



การหาความเหมาะสมที่สุดสำหรับการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN
ขนาดใหญ่ ด้วยวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง

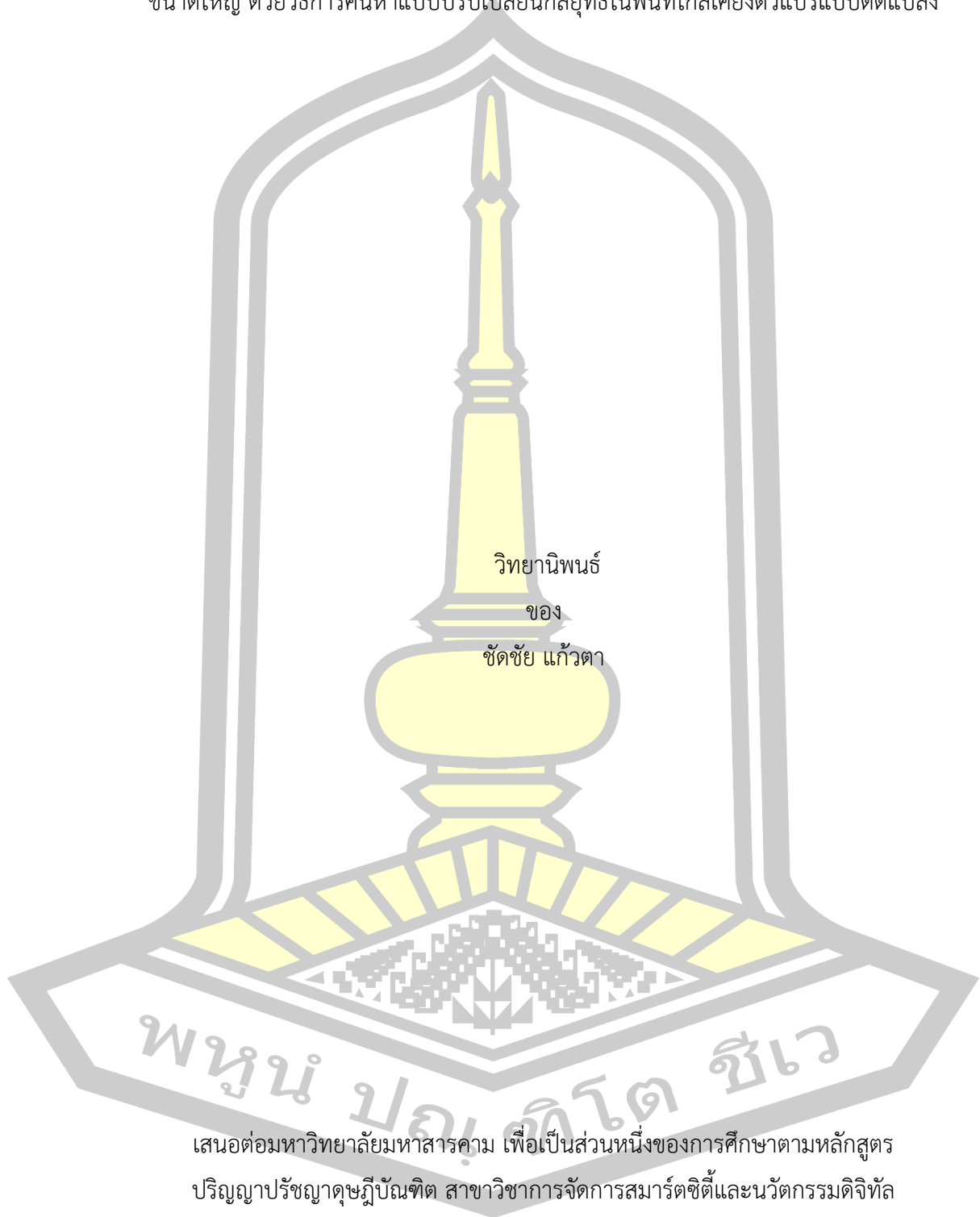
วิทยานิพนธ์
ของ
ชัชชัย แก้วตา

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสมาร์ตซิตีและนวัตกรรมดิจิทัล

มิถุนายน 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การหาความเหมาะสมที่สุดสำหรับการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN
ขนาดใหญ่ ด้วยวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง

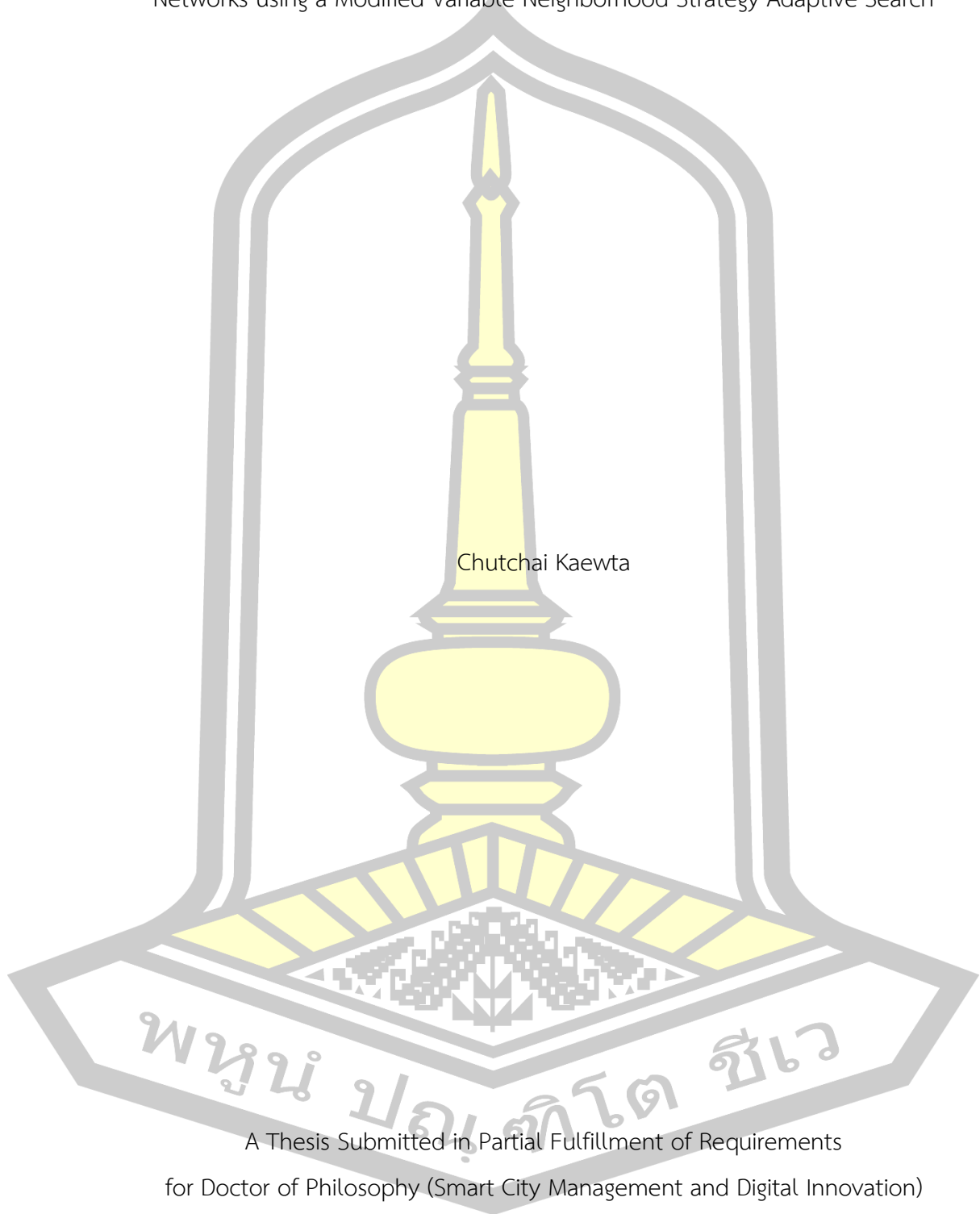


เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสมาร์ตซิตี้และนวัตกรรมดิจิทัล

มิถุนายน 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

An Optimization of Multiple Gateways Location Selection in large-scale LoRaWAN
Networks using a Modified Variable Neighborhood Strategy Adaptive Search



Chutchai Kaewta

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Doctor of Philosophy (Smart City Management and Digital Innovation)

June 2023

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายชัชชัย แก้วตา แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสมาร์ตซิตี้และนวัตกรรมดิจิทัล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ศ. ดร. ระพีพันธ์ ปิตาคะโส)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. จรรยา สาวีถี)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อ. ดร. เอกชัย แน่นอุดร)

กรรมการ

(ผศ. ดร. มณีรัตน์ วงษ์ขี้ม)

กรรมการ

(ผศ. ดร. นิพนธ์พัทธ์ เมืองโคตร)

กรรมการ

(อ. ดร. อนุชานต์ ชูติมารังสรรค์)

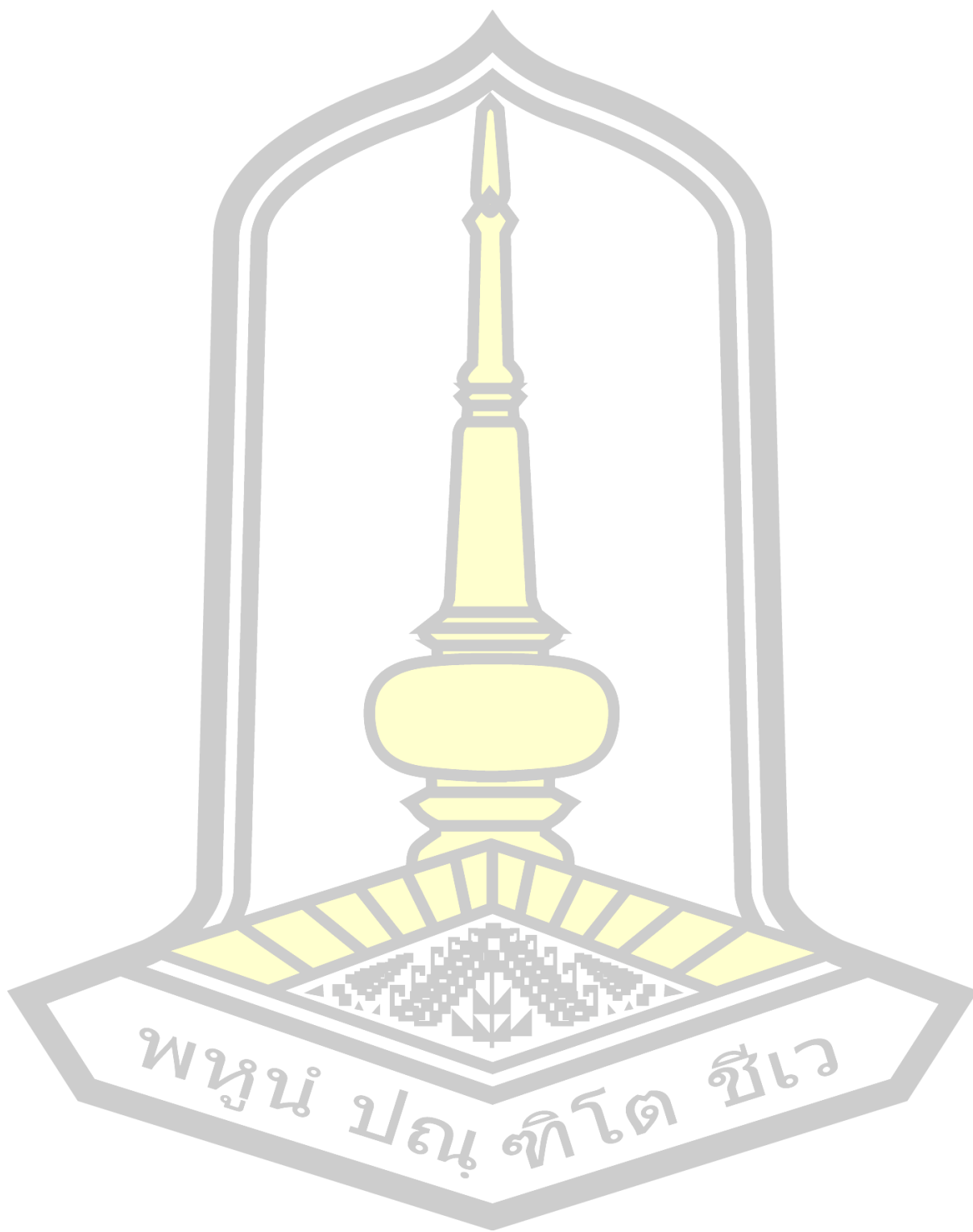
มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสมาร์ตซิตี้และนวัตกรรมดิจิทัล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(ดร. ชลธิชา ธรรมวิญญู)

คณบดีคณะการบัญชีและการจัดการ

(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย



พหุณฺ์ ปณฺุ ทิตฺ สวี

ชื่อเรื่อง	การหาความเหมาะสมที่สุดสำหรับการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ ด้วยวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง		
ผู้วิจัย	ชัชชัย แก้วตา		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จรรยา สาวิติ อาจารย์ ดร. เอกชัย แน่นอุดร		
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต	สาขาวิชา	การจัดการสมาร์ตซิตีและนวัตกรรมดิจิทัล
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2566

บทคัดย่อ

แนวคิดของเมืองอัจฉริยะ คือการใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยีและนวัตกรรม เพื่อยกระดับคุณภาพชีวิตและสร้างความสุขอย่างยั่งยืนให้กับผู้อยู่อาศัย อย่างไรก็ตามพื้นที่ชนบทยังมีข้อจำกัดในด้านการครอบคลุมของสัญญาณอินเทอร์เน็ต ซึ่งเทคโนโลยี LoRa กลายเป็นแนวทางที่จะทำให้สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สายของพื้นที่ชนบท ให้เข้าถึงระบบคลาวด์โดยผ่านโพรโทคอลการสื่อสาร LoRaWAN สำหรับการเลือกตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ จะต้องคำนึงถึงการครอบคลุมของสัญญาณและข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ให้บริการ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) ศึกษาวิธีการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN (2) เปรียบเทียบรูปแบบเครือข่าย LoRaWAN ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับจังหวัดอุบลราชธานี และ (3) เปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมผลการวิจัยพบว่า รูปแบบเครือข่าย LoRaWAN ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับจังหวัดอุบลราชธานี ประกอบด้วย 144 เกตเวย์ และวิธีการ M-VaNSAS เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการเลือกตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ รองลงมาคือวิธีการ PSO, DE และ GA ตามลำดับ

คำสำคัญ : การหาความเหมาะสมที่สุด, การเลือกตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์, เกษตรอัจฉริยะ, เมืองอัจฉริยะ

TITLE	An Optimization of Multiple Gateways Location Selection in large-scale LoRaWAN Networks using a Modified Variable Neighborhood Strategy Adaptive Search		
AUTHOR	Chutchai Kaewta		
ADVISORS	Assistant Professor Charuay Savithi , Ph.D. Ekkachai Naenudorn , Ph.D.		
DEGREE	Doctor of Philosophy	MAJOR	Smart City Management and Digital Innovation
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2023

ABSTRACT

The concept of a smart city revolves around leveraging technology and innovation to enhance the quality of life and foster sustainable happiness for its residents. However, rural areas face limitations in terms of internet network coverage. LoRa technology has emerged as a viable solution that empowers wireless sensor devices in rural areas, enabling seamless connectivity to the cloud via the LoRaWAN communication protocol. Gateway location selection necessitates careful consideration of factors such as signal coverage and service equipment limitations. This research aims to (1) explore methods for selecting multiple gateway locations in LoRaWAN networks, (2) identify the optimal LoRaWAN network model for Ubon Ratchathani Province, and (3) compare the performance of different algorithms. The findings reveal that the most suitable LoRaWAN network model for the Ubon Ratchathani province consists of 144 gateways. Among the algorithms analyzed, the M-VaNSAS method proves to be the most efficient for gateway location selection, followed by the PSO, DE, and GA methods, respectively.

Keyword : Optimization, Gateway location selection, Smart agriculture, Smart city

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี ข้าพเจ้าจึงขอขอบพระคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรวัย สาวิติ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และอาจารย์ ดร.เอกชัย แน่นอุดร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาอุทิศเวลาในการให้คำปรึกษา และแนะนำองค์ความรู้ที่มีประโยชน์ในการทำวิจัย รวมทั้งให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าเสมอมา

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะโส ประธานกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.เกริก ภิมย์โสภา ประธานกรรมการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ ตลอดจน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มณีนรัตน์ วงษ์ขิม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์พัทธ์ เมืองโคตร และอาจารย์ ดร. ณัฐกานต์ ชุติมารังสรรค์ กรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ และกรรมการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอน้อมรำลึกถึงพระคุณของบิดามารดาและครอบครัว ที่ได้อบรมเลี้ยงดู ให้ความรัก ความอบอุ่นแก่ข้าพเจ้า ขอกราบขอบพระคุณครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า จนกระทั่งทำให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จ

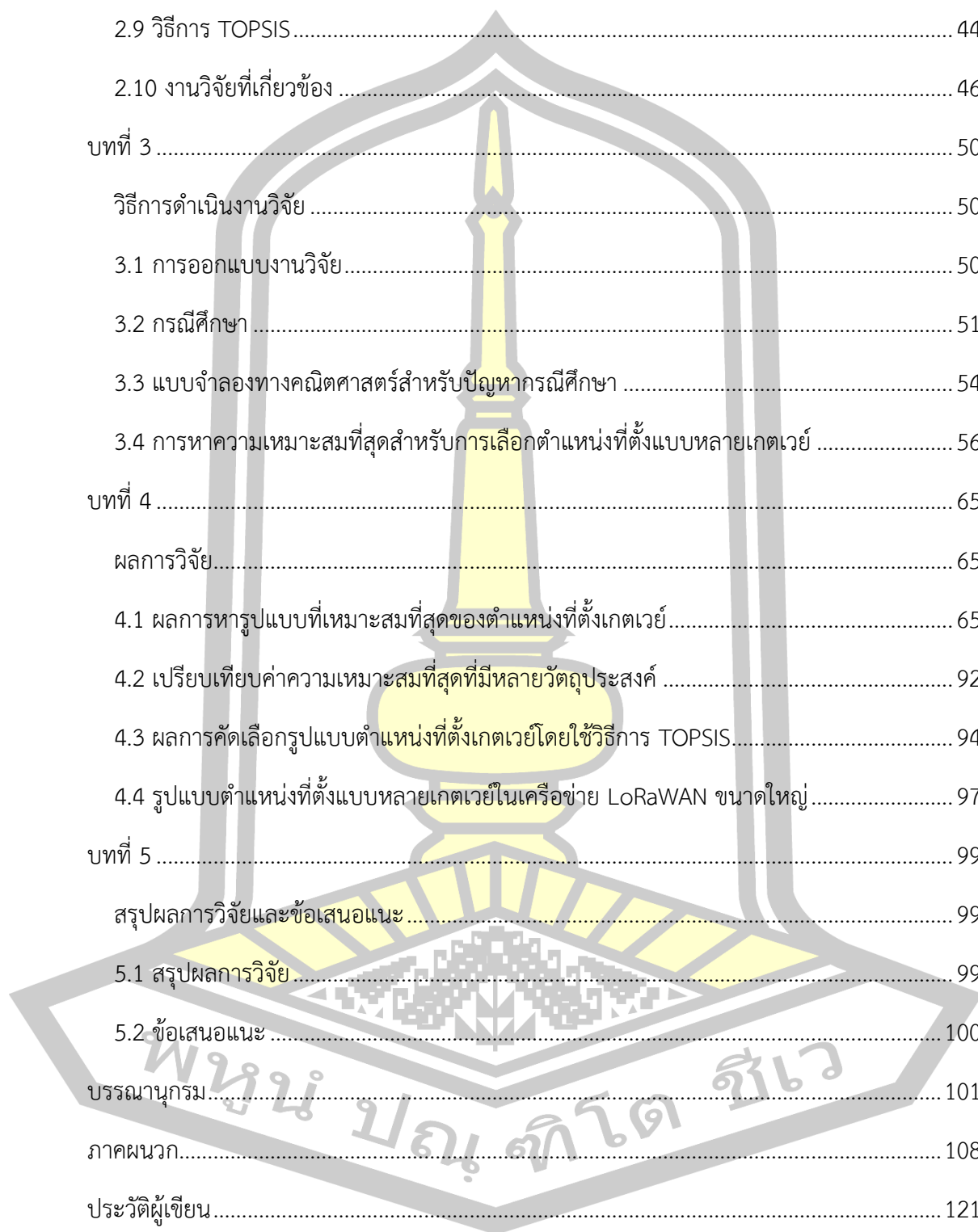
ชัตชัย แก้วตา



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพประกอบ.....	ญ
บทที่ 1	1
บทนำ	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน	5
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2	8
วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 เมืองอัจฉริยะ	8
2.2 เทคโนโลยีการสื่อสาร LoRa และ LoRaWAN.....	14
2.3 วิธีการเมตาฮิวริสติก.....	24
2.4 วิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง	26
2.5 วิธีการเชิงพันธุกรรม.....	31
2.6 วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง	35
2.7 วิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค.....	38

2.8 การหาค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์	41
2.9 วิธีการ TOPSIS.....	44
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	46
บทที่ 3	50
วิธีการดำเนินงานวิจัย	50
3.1 การออกแบบงานวิจัย.....	50
3.2 กรณีศึกษา	51
3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหากรณีศึกษา	54
3.4 การหาความเหมาะสมที่สุดสำหรับการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเขตเวทย์	56
บทที่ 4	65
ผลการวิจัย.....	65
4.1 ผลการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของตำแหน่งที่ตั้งเขตเวทย์.....	65
4.2 เปรียบเทียบค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์	92
4.3 ผลการคัดเลือกรูปแบบตำแหน่งที่ตั้งเขตเวทย์โดยใช้วิธีการ TOPSIS.....	94
4.4 รูปแบบตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเขตเวทย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่.....	97
บทที่ 5	99
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	99
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	99
5.2 ข้อเสนอแนะ	100
บรรณานุกรม.....	101
ภาคผนวก.....	108
ประวัติผู้เขียน.....	121



สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	อัตราการส่งข้อมูลของสัญญาณ LoRa	17
2.2	การเปรียบเทียบความแตกต่างของแพ็คเกจการกระจาย	18
2.3	ค่าความไวของเครื่องรับและการเชื่อมต่อสัญญาณ LoRa	19
2.4	กลยุทธ์การสร้าง Mutant Vector	36
3.1	ข้อมูลพื้นฐานสำหรับหาความเหมาะสมที่สุด	53
3.2	ข้อมูลด้านอุปกรณ์ LoRaWAN Gateway สำหรับหาความเหมาะสมที่สุด	53
3.3	ตัวอย่างชุดคำตอบเริ่มต้น	57
3.4	การเปรียบเทียบก่อนและหลังการเรียงข้อมูลแทรกที่ 1	57
4.1	ผลการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ GA	65
4.2	ค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ของวิธีการ GA	69
4.3	ผลการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ DE	70
4.4	ค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ของวิธีการ DE	73
4.5	รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ PSO	75
4.6	ค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ของวิธีการ PSO	79
4.7	รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ M-VaNSAS	80
4.8	ค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ของวิธีการ M-VaNSAS	90
4.9	การเปรียบเทียบค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์	93
4.10	ผลการคำนวณน้ำหนักของหลักเกณฑ์ในการตัดสินใจด้วยวิธีการ TOPSIS	95

สารบัญภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1.1 ระบบควบคุมการปลูกดอกเบญจมาศ	3
1.2 กรอบแนวคิดในการวิจัย	5
2.1 สัญญาณ chirp ขาขึ้น (Up-Chirp)	15
2.2 Spectrogram ของการมอดูเลตสัญญาณ LoRa	16
2.3 โครงสร้างสถาปัตยกรรมเครือข่าย LoRaWAN	20
2.4 การกำหนดการดำเนินการอุปกรณ์ในเครือข่าย LoRaWAN	21
2.5 รูปแบบของ Class A ในเครือข่าย LoRaWAN	22
2.6 รูปแบบของ Class B ในเครือข่าย LoRaWAN	22
2.7 รูปแบบของ Class C ในเครือข่าย LoRaWAN	23
2.8 ขั้นตอนการค้นหาคำตอบของวิธีการ M-VaNSAS	29
2.9 รหัสเทียมของวิธีการ M-VaNSAS	30
2.10 รหัสเทียมของวิธีการ GA	34
2.11 ตัวอย่างการหาค่า Mutant Vector	35
2.12 การ Crossover ของ Target Vector และ Mutant Vector	37
2.13 กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ f_1 และ f_2	43
3.1 แผนที่แสดงพื้นที่หมู่บ้านของจังหวัดอุบลราชธานี	52
3.2 แนวคิดของอัลกอริทึมการถอดรหัสคำตอบ	58
3.3 รหัสเทียมของวิธีการ M-VaNSAS	62
4.1 รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ GA	68
4.2 ค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ของวิธีการ GA	70
4.3 รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ DE	73

4.4	ค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ของวิธีการ DE	74
4.5	รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ PSO	78
4.6	ค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ของวิธีการ PSO	80
4.7	รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ M-VaNSAS	90
4.8	ค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ของวิธีการ M-VaNSAS	92
4.9	การเปรียบเทียบค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์	94
4.10	ค่าน้ำหนักของหลักเกณฑ์ในการตัดสินใจด้วยวิธีการ TOPSIS	96
4.11	แผนที่แสดงที่ตั้ง LoRaWAN Gateway ที่เหมาะสมที่สุดของจังหวัดอุบลราชธานี	97



บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

ประเทศไทยได้ชื่อว่าเป็นประเทศเกษตรกรรมมาช้านาน เนื่องจากภูมิประเทศตั้งอยู่ในเขตที่เอื้ออำนวยต่อการทำการเกษตร (กิตติศักดิ์ ทองมีทิพย์, 2564) จากการสำรวจการใช้ที่ดินของประเทศไทยในช่วงปี พ.ศ. 2560-2561 พบว่า การใช้ที่ดินส่วนใหญ่เป็นพื้นที่การทำเกษตรกรรม หรือมีจำนวน 178.73 ล้านไร่ คิดเป็นร้อยละ 55.73 ของเนื้อที่ทั้งหมดของประเทศ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2562) และประชากรส่วนใหญ่ของประเทศประกอบอาชีพด้านการเกษตร จำนวน 11.75 ล้านคน คิดเป็นร้อยละ 31.1 ของจำนวนอาชีพทั้งหมด โดยจังหวัดอุบลราชธานี มีจำนวนครัวเรือนเกษตรกรสูงสุดของประเทศ จำนวน 322,265 ครัวเรือน รองลงมาคือ นครราชสีมา ศรีสะเกษ และขอนแก่น ตามลำดับ (สำนักงานสถิติแห่งชาติ, 2564) แต่ในขณะเดียวกันเกษตรกรยังคงประสบปัญหาผลผลิตทางการเกษตรมีราคาตกต่ำ และมีต้นทุนการผลิตสูง ยกตัวอย่างต้นทุนการผลิต เช่น ค่าเมล็ดพันธุ์ ค่าปุ๋ย ค่ายาปราบศัตรูพืช ค่าแรงงาน ค่าจ้างเหมาเครื่องจักรทางการเกษตร และค่าเช่าพื้นที่ในการเพาะปลูก เป็นต้น อีกทั้งสภาพดิน ฟ้า อากาศไม่มีความแน่นอน และการทำการเกษตรของเกษตรกรในหลายกิจกรรมยังมีช่วงเวลาที่ทับซ้อนกัน (สำนักงานคณะกรรมการข้อมูลข่าวสารของราชการ, 2563) ซึ่งส่งผลให้เกษตรกรไม่สามารถทำการเกษตรที่หลากหลายและในปริมาณมากได้ ตลอดจนประชากรเข้าสู่สังคมสูงวัยจึงทำให้เกิดแนวคิดในการนำระบบเกษตรอัจฉริยะ (Smart Farming) เข้ามาใช้ทดแทนแรงงานคน (ณัฐกิตติ์ ปัทมะ, 2563) โดยผู้วิจัยได้ลงพื้นที่เพื่อสำรวจข้อมูลการทำการเกษตรในพื้นที่หมู่บ้านตาติด ตำบลโนนผึ้ง อำเภวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี ซึ่งเป็นพื้นที่ปลูกดอกเบญจมาศที่มีชื่อเสียงของจังหวัดอุบลราชธานี พบว่า มีเกษตรกรบางรายได้ใช้ระบบ IoT เข้ามาใช้ในการควบคุมการให้น้ำ ระบบไฟให้แสงสว่างดอกเบญจมาศในช่วงกลางคืน และมีระบบรายงานสถานะการทำงานต่าง ๆ ให้แก่เกษตรกร ซึ่งทำให้ลดขั้นตอนการทำงานและลดการใช้แรงงานลง

การทำเกษตรอัจฉริยะในยุโรป (Moysiadis et al., 2021) มีการสร้างนวัตกรรมในการลดการใช้แรงงาน เช่น อากาศยานไร้คนขับ (UAV) สำหรับการพ่นปุ๋ย พ่นยากำจัดวัชพืช พ่นฮอร์โมน การทำภาพถ่ายทางอากาศเพื่อทำนายผลผลิต หรือการทำข้อมูลเชิงพื้นที่เพื่อวางแผนการเพาะปลูกที่เหมาะสม เป็นต้น การใช้ยานยนต์ไร้คนขับ (UGV) ช่วยในการหว่านเมล็ดพันธุ์ การเก็บเกี่ยว การกำจัดวัชพืช การฉีดพ่นปุ๋ย การตัดแต่งกิ่ง และการเฝ้าติดตามพืชผล การใช้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย การใช้เทคโนโลยีไร้สาย การใช้การประมวลผลภาพ (Image processing) สำหรับสร้างแผนที่สองมิติจากภาพที่ถ่ายจาก UAV ในการเฝ้าติดตามพืช และการประเมินผลผลิต ตรวจสอบโรคหรือ

แมลง การจำแนกวัชพืช และตรวจจับผลไม้หรือผักที่พร้อมเก็บเกี่ยว เป็นต้น การใช้การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning) ในการติดตามพืชผล การจัดการน้ำ การวิเคราะห์โรคพืช และการจำแนกวัชพืช เป็นต้น การใช้ข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data) สำหรับรวมข้อมูลที่บันทึกจากเซนเซอร์ต่าง ๆ การจัดเก็บข้อมูล การถ่ายโอนข้อมูล การแปลงข้อมูล และการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อสร้างแบบจำลองผลผลิตใหม่ และแนะนำแนวทางในการเพาะปลูก เป็นต้น การใช้ระบบคลาวด์ (Cloud) สำหรับจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลจำนวนมาก เพื่อให้เกษตรกรสามารถเข้าถึงข้อมูลแบบเรียลไทม์ได้ตลอดเวลา

จะเห็นได้ว่าเกษตรอัจฉริยะ (Smart Farming) เป็นการนำเทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูล (ICT) สำหรับสร้างนวัตกรรมในการลดการใช้แรงงาน เช่น อากาศยานไร้คนขับ (UAV) ยานยนต์ไร้คนขับ (UGV) เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย (WSN) การประมวลผลภาพ (Image processing) การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning) ข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data) และระบบคลาวด์ (Cloud) สำหรับช่วยในการวางแผนและบริหารจัดการสำหรับทำการเกษตร สามารถคาดการณ์ผลผลิตได้อย่างแม่นยำ ช่วยลดต้นทุน ปริมาณการให้ปุ๋ย น้ำ และลดการใช้แรงงานคน ซึ่งจะทำให้เกษตรกรสามารถผลิตสินค้าทางการเกษตรที่มีคุณภาพในปริมาณที่มากขึ้น ประกอบกับยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี (พ.ศ. 2561-2580) ในประเด็นยุทธศาสตร์ด้านการสร้างความสามารถในการแข่งขันโดยเน้นการใช้เทคโนโลยีและนวัตกรรม (สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2561) ซึ่งสอดคล้องกับยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับที่ 12 (2560-2564) ยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศ ในยุทธศาสตร์ที่ 8 การพัฒนาวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี วิจัย และนวัตกรรม ที่ให้ความสำคัญกับการใช้เทคโนโลยี นวัตกรรมและความคิดสร้างสรรค์ เพื่อช่วยขับเคลื่อนการพัฒนาประเทศ จากนโยบายของประเทศที่ต้องการส่งเสริมการสร้างขีดความสามารถในการแข่งขัน และความสามารถของเทคโนโลยีในปัจจุบัน (สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2559) และมีความสอดคล้องกับการส่งเสริมเมืองอัจฉริยะของประเทศไทย (สำนักงานส่งเสริมเศรษฐกิจดิจิทัล, 2564) ต้องการพัฒนาเมืองอัจฉริยะให้เป็นเมืองที่ใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยีและนวัตกรรมในการเพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการและการบริหารจัดการเมือง เพื่อให้ประชาชน มีคุณภาพชีวิตที่ดี มีความสุข อย่างยั่งยืน โดยการพัฒนาเมืองอัจฉริยะของประเทศไทย ประกอบด้วย 7 ด้านคือ สิ่งแวดล้อมอัจฉริยะ (Smart Environment) การเดินทางและขนส่งอัจฉริยะ (Smart Mobility) การดำรงชีวิตอัจฉริยะ (Smart Living) พลเมืองอัจฉริยะ (Smart People) พลังงานอัจฉริยะ (Smart Energy) เศรษฐกิจอัจฉริยะ (Smart Economy) และการบริหารภาครัฐอัจฉริยะ (Smart Governance) จึงเป็นโอกาสที่เกษตรกรสามารถลดต้นทุนและสามารถผลิตสินค้าทางการเกษตรที่มีคุณภาพในปริมาณที่มากได้

สำหรับการนำเทคโนโลยีเกษตรอัจฉริยะเข้ามาใช้กับเกษตรกรโดยเฉพาะในเขตพื้นที่ชนบทยังเป็นเรื่องที่มีข้อจำกัดเนื่องจากโครงสร้างเครือข่ายพื้นฐาน (Network Infrastructure) ด้านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตยังไม่รองรับเนื่องจากการลงทุนด้านโครงสร้างเครือข่ายพื้นฐานของผู้ให้บริการ

อินเทอร์เน็ต (Internet service provider) ในพื้นที่ห่างไกลยังไม่คุ้มค่า ทำให้เกษตรกรใช้วิธีติดตั้งอุปกรณ์กระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบไร้สาย (Wi-Fi Router) แบบใช้ซิมการ์ด (Sim card) เพื่อให้อุปกรณ์ IoT เข้าสู่ระบบคลาวด์ (Cloud) สำหรับการประมวลผล ซึ่งระบบควบคุมการปลูกดอกเบญจมาศของเกษตรกร ดังแสดงในภาพประกอบ 1.1



ภาพประกอบ 1.1 ระบบควบคุมการปลูกดอกเบญจมาศ

จากภาพประกอบ 1.1 เป็นระบบควบคุมการปลูกดอกเบญจมาศของเกษตรกร หมู่บ้านตาตืด ตำบลโนนผึ้ง อำเภวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี โดยใช้การติดตั้งอุปกรณ์กระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบไร้สาย เพื่อให้อุปกรณ์ IoT เข้าสู่ระบบคลาวด์ (Cloud) สำหรับการประมวลผลเพื่อควบคุมระบบให้น้ำ ระบบให้แสงสว่างดอกเบญจมาศในช่วงกลางวัน และระบบรายงานการทำงานต่าง ๆ ให้กับเกษตรกร เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์กระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบไร้สายดังกล่าวยังมีข้อจำกัดในระยะทางของการส่งสัญญาณ โดยสามารถส่งได้ในระยะ 100 เมตรเท่านั้น (Miles et al., 2020) ซึ่งทำให้สัญญาณอินเทอร์เน็ตไม่ครอบคลุมพื้นที่แปลงเกษตรที่มีขนาดใหญ่ได้ และเกษตรกรยังต้องเสียค่าบริการอินเทอร์เน็ตรายเดือน ทำให้การลงทุนด้านเกษตรอัจฉริยะของเกษตรกรยังไม่คุ้มค่า ซึ่งในปัจจุบันมีเทคโนโลยีให้บริการเครือข่ายบริเวณกว้างที่ใช้พลังงานต่ำ (Low Power Wide Area Networks : LPWAN) เพื่อเชื่อมโยงระบบ IoT เข้าสู่ระบบอินเทอร์เน็ต โดยสามารถส่งสัญญาณได้ระยะไกล ตั้งแต่ 5-15 กิโลเมตร โดยในเขตพื้นที่เมืองสามารถส่งสัญญาณได้ไกล 5 กิโลเมตร และในเขตพื้นที่นอกเมืองสามารถส่งสัญญาณได้ไกล 15 กิโลเมตร (Semtech Corporation, 2019) เครือข่ายบริเวณกว้างที่ใช้พลังงานต่ำ (LPWAN) เป็นเครื่องมือสนับสนุนการทำเกษตรอัจฉริยะที่จะทำให้อุปกรณ์ระบบ IoT สามารถสื่อสารในระยะทางไกลและเข้าถึงระบบคลาวด์ (Cloud) สำหรับการประมวลผลได้ (Hassan et al., 2019)

จากการศึกษาพบว่า มีงานวิจัยที่ได้ศึกษาการเปรียบเทียบเทคโนโลยี LPWAN สำหรับการประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยี IoT ที่มีขนาดใหญ่ (Mekki et al., 2019) โดยทำการเปรียบเทียบ 3 เทคโนโลยีคือ Sigfox, LoRa และ NB-IoT ผลการวิจัยพบว่า เทคโนโลยี LoRa มีความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยี IoT ที่มีขนาดใหญ่ สำหรับเครือข่าย LoRaWAN กำลังได้รับความนิยมเนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นในด้านการส่งสัญญาณระยะไกล ใช้พลังงานต่ำ และการใช้คลื่นความถี่ที่ไม่ต้องมีใบอนุญาต (Unlicensed band) จึงเหมาะกับการพัฒนานวัตกรรมด้าน IoT ด้าน Smart Farm และด้านการสื่อสารระหว่างเครื่องจักร เป็นต้น โดยในประเทศไทยได้รับอนุญาตให้ใช้งานในคลื่นความถี่ย่าน 920–925 เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) ตามประกาศคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ เรื่อง หลักเกณฑ์การใช้คลื่นความถี่และเครื่องวิทยุคมนาคมที่อนุญาตให้มีการใช้งานเป็นการทั่วไป พ.ศ. 2562 ซึ่งตรงตามมาตรฐาน LoRaWAN AS923 MHz ที่ใช้ในประเทศต่าง ๆ ของทวีปเอเชีย ซึ่งได้แก่ประเทศ บรูไน กัมพูชา อินโดนีเซีย ญี่ปุ่น ลาว สิงคโปร์ เวียดนาม และไทย (LoRa Alliance, 2020) โดยผู้ให้บริการเครือข่ายคลื่นความถี่ย่าน 920–925 เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) สามารถกำหนดช่องสัญญาณขั้นต่ำจำนวน 16 ช่องสัญญาณ และใช้ความกว้างแถบความถี่ (Bandwidth) เท่ากับ 125 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz)

แนวทางการนำเครือข่าย LoRaWAN เข้ามาใช้ในจังหวัดอุบลราชธานียังมีข้อจำกัดในการเลือกตำแหน่งที่ตั้งของเกตเวย์ที่เหมาะสมกับเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ให้สามารถครอบคลุมพื้นที่ในทุกลมุ่บ้านได้ ซึ่งปัญหาของการเลือกตำแหน่งของเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN จะคล้ายกับการวางเครือข่ายเซลลูลาร์ (cellular networks) โดยจะมีการสร้างแบบจำลองการกระจายสัญญาณ และทดสอบประสิทธิภาพ ซึ่งในการเลือกตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ (Gateway) ในเครือข่ายขนาดใหญ่ต้องคำนึงถึงการกระจายของสัญญาณเพื่อให้สามารถครอบคลุมอุปกรณ์ปลายทาง (End node) หรือลูกข่าย และข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ให้บริการ (Grochla & Potys, 2020) ดังนั้นการหาความเหมาะสมที่สุด (Optimization) สำหรับการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ จึงมีความจำเป็นสำหรับการวางโครงสร้างเครือข่ายพื้นฐาน (Network Infrastructure) ให้กับอุปกรณ์ IoT สำหรับการพัฒนาชุมชนให้มีความพร้อมในการผลิตสินค้าทางการเกษตรที่มีคุณภาพและเพียงพอต่อความต้องการของผู้บริโภค

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

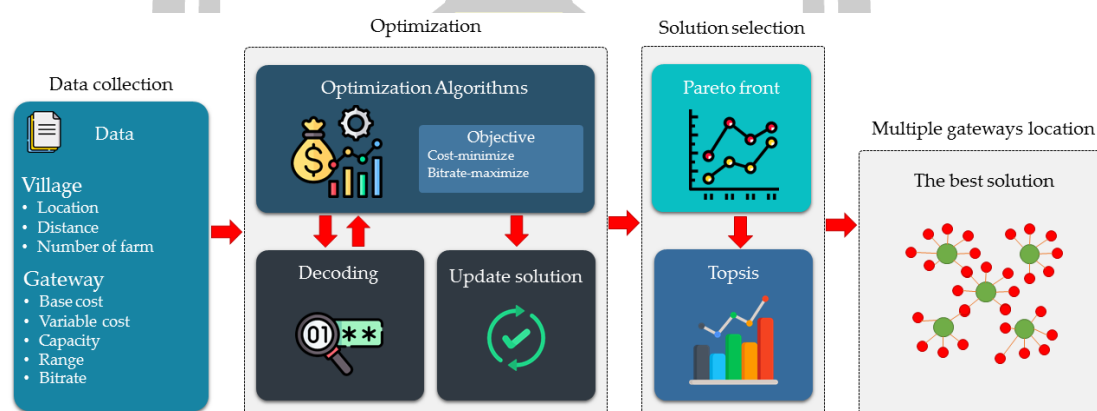
- 1.2.1 ศึกษาวิธีเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN
- 1.2.2 ทหารูปแบบเครือข่าย LoRaWAN ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับจังหวัดอุบลราชธานี
- 1.2.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม ในการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์

1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ ที่สามารถลดต้นทุนให้ต่ำที่สุด (Minimize the total costs) และมีค่าคะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Maximize the Bitrate) สำหรับการวางโครงสร้างเครือข่ายพื้นฐาน (Network Infrastructure) โดยผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตในการดำเนินงานวิจัยออกเป็นด้านต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1.3.1 ด้านขอบเขตของการวิจัย

การหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ ประกอบด้วยขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ สำหรับกระบวนการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งในกระบวนการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจะประกอบไปด้วย 2 วัตถุประสงค์ (Multi-Objects) คือ ลดต้นทุนให้ต่ำที่สุด (Minimize the total costs) และมีค่าคะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Maximize the Bitrate) ซึ่งในขั้นตอนสุดท้ายของการทำงานของกระบวนการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจะได้รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ ดังแสดงในภาพประกอบ 1.2



ภาพประกอบ 1.2 กรอบแนวคิดในการวิจัย

จากภาพประกอบ 1.2 กรอบแนวคิดในการวิจัยเริ่มต้นด้วยการเก็บรวบรวมข้อมูล (data collection) ที่ประกอบไปด้วย (1) ข้อมูลหมู่บ้าน ซึ่งเป็นการรวบรวมข้อมูลตำแหน่งที่ตั้งของหมู่บ้าน (Location) ระยะห่างของแต่ละหมู่บ้าน (Distance) และจำนวนครอบครัวเกษตรกรของแต่ละหมู่บ้านที่ต้องได้รับสัญญาณ LoRa จาก LoRaWAN gateway (2) คุณสมบัติของ LoRaWAN gateway ซึ่งเป็นการรวบรวมข้อมูล ค่าใช้จ่ายด้านอุปกรณ์ (Base cost) ค่าเช่าพื้นที่ในการสร้างสถานีของ LoRaWAN gateway ค่าใช้จ่ายแปรผันอื่น ๆ (Variable cost) ความสามารถในการ

รองรับการรองรับอุปกรณ์ปลายทาง (Capacity) ระยะในการกระจายสัญญาณ LoRaWAN gateway (Range) และอัตราการส่งข้อมูล (Bitrate) หลังจากการทำ data collection จะเป็นกระบวนการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ซึ่งในกระบวนการนี้จะเริ่มจากการอ่านค่าจาก data collection เข้ามายังกระบวนการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุด (Optimization algorithm) โดยในกระบวนการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจะมีการถอดรหัส (Decoding) เพื่อหาค่าฟิตเนตฟังก์ชัน (Fitness function) ที่ดีที่สุด และทำการอัปเดตรูปแบบที่ดีที่สุด (Update Solution) เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดจะได้รูปแบบของตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ซึ่งจะมีหลายรูปแบบ ซึ่งต้องทำการเลือกแบบที่ดีที่สุดในช่วง Solution selection ซึ่งจะใช้เทคนิค Pareto front analysis และเทคนิค TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) และขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการแสดงผลรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่

1.3.2 ด้านข้อมูล

ใช้ข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) ที่ได้รวบรวมจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย ข้อมูลหมู่บ้านจำนวน 2,198 หมู่บ้าน และข้อมูลเกษตรกร จำนวน 295,942 ครัวเรือน ใน 25 อำเภอ ของจังหวัดอุบลราชธานี เพื่อหาความเหมาะสมที่สุดสำหรับการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่

1.3.3 อัลกอริทึมในการหาความเหมาะสมที่สุด

- 1) วิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง (Modified Variable Neighborhood Strategy Adaptive Search: M-VaNSAS)
- 2) วิธีการทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA)
- 3) วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (Differential Evolution: DE)
- 4) วิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO)

