท่ากัน โดยผลการให้คะแนนแสดงดังตารางภาคผนวก ก_1- ก_64

จากผลการเปรียบเทียบค่าทางสถิติในตารางภาคผนวก ก_1- ก_64 สามารถสรุปคะแนนรวมของแต่ละจำนวนประชากรได้ดังตาราง 4.55 ซึ่งเมื่อทำการรวมคะแนนแล้วสามารถสรุปได้ว่า

ตัวอย่างที่ 1 CSA เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยมีคะแนนรวมเท่ากับ 72 คะแนน ซึ่งจะเห็นว่าทุกจำนวนประชากรมีคะแนนเท่ากัน อัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพรองจาก CSA คือ WOA ซึ่งมีคะแนนรวมเท่ากับ 52 คะแนน โดยจำนวนประชากรเท่ากับ 30 ตัว มีคะแนนมากที่สุดซึ่งเท่ากับ 14 คะแนน และจำนวนประชากรเท่ากับ 40 ตัว มีคะแนนน้อยที่สุดเท่ากับ 12 คะแนน สำหรับอัลกอริทึม GWO เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด โดยมีคะแนนรวมเท่ากับ 46 คะแนน ซึ่งจำนวนประชากรเท่ากับ 30 ตัว มีคะแนนเท่ากับ 13 คะแนน โดยเป็นคะแนนที่มากที่สุด และจำนวนประชากรที่มีคะแนนน้อยที่สุดคือ 20 ตัว ซึ่งเท่ากับ 10 คะแนน

ตัวอย่างที่ 2 CSA เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยมีคะแนนรวมเท่ากับ 69 คะแนน ซึ่งจะเห็นว่าจำนวนประชากรเท่ากับ 20 และ 30 ตัว มีคะแนนเท่ากันซึ่งเท่ากับ 18 คะแนน โดยเป็นคะแนนที่มากที่สุด อัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพรองจาก CSA คือ WOA ซึ่งมีคะแนนรวมเท่ากับ 43 คะแนน โดยจำนวนประชากรเท่ากับ 40 ตัว มีคะแนนมากที่สุดซึ่งเท่ากับ 13 คะแนน และจำนวนประชากรเท่ากับ 50 ตัว มีคะแนนน้อยที่สุดเท่ากับ 9 คะแนน สำหรับอัลกอริทึม GWO เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด โดยมีคะแนนรวมเท่ากับ 36 คะแนน ซึ่งจำนวนประชากรเท่ากับ 50 ตัว มีคะแนนเท่ากับ 12 คะแนน โดยเป็นคะแนนที่มากที่สุด และจำนวนประชากรที่มีคะแนนน้อยที่สุดคือ 20 ตัว ซึ่งเท่ากับ 8 คะแนน

ตัวอย่างที่ 3 (หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม) CSA เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยมีคะแนนรวมเท่ากับ 65 คะแนน ซึ่งจะเห็นว่าจำนวนประชากรเท่ากับ 50 ตัว มีคะแนนเท่ากับ 17 คะแนน ซึ่งเป็นคะแนนที่มากที่สุดและเมื่อจำนวนประชากรเท่ากับ 20 30 40 ตัว มีคะแนนเท่ากับ 16 คะแนน อัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพรองจาก CSA คือ GWO ซึ่งมีคะแนนรวมเท่ากับ 46 คะแนน โดยจำนวนประชากรเท่ากับ 30 และ 50 ตัว มีคะแนนมากที่สุดซึ่งเท่ากับ 12 คะแนน และจำนวนประชากรเท่ากับ 20 และ 40 ตัว มีคะแนนน้อยที่สุดเท่ากับ 11 คะแนน สำหรับอัลกอริทึม WOA เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด โดยมีคะแนนรวมเท่ากับ 39 คะแนน ซึ่งจำนวนประชากรเท่ากับ 20 40 และ 50 ตัว มีคะแนนมากที่สุด เท่ากับ 10 คะแนน และจำนวนประชากรเท่ากับ 30 ตัว มีคะแนนน้อยที่สุดซึ่งเท่ากับ 9 คะแนน

และจำนวนประชากรเท่ากับ 20 และ 30 ตัว มีคะแนนน้อยที่สุดเท่ากับ 10 คะแนน สำหรับอัลกอริทึม GWO เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด โดยมีคะแนนรวมเท่ากับ 36 คะแนน ซึ่งจำนวนประชากรเท่ากับ 20 ตัว มีคะแนนมากที่สุด เท่ากับ 10 คะแนน และจำนวนประชากรเท่ากับ 50 ตัว มีคะแนนน้อยที่สุดซึ่งเท่ากับ 8 คะแนน

ตัวอย่างที่ 4 (หน้าต่างปีกกว้าง) CSA เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยมีคะแนนรวมเท่ากับ 69 คะแนน ซึ่งจะเห็นว่าจำนวนประชากรเท่ากับ 20 และ 50 ตัว มีคะแนนเท่ากับ 18 คะแนน ซึ่งเป็นคะแนนที่มากที่สุด และเมื่อจำนวนประชากรเท่ากับ 30 ตัว มีคะแนนน้อยที่สุดเท่ากับ 16 คะแนน อัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพรองจาก CSA คือ WOA ซึ่งมีคะแนนรวมเท่ากับ 42 คะแนน โดยจำนวนประชากรเท่ากับ 30 40 และ 50 ตัว มีคะแนนมากที่สุดซึ่งเท่ากับ 11 คะแนน และจำนวนประชากรเท่ากับ 20 ตัว มีคะแนนน้อยที่สุดเท่ากับ 9 คะแนน สำหรับอัลกอริทึม GWO เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด โดยมีคะแนนรวมเท่ากับ 39 คะแนน ซึ่งจำนวนประชากรเท่ากับ 20 ตัว มีคะแนนมากที่สุด เท่ากับ 12 คะแนน และจำนวนประชากรเท่ากับ 50 ตัว มีคะแนนน้อยที่สุดซึ่งเท่ากับ 8 คะแนน

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของอัลกอริทึมในการออกแบบโครงข้อแข็งโดยการรวมคะแนนของแต่ละอัลกอริทึมจากตัวอย่างที่ 1 และ 2 พบว่า CSA มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยมีคะแนนรวมเท่ากับ 141 คะแนน อัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพรองจาก CSA คือ WOA ซึ่งมีคะแนนรวมเท่ากับ 95 คะแนน และอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพน้อยที่สุด คือ GWO โดยมีคะแนนรวมเท่ากับ 82 คะแนน และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของอัลกอริทึมในการออกแบบโครงข้อหมุนโดยการรวมคะแนนของแต่ละอัลกอริทึมจากตัวอย่างที่ 3 และ 4 พบว่า CSA มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยมีคะแนนรวมเท่ากับ 401 คะแนน อัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพรองจาก CSA คือ GWO ซึ่งมีคะแนนรวมเท่ากับ 249 คะแนน และอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพน้อยที่สุด คือ WOA โดยมีคะแนนรวมเท่ากับ 235 คะแนน

เพื่อที่จะพิจารณาประสิทธิภาพโดยรวมของอัลกอริทึมได้ทำการรวมคะแนนของแต่ละอัลกอริทึมในทุกตัวอย่างการทดสอบ ซึ่งผลการรวมคะแนนแสดงให้เห็นว่า CSA เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยมีคะแนนรวมเท่ากับ 542 คะแนน อัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพรองจาก CSA คือ GWO ซึ่งมีคะแนนรวมเท่ากับ 331 คะแนน และอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพน้อยที่สุด คือ WOA โดยมีคะแนนรวมเท่ากับ 330 คะแนน

ตาราง 55 สรุปคะแนนโดยรวมของแต่ละอัลกอริทึม

ตัวอย่างที่	วิธีการ แก้ปัญหา	คะแนนในแต่ละการกำหนดจำนวนประชากร				คะแนนรวม
		20	30	40	50	
1	CSA	18	18	18	18	72
	GWO	10	13	12	11	46
	WOA	13	14	12	13	52
2	CSA	18	18	17	16	69
	GWO	8	9	7	12	36
	WOA	11	10	13	9	43
3 (หน้าตัดท่อ สี่เหลี่ยม)	CSA	16	16	16	17	65
	GWO	11	12	11	12	46
	WOA	10	9	10	10	39
3 (หน้าตัดท่อ กลม)	CSA	18	16	17	14	65
	GWO	11	11	13	11	46
	WOA	8	10	7	8	33
3 (หน้าตัดปีก กว้าง)	CSA	17	17	17	17	68
	GWO	11	12	12	10	45
	WOA	9	9	8	10	36
4 (หน้าตัดท่อ สี่เหลี่ยม)	CSA	16	16	18	18	68
	GWO	12	10	7	8	37
	WOA	9	11	10	11	41
4 (หน้าตัดท่อ กลม)	CSA	17	16	16	17	66
	GWO	10	9	9	8	36
	WOA	10	10	12	12	44
4 (หน้าตัดปีก กว้าง)	CSA	18	16	17	18	69
	GWO	12	10	9	8	39
	WOA	9	11	11	11	42

4.5 การเปรียบเทียบผลการออกแบบที่เหมาะสมกับงานวิจัยที่ผ่านมา

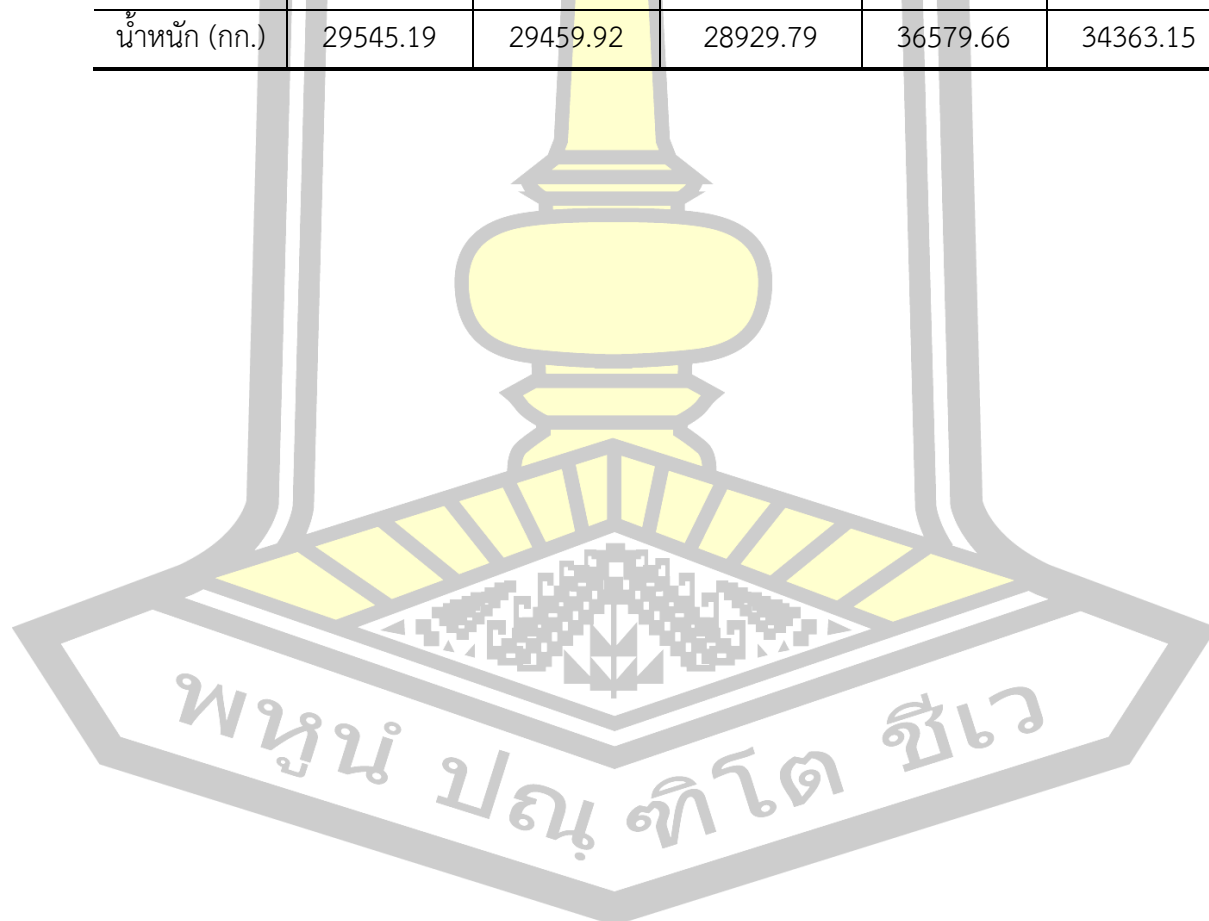
การเปรียบเทียบผลการออกแบบที่เหมาะสมของตัวอย่างที่ 1 กับงานวิจัยของ Pezeshk (2000) ซึ่งใช้อัลกอริทึมทางพันธุกรรม (GA) Camp (2005) ใช้อัลกอริทึมอาณานิคมมด (ACO) และ Degertekin (2008) ใช้อัลกอริทึมฮาร์โมนีเสริช แสดงดังตาราง 56 ซึ่งจากตารางพบว่า CSA GWO และ WOA ค้นพบคำตอบที่เหมาะสมมีค่าน้อยกว่า GA ACO และ HS ร้อยละ 3.13 3.13 0.48 ตามลำดับ สำหรับตัวอย่างที่ 2 จะนำผลการออกแบบที่เหมาะสมมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Pezeshk ที่ใช้อัลกอริทึมทางพันธุกรรม (GA) และ Dogan (2012) ที่ใช้อัลกอริทึมฝูงอนุภาค PSO โดยผลการออกแบบที่เหมาะสมของแต่ละอัลกอริทึมแสดงดังตาราง 57 ซึ่งพบว่า CSA สามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่มีค่าน้อยกว่า GA และ PSO ร้อยละ 2.08 และ 1.80 ตามลำดับ แต่ GWO และ WOA ค้นพบคำตอบที่เหมาะสมมีค่ามากกว่า GA และ PSO โดยคำตอบที่เหมาะสมของ GWO มากกว่า GA และ PSO ร้อยละ 23.81 และ 24.17 และคำตอบที่เหมาะสมของ WOA มากกว่า GA และ PSO ร้อยละ 16.31 และ 16.64 ตามลำดับ

ตาราง 56 ผลการเปรียบเทียบคำตอบที่เหมาะสมของโครงข้อแข็งตัวอย่างที่ 1 กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กลุ่มที่	Pezeshk et al (GA)	Camp et al (ACO)	Degertekin (HS)	CSA	GWO	WOA
1 (เสา)	W250X89	W250X89	W250X80	W250X80	W250X80	W250X80
2 (คาน)	W610X92	W610X92	W530X92	W610X92	W610X92	W610X92
น้ำหนัก (กก.)	8523.91	8523.91	8297.11	8256.96	8256.96	8256.96

ตาราง 57 ผลการเปรียบเทียบคำตอบที่เหมาะสมของโครงข้อแข็งตัวอย่างที่ 2 กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กลุ่มที่	Pezeshk et al (GA)	Dogan et al (PSO)	CSA	GWO	WOA
1 (เสา)	W360X347	W360X147	W360X314	W360X314	W360X314
2 (เสา)	W360X262	W360X147	W360X262	W360X287	W360X262
3 (เสา)	W360X237	W360X196	W360X196	W360X237	W360X216
4 (เสา)	W360X147	W360X237	W360X147	W310X226	W310X143
5 (เสา)	W310X117	W840X210	W360X91	W310X202	W360X147
6 (คาน)	W840X176	W760X173	W920X201	W840X226	W920X201
7 (คาน)	W760X134	W530X101	W760X147	W690X170	W920X253
8 (คาน)	W690X125	W360X91	W690X125	W610X153	W760X147
9 (คาน)	W610X82	W1000X272	W530X66	W690X265	W760X161
น้ำหนัก (กก.)	29545.19	29459.92	28929.79	36579.66	34363.15



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการประยุกต์ใช้เมตาฮีริสติกอัลกอริทึมสมัยใหม่แบบต่างๆสำหรับการออกแบบโครงสร้างหลักที่เหมาะสม ซึ่งประกอบไปด้วย อัลกอริทึมการค้นหาแบบฮิลล์ อัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสีเทา และอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของวฬ โดยใช้เครื่องมือโครมคอมพิวเตอร์ภายใต้ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 10 และพัฒนาวิธีการดังกล่าวโดยใช้โปรแกรม Microsoft Visual Studio 2015 ซึ่งได้ทำการทดสอบการออกแบบโครงสร้างหลักด้วยมาตรฐาน AISC วิธี LRFD จำนวน 4 ตัวอย่าง โดยแบ่งเป็น โครงข้อแข็ง 2 มิติ 2 ตัวอย่าง และโครงข้อหมุน 2 มิติ 2 ตัวอย่าง เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของแต่ละวิธีได้มีการปรับเปลี่ยนจำนวนประชากรตามความเหมาะสม ซึ่งประกอบด้วยจำนวนประชากรตั้งแต่ 20 ตัว ถึง 50 ตัว (ปรับเพิ่มขึ้นทีละ 10) โดยแต่ละค่าของจำนวนประชากรจะทำการออกแบบจำนวน 10 ครั้ง ซึ่งผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 คุณลักษณะในการใช้งาน