1.3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1) โปรแกรมภาษา Python
- 2) โปรแกรม QGIS (Quantum Geographic Information System)
- 3) Google Colab ที่ได้รับการจัดสรรทรัพยากรจาก Google ประกอบด้วย หน่วยประมวลผลกลาง (CPU) Intel(R) Xeon(R) 2.20GHz หน่วยความจำหลัก (RAM) 12.7 GB และหน่วยสำรองข้อมูล (Hard Disk) 107.7 GB
- 4) เครื่องคอมพิวเตอร์
 - 4.1) หน่วยประมวลผลกลาง (CPU) Core i7 2.20GHz
 - 4.2) หน่วยความจำหลัก (RAM) 12 GB
 - 4.3) ระบบปฏิบัติการ (OS) Microsoft Windows 10 Pro

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 รูปแบบเครือข่าย LoRaWAN ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการวางโครงสร้างเครือข่ายพื้นฐานให้กับอุปกรณ์ปลายทางของเกษตรกรจังหวัดอุบลราชธานี

1.4.2 จังหวัดอุบลราชธานีสามารถนำรูปแบบเครือข่าย LoRaWAN ในการวางโครงสร้างเครือข่ายพื้นฐาน เพื่อส่งเสริมการพัฒนาเกษตรอัจฉริยะในเขตพื้นที่ชนบท

1.4.3 เกิดการนำระบบอัจฉริยะมาใช้ในเขตพื้นที่ชนบทของจังหวัดอุบลราชธานี

1.4.4 ได้ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์เพื่อแก้ไขปัญหาด้านการเกษตร

1.4.5 เกิดโมเดลการพัฒนาเมืองอัจฉริยะ และนวัตกรรมใหม่ ๆ สำหรับการพัฒนาประเทศ



วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยได้นำวรรณกรรมและงานวิจัยต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะของงานวิจัย เพื่อหาความเหมาะสมที่สุดสำหรับการเลือก ตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเขตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ ซึ่งประกอบด้วย เมืองอัจฉริยะ เทคโนโลยีการสื่อสาร LoRa และ LoRaWAN วิธีการเมตาฮีริสติก วิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยน กลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบตัดแปลง วิธีการเชิงพันธุกรรม วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง วิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค การหาค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลาย วัตถุประสงค์ วิธีการ TOPSIS และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด มีความเกี่ยวข้องและสัมพันธ์กับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงได้นำมาใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการดำเนินงานวิจัย ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 เมืองอัจฉริยะ

2.1.1 ความหมายของเมืองอัจฉริยะ

เมืองอัจฉริยะ (Smart city) คือ เมืองที่นำเทคโนโลยีและนวัตกรรมมาใช้ประโยชน์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการเมืองให้มีความปลอดภัย สามารถใช้ทรัพยากรได้อย่าง คุ่มค่า และมีความเสมอภาค ภายใต้แนวคิดการพัฒนาเมืองน่าอยู่ เมืองทันสมัย ให้ประชาชนในเมือง มีคุณภาพชีวิตที่ดี มีความสุข อย่างยั่งยืน (สำนักงานส่งเสริมเศรษฐกิจดิจิทัล, 2564) การพัฒนา เมืองอัจฉริยะที่เป็นสากลประกอบด้วย 6 ด้าน คือ สิ่งแวดล้อมอัจฉริยะ (Smart Environment) การดำรงชีวิตอัจฉริยะ (Smart Living) เศรษฐกิจอัจฉริยะ (Smart Economy) การเดินทางและ ขนส่งอัจฉริยะ (Smart Mobility) การบริหารภาครัฐอัจฉริยะ (Smart Governance) และพลเมือง อัจฉริยะ (Smart People) (Gassmann et al., 2019) สำหรับการพัฒนาเมืองอัจฉริยะของประเทศ ไทยได้มีการแยกด้านพลังงานอัจฉริยะออกมาจากด้านสิ่งแวดล้อมอัจฉริยะให้กลายเป็นการพัฒนา เมืองอัจฉริยะในด้านที่ 7 โดยการพัฒนาเมืองอัจฉริยะของประเทศไทยทั้ง 7 ด้าน มีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

1) สิ่งแวดล้อมอัจฉริยะ

สิ่งแวดล้อมอัจฉริยะ (Smart Environment) คือ เมืองที่คำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ มีการนำเทคโนโลยีและนวัตกรรมเข้ามาช่วย ปรับปรุงคุณภาพและเพิ่มประสิทธิภาพบริหารจัดการ การเฝ้าระวังผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่าง เป็นระบบ เช่น การบริหารจัดการน้ำ การดูแลสภาพอากาศ การเฝ้าระวังภัยพิบัติ และนอกจากนั้น ยังให้ประชาชนเข้ามามีส่วนร่วมในการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ เป็นต้น

2) การดำรงชีวิตอัจฉริยะ

การดำรงชีวิตอัจฉริยะ (Smart Living) คือ เมืองที่มีการพัฒนาสิ่งอำนวยความสะดวกต่อการดำรงชีวิตโดยคำนึงถึงหลักการยสถาปัตยกรรม (Universal Design) เพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการของสมาชิกในสังคม ยกตัวอย่างเช่น การบริการด้านสุขภาพ การเตรียมความพร้อมการเข้าสู่สังคมสูงอายุ และการเพิ่มความปลอดภัยสำหรับการดำรงชีวิต เพื่อให้ประชาชนมีสุขภาพแข็งแรง มีคุณภาพชีวิตที่ดี มีความปลอดภัย และมีความสุขในการดำรงชีวิต

3) เศรษฐกิจอัจฉริยะ

เศรษฐกิจอัจฉริยะ (Smart Economy) คือ เมืองที่มีการนำเทคโนโลยีและนวัตกรรมเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างมูลค่าเพิ่มในระบบเศรษฐกิจ เชื่อมโยงและความร่วมมือทางธุรกิจ และการบริหารจัดการทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ ยกตัวอย่างเช่น การเกษตรอัจฉริยะ (Smart Farming) และการท่องเที่ยวอัจฉริยะ (Smart Tourism) เป็นต้น

4) การเดินทางและขนส่งอัจฉริยะ

การเดินทางและขนส่งอัจฉริยะ (Smart Mobility) คือ เมืองที่มีการนำเทคโนโลยีและนวัตกรรมเพื่อพัฒนาระบบจราจรและการขนส่งที่ทันสมัยสำหรับการขับเคลื่อนประเทศ การเพิ่มประสิทธิภาพของการเดินทางให้มีความปลอดภัยและการขนส่งที่มีความรวดเร็ว สร้างการเชื่อมโยงของระบบขนส่งและการสัญจรที่หลากหลาย รวมถึงการเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

5) การบริหารภาครัฐอัจฉริยะ

การบริหารภาครัฐอัจฉริยะ (Smart Governance) คือ เมืองที่มีการนำเทคโนโลยีและนวัตกรรมเพื่อพัฒนาระบบบริการภาครัฐเพื่ออำนวยความสะดวกแก่ประชาชน เพื่อให้ประชาชนสามารถเข้าถึงบริการของภาครัฐได้สะดวก รวดเร็ว เพิ่มช่องทางการมีส่วนร่วมของประชาชน รวมถึงการเปิดให้ประชาชนผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในการเข้าถึงข้อมูลข่าวสารของภาครัฐ โดยมุ่งเน้นความโปร่งใสและการมีส่วนร่วมของประชาชน

6) พลเมืองอัจฉริยะ

พลเมืองอัจฉริยะ (Smart People) คือ เมืองที่มีการนำเทคโนโลยีและนวัตกรรมเพื่อพัฒนาพลเมืองให้มีความรู้ ทักษะ และสิ่งแวดล้อมที่เอื้อต่อการเรียนรู้ตลอดชีวิต สามารถประยุกต์ใช้เทคโนโลยีให้เกิดประโยชน์ทั้งในเชิงเศรษฐกิจและการดำรงชีวิต ลดความเหลื่อมล้ำทางสังคมและเศรษฐกิจตลอดจนเปิดกว้างสำหรับความคิดสร้างสรรค์และการมีส่วนร่วม

7) พลังงานอัจฉริยะ

พลังงานอัจฉริยะ (Smart Energy) คือ เมืองที่มีการนำเทคโนโลยีและนวัตกรรมเพื่อบริหารจัดการด้านพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตลอดจนการใช้พลังงานทางเลือกที่เป็นพลังงานสะอาดเพื่อสร้างความสมดุลระหว่างการผลิตและการใช้พลังงานในพื้นที่ ในการสร้างความมั่นคงทางพลังงานและลดการพึ่งพาพลังงานจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลัก

2.1.2 โครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นต่อการพัฒนาเมืองอัจฉริยะ

จุดเริ่มต้นของการพัฒนาเมืองอัจฉริยะจำเป็นจะต้องอาศัยโครงสร้างพื้นฐานของเมืองเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ ซึ่งแนวทางการพัฒนาเมืองอัจฉริยะต้องอาศัยเทคโนโลยีและนวัตกรรมเข้ามาช่วยในการพัฒนา ยกตัวอย่างเช่น เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร (Information and Communications Technology) เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network) และเทคโนโลยีที่อาศัยข้อมูลจากเซนเซอร์ต่าง ๆ เพื่อนำไปสู่กระบวนการสร้างข้อมูลเป็นต้น ซึ่งเทคโนโลยีและนวัตกรรมเหล่านี้จะเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการนำไปสู่กระบวนการวางแผนการพัฒนาเมืองอัจฉริยะ (Gaur et al., 2015) โดยโครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นต่อการพัฒนาเมืองอัจฉริยะ มีดังต่อไปนี้

1) เทคโนโลยี 4G/5G

การพัฒนาเมืองอัจฉริยะมีเป้าหมายเพื่อยกระดับมาตรฐานความเป็นอยู่ของประชาชน โดยการปรับปรุงและการจัดการโครงสร้างพื้นฐานของเมือง ยกตัวอย่างเช่น การจราจร ธรรมชาติ น้ำและของเสีย พลังงาน ระบบสุขภาพ ระบบความมั่นคงและความปลอดภัย และระบบการศึกษา เป็นต้น โดยโครงสร้างพื้นฐานเหล่านี้ต้องอาศัยการเชื่อมต่ออุปกรณ์ และการรับส่งข้อมูลเพื่อเข้าสู่การประมวลผลบนระบบคลาวด์ (Cloud) ซึ่งจำเป็นจะต้องอาศัยเทคโนโลยี 4G/5G โดยเทคโนโลยี 4G นั้นปัจจุบันมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ตรงกับความต้องการของผู้บริโภค ในอนาคตเทคโนโลยี 5G คาดว่าจะสามารถขยายและต่อยอดการใช้งานของ IoT ในปัจจุบันได้อย่างมาก และสามารถเป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาเมืองอัจฉริยะต่อไป (Li et al., 2018) การนำเทคโนโลยี 4G/5G เข้ามาใช้ในการพัฒนาเมืองอัจฉริยะ เป็นสิ่งสำคัญและมีผลกระทบอย่างมากต่อการพัฒนาเมืองให้เป็นเมืองที่มีความสามารถในการบริหารจัดการทรัพยากรและบริการสำหรับประชาชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเทคโนโลยี 4G/5G มีผลต่อการพัฒนาเมืองอัจฉริยะดังนี้

1.1) การเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตความเร็วสูงด้วยเทคโนโลยี 4G/5G ทำให้เมืองอัจฉริยะ ทำให้ผู้ใช้บริการสามารถเข้าถึงข้อมูลและบริการต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็วและมีคุณภาพสูง

1.2) การติดตั้งระบบกล้องวงจรปิด (CCTV) ในเมืองอัจฉริยะที่ใช้เทคโนโลยี 4G/5G ทำให้สามารถตรวจสอบและควบคุมการจราจรและการเคลื่อนไหวในพื้นที่ของเมืองได้อย่างมีประสิทธิภาพ และช่วยลดอุบัติเหตุการจราจรได้

1.3) การจัดการขยะทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บรักษาและกำจัดขยะ โดยสามารถตรวจสอบขนาดและปริมาณของขยะได้อย่างแม่นยำ และสามารถแจ้งเตือนให้ผู้รับผิดชอบเก็บขยะเมื่อถึงเวลาที่กำหนดได้อย่างทันท่วงที

1.4) การจัดการการจราจร โดยสามารถตรวจสอบและควบคุมการจราจรได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงช่วยลดการชนกันระหว่างรถและการอุดตันในช่วงเวลาที่มีการเคลื่อนย้ายประชากรมาก เช่นในช่วงเวลาราชการ การจัดงานประเภทต่าง ๆ และการเปลี่ยนสภาพอากาศ

1.5) สามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบและจัดการสิ่งแวดล้อม เช่นการตรวจวัดคุณภาพอากาศ การตรวจวัดระดับน้ำในแม่น้ำและคลอง เพื่อให้สามารถวิเคราะห์และวางแผนการจัดการสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.6) การพัฒนาบริการสำหรับประชาชน สำหรับอำนวยความสะดวกแก่ประชาชนเพื่อให้ประชาชนสามารถเข้าถึงบริการของภาครัฐได้สะดวก รวดเร็ว มีความถูกต้อง และเท่าเทียม

2) เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network) คือ ระบบเครือข่ายที่ประกอบด้วยเซนเซอร์ (Sensor) และอุปกรณ์เชื่อมต่อไร้สาย (Wireless Communication Devices) เพื่อใช้ในการส่งข้อมูลต่าง ๆ ระหว่างกัน โดยที่เซนเซอร์จะเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับตรวจจับและวัดค่าต่าง ๆ ยกตัวอย่างเช่น อุณหภูมิ ความชื้น แรงดันไฟฟ้า และการเคลื่อนไหว เป็นต้น และอุปกรณ์เชื่อมต่อไร้สายจะใช้สำหรับรับส่งข้อมูลที่เซนเซอร์ตรวจวัดได้ไปยังสถานีฐานหรือเครือข่ายอื่น ๆ โดยการนำเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายเข้ามาเป็นโครงสร้างพื้นฐานของเมืองอัจฉริยะ เป็นการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการและพัฒนาเมืองให้มีความยั่งยืนและมีประสิทธิภาพ โดยเซนเซอร์ไร้สายจะถูกติดตั้งไว้ในพื้นที่ต่าง ๆ ของเมือง ยกตัวอย่างเช่น ถนน สวนสาธารณะ สถานที่ท่องเที่ยว และตึกสูง เป็นต้น เพื่อให้สามารถรวบรวมข้อมูลสภาพแวดล้อม และสถานะของเมืองในเวลาจริง ด้วยเทคโนโลยีเซนเซอร์ไร้สายที่เชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ต ข้อมูลที่รวบรวมได้จะถูกส่งไปยังศูนย์กลางเพื่อวิเคราะห์และจัดการให้เหมาะสมช่วยให้เมืองมีการบริหารจัดการและวิเคราะห์ข้อมูลที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการนำข้อมูลที่รวบรวมจากเซนเซอร์ไร้สายจะช่วยให้เมืองสามารถปรับปรุงสภาพแวดล้อมและสถานะของเมืองได้ในเวลาที่เหมาะสม และช่วยเพิ่มความปลอดภัยให้กับประชาชน อีกทั้งข้อมูลที่รวบรวมมาจากเซนเซอร์ไร้สายยังสามารถพัฒนาระบบการจราจรและการขนส่งที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการนำข้อมูลเหล่านี้มาวิเคราะห์และปรับปรุงแผนการจราจร ช่วยลดการล่าช้าของการเดินทาง ลดเวลาเดินทาง และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Gaur et al., 2015) นอกจากนี้ เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายยังสามารถใช้ในการควบคุมและจัดการทรัพยากรน้ำและพลังงาน ยกตัวอย่างเช่น การตรวจวัดคุณภาพน้ำ การควบคุมแสงสว่าง และการควบคุมการใช้พลังงานในอาคาร ทั้งนี้จะช่วยลดการใช้ทรัพยากรที่ไม่จำเป็น และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

3) ระบบคลาวด์

ระบบคลาวด์ (Cloud) หรือระบบการประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ (Cloud Computing) คือ รูปแบบที่ผู้ใช้สามารถเข้าถึงและใช้งานทรัพยากรคอมพิวเตอร์ ยกตัวอย่างเช่น

เครือข่าย เครื่องเซิร์ฟเวอร์ หน่วยเก็บข้อมูล แอปพลิเคชัน และระบบบริการอื่นๆ ซึ่งระบบคลาวด์จะเป็นเครื่องมือในการพัฒนาเมืองอัจฉริยะ โดยการนำระบบคลาวด์เข้ามาใช้ในการพัฒนาเมืองอัจฉริยะเป็นการใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์และอินเทอร์เน็ตเพื่อช่วยให้การบริหารจัดการและการพัฒนาเมืองเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ไม่ต้องลงทุนซื้อเครื่องคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์เครือข่ายที่มีราคาสูง เพราะในระบบคลาวด์นั้นจะมีบริการทุกอย่างบนระบบคลาวด์ ซึ่งใช้เงินลงทุนน้อยกว่าการสร้างระบบของตนเองและมีความยืดหยุ่นสูง (Clohessy et al., 2014) โดยการนำระบบคลาวด์มาใช้ในการพัฒนาเมืองอัจฉริยะยังมีประโยชน์อีกมากมาย ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1) การส่งเสริมการทำงานร่วมกันขององค์กรและภาคเอกชน การใช้ระบบคลาวด์ช่วยให้องค์กรและภาคเอกชนสามารถทำงานร่วมกันได้โดยง่าย ไม่ว่าจะเป็นการแบ่งปันข้อมูลการประชุมทางไกล หรือการทำงานร่วมกันในโครงการต่างๆ ซึ่งจะช่วยให้การพัฒนาเมืองเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

3.2) การจัดการข้อมูลและความปลอดภัย การนำระบบคลาวด์มาใช้ในการจัดการข้อมูลและความปลอดภัย ระบบคลาวด์มีการรักษาความปลอดภัยของข้อมูลอย่างเข้มงวด โดยมีการใช้เทคโนโลยีการเข้ารหัสข้อมูลและการตรวจสอบความปลอดภัยของระบบอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังมีการสำรองข้อมูลและการทำความสะอาดระบบอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้ระบบเสถียรและปลอดภัยจากการโจมตีทางไซเบอร์

3.3) การลดความสูญเสียทางเศรษฐกิจ การนำระบบคลาวด์มาใช้ในการพัฒนาเมืองอัจฉริยะยังช่วยลดความสูญเสียทางเศรษฐกิจด้วยการลดค่าใช้จ่ายในการลงทุนในโครงสร้างระบบ IT และเพิ่มความสามารถในการปรับตัวและประยุกต์ใช้งานระบบได้อย่างสะดวกขึ้น โดยเฉพาะในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานของเมืองอัจฉริยะ ยกตัวอย่างเช่น การพัฒนาระบบโครงข่ายอินเทอร์เน็ตสำหรับการเชื่อมต่ออุปกรณ์ IoT หรือการพัฒนาระบบกล้องวงจรปิดเพื่อเพิ่มความปลอดภัยในเมือง เป็นต้น

4) อินเทอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่ง

4.1) ความหมายของอินเทอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่ง

อินเทอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่ง (Internet of Things : IoT) คือ เทคโนโลยีที่เชื่อมต่ออุปกรณ์หรือสิ่งของต่าง ๆ ที่มีความสามารถในการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต หรือเครือข่ายอื่น ๆ เข้าด้วยกัน เพื่อให้สามารถสื่อสารและแลกเปลี่ยนข้อมูลกันได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ (Latre et al., 2016) ยกตัวอย่างเช่น อุปกรณ์อัจฉริยะ (Smart devices) อุปกรณ์ไอโอที (IoT) อุปกรณ์เกี่ยวกับสุขภาพ อุปกรณ์ในรถยนต์ และอุปกรณ์เพื่อการเชื่อมต่อเครือข่ายแบบไร้สายที่สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์เครื่องเล่นเพลงได้โดยตรงผ่านทางอินเทอร์เน็ตได้ เป็นต้น โดยการเชื่อมต่อทุกสิ่งนี้ก็สามารถทำงานร่วมกันได้ด้วยการใช้อินเทอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่งเป็นตัวกลางในการสื่อสารแลกเปลี่ยนข้อมูล (Kim et al., 2017) การใช้งานอินเทอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่งนั้นมีผลกระทบต่อชีวิตประจำวันของเราอย่างมาก ยกตัวอย่างเช่น การใช้งานอุปกรณ์ไอโอที (IoT) ในบ้านจะช่วยให้

เราสามารถควบคุม และติดตามการทำงานอุปกรณ์ต่างๆ ในบ้านผ่านทางอินเทอร์เน็ต ยกตัวอย่างเช่น ควบคุมหลอดไฟ เครื่องปรับอากาศ หรือควบคุมเครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ ผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เป็นต้น ทำให้เราสามารถปรับปรุงการใช้งานและลดการใช้งานพลังงานได้ นอกจากนี้การใช้งานอุปกรณ์อัจฉริยะเพื่อเฝ้าระวังสุขภาพของเราก็เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ดี ยกตัวอย่างเช่น นาฬิกาอัจฉริยะที่สามารถตรวจจับการนอนหลับและการออกกำลังกายของเรา และส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์เครื่องพื้นฐาน เช่น โทรศัพท์มือถือ เพื่อวิเคราะห์และสรุปผลสุขภาพของเราได้ ดังนั้นการใช้งานอินเทอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่งนั้นสามารถช่วยให้ชีวิตประจำวันของเราเป็นไปได้อย่างสะดวกสบาย และปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

4.2) สถาปัตยกรรม IoT

สถาปัตยกรรม IoT หมายถึงการออกแบบและวางแผนการใช้งานระบบอินเทอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่ง ซึ่ง สถาปัตยกรรม IoT ประกอบด้วย 3 เลเยอร์ (Layer) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (กอบเกียรติ สระอุบล, 2561)

4.2.1) Device Layer เป็นส่วนฮาร์ดแวร์ IoT ที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลผ่านอินเทอร์เน็ต โดยปกติแล้วเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสามารถในการเชื่อมต่อเครือข่ายได้ ยกตัวอย่างเช่น หลอดไฟ LED อัจฉริยะ ระบบควบคุมการเปิด-ปิดน้ำสำหรับการเกษตร ระบบมิเตอร์ และอุปกรณ์ตรวจจับความเร็วของรถยนต์ เป็นต้น

4.2.2) Network Layer เป็นชั้นของการเชื่อมต่อผ่านระบบเครือข่าย หรืออาจเรียกว่าเป็นส่วน เกตเวย์ (Gateway) ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ IoT กับระบบคลาวด์ ซึ่งเป็นชั้นของ Service Layer โดยชั้น Network Layer จะทำหน้าที่แปลงข้อมูลจากอุปกรณ์ IoT เป็นรูปแบบที่สามารถเข้าถึงได้กับชั้น Service Layer รวมถึงทำหน้าที่ส่งข้อมูลกลับไปยังอุปกรณ์ IoT เพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์นั้นๆ ได้

4.2.3) Service Layer เป็นชั้นของการให้บริการต่าง ๆ เช่น ระบบคลาวด์ เป็นพื้นที่เก็บข้อมูลออนไลน์ที่ใช้ในการจัดเก็บข้อมูลและประมวลผลข้อมูล โดยจะอยู่บนเซิร์ฟเวอร์ในอินเทอร์เน็ต ทำให้สามารถเข้าถึงข้อมูลได้จากทุกที่ที่มีการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต สำหรับแอปพลิเคชัน (Application) ที่จะให้บริการแอปพลิเคชันสำหรับจัดการและควบคุมอุปกรณ์ IoT ผ่านสมาร์ทโฟน (Smart phone) ของผู้ใช้งาน