5.1.1.1 อัลกอริทึมการค้นหาแบบฮิลล์

อัลกอริทึมการค้นหาแบบฮิลล์ (CSA) มีพารามิเตอร์ควบคุม 2 พารามิเตอร์คือ พารามิเตอร์ระยะทางในการบินของฮิลล์ (fl) และพารามิเตอร์ความรู้ของฮิลล์ (AP) ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่า พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับออกแบบโครงสร้างหลักที่เหมาะสมคือ $fl=1.5$ $AP=0.1$ สำหรับโครงข้อแข็ง และ $fl=2$ $AP=0.1$ สำหรับโครงข้อหมุน ซึ่งการที่มีพารามิเตอร์ควบคุมเป็นข้อดีของ CSA เพราะ CSA ไม่ลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมเร็วมากเกินไป ทำให้มีโอกาสน้อยที่จะติดกับดักของคำตอบที่เหมาะสมเฉพาะแห่ง โดยผลการทดสอบทางสถิติยืนยันว่า CSA มีเป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพสูงมากในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม

5.1.1.2 อัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสีเทา

อัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสีเทา (GWO) เป็นอัลกอริทึมที่ไม่มีพารามิเตอร์ควบคุมอื่นที่นอกเหนือจากจำนวนประชากรและจำนวนรอบการทำงานซ้ำสูงสุด จึงทำให้ง่ายต่อการประยุกต์ใช้งาน โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า GWO สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบโครงสร้างหลักที่เหมาะสมได้ แต่ GWO มีประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมต่ำและ

มีผลการทดสอบทางสถิติไม่ดีเท่าที่ควร ซึ่งปัจจัยที่คาดว่าทำให้ GWO เป็นเช่นนี้คือ GWO ไม่มีพารามิเตอร์ควบคุมอื่นที่นอกเหนือจากจำนวนประชากรและจำนวนรอบการทำงานซ้ำสูงสุด ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ GWO มีอัตราการลู่เข้าที่เร็วเกินไปและส่งผลให้ไม่สามารถหาลหาค่าที่เหมาะสมเฉพาะแห่งได้

5.1.1.3 อัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของวาท

อัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของวาท (WOA) เป็นอัลกอริทึมที่ไม่มีพารามิเตอร์ควบคุมอื่นที่นอกเหนือจากจำนวนประชากรและจำนวนรอบการทำงานซ้ำสูงสุด จึงทำให้ง่ายต่อการประยุกต์ใช้งาน โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า WOA สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบโครงสร้างเหล็กที่เหมาะสมได้ แต่ WOA มีประสิทธิภาพในการค้นหาค่าตอบที่เหมาะสมต่ำซึ่งยืนยันแล้วจากผลทางสถิติ ซึ่งปัจจัยที่คาดว่าทำให้ WOA มีประสิทธิภาพการค้นหาค่าตอบที่เหมาะสมต่ำเป็นเช่นเดียวกับ GWO คือ ไม่มีพารามิเตอร์ควบคุมอื่นที่นอกเหนือจากจำนวนประชากรและจำนวนรอบการทำงานซ้ำสูงสุด ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีอัตราการลู่เข้าที่เร็วเกินไปและส่งผลให้ไม่สามารถหาลหาค่าที่เหมาะสมเฉพาะแห่งได้

5.1.2 สรุปผลการเปรียบเทียบทางสถิติ

5.1.2.1 เปรียบเทียบอัลกอริทึมการค้นหาค่าแบบอิกากับอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสี่เทา

ผลการทดสอบทางสถิติจากตัวอย่างโครงข้อแข็งและโครงหมุนจำนวน 4 ตัวอย่าง โดยการจัดแจงคะแนน พบว่า CSA เป็นอัลกอริทึมที่มีคะแนนโดยรวมทางสถิติที่ดีกว่า GWO แต่ GWO ใช้เวลาในการค้นหาค่าตอบที่เหมาะสมน้อยกว่า GWO

5.1.2.2 เปรียบเทียบอัลกอริทึมการค้นหาค่าแบบอิกากับอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของวาท

จากผลการทดสอบทางสถิติโดยการจัดแจงคะแนนยืนยันได้ว่า CSA เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพโดยรวมในการค้นหาค่าตอบที่เหมาะสมมากกว่า WOA ในทุกตัวอย่างการทดสอบ และ CSA ยังใช้เวลาในการค้นหาค่าตอบที่เหมาะสมน้อยกว่า WOA

5.1.2.3 เปรียบเทียบอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสี่เทากับอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมของวาท

จากผลการทดสอบทางสถิติโดยการจัดแจงคะแนนยืนยันได้ว่า WOA เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพโดยรวมในการค้นหาค่าตอบที่เหมาะสมมากกว่า GWO สำหรับการออกแบบโครงข้อแข็งเหล็ก แต่ในการออกแบบโครงข้อหมุนกับพบว่า GWO มีประสิทธิภาพโดยรวมในการค้นหาค่าตอบที่เหมาะสมมากกว่า WOA และ GWO ยังใช้เวลาในการค้นหาค่าตอบที่เหมาะสมน้อยกว่า WOA

เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยรวมของการออกแบบโครงสร้างหลักที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ พบว่า CSA ได้รับคะแนนโดยรวมทางสถิติมากที่สุด อัลกอริทึมที่มีคะแนนรองจาก CSA คือ GWO และอัลกอริทึมที่มีคะแนนต่ำที่สุดคือ WOA ซึ่ง GWO และ WOA มีคะแนนโดยรวมทางสถิติใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า CSA เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อเทียบกับ GWO และ WOA และ GWO ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมน้อยที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 สามารถนำทฤษฎีจากเมตาฮิวริสติกอัลกอริทึมเหล่านี้ไปใช้ในการประยุกต์เพื่อพัฒนาโปรแกรมในภาษาอื่นได้ เพื่อให้ได้ซอฟต์แวร์ที่มีความสะดวกและเหมาะสมต่อการใช้งาน

5.2.2 จากการวิจัยในเรื่องการประยุกต์ใช้เมตาฮิวริสติกอัลกอริทึมแบบต่างๆสำหรับการออกแบบโครงสร้างหลักที่เหมาะสม สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการเลือกอัลกอริทึมที่เหมาะสมกับงานที่ต้องการ เพื่อนำไปพัฒนาเป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับการออกแบบอย่างเหมาะสมได้

5.2.3 สำหรับนักวิจัยที่ต้องการศึกษาด้านการพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับการออกแบบอย่างเหมาะสมสามารถนำขั้นตอนวิธีการเหล่านี้ไปใช้ประยุกต์เข้ากับงานออกแบบทางด้านวิศวกรรมอื่นๆได้ เช่น การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และการออกแบบคอนกรีตอัดแรง เป็นต้น

พูน ปณ ภิโต ชีเว

บรรณานุกรม

- Askarzadeh, A. (2016). A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: crow search algorithm. *Computers & Structures*, 169, 1-12.
- Bekdaş, G., Nigdeli, S. M., & Yang, X.-S. (2015). Sizing optimization of truss structures using flower pollination algorithm. *Applied Soft Computing*, 37, 322-331.
- Camp, C., & Farshchin, M. (2014). Design of space trusses using modified teaching-learning based optimization. *Engineering Structures*, 62, 87-97.
- Camp, C. V., Bichon, B. J., & Stovall, S. P. (2005). Design of steel frames using ant colony optimization. *Journal of Structural Engineering*, 131(3), 369-379.
- Degertekin, S., & Hayalioglu, M. (2013). Sizing truss structures using teaching-learning-based optimization. *Computers & Structures*, 119, 177-188.
- Degertekin, S. O. (2008). Optimum design of steel frames using harmony search algorithm. *Structural and multidisciplinary optimization*, 36(4), 393-401.
- Doğan, E., & Saka, M. P. (2012). Optimum design of unbraced steel frames to LRFD-AISC using particle swarm optimization. *Advances in Engineering Software*, 46(1), 27-34.
- Dumonteil, P., & MOORE, W. (1993). Simple equations for effective length factors-discussion. *ENGINEERING JOURNAL-AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION INC*, 30(1), 37-37.
- Erol, O. K., & Eksin, I. (2006). A new optimization method: big bang-big crunch. *Advances in Engineering Software*, 37(2), 106-111.
- Eskandar, H., Sadollah, A., Bahreininejad, A., & Hamdi, M. (2012). Water cycle algorithm-A novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems. *Computers & Structures*, 110, 151-166.
- Farshchin, M., Camp, C., & Maniat, M. (2016). Multi-class teaching-learning-based optimization for truss design with frequency constraints. *Engineering Structures*, 106, 355-369.
- Farshchin, M., Maniat, M., Camp, C. V., & Pezeshk, S. (2018). School based optimization

- algorithm for design of steel frames. *Engineering Structures*, 171, 326-335.
- Gandomi, A. H., & Alavi, A. H. (2012). Krill herd: a new bio-inspired optimization algorithm. *Communications in nonlinear science and numerical simulation*, 17(12), 4831-4845.
- Ghaemi, M., & Feizi-Derakhshi, M.-R. (2014). Forest optimization algorithm. *Expert Systems with Applications*, 41(15), 6676-6687.
- Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers operations research*, 13(5), 533-549.
- Hasançebi, O., & Carbas, S. (2014). Bat inspired algorithm for discrete size optimization of steel frames. *Advances in Engineering Software*, 67, 173-185.
- Kaveh, A., & Dadras, A. (2017). A novel meta-heuristic optimization algorithm: thermal exchange optimization. *Advances in Engineering Software*, 110, 69-84.
- Kaveh, A., & Ghazaan, M. I. (2014). Enhanced colliding bodies optimization for design problems with continuous and discrete variables. *Advances in Engineering Software*, 77, 66-75.
- Kaveh, A., & Mahdavi, V. R. (2014). Colliding bodies optimization: a novel meta-heuristic method. *Computers & Structures*, 139, 18-27.
- Kaveh, A., & Talatahari, S. (2010). An improved ant colony optimization for the design of planar steel frames. *Engineering Structures*, 32(3), 864-873.
- Kaveh, A., & Talatahari, S. (2012). Charged system search for optimal design of frame structures. *Applied Soft Computing*, 12(1), 382-393.
- Kaveh, A., & Zolghadr, A. (2014). Democratic PSO for truss layout and size optimization with frequency constraints. *Computers & Structures*, 130, 10-21.
- Li, Q., Song, K., He, Z., Li, E., Cheng, A., & Chen, T. (2017). The artificial tree (AT) algorithm. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 65, 99-110.
- Mirjalili, S. (2015). The ant lion optimizer. *Advances in engineering software*, 83, 80-98.
- Mirjalili, S., & Lewis, A. (2016). The whale optimization algorithm. *Advances in engineering software*, 95, 51-67.
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software*, 69, 46-61.
- Pezeshk, S., Camp, C., & Chen, D. (2000). Design of nonlinear framed structures using

genetic optimization. *Journal of structural engineering*, 126(3), 382-388.

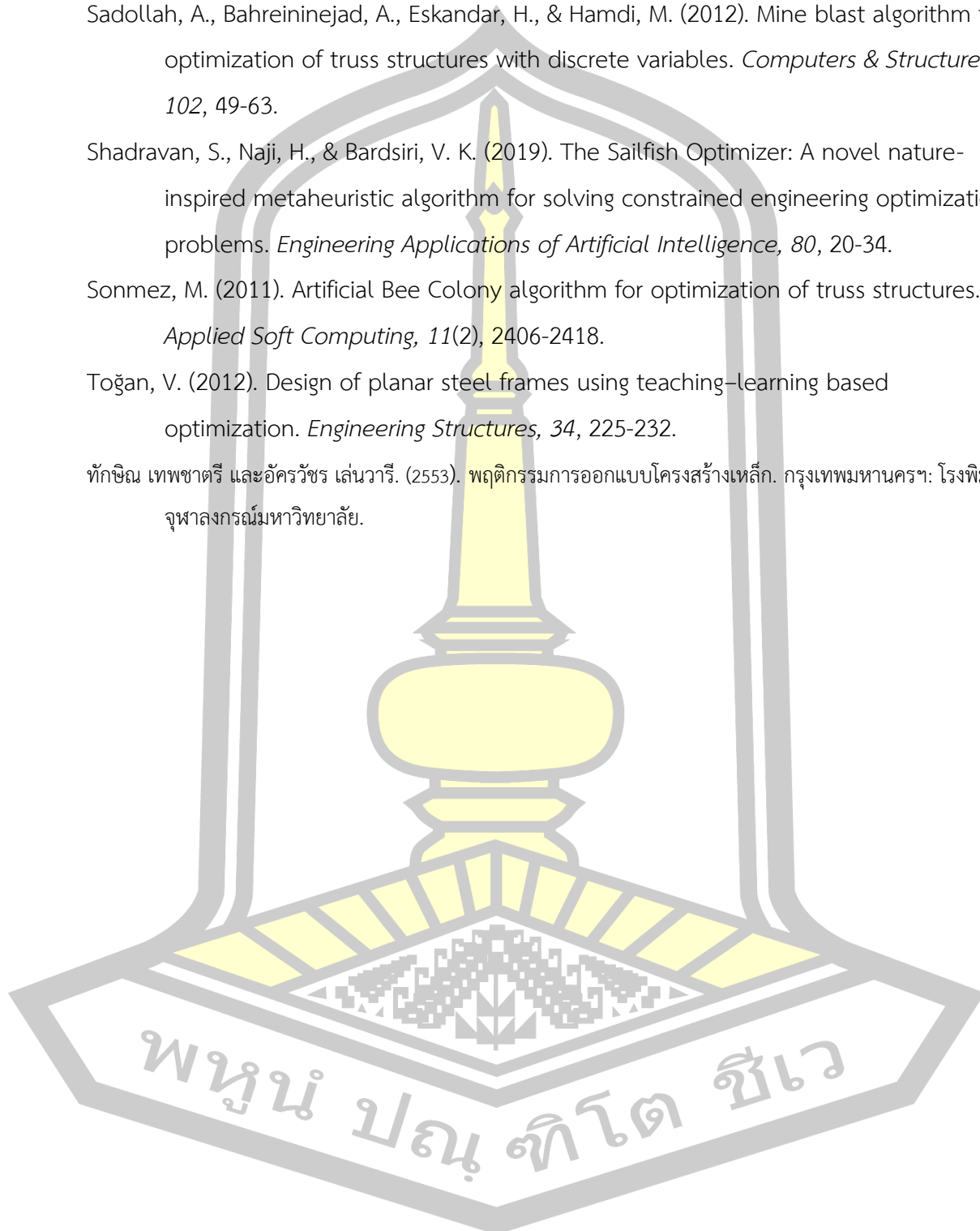
Sadollah, A., Bahreininejad, A., Eskandar, H., & Hamdi, M. (2012). Mine blast algorithm for optimization of truss structures with discrete variables. *Computers & Structures*, 102, 49-63.

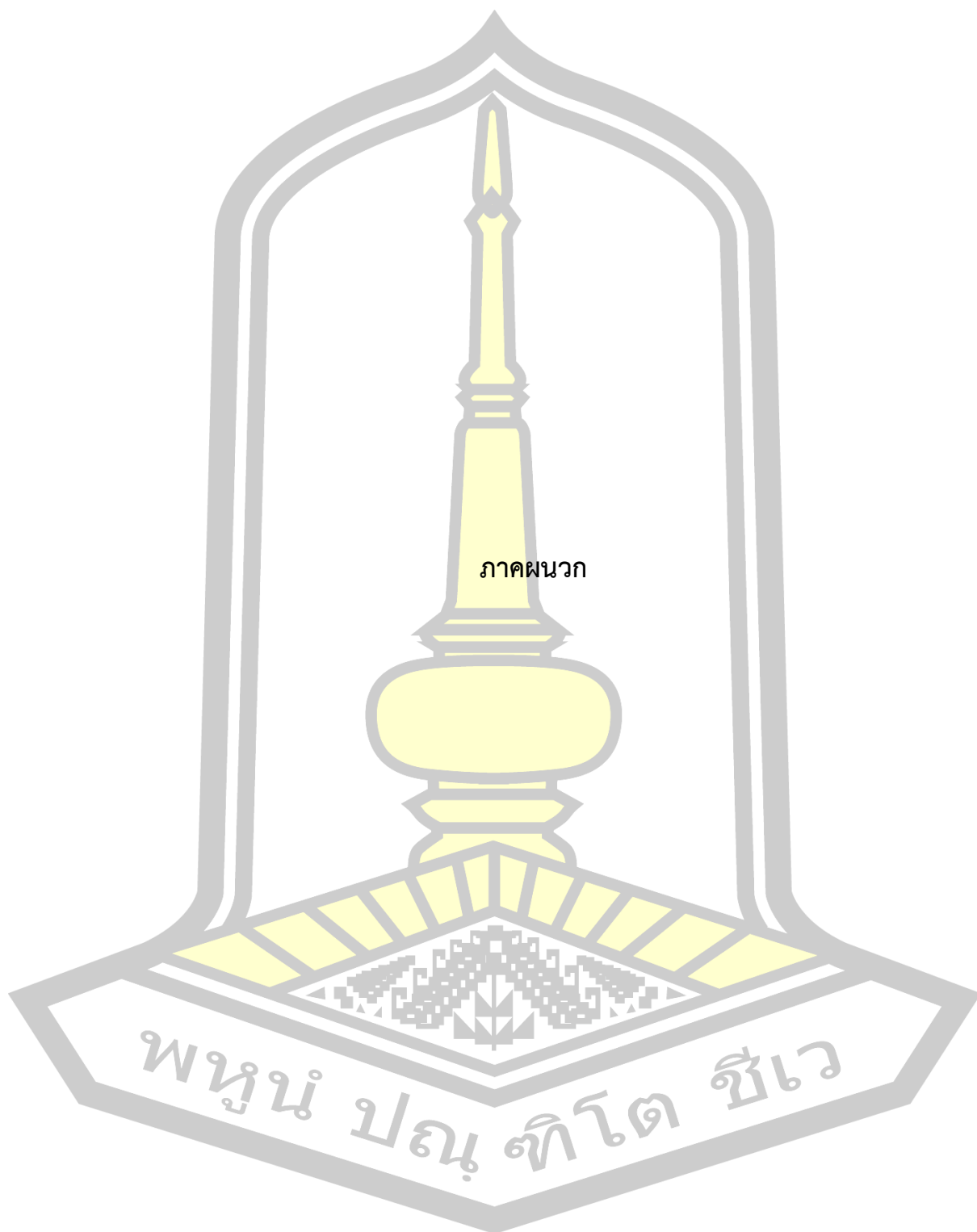
Shadravan, S., Naji, H., & Bardsiri, V. K. (2019). The Sailfish Optimizer: A novel nature-inspired metaheuristic algorithm for solving constrained engineering optimization problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 80, 20-34.