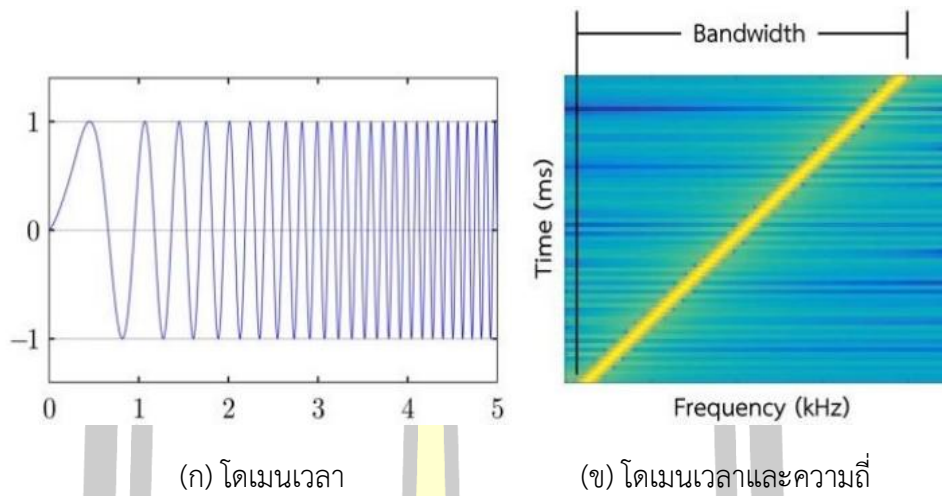
5) ข้อมูลขนาดใหญ่

ข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data) หมายถึง ชุดข้อมูลที่มีปริมาณมากเกินกว่าเครื่องมือและเทคโนโลยีการจัดการข้อมูลปกติจะสามารถจัดการได้ โดยปกติแล้ว ข้อมูลขนาดใหญ่มักจะมีคุณสมบัติที่เรียกว่า 3V คือ ความเร็ว (Velocity) ปริมาณ (Volume) และความหลากหลาย (Variety) นอกจากนี้ ยังมีคุณสมบัติอื่น ๆ เช่น ความซับซ้อนในการจัดระเบียบ ความเปลี่ยนแปลงของข้อมูลอย่างต่อเนื่อง และการนำข้อมูลที่แตกต่างกันมาเชื่อมโยงเข้าด้วยกัน การจัดการข้อมูลขนาดใหญ่มักใช้เทคโนโลยีการจัดการข้อมูลที่มีความสามารถในการจัดการข้อมูลปริมาณมาก โดยเฉพาะ

การนำเทคโนโลยีการประมวลผลข้อมูลแบบพร้อมตอบสนอง (Real-time processing) มาช่วยในการวิเคราะห์และสกัดความรู้จากข้อมูลที่มีปริมาณมาก เช่น การใช้เทคโนโลยี Big Data Analytics หรือ Machine Learning และ Deep Learning เพื่อวิเคราะห์และสกัดความรู้จากข้อมูล ในการนำข้อมูลขนาดใหญ่ไปใช้ในการตัดสินใจธุรกิจหรือวิจัยก็มีความสำคัญอย่างมาก โดยเฉพาะในยุคปัจจุบันที่มีการเก็บข้อมูลมากขึ้นและการใช้งานข้อมูลเป็นสิ่งสำคัญในการพัฒนาธุรกิจ ซึ่งจะช่วยให้ธุรกิจมีประสิทธิภาพ การจัดการข้อมูลขนาดใหญ่ยังมีความซับซ้อนเนื่องจากต้องมีการจัดการระบบเก็บข้อมูลให้มีความเป็นระบบและมีความเสถียรสูง เพื่อให้สามารถเข้าถึงข้อมูลได้ตลอดเวลา นอกจากนี้ยังต้องมีการสร้างโมเดลการจัดการข้อมูลที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถใช้ข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีความแม่นยำ การควบคุมความเป็นส่วนตัวและการรักษาความปลอดภัยของข้อมูลก็เป็นปัจจัยที่สำคัญในการจัดการข้อมูลขนาดใหญ่ (Hashem et al., 2016) ดังนั้น การจัดการข้อมูลขนาดใหญ่ไม่ใช่เพียงแค่การจัดการข้อมูลปกติ แต่เป็นการจัดการที่มีความซับซ้อนและต้องใช้เทคโนโลยีการจัดการข้อมูลที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการตัดสินใจและพัฒนาธุรกิจได้อย่างมีประสิทธิภาพและประสิทธิผลต่อธุรกิจ

2.2 เทคโนโลยีการสื่อสาร LoRa และ LoRaWAN

เทคโนโลยีให้บริการเครือข่ายบริเวณกว้างที่ใช้พลังงานต่ำ (LPWAN : Low Power Wide Area Networks) สำหรับเชื่อมต่อระบบ IoT เข้าสู่ระบบอินเทอร์เน็ต โดยสามารถส่งสัญญาณได้ระยะไกล ตั้งแต่ 5-15 กิโลเมตร โดยในเขตพื้นที่เมืองสามารถส่งสัญญาณได้ไกล 5 กิโลเมตร และในเขตพื้นที่นอกเมืองสามารถส่งสัญญาณได้ไกล 15 กิโลเมตร (Semtech Corporation, 2019) เครือข่ายบริเวณกว้างที่ใช้พลังงานต่ำเป็นเครื่องมือที่จะช่วยให้อุปกรณ์ระบบ IoT สามารถสื่อสารในระยะทางไกลและเข้าถึงระบบคลาวด์ (Cloud) สำหรับการประมวลผลได้ (Hassan et al., 2019) เทคโนโลยีการสื่อสาร LoRa เป็นกระบวนการในชั้นกายภาพ (Physical Layer) ถูกตั้งชื่อตามคุณสมบัติเด่นด้านระยะการส่งสัญญาณไกล (Long Range) ซึ่งถูกพัฒนาโดยบริษัท Semtech มีมาตรฐานรองรับการใช้งานหลายย่านความถี่ สำหรับประเทศไทยได้รับอนุญาตให้ใช้งานในคลื่นความถี่ย่าน 920-925 เมกะเฮิรตซ์ ตามมาตรฐาน LoRaWAN AS923 เมกะเฮิรตซ์ ลักษณะเฉพาะของ LoRa คือใช้การมอดูเลต (LoRa modulation) ด้านเทคนิค chirp spread spectrum (Chirp Spread Spectrum: CSS) โดยใช้สัญญาณ chirp (Chirp) ที่มีความชันคงที่ ดังแสดงในภาพประกอบ 2.1



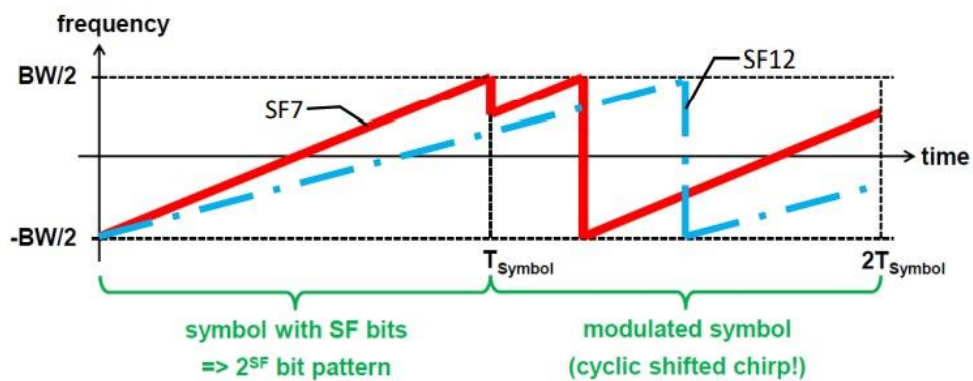
ภาพประกอบ 2.1 สัญญาณเชิร์ปขาขึ้น (Up-Chirp) (เอกพงศ์ คงสวัสดิ์, 2562)

จากภาพประกอบ 2.1 แสดงสัญญาณเชิร์ปขาขึ้น (Up-Chirp) ในหนึ่งลูกคลื่น สัญญาณเชิร์ป (Chirp) ย่อมาจากคำว่า Compressed High Intensity Radar Pulse ซึ่งถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบเรดาร์ ลักษณะของสัญญาณเชิร์ป คือ สัญญาณวิทยุซึ่งความถี่ของคลื่นพาห้ (Carrier) ถูกทำให้เพิ่มขึ้น หรือลดลงอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในภาพประกอบ 2.1 (ก) สัญญาณเชิร์ปเป็นคลื่นรูปไซน์ที่มีความถี่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากความถี่ต่ำสุดไปถึงความถี่สูงสุด ด้วยความกว้างแถบความถี่ (Bandwidth) คงที่ ดังแสดงในภาพประกอบ 2.1 (ข)

2.2.1 การมอดูเลตสัญญาณ LoRa

พารามิเตอร์ที่สำคัญในการกำหนดรูปแบบการมอดูเลต ได้แก่ ความกว้างแถบความถี่ (Bandwidth: BW) แฟกเตอร์การกระจาย (SF) และอัตราเข้ารหัส (Code Rate: CR) ในการสร้างชุดข้อมูล (Packet) พารามิเตอร์ SF จะแสดงถึงจำนวนบิตของข้อมูลต่อหนึ่งสัญลักษณ์ (Bit per symbol) มีค่าระหว่าง 7-12 (SF7-SF12) หรือหมายถึง ในหนึ่งสัญลักษณ์สามารถจัดเรียงบิตข้อมูลของสัญญาณเชิร์ป เท่ากับ 2^{SF} ซึ่งรูปแบบในความกว้างแถบความถี่ที่ตลอดการมอดูเลต ดังแสดงในภาพประกอบ 2.2

พูน ปณ ทิโต ชีเว



ภาพประกอบ 2.2 Spectrogram ของการมอดูเลตสัญญาณ LoRa (เอกพงศ์ คงสวัสดิ์, 2562)

จากภาพประกอบ 2.2 แสดงการมอดูเลตสัญญาณ LoRa ด้วยเทคนิค CSS ที่มีการกำหนด SF เท่ากัน ซึ่งจำนวนสองสัญญาณ chirp ที่มีความชันเท่ากัน โดยพิจารณาตำแหน่งของความถี่เริ่มต้นของแต่ละสัญญาณ chirp หรือตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่แบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งเป็นเทคนิคในการเข้ารหัสข้อมูล (Encode) เพื่อสร้างสัญญาณ chirp ที่เรียงต่อกันตามมาตรฐานของ LoRaWAN (Augustin et al., 2016) ความเร็วในการส่งสัญญาณ LoRa ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแต่ละสัญญาณ chirp ที่ถูกกำหนดโดยแฟกเตอร์การกระจาย (SF) และความกว้างแถบความถี่ (BW) ซึ่งความเร็วในการส่งสัญญาณ LoRa สามารถหาความสัมพันธ์จากสมการ (2-1) - (2-3) สำหรับอัตราการส่งข้อมูล (Bit Rate) สามารถสรุปได้ดังตาราง 2.1

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (2-1)$$

$$R_s = \frac{1}{T_s} = \frac{BW}{2^{SF}} \quad (2-2)$$

$$R_b = SF \cdot \frac{BW}{2^{SF}} \cdot \left(\frac{4}{4+CR} \right) \quad (2-3)$$

โดยที่

T_s = Symbol Period (วินาที)

R_s = Symbol Rate (symbols ต่อวินาที)

R_b = Bit Rate (บิตต่อวินาที, bps)

SF = Spreading Factor มีค่าระหว่าง 7 ถึง 12 (ไม่มีหน่วย)

BW = Bandwidth ได้แก่ 125, 250 และ 500 kHz

CR = Code Rate มีค่าระหว่าง 1 ถึง 4

ตาราง 2.1 อัตราการส่งข้อมูลของสัญญาณ LoRa

Code Rate (CR)	Bandwidth (kHz)	Bit Rate (kbps)					
		SF7	SF8	SF9	SF10	SF11	SF12
1	125	5.469	3.125	1.758	0.977	0.537	0.293
1	250	10.938	6.250	3.516	1.953	1.074	0.586
1	500	21.875	12.500	7.031	3.906	2.148	1.172
2	125	4.557	2.604	1.465	0.814	0.448	0.244
2	250	9.115	5.208	2.930	1.628	0.895	0.488
2	500	18.229	10.417	5.859	3.255	1.790	0.977
3	125	3.906	2.232	1.256	0.698	0.384	0.209
3	250	7.813	4.464	2.511	1.395	0.767	0.419
3	500	15.625	8.929	5.022	2.790	1.535	0.837
4	125	3.418	1.953	1.066	0.610	0.336	0.183
4	250	6.836	3.906	2.197	1.221	0.671	0.366
4	500	13.672	7.813	4.395	2.441	1.343	0.732

จากตาราง 2.1 แสดงอัตราการส่งข้อมูล (Bit Rate) ของสัญญาณ LoRa จากการคำนวณในสมการ (2-3) เปรียบเทียบระหว่าง แพลตฟอร์มการกระจาย (Spreading Factor: SF) ความกว้างแถบความถี่ (Bandwidth: BW) และ อัตราเข้ารหัส (Code Rate: CR) ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้ดังต่อไปนี้

1) แพลตฟอร์มการกระจาย (Spreading Factor: SF) เป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดความชันของสัญญาณเซิร์ป ซึ่งหาก SF มีค่าต่ำ สัญญาณเซิร์ปจะมีความชันสูง ทำให้มี Time duration ต่ำ อัตราเร็วบิตจึงมีค่าสูง ดังแสดงในภาพประกอบ 2.2

2) ความกว้างแถบความถี่ (Bandwidth: BW) เป็นพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความชันของสัญญาณเซิร์ป ซึ่งหาก BW มีค่าสูง สัญญาณเซิร์ปจะมีความชันสูง ทำให้อัตราเร็วบิตมีค่าสูง

3) อัตราเข้ารหัส (Code Rate: CR) ถ้าหากอัตราเข้ารหัสมีค่าต่ำ อัตราเร็วบิตจะมีค่าสูงจากการคำนวณด้วยสมการ (2-3)

นอกจากอัตราการส่งข้อมูล (Bit Rate) แล้ว ในระหว่างการส่งข้อมูลของเทคโนโลยี LoRa ยังมีความสัมพันธ์กับเวลาออกอากาศ (Time on Air) ระยะทางการส่งข้อมูล (Range) และแพลตฟอร์มการกระจาย (SF) สำหรับเวลาออกอากาศ (Time on Air) เมื่อเทียบกับอัตราการครอบครองคลื่นความถี่ทางเวลา (Duty Cycle) จะต้องไม่เกินกว่าที่กฎหมายกำหนด สำหรับประเทศไทยได้กำหนดมาตรฐานอัตราการครอบครองคลื่นความถี่ทางเวลา (Duty Cycle) ในรอบการทำงาน 1 ชั่วโมง ในความถี่ของคลื่นความถี่ใช้งานไม่เกิน 500 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) กำลังส่งน้อยกว่า

50 มิลลิวัตต์ (mW) เวลาครอบครองคลื่นทางความถี่ 1% ซึ่งหากทำการค้าต้องได้รับการอนุญาต ถ้ากำลังส่งมากกว่า 50 มิลลิวัตต์ (mW) แต่ไม่เกิน 4 วัตต์ (W) เวลาครอบครองคลื่นทางความถี่ 10% ซึ่งหากนำเข้า การผลิต และทำการค้า ต้องได้รับการอนุญาต ตามประกาศคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ เรื่องมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องโทรคมนาคมและอุปกรณ์ สำหรับเครื่องวิทยุคมนาคมที่ไม่ใช่ประเภท Radio Frequency Identification (RFID) ซึ่งใช้คลื่นความถี่ย่าน 920-925 เมกะเฮิร์ตซ์ พ.ศ. 2560 โดยการเปรียบเทียบความแตกต่างของแฟกเตอร์การกระจาย ตั้งแต่ SF7-SF12 ที่ประกอบด้วยอัตราการส่งข้อมูล (Bitrate) เวลาออกอากาศ (Time on Air) และระยะทางการส่งข้อมูล (Range) ดังแสดงในตาราง 2.2 (Nicolas et al., 2016)

ตาราง 2.2 การเปรียบเทียบความแตกต่างของแฟกเตอร์การกระจาย

Spreading Factor	Bitrate	Range	Time on Air
SF7	5470 bps	2 km	56 ms
SF8	3125 bps	4 km	100 ms
SF9	1760 bps	6 km	200 ms
SF10	980 bps	8 km	370 ms
SF11	440 bps	11 km	740 ms
SF12	290 bps	14 km	1400 ms

จากตาราง 2.2 การเปรียบเทียบแฟกเตอร์การกระจาย ตั้งแต่ SF7-SF12 ประกอบด้วยอัตราการส่งข้อมูล เวลาออกอากาศ และระยะทางการส่งข้อมูล ซึ่งจากตัวอย่างในตารางเป็นการส่งข้อมูลที่มีขนาด 10 Bytes ใช้ความกว้างแถบความถี่ (Bandwidth) เท่ากับ 125 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) และใช้เกณฑ์เวลาครอบครองคลื่นทางความถี่ 1% ในแฟกเตอร์การกระจาย SF7-SF12 ซึ่งถ้าหากแฟกเตอร์การกระจายน้อย อัตราการส่งข้อมูลจะมีปริมาณมาก เวลาออกอากาศน้อย แต่ได้ระยะทางการส่งข้อมูลที่ไกล และในทางตรงกันข้าม ถ้าหากแฟกเตอร์การกระจายมาก อัตราการส่งข้อมูลจะมีปริมาณน้อย เวลาออกอากาศมาก และส่งข้อมูลได้ระยะทางที่ไกล เป็นต้น

2.2.2 การดีมอดูเลตสัญญาณ LoRa

การดีมอดูเลตสัญญาณ LoRa (LoRa Demodulation) โดยส่วนใหญ่จะถูกกระทำที่ฝั่งของเครื่องรับ หรือส่วนเกตเวย์ (Gateway) ซึ่งการดีมอดูเลตสัญญาณของเทคโนโลยี LoRa สามารถทำได้พร้อมกันในหลาย ๆ ช่องความถี่ (Multi Channels) สามารถรับสัญญาณที่ส่งมาด้วยความถี่เดียวกันและในเวลาเดียวกันได้หลายสัญญาณ หากสัญญาณที่ถูกส่งมานั้นจะใช้ช่องสัญญาณใดหรือถูกมอดูเลตด้วยความถี่ใด สัญญาณที่เครื่องรับตรวจจับได้จะต้องมีระดับความเข้มของสัญญาณฝั่งรับ (Received Signal Strength Indicator: RSSI) มากกว่าค่าความไว (Sensitivity) ของอุปกรณ์ LoRa นอกจากนี้ เทคโนโลยีการสื่อสาร LoRa สามารถรับและส่งสัญญาณภายใต้สัญญาณรบกวน

(Noise) ที่มีความเข้มสูงได้ ดังนั้น อัตราส่วนกำลังเฉลี่ยสัญญาณภาครับต่อกำลังเฉลี่ยสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio: SNR) จึงมีค่าเป็นลบได้ ซึ่งค่าความไว (Sensitivity) และอัตราส่วนกำลังเฉลี่ยสัญญาณภาครับต่อกำลังเฉลี่ยสัญญาณรบกวน (SNR) ที่แสดงถึงความสามารถในการติดมอดูเลตสัญญาณ LoRa ของเครื่องรับนั้น จะมีค่าขึ้นอยู่กับระดับของแฟกเตอร์การกระจาย (SF) ดังแสดงในตาราง 2.3

ตาราง 2.3 ค่าความไวของเครื่องรับและการติดมอดูเลตสัญญาณ LoRa

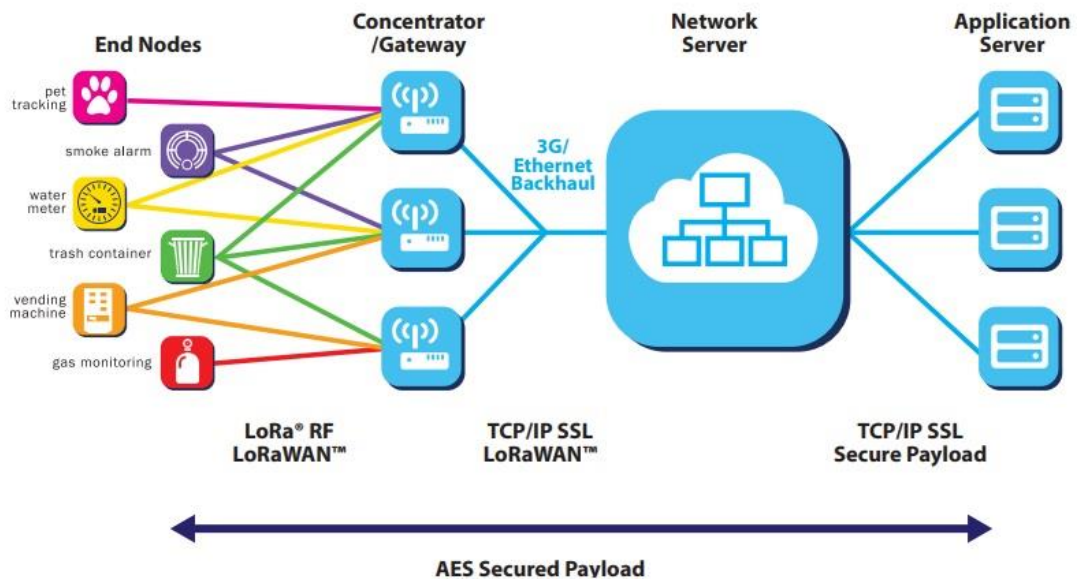
Spreading Factor	Receiver Sensitivity	SNR Limit
SF7	-125 dBm	-7.5 dB
SF8	-127 dBm	-10 dB
SF9	-130 dBm	-12.5 dB
SF10	-132 dBm	-15 dB
SF11	-135 dBm	-17.5 dB
SF12	-137 dBm	-20 dB

จากตาราง 2.3 เป็นการแสดงค่าความไวของอุปกรณ์ (Sensitivity) และระดับ SNR ขั้นต่ำ สำหรับการติดมอดูเลตสัญญาณ LoRa ซึ่งข้อจำกัดนี้จะถูกกำหนดด้วยระดับ Spreading Factor โดยที่ Spreading Factor ที่มีค่าต่ำ จะทำให้ค่าความไวของอุปกรณ์ และ SNR Limit มีค่าต่ำ หรือมีค่าติดลบน้อย และในทางตรงกันข้ามถ้าหาก Spreading Factor มีค่าสูง ค่าความไวของอุปกรณ์ และ SNR Limit จะมีค่าสูง หรือมีค่าที่ติดลบมาก ยกตัวอย่างเช่น ระดับ Spreading Factor ที่ SF7 มีค่าความไวของอุปกรณ์ เท่ากับ -125 dBm และ SNR Limit เท่ากับ -7.5 dB ในขณะที่ระดับ Spreading Factor ที่ SF12 มีค่าความไวของอุปกรณ์ เท่ากับ -137 dBm และ SNR Limit เท่ากับ -20 dB เป็นต้น

2.2.3 สถาปัตยกรรมเครือข่าย LoRaWAN

สถาปัตยกรรมเครือข่าย LoRaWAN (Long Range Wide Area Network: LoRaWAN) คือรูปแบบโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง (Medium Access Control: MAC) ที่เชื่อมโยงข้อมูลจากภาคส่งผ่านสัญญาณวิทยุที่มอดูเลตแบบ LoRa เพื่อส่งเข้าสู่ระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตผ่านอุปกรณ์ LoRa Gateway ลักษณะโทโพโลยี (Topology) ของเครือข่าย LoRaWAN เป็นแบบดาวที่ขยายออกไป (Star of Star) เครือข่าย LoRaWAN ทำงานที่ย่านความถี่ 920-925 เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) การสื่อสารมีประสิทธิภาพ ลดการรบกวนของสัญญาณ (Noise) ลดการแทรกสอด (Interference) และเพิ่มความจุช่องสัญญาณ (Channel Capacity) ซึ่งมีจุดเด่นคือ การบริหารจัดการข้อมูล และการออกแบบระบบไม่ซับซ้อนเท่ากับโทโพโลยีแบบตาข่าย (Mesh) และยังสามารถขยายพื้นที่ของเครือข่ายให้ครอบคลุมบริเวณกว้าง (Wide Area Network: WAN) ด้วยการติดตั้ง

LoRa gateway เพิ่มเติมในพื้นที่ต่าง ๆ ได้ สำหรับมาตรฐานเครือข่าย LoRaWAN จะมีกลุ่มสมาคม LoRa Alliance ที่เกิดจากการรวมตัวกันขององค์กรชั้นนำด้านการสื่อสารทั่วโลกที่ไม่แสวงหาผลกำไร เพื่อขับเคลื่อน และกำหนดมาตรฐานของเทคโนโลยีเครือข่ายการสื่อสาร LoRaWAN โดยสถาปัตยกรรมเครือข่าย LoRaWAN ดังแสดงในภาพประกอบ 2.3

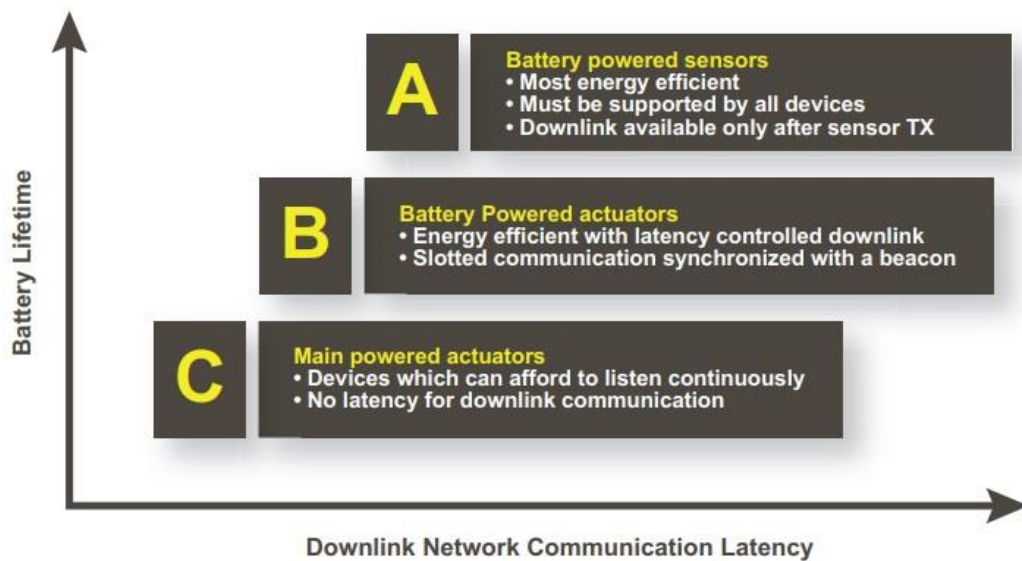


ภาพประกอบ 2.3 โครงสร้างสถาปัตยกรรมเครือข่าย LoRaWAN
ที่มา: https://lora-alliance.org/resource_hub/what-is-lorawan

จากภาพประกอบ 2.3 เป็นการแสดงโครงสร้างสถาปัตยกรรมเครือข่าย LoRaWAN ซึ่งประกอบด้วย 4 ส่วน ได้แก่ End Nodes, Gateway, Network Server และ Application Server ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ ยกตัวอย่างเช่น ระบบเกษตรอัจฉริยะ ระบบสมาร์ทโฮม ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย อุปกรณ์ IoT ต่าง ๆ ระบบแจ้งเตือนภัยหรือฝ้าระวังภัย และระบบสมาร์ทซิตี้ เป็นต้น ซึ่งส่วนต่าง ๆ ของโครงสร้างสถาปัตยกรรมเครือข่าย LoRaWAN มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) อุปกรณ์ปลายทาง

อุปกรณ์ปลายทาง (End Nodes) หรือลูกข่าย เป็นอุปกรณ์ส่งข้อมูลเซนเซอร์หรือรับคำสั่งจากแม่ข่ายเพื่อการเข้าถึงข้อมูลหรือการควบคุมอุปกรณ์ ซึ่งตามข้อกำหนดของ LoRaWAN ที่ได้มีการกำหนดการดำเนินการอุปกรณ์ โดยแบ่งออกเป็น 3 คลาส (Class) คือ Class A Class B และ Class C ดังแสดงในภาพประกอบ 2.4

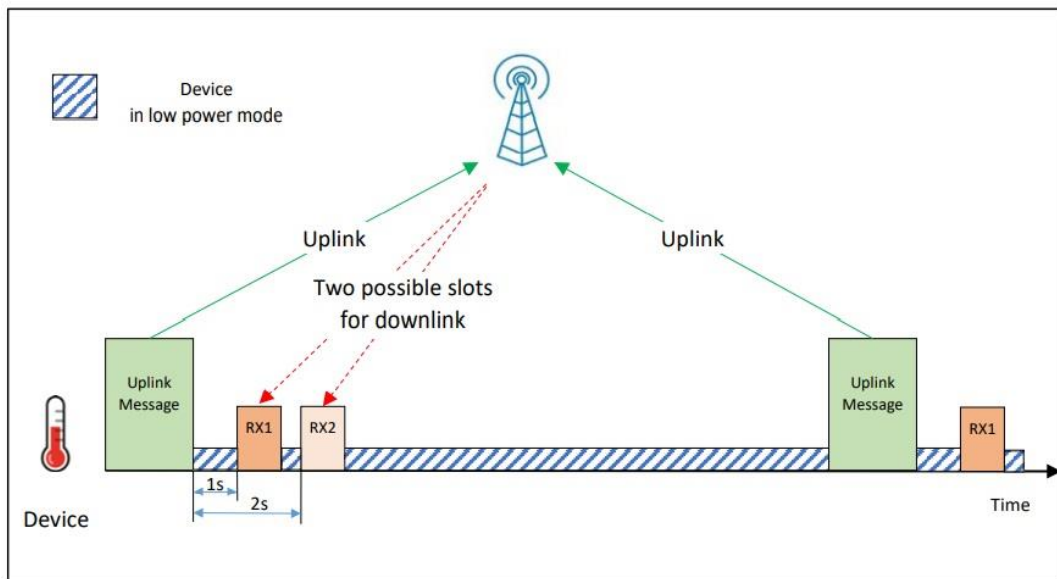


ภาพประกอบ 2.4 การกำหนดการดำเนินการอุปกรณ์ในเครือข่าย LoRaWAN

ที่มา: https://loro-alliance.org/resource_hub/what-is-lorawan

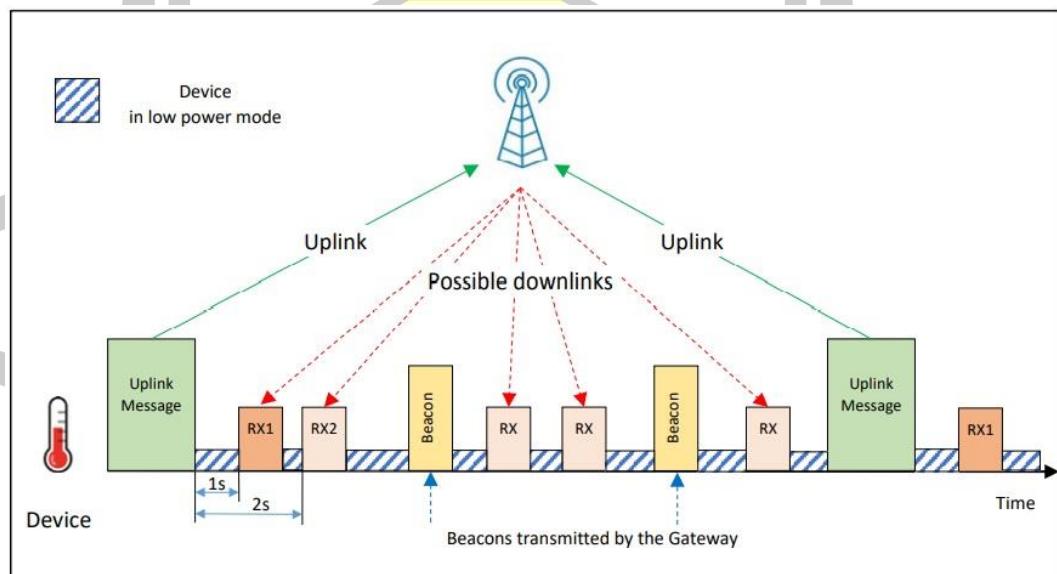
จากภาพประกอบ 2.4 แสดงการกำหนดการดำเนินการอุปกรณ์ในเครือข่าย LoRaWAN ซึ่งอุปกรณ์ทั้งหมดจะต้องดำเนินการอยู่บน Class A เป็นพื้นฐาน โดยที่ Class B และ Class C จะเป็นส่วนขยายสำหรับข้อกำหนดของอุปกรณ์ Class A ซึ่งในแต่ละ Class มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.1) Class A คือส่วนอุปกรณ์ที่สามารถรองรับการสื่อสารแบบสองทิศทางระหว่างอุปกรณ์ปลายทาง และ เกตเวย์ (Gateway) ในการส่งข้อความจากอุปกรณ์ปลายทางไปยังเครื่องแม่ข่าย (Server) สามารถทำได้ตลอดเวลา โดยปกติอุปกรณ์จะหลับเพื่อประหยัดพลังงาน และจะตื่นขึ้นเฉพาะตอนที่ต้องการส่งข้อมูล (Up Link) ตามรอบเวลาที่กำหนดในสล็อตเวลา หากต้องการรับข้อมูล (Down Link) จากเครื่องแม่ข่ายสามารถทำได้เฉพาะสล็อตเวลาที่เปิดรับเท่านั้น ซึ่งถ้าหากเครื่องแม่ข่ายไม่มีการตอบสนองต่อหน้าต่างรับข้อมูลของอุปกรณ์ปลายทางจะต้องรอการรับข้อมูล (Down Link) จากเครื่องแม่ข่ายในรอบต่อไปหลังจากเสร็จสิ้นการส่งข้อมูล (Up Link) จากอุปกรณ์ปลายทางไปที่เครื่องแม่ข่าย สำหรับ Class A จะมีเวลาแฝง (Latency) สูงสุด แต่จะประหยัดพลังงานสูงสุด ดังแสดงในภาพประกอบ 2.5



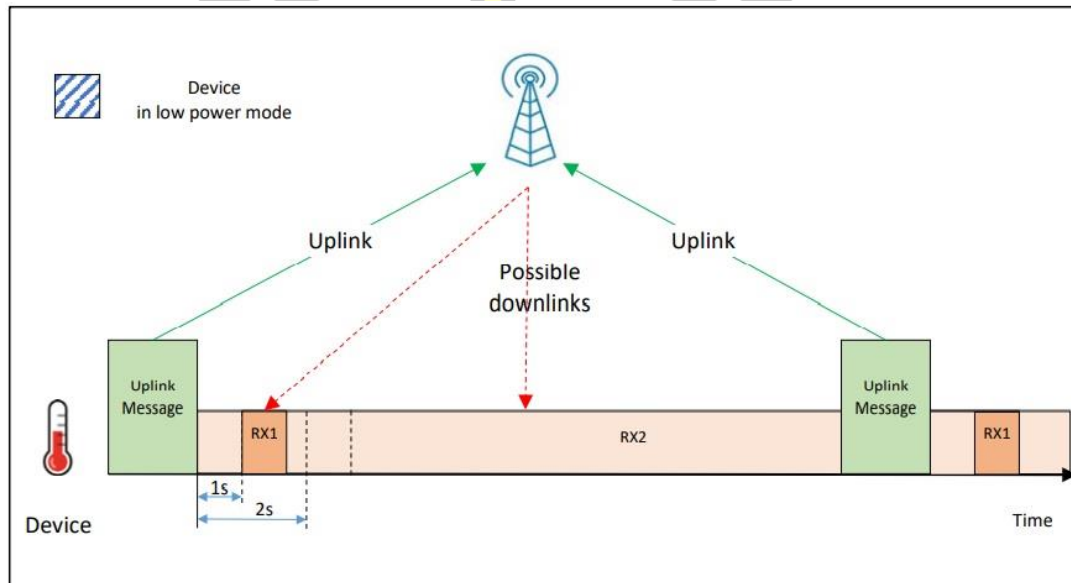
ภาพประกอบ 2.5 รูปแบบของ Class A ในเครือข่าย LoRaWAN (Montagny, 2021)

1.2) Class B ถูกพัฒนาเพิ่มเติมจาก Class A ซึ่งจะมีหน้าต่างรับข้อมูลที่ถูกกำหนดไว้แล้วเพิ่มขึ้นมา เพื่อรอรับข้อมูล (Down Link) จากเครื่องแม่ข่าย มีรูปแบบการส่งแบบ beacons ซึ่งให้จังหวะเวลาทั้งสองทางที่ติดต่อกัน (time-synchronized) จากเกตเวย์ (Gateway) และอุปกรณ์ปลายทางจะทำการเปิดหน้าต่างรับข้อมูลเป็นระยะ ๆ เพื่อรอรับข้อมูล (Down Link) ตามเวลาที่กำหนดไว้บนซอฟต์แวร์ ดังแสดงในภาพประกอบ 2.6



ภาพประกอบ 2.6 รูปแบบของ Class B ในเครือข่าย LoRaWAN (Montagny, 2021)

1.3) Class C ถูกพัฒนาเพิ่มเติมจากคลาส A ซึ่งอุปกรณ์จะตื่นตลอดเวลา เพื่อรอรับข้อมูล (Down Link) จากเครื่องแม่ข่ายอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นอุปกรณ์คลาส C จึงมี Latency ต่ำที่สุด แต่อัตราการใช้พลังงานจะสูงสุด จึงไม่เหมาะกับการใช้งานร่วมกับแบตเตอรี่ ดังแสดงในภาพประกอบ 2.7



ภาพประกอบ 2.7 รูปแบบของ Class C ในเครือข่าย LoRaWAN (Montagny, 2021)

2)เกตเวย์

เกตเวย์ (Gateway) คือ ตัวกลางการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ลูกข่ายกับแม่ข่าย โดยการดักจับส่วน Preamble ของสัญญาณ LoRa ที่ถูกส่งมาจากแต่ละลูกข่าย แล้วส่งต่อชุดข้อมูลไปประมวลผลบนเครื่องแม่ข่าย (Server) ผ่านอินเทอร์เน็ตโพรโทคอล (IP) ซึ่งสามารถมีเกตเวย์ได้มากกว่าหนึ่งเกตเวย์ (Multi Gateway) ที่ตรวจจับข้อมูลเดียวกัน ดังนั้น การคัดแยกชุดข้อมูลจะต้องอาศัยกลไกการยืนยันตัวตน (Activation) บนระบบของ Server

3) แม่ข่ายคอมพิวเตอร์

แม่ข่ายคอมพิวเตอร์ (Network Server) ที่ให้บริการในระบบเครือข่าย LoRaWAN โดยการนำชุดข้อมูลจากเกตเวย์มาประมวลผล เริ่มจากตรวจสอบการรับรอง หรือ Authenticate ชุดข้อมูลด้วยกุญแจ (Key) ตามที่ได้ลงทะเบียนไว้แล้วในระบบ ซึ่งจะมีเฉพาะแม่ข่ายที่เกี่ยวข้องเท่านั้น ที่จะสามารถถอดรหัสชุดข้อมูลได้ สำหรับมาตรฐาน LoRaWAN กำหนดวิธีการยืนยันตัวตน (Activation) แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ซึ่งมีดังต่อไปนี้

3.1) Activation By Personalization

Activation by Personalization (ABP) คือการลงทะเบียน Key อุปกรณ์ ลูกข่ายไว้ในระบบของแม่ข่ายตั้งแต่แรก ด้วยการใส่กุญแจที่แตกต่างกันในแต่ละอุปกรณ์ ซึ่งได้แก่ Device EUI, Device Address, Network Session Key และ Application Session Key วิธีการนี้จะยอมให้ลูกข่ายที่ลงทะเบียนไว้แล้วเข้าใช้งานเครือข่ายได้ทันที

3.2) Over The Air Activation

Over the Air Activation (OTAA) วิธีการนี้ เริ่มจากลูกข่ายส่งกุญแจ ซึ่งได้แก่ Device EUI, Application EUI, Application KEY ซึ่งถูกฝังไว้ภายในเพื่อให้แม่ข่าย ตรวจสอบการยืนยันตัวตน จากนั้นแม่ข่ายจะส่งกุญแจต่าง ๆ กลับ เช่นเดียวกับวิธี ABP เพื่ออนุญาตให้ลูกข่ายเข้าใช้งานเครือข่ายได้ ซึ่งวิธีนี้จะมีการหน่วงเวลา (Delay) ในช่วงแรกของการยืนยันตัวตน เล็กน้อย แต่แลกมาด้วยความยืดหยุ่นที่มากกว่าแบบ ABP

4) แอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์

แอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์ (Application Server) คือ ส่วนของการใช้ประโยชน์ จากข้อมูลที่ได้มาจากแม่ข่าย เช่น ระบบรายงานผลข้อมูล หรือแสดงผลข้อมูลด้วยกราฟ ระบบฐานข้อมูล หรือ การรายงานข้อมูลไปยังแอปพลิเคชันของสมาร์ทโฟน เป็นต้น

2.3 วิธีการเมตาฮิวริสติก

วิธีการเมตาฮิวริสติก (Metaheuristic Method) เป็นวิธีการแก้ปัญหาที่มีความยากซับซ้อน ซึ่งไม่สามารถแก้ปัญหาได้ด้วยวิธีการแม่นยำตรง (Exact Method) หรือถ้าแก้ไขได้ก็อาจจะต้องใช้เวลานานในการแก้ไขปัญหาเพื่อลดเวลาในการคำนวณ และหาค่าคำตอบที่ดีที่สุด (ระพีพันธ์ ปิตาคะโส, 2559) ซึ่งวิธีการเมตาฮิวริสติกเป็นวิธีที่ได้จากการพัฒนาและดัดแปลงมาจากวิธีฮิวริสติกให้มีความยืดหยุ่นในการหาผลเฉลยของปัญหาที่มีความซับซ้อนและมีตัวแปรจำนวนมากได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงการหาคำตอบที่รวดเร็ว ถึงแม้คำตอบที่ได้อาจจะไม่ใช่ค่าที่ดีที่สุด

2.3.1 ประเภทของเมตาฮิวริสติก

เมตาฮิวริสติกเป็นวิธีที่มีความยืดหยุ่นในการหาผลเฉลยของปัญหาที่มีความซับซ้อน มีตัวแปรจำนวนมาก และการหาคำตอบที่รวดเร็ว โดยประเภทของเมตาฮิวริสติกมีดังต่อไปนี้ (Blum & Roli, 2003)

- 1) เมตาฮิวริสติกมีขั้นตอนในการค้นหาคำตอบที่ดีภายในพื้นที่ของคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible Region)
- 2) เมตาฮิวริสติกวัตถุประสงค์ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดหรือใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด โดยใช้เวลาน้อย

3) วิธีการทางเมตาฮิวริสติกอาจจะมีทั้งแบบง่ายไม่ซับซ้อน เช่น การค้นหาเฉพาะที่ (Local search) หรือแบบที่ยุ่งยากซับซ้อนมากกว่า เช่น วิธีการระบบอาณานิคมมด วิธีการเชิงพันธุกรรม วิธีการค้นหาต้องห้าม วิธีการเลียนแบบการอบอุ่น เป็นต้น

4) เมตาฮิวริสติกเป็นการประมาณคำตอบตามขั้นตอนของแต่ละวิธี

5) เมตาฮิวริสติกอาจเกิดจากการรวมหลากหลายเทคนิค เพื่อค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดภายในพื้นที่คำตอบที่เป็นไปได้

6) เมตาฮิวริสติกมีระเบียบขั้นตอนมาตรฐานที่แน่นอน แม้ว่าเมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในปัญหาที่แตกต่างกันจะมีรายละเอียดของขั้นตอนย่อยที่ต่างกัน แต่ฮิวริสติกสำหรับปัญหาแต่ละปัญหาต้องดำเนินการตามขั้นตอนหลักของเมตาฮิวริสติกดั้งเดิม เช่น การประยุกต์ใช้วิธีการระบบอาณานิคมมด (Ant System) ในปัญหาที่แตกต่างกัน จะมีระเบียบหลัก ๆ ที่เหมือนกัน เช่น การมีทัศนคติ (Bias) ก่อนตัดสินใจ หลังจากตัดสินใจต้องใช้คำตอบมาเพิ่มหรือลดปริมาณทัศนคตินั้น วิธีการตัดสินใจจากการใช้ระดับทัศนคติในแต่ละปัญหาอาจจะไม่เหมือนกัน และวิธีการเลือกคำตอบมาเพิ่มหรือลดระดับทัศนคติในแต่ละปัญหาอาจแตกต่างกัน เป็นต้น

7) เมตาฮิวริสติกต้องสามารถใช้ได้กับปัญหาที่หลากหลาย

8) เมตาฮิวริสติกอาจจะมีลักษณะเป็นคำบรรยายโดยย่อก็ได้ หรือไม่จำเป็นต้องมีหลักการทางคณิตศาสตร์

9) ปัจจุบันนี้ เมตาฮิวริสติกใช้ความจำชั่วคราวมากขึ้นในการจำคำตอบเดิม เพื่อค้นหาคำตอบที่ไม่ซ้ำเดิมหรือแตกต่างไปจากเดิม เช่น วิธีการค้นหาต้องห้าม วิธีการระบบอาณานิคมมด

2.3.2 รูปแบบของเมตาฮิวริสติก

วิธีการเมตาฮิวริสติกมีอยู่หลากหลายรูปแบบให้เลือกใช้ ซึ่งแต่ละวิธีการจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น ในบางวิธีการจะให้ผลลัพธ์ที่ดีแต่อาจจะใช้เวลาในการคำนวณนาน หรือในบางวิธีการคำนวณอาจจะรวดเร็วแต่ให้ผลลัพธ์ที่ไม่ดีเท่ากับวิธีการอื่น เป็นต้น การแบ่งวิธีการ เมตาฮิวริสติกสามารถแบ่งออกเป็น 5 รูปแบบ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (Blum & Roli, 2003)