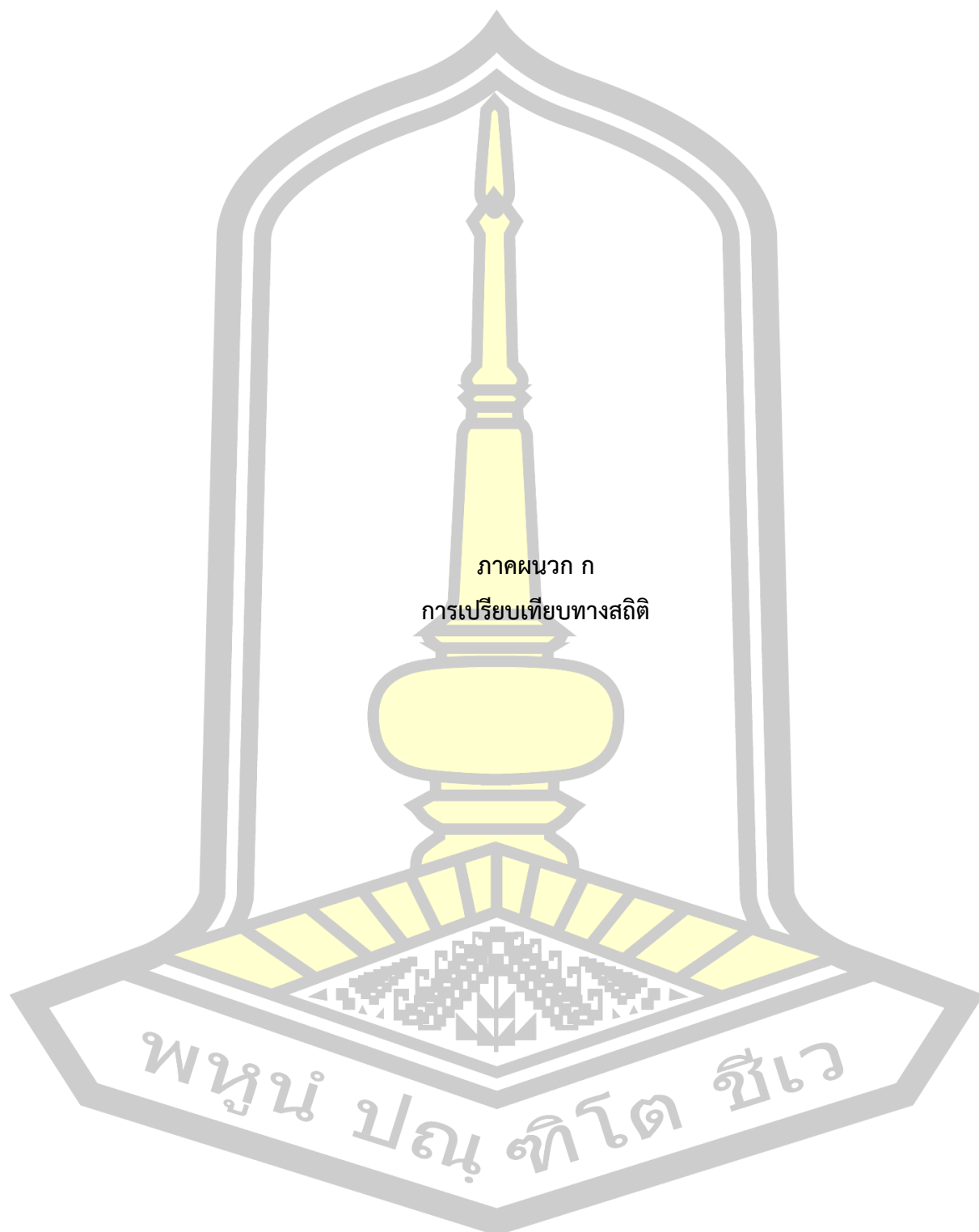
Sonmez, M. (2011). Artificial Bee Colony algorithm for optimization of truss structures. *Applied Soft Computing*, 11(2), 2406-2418.

Toğan, V. (2012). Design of planar steel frames using teaching-learning based optimization. *Engineering Structures*, 34, 225-232.

ทักษิณ เทพชาตรี และอัศวรวัชร เล่นวารี. (2553). พฤติกรรมการออกแบบโครงสร้างเหล็ก. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.







ตารางภาคผนวก ก_1 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 20 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 1

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่ามัธยฐาน	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	8256.96	8256.96	8256.96	8256.96	0.00	10
	เวลา	5.68	6.26	5.81	5.73	0.20	-
GWO	น้ำหนัก	8256.96	8849.88	8578.13	8676.95	295.77	4
	เวลา	6.15	8.69	6.59	6.25	0.79	-
WOA	น้ำหนัก	8256.96	9179.28	8431.54	8256.96	323.04	7
	เวลา	5.91	7.61	6.49	6.40	0.50	-

ตารางภาคผนวก ก_2 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 20 ตัว ในตัวอย่างที่ 1

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	3	3
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	1	2
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	2	3
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	2	1
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	1	2
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	3	1	2
คะแนนรวม	18	10	13

ตารางภาคผนวก ก_3 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 30 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 1

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่ามัธยฐาน	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	8256.96	8256.96	8256.96	8256.96	0.00	10
	เวลา	7.68	8.57	8.15	8.12	0.27	-
GWO	น้ำหนัก	8256.96	10299.24	8639.06	8256.96	646.83	6
	เวลา	8.78	9.93	9.12	8.91	0.42	-
WOA	น้ำหนัก	8256.96	8849.88	8316.25	8256.96	187.50	9
	เวลา	9.80	13.77	11.28	10.19	1.66	-

ตารางภาคผนวก ก_4 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 30 ตัว ในตัวอย่างที่ 1

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	3	3
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	1	2
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	3	3
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	3	2
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	1	3
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	3	2	1
คะแนนรวม	18	13	14

ตารางภาคผนวก ก_5 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 40 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 1

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่ามัธยฐาน	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	8256.96	8256.96	8256.96	8256.96	0.00	10
	เวลา	11.45	11.92	11.68	11.67	0.16	-
GWO	น้ำหนัก	8256.96	8849.88	8494.13	8256.96	306.18	6
	เวลา	11.64	13.61	12.06	11.80	0.61	-
WOA	น้ำหนัก	8256.96	9217.71	8435.39	8256.96	333.00	7
	เวลา	12.87	18.27	14.91	13.76	2.23	-

ตารางภาคผนวก ก_6 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 40 ตัว ในตัวอย่างที่ 1

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	3	3
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	1	2
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	3	3
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	2	1
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	1	2
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	3	2	1
คะแนนรวม	18	12	12

พหุ ประสิทธิภาพ

ตารางภาคผนวก ก_7 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 50 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 1

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่ามัธยฐาน	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	8256.96	8256.96	8256.96	8256.96	0.00	10
	เวลา	14.16	15.37	14.64	14.61	0.32	-
GWO	น้ำหนัก	8256.96	8849.88	8400.25	8256.96	249.18	7
	เวลา	14.11	16.78	14.87	14.36	0.96	-
WOA	น้ำหนัก	8256.96	8504.01	8281.67	8256.96	78.12	9
	เวลา	14.48	17.41	16.11	16.19	0.85	-

ตารางภาคผนวก ก_8 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 50 ตัว ในตัวอย่างที่ 1

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	3	3
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	1	2
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	3	3
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	1	2
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	1	2
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	3	2	1
คะแนนรวม	18	11	13

พหุ ประสิทธิภาพ

ตารางภาคผนวก ก_9 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 20 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 2

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่ามัธยฐาน	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	28929.79	29322.98	29033.49	29034.73	122.71	3
	เวลา	109.95	122.92	113.48	110.76	5.07	-
GWO	น้ำหนัก	40365.27	52142.75	46121.42	46207.38	3661.76	1
	เวลา	110.76	135.27	124.55	123.72	7.17	-
WOA	น้ำหนัก	38909.55	51892.20	45595.28	46193.66	3928.50	1
	เวลา	108.16	135.67	118.30	116.95	9.89	-