1) รูปแบบที่เกิดจากแรงบันดาลใจจากธรรมชาติหรือแบบไม่ได้เกิดจากแรงบันดาลใจจากธรรมชาติ วิธีการที่เกิดจากแรงบันดาลใจจากธรรมชาติ ได้แก่ วิธีการระบบอาณานิคมมด วิธีการเชิงพันธุกรรม วิธีการลอกแบบ วิธีการเลียนแบบการอบอุ่น ส่วนวิธีการที่ไม่ได้เลียนแบบธรรมชาติ เช่น วิธีการค้นหาต้องห้าม การค้นหาคำตอบเฉพาะที่แบบวนซ้ำ (Iterated Local Search) วิธีการค้นหาจากคำตอบใกล้เคียงแบบมีเงื่อนไข (Variable Neighborhood Search) เป็นต้น

2) รูปแบบใช้ประชากรหรือรูปแบบไม่ใช้ประชากร (Population or non-Population Based) แบบใช้ประชากรคือในหนึ่งรอบของการคำนวณจะมีคำตอบมากกว่า

หนึ่งคำตอบให้เลือก ส่วนแบบไม่มีประชากร ในหนึ่งรอบของการคำนวณจะมีคำตอบเพียงคำตอบเดียว วิธีแบบใช้ประชากร เช่น วิธีระบบอานานิคมมด วิธีเชิงพันธุกรรม วิธีการลอกแบบ วิธีแบบไม่ใช้ประชากร เช่น วิธีการเลียนแบบการอบอุ่น วิธีการค้นหาต้องห้าม วิธีการค้นหาคำตอบใกล้เคียงแบบมีเงื่อนไข

3) รูปแบบสมการเป้าหมายคงที่หรือไม่คงที่ (Dynamics or Static Objective Function) ในหนึ่งรอบของการคำนวณอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงสมการเป้าหมาย เพื่อให้ได้คำตอบใหม่ ๆ เกิดขึ้นหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมการเป้าหมาย ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงสมการเป้าหมาย เช่น การค้นหาคำตอบเฉพาะที่แบบมีการชี้นำ (Guided Local Search) กรณีที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมการเป้าหมาย เช่น วิธีการระบบอานานิคมมด วิธีการเชิงพันธุกรรม วิธีการลอกแบบ วิธีการเลียนแบบการอบอุ่น วิธีการค้นหาต้องห้าม วิธีการค้นหาคำตอบเฉพาะที่แบบวนรอบซ้ำ วิธีการค้นหาจากคำตอบใกล้เคียงแบบมีเงื่อนไข

4) รูปแบบเปลี่ยนวิธีการหาคำตอบใกล้เคียงคำตอบปัจจุบัน (Neighborhood) คงที่และไม่คงที่ กรณีที่วิธีการหาคำตอบใกล้เคียงคงที่ ได้แก่ วิธีการระบบอานานิคมมด วิธีการเชิงพันธุกรรม วิธีการลอกแบบ วิธีการเลียนแบบการอบอุ่น วิธีการค้นหาต้องห้าม วิธีการค้นหาคำตอบเฉพาะที่แบบวนรอบซ้ำ ส่วนกรณีที่มีการเปลี่ยนวิธีการหาคำตอบที่ใกล้เคียง ได้แก่วิธีการค้นหาจากคำตอบใกล้เคียงแบบมีเงื่อนไข

5) รูปแบบมีและไม่มีหน่วยความจำ ถ้ามีการใช้หน่วยความจำจะจำว่ามีคำตอบใดบ้างที่ผ่านมาแล้วนำมาเพื่อเป็นข้อมูลในการหาคำตอบรอบถัดไป ซึ่งกรณีที่ใช้หน่วยความจำที่ปรากฏชัด ได้แก่ วิธีการระบบอานานิคมมด วิธีการค้นหาต้องห้าม ส่วนวิธีที่ไม่ใช้หน่วยความจำยกตัวอย่างเช่น วิธีการค้นหาคำตอบเฉพาะที่แบบวนรอบซ้ำ เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีวิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดของหลักการทำงานของกลุ่มประชากรในการแก้ปัญหาทางวิจัยในสาขาวิชาต่าง ๆ ที่ถูกสร้างขึ้นมาในรูปแบบวิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธีการเลียนแบบธรรมชาติ และวิธีการประยุกต์ใช้ วิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง (Variable Neighborhood Strategy Adaptive Search: VaNSAS) โดยผลงานวิจัยวิธีการเหล่านี้เริ่มได้รับความสนใจมากขึ้นจนถึงปัจจุบัน

2.4 วิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง

วิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง (Modified Variable Neighborhood Strategy Adaptive Search: M-VaNSAS) เป็นวิธีการเมตาฮิวริสติก รูปแบบใหม่ที่มีจุดมุ่งหมาย เพื่อช่วยค้นหาคำตอบในพื้นที่ต่าง ๆ ให้กว้างและเหมาะสมมากขึ้น โดยเป็นการใช้กลยุทธ์ของการค้นหาพื้นที่ใกล้เคียง โดยเป็นการนำวิธีการต่าง ๆ มาช่วยค้นหาคำตอบ เพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด วิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง

(Modified Variable Neighborhood Strategy Adaptive Search: M-VaNSAS) เป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและเข้าใจง่าย โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (Pitakaso et al., 2020)

2.4.1 ขั้นตอนการค้นหาคำตอบ

วิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบตัดแปลง มีขั้นตอนในการค้นหาคำตอบ ซึ่งประกอบด้วย 5 ขั้นตอน ได้แก่

1) การสร้างชุดคำตอบเริ่มต้น

การสร้างชุดคำตอบเริ่มต้น (Generate the Initial Population) เป็นการสร้างประชากรต้นแบบขึ้นมาเพื่อใช้เป็นจุดเริ่มต้นของขั้นตอนการวิวัฒนาการ ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนแรกที่เกิดขึ้นก่อนที่จะเริ่มเข้ากระบวนการของวิธีการ M-VaNSAS โดยประชากรกลุ่มแรกเกิดจากการสุ่มเพื่อให้ได้ประชากรต้นแบบจำนวนหนึ่ง ซึ่งเป็นการสุ่มแบบมีความน่าจะเป็นเท่ากัน

2) การเลือกใช้กล่องดำ

การเลือกใช้กล่องดำ (Select Black Box) ที่จะดำเนินการหาคำตอบของชุดคำตอบเริ่มต้น ของวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบตัดแปลง โดยกระบวนการตัดสินใจในการเลือกกล่องดำเพื่อหาคำตอบจะใช้การเลือกแบบวงล้อรูเล็ต (Roulette wheel selection) ซึ่งการกระบวนการตัดสินใจในการเลือกกล่องดำ ดังในสมการ (2-4)

$$P_{bt} = \frac{FN_{bt-1} + (1 - F)A_{bt-1} + KI_{bt-1} + \rho|A_{bt-1} - A_{t-1}^{best}|}{\sum_{b=1}^B FN_{bt-1} + (1 - F)A_{bt-1} + KI_{bt-1} + \rho|A_{bt-1} - A_{t-1}^{best}|} \quad (2-4)$$

โดยที่

P_{bt} = ความน่าจะเป็นของการเลือกกล่องดำมาปรับปรุงในการคำนวณแต่ละรอบ

N_{bt-1} = จำนวนแตรีกที่เลือกกล่องดำมาปรับปรุงในรอบการคำนวณก่อนหน้านี้

A_{bt-1} = ค่าวัตถุประสงค์เฉลี่ยของแตรีกทั้งหมดที่เลือกกล่องดำในรอบการคำนวณก่อนหน้านี้

A_{t-1}^{best} = ค่าที่ดีที่สุดที่พบในรอบการคำนวณก่อนหน้านี้

I_{bt-1} = ค่าคะแนนสะสม มีค่าเป็นไบนารี 0 และ 1

1 คือ กล่องดำค้นพบผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในรอบการคำนวณล่าสุด

0 คือ ไม่พบผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

B = จำนวนรวมของกล่องดำ

F = ปัจจัยปรับขนาด (Scale Factor) เป็นจำนวนจริง ที่มีค่าคงที่ระหว่าง 0 ถึง 1

K = ตัวปัจจัยตั้งค่า (Parameter Factor) เป็นจำนวนจริงที่มีค่าคงที่ระหว่าง 0 ถึง 1

3) การดำเนินการของกล่องดำ

การดำเนินการของกล่องดำ (Black Box Operations) ของวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบตัดแปลง (M-VaNSAS) สำหรับการหาความเหมาะสมที่สุดสำหรับการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกณฑ์ ประกอบด้วย 4 วิธีการ ตามแนวทางการวิจัยของ (Sangkaphet et al., 2022) และ (Pitakaso et al., 2022) ซึ่งกล่องดำทั้ง 4 วิธีการ ประกอบด้วย วิธีการ DE-inspired Move (DIM), Random-transit (RT), Best-transit (BT) และ Inter-transit (IT) ดังแสดงในสมการ (2-5) - (2-8)

$$\text{DE-inspired Move (DIM)} \quad Z_{ijt} = X_{rjt} + Q_{ij}(X_{rjt} - X_{njt}) \quad (2-5)$$

$$\text{Random-transit (RT)} \quad Z_{ijt} = \begin{cases} X_{ijt} & \text{if } Q_{ij} \leq CR \\ R_{ijt} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2-6)$$

$$\text{Best-transit (BT)} \quad Z_{ijt} = \begin{cases} X_{ijt} & \text{if } Q_{ij} \leq CR \\ B_{ijt} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2-7)$$

$$\text{Inter-transit (IT)} \quad Z_{ijt} = \begin{cases} X_{ijt} & \text{if } Q_{ij} \leq CR \\ X_{njt} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2-8)$$

โดยทั่วไปแล้วการค้นหาในพื้นที่ใกล้เคียง (local search) หรือการปรับปรุงแบบภาคท้องถิ่น (local improvement) ของเมตาฮิวริสติก มีเป้าหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการค้นหาทั้ง 2 ประเภท คือ (1) การค้นหาเชิงความหลากหลาย (Diversification search) หรือการค้นหาเชิงสำรวจ (Exploration search) และ (2) การค้นหาเชิงความเข้มข้น (Intensification search) การค้นหาเชิงสำรวจถูกออกแบบมาเพื่อให้โซลูชันปัจจุบันหลุดออกจากโซลูชันท้องถิ่น (Local optimal solution) และการค้นหาเชิงความเข้มข้นจะช่วยให้โซลูชันปัจจุบันค้นหาในพื้นที่ค้นหาปัจจุบันอย่างหนัก ซึ่งในสมการ (2-5) - (2-8) ไม่สามารถทำได้ในสองประเภทนี้ ในสมการ (2-5) และ (2-6) ได้ถูกออกแบบสำหรับเพิ่มความหลากหลายของการสำรวจ สมการ (2-7) และ (2-8) ใช้สำหรับการเพิ่มความเข้มข้นในการค้นหา ในสมการ (2-7) โซลูชันปัจจุบันจะถูกนำไปยังพื้นที่ค้นหาที่ดีโดยใช้โซลูชันที่ดีที่สุดปัจจุบันเป็นตัวนำ สมการ (2-8) โซลูชันปัจจุบันจะถูกนำไปยังพื้นที่ค้นหาที่ดีโดยใช้โซลูชันรอบข้าง (Neighbor solution) เป็นตัวนำ

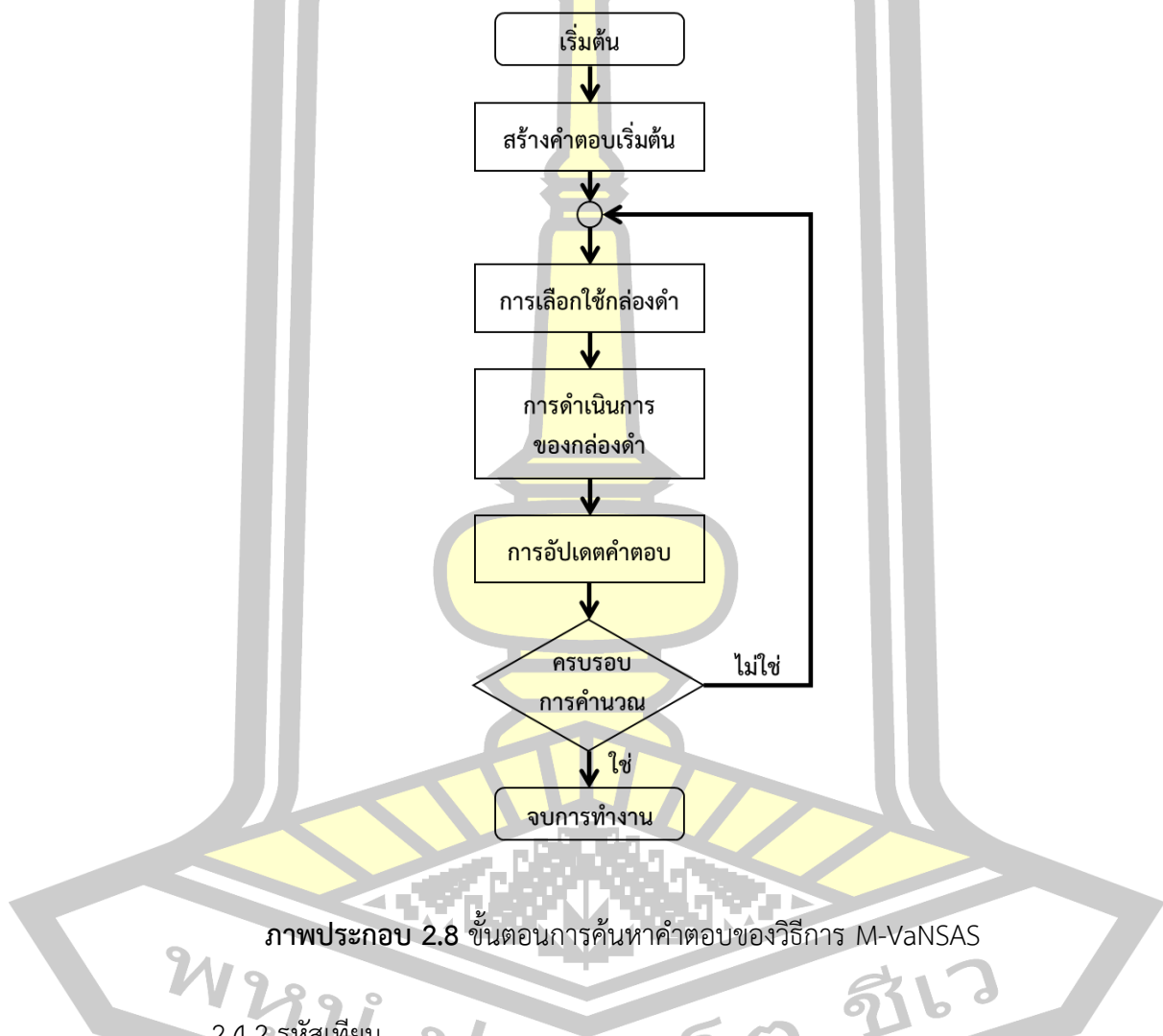
4) การอัปเดตคำตอบ

การอัปเดตคำตอบ (Update the Tracks) ในขั้นตอนนี้ เป็นการเปรียบเทียบคำตอบกับค่าเดิม เพื่อให้ได้คำตอบสำหรับการคำนวณในรอบถัดไป ดังแสดงในสมการ (2-9)

$$X_{ijt+1} = \begin{cases} Z_{ijt} & \text{if } f(Z_{ijt}) \geq f(X_{ijt}) \\ X_{ijt} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2-9)$$

จากสมการ (2-9) โดยที่ $f(Z_{ijt})$ แทนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ Z_{ijt} และ $f(X_{ijt})$ แทนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ X_{ijt} เพื่อเพิ่มค่าคะแนนสะสมสำหรับรอบการคำนวณต่อไป จะเลือกค่าคะแนนสะสมที่มีค่ามากกว่าระหว่าง Z_{ijt} และ X_{ijt} ในการประเมินคำตอบ

5) การทำซ้ำขั้นตอนที่ 2) ถึง 4) จากนั้นทำซ้ำจนกว่าจะครบรอบที่กำหนด และรายงานคำตอบที่ดีที่สุด โดยขั้นตอนการค้นหาคำตอบของวิธีการ M-VaNSAS ดังแสดงในภาพประกอบ 2.8



ภาพประกอบ 2.8 ขั้นตอนการค้นหาคำตอบของวิธีการ M-VaNSAS

2.4.2 รหัสเทียม

รหัสเทียม (Pseudo code) ของวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง ดังแสดงในภาพประกอบ 2.9

Algorithm: M-VaNSAS	
1	Input Number of tasks, Number of workstations, Task time and Type of machine
2	Output Cycle time
3	Begin
4	While i less than predefined number of iterations
5	(1) Generate the Initial Population
6	(2) Select Black Box using formula
7	
8	$P_{bt} = \frac{FN_{bt-1} + (1-F)A_{bt-1} + KI_{bt-1} + \rho A_{bt-1} - A_{t-1}^{best} }{\sum_{=1}^{Bb} FN_{bt-1} + (1-F)A_{bt-1} + KI_{bt-1} + \rho A_{bt-1} - A_{t-1}^{best} }$
9	
10	(3) Black Box Operations
11	
12	$Z_{ijt} = X_{rjt} + Q_{ij}(X_{rjt} - X_{njt})$
13	
14	$Z_{ijt} = \begin{cases} X_{ijt} & \text{if } Q_{ij} \leq CR \\ R_{ijt} & \text{otherwise} \end{cases}$
15	
16	$Z_{ijt} = \begin{cases} X_{ijt} & \text{if } Q_{ij} \leq CR \\ B_{ijt} & \text{otherwise} \end{cases}$
17	
18	$Z_{ijt} = \begin{cases} X_{ijt} & \text{if } Q_{ij} \leq CR \\ X_{njt} & \text{otherwise} \end{cases}$
19	
20	(4) Update the task and all information using formula
21	
22	$X_{ijt+1} = \begin{cases} Z_{ijt} & \text{if } f(Z_{ijt}) \geq f(X_{ijt}) \\ X_{ijt} & \text{otherwise} \end{cases}$
23	
24	$i = i + 1;$
25	End While
26	End

ภาพประกอบ 2.9 รหัสเทียมของวิธีการ M-VaNSAS

จากภาพประกอบ 2.9 แสดงรหัสเทียมของวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบตัดแปลง (M-VaNSAS) มีขั้นตอนในการค้นหาคำตอบ ซึ่งประกอบด้วย 5 ขั้นตอน คือ (1) การสร้างชุดคำตอบเริ่มต้นสำหรับการสร้างประชากรต้นแบบขึ้นมาเพื่อใช้เป็นจุดเริ่มต้นของขั้นตอนการวิวัฒนาการ (2) การเลือกใช้กล่องดำ เป็นกระบวนการตัดสินใจในการเลือกกล่องดำเพื่อหาคำตอบ (3) การดำเนินการของกล่องดำ เป็นกระบวนการของการหาค่าความเหมาะสมที่สุด (4) การอัปเดตคำตอบ ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบคำตอบกับค่าเดิม เพื่อให้ได้คำตอบ

สำหรับการคำนวณในรอบถัดไป และ (5) การทำซ้ำขั้นตอนที่ (2) ถึง (4) จากนั้นทำซ้ำจนกว่าจะครบรอบที่กำหนด และรายงานคำตอบที่ดีที่สุด

2.5 วิธีการเชิงพันธุกรรม

วิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) เป็นวิธีการเมตาฮีริสติกที่จำลองการสืบพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตมาไว้ในกลไกของวิธีการ เพื่อให้มีการคัดเลือกคำตอบที่ดีหรือไม่ดี และมีวิวัฒนาการจากรุ่นสู่รุ่นเพื่อพัฒนาไปสู่คำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งเป็นเป้าหมายหลักของการพัฒนาวิธีการทางเมตาฮีริสติก โดยองค์ประกอบหลักของวิธีการเชิงพันธุกรรม มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.5.1 การออกแบบโครโมโซมแทนคำตอบ

การออกแบบโครโมโซมแทนคำตอบ (Chromosome Encoding) เป็นขั้นตอนการออกแบบโครโมโซมเพื่อให้สอดคล้องกับปัญหาจริงที่ต้องการพัฒนาวิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธีการเชิงพันธุกรรม (GA) ซึ่งวิธีการออกแบบโครโมโซมเพื่อแทนคำตอบมีหลายวิธี ดังต่อไปนี้

1) การออกแบบโครโมโซมแบบไบนารี (Binary Encoding) เป็นการออกแบบโครโมโซมที่แทนที่ด้วย 0 หรือ 1 เท่านั้น

2) การออกแบบโครโมโซมแบบลำดับ (Permutation Encoding) เป็นการออกแบบโครโมโซมที่ใช้ตัวเลขทั่วไปได้ เช่น ตัวเลข 1-100 หรือมากกว่า ซึ่งตัวเลขแต่ละตัวจะบอกถึงลำดับขั้นตอนในการทำงานหรือเดินทาง เช่น ปัญหาการจัดลำดับการผลิต หรือ ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Travelling Salesman Problem: TSP) เป็นต้น

3) การออกแบบโครโมโซมแบบใช้ค่าหรือเครื่องหมาย (Value Encoding) เป็นการออกแบบโครโมโซมที่ใช้ตัวเลขจำนวนจริงหรือใช้อักษรที่เป็นตัวแทนของคำตอบจริงมาใช้ในการแทนค่าในโครโมโซม

2.5.2 การประชากรเริ่มต้น

การประชากรเริ่มต้น (Initial Population) เป็นการสร้างประชากรต้นแบบขึ้นมาเพื่อใช้เป็นจุดเริ่มต้นของขั้นตอนการวิวัฒนาการ ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนแรกที่เกิดขึ้นก่อนที่จะเริ่มกระบวนการของวิธีการเชิงพันธุกรรม (GA) โดยประชากรกลุ่มแรก หรือต้นกำเนิดอาจจะเกิดจากการสุ่ม หรือการกระทำใด ๆ เพื่อให้ได้ประชากรต้นแบบจำนวนหนึ่ง อาจใช้วิธีการเดียวกันหรือต่างกัน โดยจำนวนของประชากรต้นแบบที่สร้างขึ้นมานี้เป็นพารามิเตอร์ที่ต้องตั้งขึ้นมาก่อนที่จะเริ่มกระบวนการของวิธีการเชิงพันธุกรรม (GA) โดยวิธีการหาประชากรเริ่มต้นมีหลายวิธี ดังตัวอย่างต่อไปนี้

1) การสุ่มแบบมีความน่าจะเป็นเท่ากันทุกกรณี (Random) เป็นการสุ่มแบบมีความน่าจะเป็นเท่ากัน ทุกทางเลือกจะมีความน่าจะเป็นเท่ากัน ยกตัวอย่างเช่น ปัญหาการหาขนาดการผลิตในแต่ละสัปดาห์ที่จะตัดสินใจว่าจะผลิตหรือไม่ผลิต ซึ่งยีนที่เป็นไปได้มี 2 ค่าคือ ถ้าผลิตจะมียีนเป็น 1 หรือถ้าไม่ผลิตจะมียีนเป็น 0 เป็นต้น