ตารางภาคผนวก ก_10 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 20 ตัว ในตัวอย่างที่ 2

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	1	2
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	1	2
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	1	2
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	2	1
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	2	2
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	3	1	2
คะแนนรวม	18	8	11

พหุ ประสิทธิภาพ

ตารางภาคผนวก ก_11 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 30 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 2

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่ามัธยฐาน	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	28929.79	29363.80	29057.38	29026.15	140.36	3
	เวลา	168.77	187.12	174.29	170.51	6.92	-
GWO	น้ำหนัก	39165.58	52773.68	47625.61	48817.99	4217.12	1
	เวลา	162.25	202.95	189.46	191.59	11.07	-
WOA	น้ำหนัก	37693.40	53174.19	46586.85	48956.98	5993.40	1
	เวลา	162.54	195.38	179.40	178.23	10.85	-

ตารางภาคผนวก ก_12 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 30 ตัว ในตัวอย่างที่ 2

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	1	2
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	1	2
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	2	1
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	2	1
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	2	2
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	3	1	2
คะแนนรวม	18	9	10

พหุ ประสิทธิภาพ

ตารางภาคผนวก ก_13 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 40 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 2

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่ามัธยฐาน	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	28929.79	29140.10	29003.33	28982.26	86.55	5
	เวลา	240.59	276.88	249.21	245.11	11.14	-
GWO	น้ำหนัก	36656.47	52215.90	44116.51	44799.20	5765.20	1
	เวลา	213.63	292.59	252.57	256.78	30.31	-
WOA	น้ำหนัก	34363.15	49019.16	42250.22	42598.24	4740.09	1
	เวลา	230.53	257.72	242.90	243.87	8.87	-

ตารางภาคผนวก ก_14 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 40 ตัว ในตัวอย่างที่ 2

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	1	2
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	1	2
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	1	2
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	1	2
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	2	2
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	2	1	3
คะแนนรวม	17	7	13

พหุ ประสิทธิภาพ

ตารางภาคผนวก ก_15 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 50 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 2

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่ามัธยฐาน	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	28929.79	29140.10	29045.35	29034.73	77.61	2
	เวลา	305.98	345.34	323.63	323.70	10.86	-
GWO	น้ำหนัก	36579.66	53049.83	42549.78	41285.16	5637.01	1
	เวลา	266.97	280.38	270.70	269.71	3.82	-
WOA	น้ำหนัก	40339.67	49635.46	44717.09	45581.01	3321.87	1
	เวลา	269.75	358.18	314.97	318.62	28.08	-

ตารางภาคผนวก ก_16 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 50 ตัว ในตัวอย่างที่ 2

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	2	1
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	2	1
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	2	1
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	1	2
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	2	2
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	1	3	2
คะแนนรวม	16	12	9

พหุ ประสิทธิภาพ

ตารางภาคผนวก ก_17 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 20 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 3 ในกรณีหน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่า มัธยฐาน	ค่าส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	จำนวนซ้ำ คำตอบที่ เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	4094.94	4105.18	4100.06	4100.06	5.40	5
	เวลา	8.29	9.45	8.79	8.62	0.46	-
GWO	น้ำหนัก	4891.80	5772.97	5436.26	5506.66	303.04	1
	เวลา	7.16	8.33	7.57	7.26	0.49	-
WOA	น้ำหนัก	4337.52	17549.09	7354.99	6103.21	3833.30	1
	เวลา	6.78	7.72	7.15	7.14	0.33	-

ตารางภาคผนวก ก_18 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 20 ตัว ในตัวอย่างที่ 3 ในกรณีหน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	1	2
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	2	1
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	2	1
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	2	1
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	2	2
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	1	2	3
คะแนนรวม	16	11	10

พูน ปณ ภิโต ชเว

ตารางภาคผนวก ก_19 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 30 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 3 ในกรณีหน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่ามัธยฐาน	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	4094.94	4126.27	4100.12	4094.94	10.12	7
	เวลา	10.75	11.84	11.25	11.23	0.40	-
GWO	น้ำหนัก	4576.99	5685.15	5223.43	5355.00	445.00	1
	เวลา	10.17	11.17	10.52	10.47	0.31	-
WOA	น้ำหนัก	4981.37	7678.77	6042.13	5886.61	946.29	1
	เวลา	9.97	10.46	10.23	10.27	0.20	-

ตารางภาคผนวก ก_20 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 30 ตัว ในตัวอย่างที่ 3 ในกรณีหน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	2	1
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	2	1
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	2	1
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	2	1
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	2	2
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	1	2	3
คะแนนรวม	16	12	9

พหุบัน ปณ จิต ชีเว

ตารางภาคผนวก ก_21 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 40 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 3 ในกรณีหน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่า มัธยฐาน	ค่าส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	จำนวนซ้ำ คำตอบที่ เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	4094.94	4105.18	4099.04	4094.94	5.29	6
	เวลา	13.86	15.67	14.72	14.74	0.59	-
GWO	น้ำหนัก	4575.16	5609.60	5314.72	5415.38	312.55	1
	เวลา	13.11	13.93	13.45	13.45	0.31	-
WOA	น้ำหนัก	4642.79	9402.88	5737.77	5185.06	1458.81	1
	เวลา	13.11	13.31	13.16	13.16	0.06	-

ตารางภาคผนวก ก_22 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 40 ตัว ในตัวอย่างที่ 3 ในกรณีหน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	2	1
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	2	1
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	1	2
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	2	1
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	2	2
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	1	2	3
คะแนนรวม	16	11	10

พหุบัน ปณ จิต ชีเว

ตารางภาคผนวก ก_23 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 50 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 3 ในกรณีหน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่า มัธยฐาน	ค่าส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	จำนวนซ้ำ คำตอบที่ เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	4094.94	4105.18	4099.04	4094.94	5.29	6
	เวลา	17.30	21.47	18.74	18.45	1.16	-
GWO	น้ำหนัก	4960.80	5877.65	5547.73	5536.31	257.79	1
	เวลา	16.11	16.86	16.33	16.16	0.27	-
WOA	น้ำหนัก	5017.93	7277.32	5834.99	5495.09	673.60	1
	เวลา	16.12	16.77	16.33	16.17	0.26	-

ตารางภาคผนวก ก_24 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 50 ตัว ในตัวอย่างที่ 3 ในกรณีหน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	2	1
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	2	1
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	1	2
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	2	1
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	2	2
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	2	3	3
คะแนนรวม	17	12	10

พหุบัน ปณ จิต ชีเว

ตารางภาคผนวก ก_25 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 20 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 3 ในกรณีหน้าตัดทอกลม

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่า มัธยฐาน	ค่าส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	จำนวนซ้ำ คำตอบที่ เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	4287.99	4287.99	4287.99	4287.99	0.00	10
	เวลา	6.73	6.81	6.77	6.77	0.02	-
GWO	น้ำหนัก	4960.70	5276.94	5142.21	5133.31	102.52	1
	เวลา	6.72	9.30	7.44	7.09	0.89	-
WOA	น้ำหนัก	5090.48	9944.79	5924.94	5483.75	1467.64	1
	เวลา	6.73	7.93	7.09	6.77	0.46	-

ตารางภาคผนวก ก_26 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 20 ตัว ในตัวอย่างที่ 3 ในกรณีหน้าตัดทอกลม

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	2	1
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	2	1
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	2	1
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	2	1
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	2	2
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	3	1	2
คะแนนรวม	18	11	8

พูน ปณ จิต ชีเว

ตารางภาคผนวก ก_27 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 30 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 3 ในกรณีหน้าตัดทอกลม

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่า มัธยฐาน	ค่าส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	จำนวนซ้ำ คำตอบที่ เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	4287.99	4287.99	4287.99	4287.99	0.00	10
	เวลา	9.92	10.77	10.23	10.26	0.26	-
GWO	น้ำหนัก	4655.24	5295.22	5081.57	5155.33	198.72	1
	เวลา	9.84	10.52	10.01	9.94	0.20	-
WOA	น้ำหนัก	4494.56	7772.96	5761.71	5730.28	906.23	1
	เวลา	9.91	10.39	9.99	9.94	0.15	-

ตารางภาคผนวก ก_28 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 30 ตัว ในตัวอย่างที่ 3 ในกรณีหน้าตัดทอกลม

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	1	2
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	2	1
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	2	1
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	2	1
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	2	2
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	1	2	3
คะแนนรวม	16	11	10

พหุบัน ปณ จิต ชีเว

ตารางภาคผนวก ก_29 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 40 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 3 ในกรณีหน้าตัดทอกลม

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่า มัธยฐาน	ค่าส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	จำนวนซ้ำ คำตอบที่ เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	4287.99	4287.99	4287.99	4287.99	0.00	10
	เวลา	12.94	13.93	13.20	13.13	0.33	-
GWO	น้ำหนัก	4708.43	5276.94	5090.81	5158.50	203.58	1
	เวลา	12.97	13.22	13.04	12.99	0.09	-
WOA	น้ำหนัก	4947.90	7324.06	5710.11	5502.76	853.56	1
	เวลา	12.94	13.77	13.24	13.15	0.28	-

ตารางภาคผนวก ก_30 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 40 ตัว ในตัวอย่างที่ 3 ในกรณีหน้าตัดทอกลม

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	2	1
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	2	1
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	2	1
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	2	1
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	2	2
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	2	3	1
คะแนนรวม	17	13	7

พหุบัน ปณ จิต ชีเว

ตารางภาคผนวก ก_31 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 50 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 3 ในกรณีหน้าตัดที่อกกลม

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่ามัธยฐาน	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	4287.99	4287.99	4287.99	4287.99	0.00	10
	เวลา	15.92	16.61	16.08	15.98	0.22	-
GWO	น้ำหนัก	4748.65	5295.22	5052.02	5075.86	198.29	1
	เวลา	15.94	16.93	16.16	15.96	0.34	-
WOA	น้ำหนัก	4710.26	6248.76	5332.10	5277.94	524.84	1
	เวลา	15.95	16.61	16.18	16.07	0.24	-

ตารางภาคผนวก ก_32 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 50 ตัว ในตัวอย่างที่ 3 ในกรณีหน้าตัดที่อกกลม

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	1	2
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	2	1
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	2	1
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	2	1
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	2	2
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	3	2	1
คะแนนรวม	18	11	8

พหุบัน ปณ จิต ชีเว

ตารางภาคผนวก ก_33 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 20 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 3 ในกรณีหน้าตัดปีกกว้าง

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่ามัธยฐาน	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	7548.36	8004.03	7596.30	7548.36	143.46	8
	เวลา	6.78	7.14	6.96	6.99	0.14	-
GWO	น้ำหนัก	8543.29	11486.37	10083.62	10077.65	847.21	1
	เวลา	6.81	9.54	7.48	7.44	0.82	-
WOA	น้ำหนัก	8818.82	15921.67	11514.47	10217.45	2633.47	1
	เวลา	6.80	7.15	6.88	6.84	0.11	-

ตารางภาคผนวก ก_34 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 20 ตัว ในตัวอย่างที่ 3 ในกรณีหน้าตัดปีกกว้าง

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	2	1
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	2	1
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	2	1
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	2	1
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	2	2
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	2	1	3
คะแนนรวม	17	11	9

พูน ปณ ภิโต ชีเว

ตารางภาคผนวก ก_35 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 30 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 3 ในกรณีหน้าตัดปีกกว้าง

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่ามัธยฐาน	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	7548.36	8004.03	7716.10	7689.12	185.12	4
	เวลา	10.00	10.67	10.27	10.23	0.19	-
GWO	น้ำหนัก	8150.58	11321.85	9411.72	9008.52	1028.64	1
	เวลา	9.98	10.77	10.23	10.15	0.28	-
WOA	น้ำหนัก	7782.34	12565.79	9436.80	9338.72	1310.95	1
	เวลา	9.98	10.92	10.24	10.18	0.28	-

ตารางภาคผนวก ก_36 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 30 ตัว ในตัวอย่างที่ 3 ในกรณีหน้าตัดปีกกว้าง

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	1	2
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	2	1
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	2	1
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	2	1
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	2	2
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	1	3	2
คะแนนรวม	17	12	9

พูน ปณ จิต ชีเว

ตารางภาคผนวก ก_37 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 40 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 3 ในกรณีหน้าตัดปีกกว้าง

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่ามัธยฐาน	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	7548.36	8004.03	7736.34	7782.34	181.71	4
	เวลา	13.11	13.93	13.33	13.15	0.33	-
GWO	น้ำหนัก	8585.73	11596.05	9887.06	9704.20	925.22	1
	เวลา	13.10	13.93	13.30	13.16	0.30	-
WOA	น้ำหนัก	8144.29	14238.77	10808.25	10313.96	2006.37	1
	เวลา	13.12	15.77	13.72	13.27	0.87	-

ตารางภาคผนวก ก_38 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 40 ตัว ในตัวอย่างที่ 3 ในกรณีหน้าตัดปีกกว้าง

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	1	2
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	2	1
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	2	1
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	2	1
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	2	2
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	2	3	1
คะแนนรวม	17	12	8

พูน ปณ ภิโต ชีเว

ตารางภาคผนวก ก_39 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 50 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 3 ในกรณีหน้าตัดปีกกว้าง

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่ามัธยฐาน	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	7548.36	7985.75	7662.30	7548.36	158.38	6
	เวลา	16.11	16.93	16.37	16.20	0.33	-
GWO	น้ำหนัก	8581.18	9709.56	9188.84	9214.83	403.05	1
	เวลา	16.11	17.61	16.38	16.15	0.50	-
WOA	น้ำหนัก	8209.08	11838.83	9455.94	9237.65	1122.99	1
	เวลา	16.12	16.22	16.18	16.18	0.03	-

ตารางภาคผนวก ก_40 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 50 ตัว ในตัวอย่างที่ 3 ในกรณีหน้าตัดปีกกว้าง

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	1	2
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	2	1
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	2	1
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	2	1
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	2	2
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	2	1	3
คะแนนรวม	17	10	10

พูน ปณ ภิโต ชีเว

ตารางภาคผนวก ก_41 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 20 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 4 ในกรณีหน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่า มัธยฐาน	ค่าส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	จำนวนซ้ำ คำตอบที่ เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	4515.27	4690.53	4550.32	4515.27	73.90	8
	เวลา	12.98	17.14	13.70	13.15	1.25	-
GWO	น้ำหนัก	6898.89	8893.10	8000.91	8103.69	642.23	1
	เวลา	12.94	13.57	13.08	12.96	0.22	-
WOA	น้ำหนัก	6327.15	12470.29	9126.22	8779.74	2022.10	1
	เวลา	12.97	13.93	13.43	13.42	0.41	-

ตารางภาคผนวก ก_42 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 20 ตัว ในตัวอย่างที่ 4 ในกรณีหน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	1	2
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	2	1
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	2	1
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	2	1
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	2	2
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	1	3	2
คะแนนรวม	16	12	9

พหุบัน ปณ จิต ชีเว

ตารางภาคผนวก ก_43 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 30 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 4 ในกรณีหน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่า มัธยฐาน	ค่าส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	จำนวนซ้ำ คำตอบที่ เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	4515.27	4783.43	4577.14	4515.27	102.78	7
	เวลา	18.89	22.87	19.50	18.98	1.22	-
GWO	น้ำหนัก	6663.77	9281.49	7710.87	7214.90	1062.36	1
	เวลา	18.91	19.46	18.99	18.94	0.16	-
WOA	น้ำหนัก	6095.47	8904.62	7361.12	7263.11	886.15	1
	เวลา	18.98	19.77	19.21	19.14	0.28	-

ตารางภาคผนวก ก_44 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 30 ตัว ในตัวอย่างที่ 4 ในกรณีหน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	1	2
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	1	2
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	2	1
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	1	2
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	2	2
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	1	3	2
คะแนนรวม	16	10	11

พหุบัน ปณ จิต ชีเว

ตารางภาคผนวก ก_45 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 40 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 4 ในกรณีหน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่ามัธยฐาน	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	4515.27	4515.27	4515.27	4515.27	0.00	10
	เวลา	24.86	25.33	25.02	24.97	0.16	-
GWO	น้ำหนัก	6436.34	8955.36	7708.33	7854.70	949.31	1
	เวลา	24.91	25.62	25.05	24.96	0.22	-
WOA	น้ำหนัก	6070.07	8291.37	6781.99	6463.50	712.02	1
	เวลา	24.98	25.61	25.22	25.24	0.20	-

ตารางภาคผนวก ก_46 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 40 ตัว ในตัวอย่างที่ 4 ในกรณีหน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	1	2
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	1	2
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	1	2
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	1	2
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	1	1
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	3	2	1
คะแนนรวม	18	7	10

พหุบัน ปณ จิต ชีเว

ตารางภาคผนวก ก_47 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 50 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 4 ในกรณีหน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่ามัธยฐาน	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	4515.27	4690.53	4532.79	4515.27	55.42	9
	เวลา	30.81	31.14	30.89	30.87	0.09	-
GWO	น้ำหนัก	6342.54	8712.38	7232.40	6966.13	833.99	1
	เวลา	30.86	31.88	31.17	31.04	0.32	-
WOA	น้ำหนัก	5907.51	7617.74	6777.06	6914.96	661.43	1
	เวลา	30.92	31.45	31.18	31.16	0.22	-

ตารางภาคผนวก ก_48 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 50 ตัว ในตัวอย่างที่ 4 ในกรณีหน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	1	2
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	1	2
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	1	2
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	1	2
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	2	2
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	3	2	1
คะแนนรวม	18	8	11