2) การสุ่มแบบมีความน่าจะเป็นไม่เท่ากัน (Greedy Random) เป็นการสุ่มแบบมีความน่าจะเป็นไม่เท่ากัน หรือที่เรียกว่า Greedy Random ซึ่งแต่ละทางเลือกจะมีความน่าจะเป็นไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรบางตัวในปัญหานั้น ๆ

2.5.3 สมการแทนค่าคำตอบ

สมการแทนค่าคำตอบ (Fitness Function) คือ การหาฟังก์ชันที่ใช้ในการประเมินค่าความเหมาะสมเพื่อให้ได้คะแนนคำตอบต่าง ๆ ที่เป็นไปได้ ซึ่งผลการประเมินความเหมาะสมนี้อาจจะเป็นคำตอบของปัญหาที่ต้องการแก้ปัญหาโดยตรง หรือฟังก์ชันอื่น ๆ ที่ใช้เพื่อประเมินความเหมาะสมเท่านั้น ซึ่งสมการแทนค่าคำตอบคือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จริงของปัญหา แต่ในการออกแบบอัลกอริทึม GA สามารถหาสมการแทนค่าคำตอบด้วยฟังก์ชันอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยอาจจะทำให้ค้นหาคำตอบจากหลากหลายพื้นที่มากขึ้น หรือเพื่อให้คำตอบต้นแบบมีความหลากหลายมากขึ้น เพื่อให้ได้ผลของคำตอบสุดท้ายที่ดี ซึ่งตัวอย่างการหาสมการแทนค่าคำตอบในลักษณะต่าง ๆ มีดังต่อไปนี้

1) สมการแทนค่าคำตอบแบบมีการลงโทษ (Penalty)

สมการแทนค่าคำตอบแบบนี้ส่วนมากจะใช้กรณีที่คำตอบที่ได้มาไม่สามารถใช้เป็นคำตอบของปัญหาที่ต้องการแก้ได้ แต่อาจจะสามารถยอมรับให้เป็นโครโมโซมต้นแบบเพื่อการเดินทางไปสู่พื้นที่คำตอบใหม่ ๆ หรือเพื่อการปรับปรุงคำตอบเฉพาะที่ เพื่อให้ได้คำตอบสุดท้ายที่ดีขึ้น

2) สมการแทนค่าคำตอบที่มีการปรับเปลี่ยนจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์จริง

สมการแทนค่าคำตอบแบบนี้อาจจะมีการปรับเปลี่ยนฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากหรือน้อยก็ได้ เพื่อประโยชน์ในการค้นหาในพื้นที่ที่แตกต่าง เพื่อให้ได้คำตอบที่หลากหลายมากขึ้น โดยในการปรับเปลี่ยนนี้ สมการแทนค่าคำตอบอาจมีความสอดคล้องกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ หรือไม่สอดคล้องเลยก็ได้ แต่ส่วนมากแล้วสมการแทนค่าคำตอบจะไม่ได้เปลี่ยนไปจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหามากนัก แต่อาจจะมีการปรับเปลี่ยนในบางรอบการวนซ้ำเพื่อให้ได้คำตอบที่มีความหลากหลายมากขึ้น

2.5.4 ตัวดำเนินการทางพันธุกรรม

ตัวดำเนินการทางพันธุกรรม (Genetic Operation) คือ ตัวดำเนินการต่าง ๆ เพื่อให้เกิดการถ่ายทอดจากประชากรรุ่นหนึ่งไปสู่อีกรุ่นหนึ่ง ไม่ว่าจะเป็นการคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection) การแลกเปลี่ยนยีนข้ามโครโมโซม (Crossover) การปรับเปลี่ยนยีนภายในโครโมโซม (Mutation) นอกจากวิธีการทั้งสามแล้ว การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับวิธีการทั้งสามนี้ก็มักมีผลกับคำตอบเช่นเดียวกัน พารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการดำเนินการต่าง ๆ ทางพันธุกรรม เช่น ขนาดของประชากรในแต่ละรุ่น ความน่าจะเป็นในการเลือกใช้วิธีการถ่ายทอดพันธุกรรมทั้งสามแบบ เป็นต้น รายละเอียดของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ความน่าจะเป็นในการแลกเปลี่ยนยีนข้ามโครโมโซม

ความน่าจะเป็นในการแลกเปลี่ยนยีนข้ามโครโมโซม (Crossover Probability) คือ ความน่าจะเป็นของการเกิดการแลกเปลี่ยนยีนข้ามโครโมโซมซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0-100 โดยทั่วไปค่าความเหมาะสมของความน่าจะเป็นในการเกิดการแลกเปลี่ยนยีนข้ามโครโมโซมมีค่าประมาณ 60-95% ทั้งนี้แล้วแต่ผู้ออกแบบอัลกอริทึมจะทดสอบหาค่าใดเหมาะสมกับปัญหาประเภทใด และในกรณีที่ไม่เกิดการแลกเปลี่ยนยีนข้ามโครโมโซม โครโมโซมรุ่นลูก (Offspring) จะมีโครโมโซมเหมือนกับโครโมโซมรุ่นพ่อแม่ (Parent) ทุกประการ ปัจจุบันมีการพัฒนาวิธีการแลกเปลี่ยนยีนข้ามโครโมโซมหลากหลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น การแลกเปลี่ยนยีนข้ามโครโมโซมแบบหนึ่งจุด (Single Point Crossover) การแลกเปลี่ยนยีนข้ามโครโมโซมแบบสองจุด (Two Points Crossover) การแลกเปลี่ยนยีนข้ามโครโมโซมแบบตามลำดับ (Order Crossover) การแลกเปลี่ยนยีนข้ามโครโมโซมแบบยึดตำแหน่งเป็นหลัก (Position Based Crossover) การแลกเปลี่ยนยีนข้ามโครโมโซมแบบวนรอบ (Cycle Crossover) และการแลกเปลี่ยนยีนข้ามโครโมโซมแบบการจับคู่ปรับบางส่วน (Partial Mapped Crossover) เป็นต้น

2) ความน่าจะเป็นในการปรับเปลี่ยนยีนภายในโครโมโซม

ความน่าจะเป็นในการปรับเปลี่ยนยีนภายในโครโมโซม (Mutation Probability) คือความน่าจะเป็นของการเกิดการปรับเปลี่ยนยีนภายในโครโมโซมเพื่อให้เกิดโครโมโซมใหม่ในรุ่นลูก (Offspring) หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงยีนภายในโครโมโซม ซึ่งค่าความน่าจะเป็นนี้มีค่าอยู่ในช่วง 0-100 โดยทั่วไปค่าความน่าจะเป็นของการปรับเปลี่ยนยีนภายในโครโมโซมหนึ่ง 100 ยีน ความน่าจะเป็นในการปรับเปลี่ยนยีน 10% หมายความว่าจำนวนตำแหน่งยีนภายในโครโมโซมจะถูกเปลี่ยนแปลงจากเดิมเป็น 10 ตำแหน่ง ในกรณีที่ไม่มี การปรับเปลี่ยนยีนภายในโครโมโซม นั้นหมายความว่ามีการแลกเปลี่ยนยีนข้ามโครโมโซมเกิดขึ้นเพียงอย่างเดียว แต่ถ้าเกิดการปรับเปลี่ยนยีนภายในโครโมโซม 100% จะทำให้ทุกตำแหน่งในโครโมโซมมีการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด ซึ่งปกติแล้ววิธีการเชิงพันธุกรรมกลายเป็นการค้นหาแบบสุ่ม (Random Search)

3) ขนาดของประชากรในแต่ละรุ่น

ขนาดของประชากรในแต่ละรุ่น (Population Size) คือ พารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดขึ้นมาก่อน เพื่อสร้างกลไกในการสร้างคำตอบให้ได้ตามจำนวนที่ต้องการ หากมีประชากรในแต่ละรุ่นมากจะทำให้ได้คำตอบที่หลากหลายขึ้น แต่หากมีจำนวนประชากรมากเกินไปจะทำให้เสียเวลาในการประมวลผลมาก แต่หากน้อยเกินไป คำตอบที่ได้จะมีจำนวนน้อย และค้นหาคำตอบที่ดีได้น้อย โดยปกติจำนวนประชากรจะขึ้นอยู่กับจำนวนหรือองค์ประกอบของคำตอบ ยกตัวอย่างเช่น ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Travelling Salesman Problem: TSP) ที่ต้องเดินทางผ่านเมือง 5 เมือง หรือค่า $N=5$ ค่าจำนวนประชากรในแต่ละรุ่นอาจจะเป็น 5 (N) โครโมโซม 10 (2N) โครโมโซม หรือตัวเลขอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์กับ N เมื่อ N คือ จำนวนหน่วยของปัญหาที่ต้องการตัดสินใจ

2.5.5 รหัสเทียมของวิธีการเชิงพันธุกรรม

รหัสเทียม (Pseudo Code) เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการพัฒนาวิธีการเมตาฮีริสติก รหัสเทียมของวิธีการเชิงพันธุกรรม (GA) ดังแสดงในภาพประกอบ 2.10

Algorithm: Genetic Algorithm	
1	[เริ่มต้น] สร้างคำตอบเริ่มต้นด้วยการสุ่มจำนวน N โครโมโซม
2	[คำนวณค่าสมการแทนค่าคำตอบ] คำนวณหาค่าสมการแทนค่าคำตอบของคำตอบเริ่มต้น
3	[สร้างคำตอบรุ่นลูก] สร้างโครโมโซมรุ่นลูกจนกว่าจะได้จำนวนรุ่นลูกเท่ากับค่า N จากลำดับขั้นต่อไป
4	(1) [เลือกโครโมโซมต้นแบบ] เลือกโครโมโซมต้นแบบ 2 โครโมโซม จาก N โครโมโซม (พ่อ-แม่) โดยใช้ความน่าจะเป็นโดยพิจารณาจากค่าสมการแทนค่าคำตอบ (โครโมโซมที่มีค่าสมการแทนค่าคำตอบดีกว่าจะมีโอกาสถูกเลือกมากกว่า)
5	(2) [แลกเปลี่ยนยีนข้ามโครโมโซม] การแลกเปลี่ยนยีนข้ามโครโมโซมเกิดขึ้นด้วยความน่าจะเป็นในการแลกเปลี่ยนยีน 0.7 หรือ 70%
6	(3) [ปรับเปลี่ยนยีนภายในโครโมโซม] การปรับเปลี่ยนยีนภายในโครโมโซมเกิดขึ้นด้วยความน่าจะเป็นในการปรับเปลี่ยนยีนภายใน 10%
7	[แทนที่] แทนที่โครโมโซมรุ่นพ่อ-แม่ ด้วยโครโมโซมลูก
8	[ทดสอบการแทนที่คำตอบใหม่ที่ดีที่สุด] หากพบคำตอบที่ดีกว่าให้บันทึกไว้ และให้วนซ้ำขั้นตอน [คำนวณค่าสมการแทนค่าคำตอบ] ถึงขั้นตอน [ทดสอบการแทนที่คำตอบใหม่ที่ดีที่สุด] จนกว่าจะครบ 5 รอบ หรือครบเงื่อนไขอื่น ๆ ในการหยุดการทำงาน

ภาพประกอบ 2.10 รหัสเทียมของวิธีการ GA

สำหรับเงื่อนไขในการหยุดการทำงาน (Stop Condition) สามารถกำหนดได้หลากหลายรูปแบบ ยกตัวอย่างเช่น

1) ครบรอบการทำงานที่ได้กำหนดไว้ ยกตัวอย่างเช่น กำหนดให้มีการวนซ้ำจำนวน 100 รอบ จะดำเนินการทำซ้ำในขั้นตอน [คำนวณค่าสมการแทนค่าคำตอบ] ถึงขั้นตอน [ทดสอบการแทนที่คำตอบใหม่ที่ดีที่สุด] จำนวน 100 รอบ เมื่อครบแล้วจะหยุดการทำงาน

2) พบเป้าหมาย หรือคำตอบที่ต้องการ เช่น การกำหนดว่าหากคำตอบได้มากกว่าหรือน้อยกว่าค่าที่กำหนดให้หยุดการทำงาน

3) กำหนดเวลา เช่น กำหนดให้วนซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะครบ 30 นาที หรือครบ 1 ชั่วโมง หลังจากหยุดวนซ้ำ คำตอบที่ดีที่สุดที่พบจะถูกนำมารายงานให้ทราบ

2.6 วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง

วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (Differential Evolution: DE) เป็นอัลกอริทึมที่มีวิวัฒนาการคล้ายวิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) ซึ่งมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนต่างจากวิธีการเชิงพันธุกรรมโดยไม่จำเป็นต้องแปลงค่าตัวแปรการตัดสินใจ (Decision variables) ให้เป็นเลขฐานสอง สามารถใช้ตัวเลขที่เป็นค่าจริงในการคำนวณ จึงทำให้การแก้ปัญหามีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่ดีกว่าวิธีการอื่น ๆ (Storn & Price, 1997) โดยวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างประกอบด้วยขั้นตอน 5 ขั้นตอน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

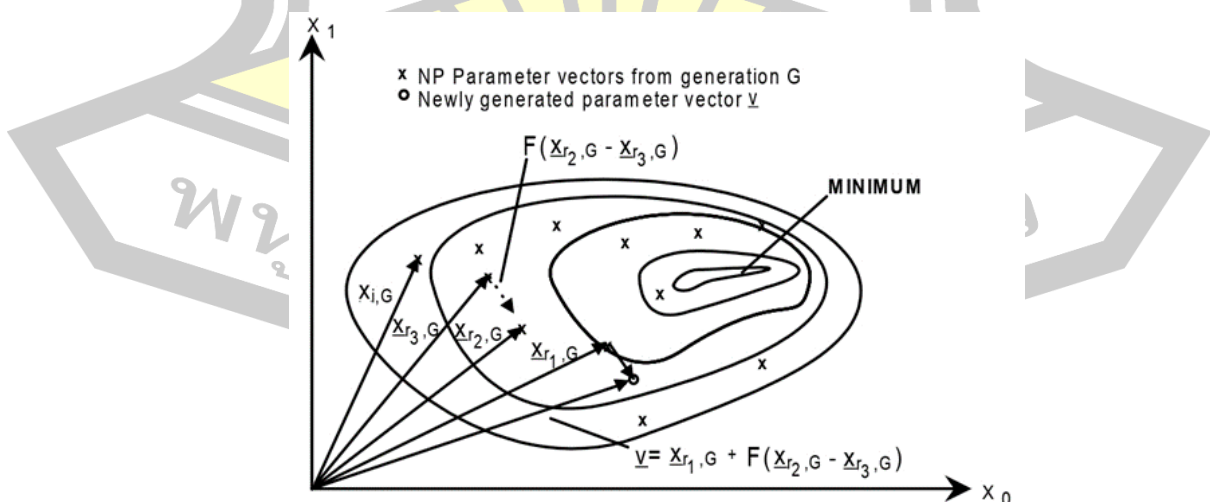
2.6.1 ประชากรเริ่มต้น

ประชากรเริ่มต้น (Initial Population) คือการกำหนดประชากรเริ่มต้นเพื่อนำมาคำนวณหาคำตอบที่ดีที่สุด โดยการสุ่มค่าตัวเลขที่เป็นค่าจริงสำหรับการสุ่มเลือกจำนวนประชากรตั้งต้นภายใต้ข้อจำกัด คือค่า NP (Number of Population) ที่เป็นตัวแปรตัดสินใจ เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความเหมาะสมของประชากร (Fitness Value)

2.6.2 การปรับเปลี่ยนค่าในพิกัด

การปรับเปลี่ยนค่าในพิกัด (Mutation) คือขั้นตอนการกลายพันธุ์ที่ทำให้ได้คำตอบใหม่ที่แปลกแตกต่างไปจากกลุ่มจำนวนประชากรเริ่มต้น ที่เรียกว่าค่า Weighting Factor หรือค่า F ซึ่งประชากรรุ่นที่ถูกปรับเปลี่ยนค่าในพิกัดเรียกว่า ค่าเวกเตอร์เป้าหมาย (Target Vector) โดยมีขั้นตอนย่อย ดังต่อไปนี้ (Qin et al., 2009; ระบุพิพันธ์ ปิตาคะโส, 2559)

- 1) กำหนด Target vector ($X_{i,G}$) โดยที่ $i = 1, 2, \dots, NP$
- 2) สุ่มเลือก Target vector ($X_{r_1,G}, X_{r_2,G}, X_{r_3,G}$) จากประชากรตั้งต้น แต่ต้องไม่ซ้ำกับ Target vector ที่ถูกเลือกไปแล้ว
- 3) ทำการคำนวณหา Mutant vector ($V_{i,G+1}$) จากความสัมพันธ์



ภาพประกอบ 2.11 ตัวอย่างการหาค่า Mutant Vector (Storn & Price, 1997)

ในการปรับเปลี่ยนค่าพิกัดนั้น สามารถทำได้โดยการสุ่มเวกเตอร์มา 3 เวกเตอร์ (ตัวแทน ผลลัพธ์) ได้แก่ $X_{r1,G} / X_{r2,G} / X_{r3,G}$ มาดำเนินการ โดยเวกเตอร์ที่ถูกปรับเปลี่ยนค่าพิกัดไปแล้ว จะถูกเรียกว่า “มิวแทนต์เวกเตอร์” โดยที่ค่ามิวแทนต์เวกเตอร์ ($V_{i,G}$) จะมีค่าเท่ากับ $X_{r1,G}$ รวมกับผลต่างของเวกเตอร์ $X_{r2,G}$ และ $X_{r3,G}$ คูณด้วย F โดยสามารถอธิบายการปรับค่าในพิกัดของเวกเตอร์ได้ ดังสมการ (2-10) และตาราง 2.4

$$V_{i,G+1} = X_{r1,G} + F(X_{r2,G} - X_{r3,G}) \quad (2-10)$$

โดยที่
 $X_{i,G}$ = Target Vector
 $V_{i,G+1}$ = Mutant Vector
 $X_{i,G}, X_{r3,G}$ = Random Vector
 F = Weighting Factor

ตาราง 2.4 กลยุทธ์การสร้าง Mutant Vector

กลยุทธ์ที่	รูปแบบ	สมการการกลายพันธุ์ (Mutation)
Binomial		
1	DE/rand/1/bin	$V_{i,G+1} = X_{r1,G} + F(X_{r2,G} - X_{r3,G})$
2	DE/best/1/bin	$V_{i,G+1} = X_{best,G} + F(X_{r1,G} - X_{r2,G})$
3	DE/rand-to-best/1/bin	$V_{i,G+1} = X_{r1,G} + F1(X_{r2,G} - X_{r3,G}) + F2(X_{best,G} - X_{r1,G})$
4	DE/rand/2/bin	$V_{i,G+1} = X_{r1,G} + F(X_{r2,G} - X_{r3,G} + X_{r4,G} - X_{r5,G})$
5	DE/best/2/bin	$V_{i,G+1} = X_{best,G} + F(X_{r2,G} - X_{r3,G} + X_{r4,G} - X_{r5,G})$
Exponential		
6	DE/rand/1/exp	$V_{i,G+1} = X_{r1,G} + F(X_{r2,G} - X_{r3,G})$
7	DE/best/1/exp	$V_{i,G+1} = X_{best,G} + F(X_{r1,G} - X_{r2,G})$
8	DE/rand-to-best/1/exp	$V_{i,G+1} = X_{r1,G} + F1(X_{r2,G} - X_{r3,G}) + F2(X_{best,G} - X_{r1,G})$
9	DE/rand/2/exp	$V_{i,G+1} = X_{r1,G} + F(X_{r2,G} - X_{r3,G} + X_{r4,G} - X_{r5,G})$
10	DE/best/2/exp	$V_{i,G+1} = X_{best,G} + (X_{r2,G} - X_{r3,G} + X_{r4,G} - X_{r5,G})$

2.6.3 การแลกเปลี่ยนพิกัด

การแลกเปลี่ยนพิกัด (Crossover) คือ ขั้นตอนการผสมสายพันธุ์ ซึ่งจะได้สายพันธุ์ใหม่ของคำตอบที่ดีกว่าและแยกว่าออกมาอย่างหลากหลาย เพื่อค้นหาสายพันธุ์จากตัวแปรตัดสินใจใหม่ ๆ โดยใช้สมการ (2-11) ในการทำ Trial Vector ($U_{i,G+1}$) เพื่อเปรียบเทียบ และวิเคราะห์ในการผสมสายพันธุ์ (Qin et al., 2009) โดยตัวอย่างการ Crossover (Storn & Price, 1997) แสดงภาพประกอบ 2.12

$$U_{i,G+1} = \begin{cases} V_{i,j,G+1} & \text{if } rand_{i,j} \leq CR \text{ or } j = I_{rand} \\ X_{i,j,G} & \text{if } rand_{i,j} > CR \text{ and } j \neq I_{rand} \end{cases} \quad (2-11)$$

โดยที่

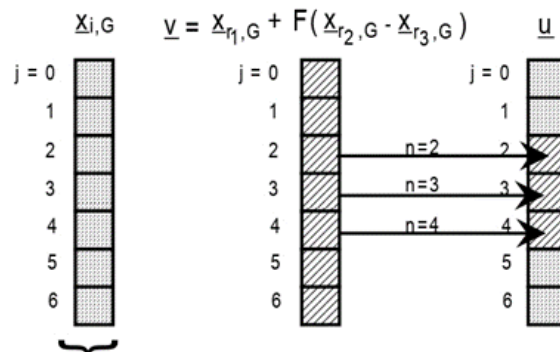
$U_{i,G+1}$ = Trial vector

$V_{i,j,G+1}$ = Mutant vector

$X_{i,j,G}$ = Target vector

$rand_{i,j}$ = การสุ่มตัวเลขที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

CR = Crossover Rate มีเป็นเลขระหว่าง 0.1-0.9



Parameter vector containing the parameters $x_j, j=0,1, \dots, D-1$

ภาพประกอบ 2.12 การ Crossover ของ Target Vector และ Mutant Vector

2.5.4 การคัดเลือก

การคัดเลือก (Selection) คือ ขั้นตอนคัดเลือกประชากรในรุ่นต่อไป ($G+1$) โดยคัดเลือกเฉพาะคำตอบที่ดีกว่า โดยใช้วิธีเปรียบเทียบค่า Function value ระหว่าง Target vector

กับ Trial vector ในกรณีที่ว่า Function value ของ Trial vector ดีกว่า Target vector จะถูกแทนที่ด้วย Trial vector ในรุ่นต่อไป

2.5.5 ดำเนินการซ้ำ

ดำเนินการซ้ำตามขั้นตอนที่ 2 การปรับเปลี่ยนค่าในพิกัด (Mutation) ไปจนถึงขั้นตอนที่ 4 การคัดเลือก (Selection) โดยเปลี่ยนค่า Target Vector จนถึง $i = NP$