พหุ ประสิทธิภาพ

ตารางภาคผนวก ก_49 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 20 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 4 ในกรณีหน้าตัดท่อกลม

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่ามัธยฐาน	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	4742.74	4742.74	4742.74	4742.74	0.00	10
	เวลา	13.22	16.55	13.68	13.30	1.02	-
GWO	น้ำหนัก	5606.98	7190.42	6480.21	6594.63	476.89	1
	เวลา	12.94	13.62	13.14	13.06	0.24	-
WOA	น้ำหนัก	5352.98	8028.29	6413.86	5945.90	964.35	1
	เวลา	12.98	16.16	13.78	13.50	0.91	-

ตารางภาคผนวก ก_50 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 20 ตัว ในตัวอย่างที่ 4 ในกรณีหน้าตัดท่อกลม

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	1	2
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	1	2
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	1	2
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	2	1
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	2	2
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	2	3	1
คะแนนรวม	17	10	10

พูน ปณ จิต ชีเว

ตารางภาคผนวก ก_51 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 30 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 4 ในกรณีหน้าตัดทอกลม

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่า มัธยฐาน	ค่าส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	จำนวนซ้ำ คำตอบที่ เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	4742.74	4742.74	4742.74	4742.74	0.00	10
	เวลา	19.19	19.33	19.27	19.28	0.05	-
GWO	น้ำหนัก	5197.05	7320.59	6290.96	6505.44	607.98	1
	เวลา	18.87	19.46	19.06	18.96	0.21	-
WOA	น้ำหนัก	4860.22	6409.27	5653.34	5441.56	554.18	1
	เวลา	18.94	19.61	19.10	18.96	0.25	-

ตารางภาคผนวก ก_52 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 30 ตัว ในตัวอย่างที่ 4 ในกรณีหน้าตัดทอกลม

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	1	2
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	1	2
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	1	2
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	1	2
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	2	2
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	1	3	2
คะแนนรวม	16	9	10

พหุบัน ปณ จิต ชีเว

ตารางภาคผนวก ก_53 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 40 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 4 ในกรณีหน้าตัดที่อกกลม

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่ามัธยฐาน	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	4742.74	4742.74	4742.74	4742.74	0.00	10
	เวลา	25.33	25.64	25.41	25.37	0.10	-
GWO	น้ำหนัก	4846.88	7303.29	5814.77	5723.96	685.11	1
	เวลา	24.84	25.52	25.04	24.94	0.24	-
WOA	น้ำหนัก	4844.92	6527.09	5567.24	5347.55	564.03	1
	เวลา	24.93	25.37	25.07	25.00	0.15	-

ตารางภาคผนวก ก_54 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 40 ตัว ในตัวอย่างที่ 4 ในกรณีหน้าตัดที่อกกลม

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	1	2
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	1	2
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	1	2
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	1	2
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	2	2
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	1	3	2
คะแนนรวม	16	9	12

พหุบัน ปณ จิต ชีเว

ตารางภาคผนวก ก_55 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 50 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 4 ในกรณีหน้าตัดที่อกกลม

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่ามัธยฐาน	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	4742.74	4742.74	4742.74	4742.74	0.00	10
	เวลา	31.39	32.62	31.63	31.50	0.36	-
GWO	น้ำหนัก	5480.98	6760.50	6132.52	6141.66	486.94	1
	เวลา	30.80	37.22	32.29	30.91	2.38	-
WOA	น้ำหนัก	5009.44	6704.90	5583.79	5349.43	545.66	1
	เวลา	30.89	31.44	31.05	30.92	0.21	-

ตารางภาคผนวก ก_56 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 50 ตัว ในตัวอย่างที่ 4 ในกรณีหน้าตัดที่อกกลม

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	1	2
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	1	2
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	1	2
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	2	1
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	2	2
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	2	1	3
คะแนนรวม	17	8	12

พหุบัน ปณ จิต ชีเว

ตารางภาคผนวก ก_57 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 20 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 4 ในกรณีหน้าตัดปีกกว้าง

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่า มัธยฐาน	ค่าส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	จำนวนซ้ำ คำตอบที่ เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	5767.81	5767.81	5767.81	5767.81	0.00	10
	เวลา	12.94	13.47	13.08	13.00	0.17	-
GWO	น้ำหนัก	6898.89	8893.10	8000.91	8103.69	642.23	1
	เวลา	12.94	13.57	13.08	12.96	0.22	-
WOA	น้ำหนัก	6327.15	12470.29	9126.22	8779.74	2022.10	1
	เวลา	12.97	13.93	13.43	13.42	0.41	-

ตารางภาคผนวก ก_58 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 20 ตัว ในตัวอย่างที่ 4 ในกรณีหน้าตัดปีกกว้าง

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	1	2
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	2	1
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	2	1
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	2	1
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	2	2
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	3	3	2
คะแนนรวม	18	12	9

พูน ปณ จิต ชีเว

ตารางภาคผนวก ก_59 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 30 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 4 ในกรณีหน้าตัดปีกกว้าง

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่ามัธยฐาน	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	5767.81	5767.81	5767.81	5767.81	0.00	10
	เวลา	18.95	19.93	19.29	19.22	0.33	-
GWO	น้ำหนัก	6663.77	9281.49	7710.87	7214.90	1062.36	1
	เวลา	18.91	19.46	18.99	18.94	0.16	-
WOA	น้ำหนัก	6095.47	8904.62	7361.12	7263.11	886.15	1
	เวลา	18.98	19.77	19.21	19.14	0.28	-

ตารางภาคผนวก ก_60 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 30 ตัว ในตัวอย่างที่ 4 ในกรณีหน้าตัดปีกกว้าง

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	1	2
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	1	2
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	2	1
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	1	2
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	2	2
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	1	3	2
คะแนนรวม	16	10	11

พูน ปณ จิต ชีเว

ตารางภาคผนวก ก_61 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 40 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 4 ในกรณีหน้าตัดปีกกว้าง

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่ามัธยฐาน	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	5767.81	5767.81	5767.81	5767.81	0.00	10
	เวลา	24.91	25.77	25.12	24.98	0.28	-
GWO	น้ำหนัก	6436.34	8955.36	7708.33	7854.70	949.31	1
	เวลา	24.91	25.62	25.05	24.96	0.22	-
WOA	น้ำหนัก	6070.07	8291.37	6781.99	6463.50	712.02	1
	เวลา	24.98	25.61	25.22	25.24	0.20	-

ตารางภาคผนวก ก_62 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 40 ตัว ในตัวอย่างที่ 4 ในกรณีหน้าตัดปีกกว้าง

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	1	2
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	1	2
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	1	2
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	1	2
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	2	2
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	2	3	1
คะแนนรวม	17	9	11

พูน ปณ จิต ชีเว

ตารางภาคผนวก ก_63 ข้อมูลทางสถิติของประชากรเท่ากับ 50 ตัว สำหรับตัวอย่างที่ 4 ในกรณีหน้าตัดปีกกว้าง

วิธีการ	รายการ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่ามัธยฐาน	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสม
CSA	น้ำหนัก	5767.81	5767.81	5767.81	5767.81	0.00	10
	เวลา	30.84	31.30	30.97	30.92	0.15	-
GWO	น้ำหนัก	6342.54	8712.38	7232.40	6966.13	833.99	1
	เวลา	30.86	31.88	31.17	31.04	0.32	-
WOA	น้ำหนัก	5907.51	7617.74	6777.06	6914.96	661.43	1
	เวลา	30.92	31.45	31.18	31.16	0.22	-

ตารางภาคผนวก ก_64 สรุปผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการกำหนดจำนวนประชากรเท่ากับ 50 ตัว ในตัวอย่างที่ 4 ในกรณีหน้าตัดปีกกว้าง

รายการทางสถิติ	วิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสม		
	CSA	GWO	WOA
คำตอบที่เหมาะสมต่ำสุด	3	1	2
ค่าเฉลี่ยต่ำสุด	3	1	2
ค่ามัธยฐานต่ำสุด	3	1	2
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด	3	1	2
จำนวนซ้ำคำตอบที่เหมาะสมสูงสุด	3	2	2
ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยที่สุด	3	2	1
คะแนนรวม	18	8	11

พหุ ประสิทธิภาพ

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สิทธิศักดิ์ อันสนั่น
วันเกิด 17 เมษายน 2538
สถานที่เกิด อ.ยางตลาด จ.กาฬสินธุ์ ประเทศไทย
สถานที่อยู่ปัจจุบัน 104 หมู่ที่ 13 ต.ยางตลาด อ.ยางตลาด จ.กาฬสินธุ์ 46120
ประวัติการศึกษา
พ.ศ. 2552 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนเพิ่มพูนวิทยาคมกาฬสินธุ์
พ.ศ. 2555 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนกาฬสินธุ์พิทยาสรรพ์
พ.ศ. 2559 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
พ.ศ. 2563 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูน ปณ ภัโต ชีเว