2.7 วิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค

วิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาในปี ค.ศ. 1995 (Eberhart & Kennedy, 1995) ซึ่งแนวคิดวิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค ได้นำพฤติกรรมการหาอาหารของฝูงสัตว์ ยกตัวอย่างเช่น ฝูงปลา และฝูงนก เป็นต้น สำหรับเลียนแบบเพื่อคิดการคำนวณเชิงวิวัฒนาการ ซึ่งพฤติกรรมของการหาอาหารอย่างเช่นฝูงนก จะมีลักษณะการบินเพื่อค้นหาอาหารอยู่พื้นที่หนึ่งที่มีอาหารเพียงชิ้นเดียวในบริเวณนั้น โดยนกทุกตัวจะไม่ว่าจะรู้ว่าอาหารอยู่ที่ตำแหน่งใด แต่สัญชาตญาณของพวกมันรู้ว่าอยู่ห่างจากอาหารมากน้อยเพียงใด เมื่อฝูงนกบินไปในแต่ละช่วงจะหาระยะห่างของมันจากแหล่งอาหาร และฝูงนกจะเลือกบินตามนกตัวที่อยู่ใกล้อาหารมากที่สุด จากนั้นก็จะบินช่วงต่อไปโดยที่ฝูงนกจะทำซ้ำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนสามารถถึงแหล่งอาหารมากที่สุด จากวิธีการหาอาหารของฝูงนก จะเห็นได้ว่าในการกำหนดตำแหน่งระยะห่างของตัวมันจากแหล่งอาหาร และการตัดสินใจบินตามนกตัวที่บินอยู่ใกล้แหล่งอาหารมากที่สุดในแต่ละช่วง จะใช้เวลาน้อยมากจนเหมือนมันบินเกาะกลุ่มกันไปแบบต่อเนื่อง PSO เป็นการคำนวณเชิงวิวัฒนาการโดยจำลองการหาอาหารของฝูงนก ซึ่งการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่มีลักษณะการเคลื่อนที่ของนกแต่ละตัวในฝูงจะถูกแทนด้วยอนุภาค (Particle) ในแต่ละอนุภาคจะมีค่าความเหมาะสม (Fitness Values) ที่บอกถึงระยะห่างของตัวมันจากแหล่งอาหาร โดยอนุภาคทั้งหมดจะบินตามอนุภาคที่มีค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดในแต่ละรอบ

2.7.1 แนวคิดของวิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค

แนวคิดของวิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค หรือ PSO ในรูปแบบการหาคำตอบเพื่อแก้ไขปัญหาจะคล้ายกับขั้นตอนของวิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) แต่กระบวนการคำนวณจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน โดยอาศัยการแข่งขันหาคำตอบและไม่มีการแบ่งปันข้อมูลของผลลัพธ์ระหว่างอนุภาคสิ่งมีชีวิตเล็ก ๆ ในหนึ่งอนุภาคที่เป็นตัวแทนคำตอบของปัญหาจะมีการจัดเก็บค่าตัวแปรอยู่สองค่า คือ ค่าเวกเตอร์ระบุตำแหน่ง (Position) และค่าเวกเตอร์ระบุความเร็ว (Velocity) จะเริ่มต้นด้วยการสุ่มหาค่าตำแหน่งของอนุภาคหรือคำตอบขึ้นมาหนึ่งชุด จากนั้นก็จะหาค่าความเหมาะสมที่สุดด้วยการปรับปรุงค่าในแต่ละรอบของการตัดสินใจ โดยอนุภาคแต่ละตัวจะมีการปรับปรุงค่าด้วยการเปลี่ยนตำแหน่งตามค่าที่ดีที่สุดสองค่า คือ 1) ค่าที่ดีที่สุดของการคำนวณที่ผ่านมาของอนุภาคนั้น เรียกว่า ค่าที่ดีที่สุดของอนุภาค (Particle Best: Pbest) และ

2) ค่าที่ดีที่สุดของทั้งกลุ่มที่ผ่านมา ค่านี้นี้จะเรียกว่า ค่าที่ดีที่สุดของสากล (Global Best: Gbest) เมื่อมีการหาค่าที่ดีที่สุดสองค่า คือ Pbest และ Gbest แล้ว จะมีการปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งดังสมการ (2-12)

$$V'_D = weight * V_D + n_1 * random() * (Pbest - X_D) + n_2 * random() * (Gbest - X_D) \quad (2-12)$$

โดยที่

- V'_D = ค่าความเร็วที่คำนวณได้จากอนุภาครุ่นปัจจุบัน
 V_D = ค่าความเร็วที่คำนวณได้จากอนุภาครุ่นก่อน
 $weight$ = ค่าการถ่วงน้ำหนัก
 n_1 และ n_2 = ค่าคงที่ความเร็วในการค้นหา
 $random()$ = ค่าสุ่มที่อยู่ระหว่าง 0 และ 1

การทำงานของ PSO เป็นกระบวนการทำงานที่เป็นรอบ ซึ่งในแต่ละรอบของการทำงานความเร็วของอนุภาคแต่ละตัวจะถูกปรับโดยมีตัวแปรที่สำคัญ 3 ตัว คือ ความเร็วในปัจจุบันของอนุภาคนั้น ข้อมูลที่อนุภาคมีอยู่ (Pbest) และข้อมูลรวมของอนุภาคทั้งกลุ่ม (Gbest) ดังนั้นในหนึ่งอนุภาคเมื่อแทนด้วยพารามิเตอร์ของปัญหาหนึ่งจะประกอบด้วยตัวแปร ดังสมการ (2-13)

$$P_k = \{X, V, Fitness\ value, Gbest, Pbest\} \quad (2-13)$$

โดยที่

- P = อนุภาคประกอบด้วย $P = \{P_1, P_2, \dots, P_K\}$
 K = จำนวนอนุภาค
 X = ตำแหน่งที่อนุภาคที่อยู่ในปัญหา เขียนในรูป $X_D = \{X_1, X_2, \dots, X_D\}$
 D = จำนวนมิติของปัญหา จะถูกกำหนดโดยลักษณะของปัญหาที่ต้องการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด
 V = ค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาค ประกอบด้วยเวกเตอร์ตามขนาดมิติของปัญหา $V_D = \{V_1, V_2, \dots, V_D\}$
 $Fitness\ value$ = ค่าความเหมาะสมของอนุภาคนั้น สามารถคำนวณได้จากฟังก์ชันเป้าหมายซึ่งได้จาก $Fitness\ value = Objective\ Function(x)$
 $Gbest_D$ = ค่าตำแหน่งที่อนุภาคนั้นได้ค่าความเหมาะสมสูงสุด
โดย $Gbest_D = \{Gbest_1, Gbest_2, \dots, Gbest_D\}$
 $Pbest$ = ค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดของกลุ่มอนุภาคในรุ่นปัจจุบัน

2.7.2 ขั้นตอนวิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค

วิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค ประกอบด้วยกระบวนการทั้งหมด 7 ขั้นตอน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) กำหนดประชากรเริ่มต้นในการทำงาน โดยใช้การสุ่มตำแหน่งค่าให้ X และ ค่าความเร็วการเคลื่อนที่ให้ V ของอนุภาคแต่ละตัว ดังสมการ (2-14) และ (2-15) สุ่มค่าพารามิเตอร์ให้ตัวแปรของ X และ V ตามจำนวนมิติของปัญหา และเก็บค่า V ซึ่งเป็น พารามิเตอร์เสริมคำนวณความเร็วการเคลื่อนที่

$$X_D = \text{Function Random Value } () \quad (2-14)$$

$$V_D = \text{Function Random Value } () \quad (2-15)$$

2) สำหรับอนุภาคแต่ละตัวจะมีการเปลี่ยนตำแหน่ง โดยพยายามมุ่งเข้าหาคำตอบ ของปัญหาที่กำหนด และประเมินค่าคำตอบนั้น ๆ (Fitness Evaluate) การคำนวณค่าฟังก์ชันความ เหมาะสมของอนุภาค โดยขั้นตอนการแปลงตำแหน่ง (X) เป็นคำตอบขึ้นอยู่กับแต่ละฟังก์ชัน เป้าหมาย ดังสมการ (2-16)

$$\text{Fitness Value} = \text{Objective Function } (X_D) \quad (2-16)$$

3) สำหรับอนุภาคแต่ละตัวปรับตำแหน่งที่ดีที่สุดของตัวเอง โดยการเปรียบเทียบกับ ค่า Pbest ซึ่งหาค่าความเหมาะสมของแต่ละอนุภาคดีกว่าค่า Pbest ให้ปรับค่า Pbest เท่ากับ ค่าความเหมาะสมของตำแหน่งนั้น ๆ

4) การเก็บค่าตำแหน่งที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เป็นตำแหน่งที่ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดย พิจารณาจากการวนรอบตั้งแต่รอบแรกจนถึงรอบปัจจุบัน ซึ่งแตกต่างจาก Pbest ที่พิจารณาการเก็บ ค่าที่ดีที่สุดเฉพาะรอบปัจจุบัน Gbest จึงเหมือนการเก็บค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดของภาพรวม ซึ่งเงื่อนไขการปรับปรุงดังแสดงในสมการ (2-17)

IF Fitness value > Gbest THEN

$$Gbest_D = X_D \text{ ENDIF} \quad (2-17)$$

IF Fitness value > Gbest THEN $Gbest_D = X_D$ ENDIF

5) การปรับความเร็วการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาค ดังสมการ (2-15)

6) การปรับปรุงค่าตำแหน่งของแต่ละอนุภาค โดยใช้ผลลัพธ์จากการคำนวณจาก สมการ (2-15) ทำให้ได้ตำแหน่งใหม่ที่อนุภาคจะเคลื่อนที่ไป จากนั้นนำผลลัพธ์มาปรับปรุง ซึ่งการ

ปรับปรุงด้วยการบวกค่าเพิ่มนั้นจำเป็นต้องตรวจสอบขอบเขตของปัญหาเพื่อป้องกันไม่ให้ตำแหน่งเกินค่าขอบเขตของปัญหา ดังสมการ (2-18)

$$X'_D = X_D + V'_D \quad (2-18)$$

7) การตรวจสอบการสิ้นสุดในการวนรอบ เงื่อนไขที่ตรวจสอบแบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ เมื่อผลลัพธ์ที่ได้มีค่าสูง หรือดีกว่าค่าตอบที่ต้องการให้หยุดการทำงาน หรือมีจำนวนรอบถึงค่าที่กำหนดไว้ แต่ถ้าเงื่อนไขการหยุดทำงานไม่สมบูรณ์ให้กลับไปทำงานตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2

2.8 การหาค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์

การหาค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Pareto Front) เป็นวิธีการที่ใช้เพื่อค้นหาวิธีแก้ปัญหาที่ดีที่สุดภายใต้เงื่อนไขหรือข้อจำกัดบางประการ ประกอบด้วย 3 วิธีการซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (ภรณ์ยา อามฤครัตน์ และพยุ่ง มีสัจ, 2555)

2.8.1 วิธีการหาค่าเหมาะสม เป็นวิธีการที่ใช้เพื่อค้นหาวิธีแก้ปัญหาที่ดีที่สุดภายใต้เงื่อนไขหรือข้อจำกัดบางประการ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียว และฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์ สำหรับปัญหาประเภทนี้อาจมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ขัดแย้งกัน หรือไปในทิศทางเดียวกัน และเรียกว่าการเพิ่มประสิทธิภาพแบบหลายเกณฑ์ หรือปัญหาการปรับค่าเวกเตอร์ให้เหมาะสม การเพิ่มประสิทธิภาพนี้ประกอบด้วยเวกเตอร์ของตัวแปรการตัดสินใจ ข้อจำกัด และฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สามารถเรียกได้ว่าเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มักจะเกี่ยวข้องกับการหาค่าสูงสุด

2.8.2 ชนิดของปัญหาสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่มีหลายวัตถุประสงค์ เป็นวิธีการค้นหากลุ่มคำตอบภายในช่องว่างคำตอบที่เป็นไปได้ เพื่อหาค่าต่ำสุดหรือค่าสูงสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในแต่ละฟังก์ชันพร้อมกัน ผลลัพธ์ของการแก้ปัญหาเรียกว่าชุดกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดของการแก้ปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ที่ประกอบด้วยวัตถุประสงค์ m และตัวแปรการตัดสินใจ ดังสมการ (2-19)

$$\text{Minimize or Maximize: } [f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)] \quad (2-19)$$

โดยที่

x = เวกเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ

$f_i(x)$ = ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i เมื่อ $i = 1, 2, \dots, m$

ดังนั้น ชนิดแบบจำลองปัญหาการหาค่าเหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์จะมองหา
 เวกเตอร์โซลูชัน x ภายใต้ m ซึ่งเป็นข้อจำกัดแบบอสมการดังสมการ (2-20) หรือภายใต้ n ข้อจำกัด
 แบบสมการ ดังสมการ (2-21)

$$g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m \quad (2-20)$$

$$h_i(x) = 0, i = 1, 2, \dots, m \quad (2-21)$$

การกำหนดขอบเขตของโซลูชันที่เป็นไปได้โดยทั่วไปแล้ว มี 3 ลักษณะ คือ

- 1) แบบทุกฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต้องการหาผลลัพธ์ที่น้อยที่สุด
- 2) แบบทุกฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต้องการหาผลลัพธ์ที่มากที่สุด
- 3) แบบสับสนทาง คือ บางฟังก์ชันวัตถุประสงค์บางอย่างต้องการหาผลลัพธ์ที่
 น้อยที่สุด บางอย่างต้องการหาผลลัพธ์ที่มากที่สุด

ในการหาค่าที่เหมาะสมของหลายวัตถุประสงค์ สามารถแปลงเป็นรูปแบบของ
 โซลูชันต่ำสุดหรือสูงสุด เช่น การเปลี่ยนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งหมดที่มีค่าตบน้อยไปเป็นมากที่สุด

ตัวอย่างการแก้ปัญหาการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ การหาค่าตอบ
 ที่น้อยที่สุดจากสมการ (2-22) โดยที่การค้นหาค่าตอบถูกกำหนดจากเวกเตอร์ตัวแปรการตัดสินใจ
 ภายใต้เงื่อนไขที่จะเป็นสิ่งที่ใช้เพื่อกำหนดขอบเขตที่น้อยที่สุด

$$\text{Minimize: } [f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)] \quad (2-22)$$

$$\text{ข้อจำกัด } g(x) \leq 0$$

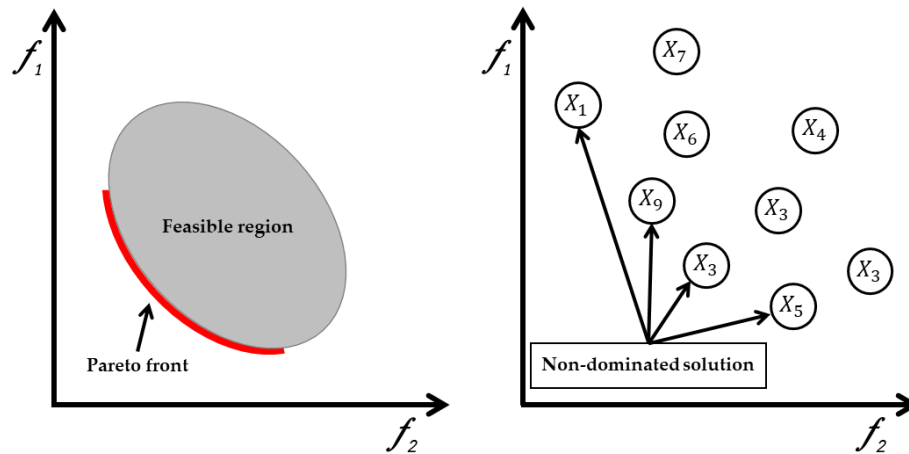
โดยที่

$$x = \text{เวกเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ}$$

$$f_i(x) = \text{ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ } i$$

$$g_i(x) = \text{เวกเตอร์ข้อจำกัดที่ } i$$

โดยที่คำตอบใดอยู่ในขอบเขตคำตอบที่เป็นไปได้ เป็นคำตอบที่ไม่มีคำตอบใดดีกว่า
 และไม่มีคำตอบใดที่จะครอบงำคำตอบชุดนี้ได้ คำตอบนี้เรียกว่า Pareto Optimal และสมาชิก
 คำตอบทั้งหมดที่อยู่ในกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเรียกว่า กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Pareto
 Optimal Set) หรือกลุ่มคำตอบที่ไม่ได้ถูกครอบงำจากทุกคำตอบ (Non-Dominated Set) ดังแสดง
 ในภาพประกอบ 2.13 (ภรณ์ยา อำนวยรัตน์ และพยุง มีสีจ, 2555)



ภาพประกอบ 2.13 กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ f_1 และ f_2

2.8.3 การวัดประสิทธิภาพของกลุ่มคำตอบกลุ่มหนึ่งที่ดีที่สุด

ในการสร้างความแตกต่างของโซลูชันแบบหลายวัตถุประสงค์ ด้วยปัญหาวัตถุประสงค์เดียวเป็นคำตอบจากการค้นหาผลลัพธ์ของวิธีการแก้ปัญหาแบบวัตถุประสงค์เดียว คือคำตอบเดียวเท่านั้น ปัญหาหลายวัตถุประสงค์จะได้คำตอบที่ดีที่สุดในแง่ของขอบเขตกลุ่ม ดังนั้นขอบเขตของกลุ่มการตอบสนองจึงถือเป็นขอบเขตคำตอบที่ดีก็ต่อเมื่อสามารถวัดประสิทธิภาพการตอบสนองได้ใกล้เคียงกับพारेโตที่เหมาะสมที่สุดเท่านั้น กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดคือการวัดคุณภาพของคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึม เช่น การบรรจบกันของกลุ่มคำตอบจริง และการแจกแจงกลุ่มคำตอบที่แท้จริง เป็นต้น การวัดประสิทธิภาพของคำตอบมีขั้นตอน ดังนี้

1) การวัดประสิทธิภาพการบรรจบกันของกลุ่มคำตอบจริงเป็นการวัดการบรรจบกันของกลุ่มคำตอบ ได้มาจากการเปรียบเทียบระยะห่างจากสมาชิกของกลุ่มคำตอบสำหรับคำตอบทั้งหมดที่ให้กับกลุ่มคำตอบที่ถูกต้อง ดังในสมการ (2-23) และ สมการ (2-24)

$$\text{Convergence (A)} = \frac{\sum_{i=1}^{|\hat{A}|} d_i^t}{|\hat{A}|} \quad (2-23)$$

$$d_i^t = \min_{j=1}^{|\hat{A}|} \sqrt{\sum_{k=1}^k \left[\frac{f_k(x) - f_k(y)}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} \right]^2} \quad (2-24)$$

โดยที่

Convergence (A) = ตัวชี้วัดการลู่เข้าของกลุ่มคำตอบที่แท้จริง

\hat{A} = เซตคำตอบที่แท้จริง

f_k^{\min} = ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ k^{th} ที่มีค่าน้อยที่สุด

$$\begin{aligned}
 f_k^{max} &= \text{ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ } k^{th} \text{ ที่มีค่ามากที่สุด} \\
 K &= \text{จำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์} \\
 |A| &= \text{จำนวนคำตอบที่แท้จริงในเซต A}
 \end{aligned}$$

d_i^t คือ ระยะห่างระหว่างคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ i^{th} จากขอบของกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (y) และโซลูชันที่ได้ (x) ถ้าค่าประสิทธิภาพชนิดนี้มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ถือว่ากลุ่มคำตอบขั้นตอนวิธีนั้นเป็นกลุ่มคำตอบที่ลู่เข้าใกล้กลุ่มคำตอบที่แท้จริง

2) การวัดประสิทธิภาพของคำตอบด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่หาได้ (Spread Measurement) เป็นตัวชี้วัดที่บอกการกระจายของกลุ่มคำตอบดังสมการ (2-25) และสมการ (2-26)

$$\text{spread}(A) = \frac{sd_f + sd_l + \sum_{i=1}^{|A|-1} \|sd_i - \overline{sd}\|}{sd_f + sd_l + (|A| - 1)\overline{sd}} \quad (2-25)$$

$$sd_i = \sqrt{\sum_{k=1}^k \left[\frac{f_k(x_i) - f_k(x_{i+1})}{f_k^{max} - f_k^{min}} \right]^2} \quad (2-26)$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
 \text{spread}(A) &= \text{ตัวชี้วัดที่บอกการกระจายของกลุ่มคำตอบ} \\
 sd_f \text{ และ } sd_l &= \text{ระยะห่างของคำตอบปลายสุดทั้งสองด้าน ของเส้นขอบเขตกลุ่มคำตอบที่หาได้} \\
 sd_i &= \text{ระยะของคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกันในเซตคำตอบที่ดีที่สุดที่หาได้} \\
 |A| &= \text{จำนวนคำตอบที่หาได้} \\
 Sd &= \text{ค่าเฉลี่ยของระยะทาง } sd_i
 \end{aligned}$$

ถ้าค่าประสิทธิภาพมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ถือว่ากลุ่มคำตอบวิธีนั้นจะมีคำตอบที่มีลักษณะการกระจายที่สม่ำเสมอตลอดเส้นขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด

2.9 วิธีการ TOPSIS

วิธีการ TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution) เป็นแนวคิดในการแก้ปัญหาเพื่อหาค่าที่ใกล้เคียงกับค่าอุดมคติบวกและลบ เป็นวิธีการวิเคราะห์การตัดสินใจแบบหลายทางเลือกเพื่อค้นหาทางเลือกที่ดีที่สุดที่เน้นถึงความเหมาะสมกับการตัดสินใจทั้งด้านบวกและด้านลบ โดยมีหลักการคือ หาทางเลือกที่มีสมรรถนะโดยรวมใกล้เคียงกับค่าที่

ที่ดีที่สุดในแต่ละเกณฑ์ และรวมทั้งหมดแล้วต้องห่างจากค่าที่แย่ที่สุดของแต่ละเกณฑ์เช่นกัน (Hwang & Yoon, 1981) ดังนั้นแนวทางดังกล่าวจึงถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาต่าง ๆ สำหรับการวิเคราะห์ เป้าหมายในอุดมคติที่ตั้งไว้ และตัวเลือกใดมีค่าเป้าหมายในอุดมคติเชิงบวกมากที่สุด และห่างจาก อุดมคติเชิงลบมากที่สุด คือ ตัวเลือกที่ดีที่สุด (อภิรดี สรวีสูตร, 2559) การประยุกต์ใช้วิธีการ TOPSIS ผู้วิเคราะห์ต้องกำหนดให้ค่าน้ำหนักของความสำเร็จกับเกณฑ์ตัดสินใจของแต่ละเกณฑ์ (ธีรยุทธ มุเล็ง, 2562) และขั้นตอนของ TOPSIS มีดังต่อไปนี้ (ภัชรี นิมศรีกุล, 2551)

- 1) กำหนดกลุ่มทางเลือกที่เป็นไปได้
- 2) ทำแอตทริบิวต์ของชั้นข้อมูลแต่ละชั้นให้เป็นมาตรฐาน (Standardize) หรือทำให้เป็นปกติ (Normalization) ด้วยการปรับข้อมูลของแต่ละเกณฑ์ที่อยู่ในแต่ละหน่วยที่แตกต่างกันให้มีมาตรฐานเดียวกัน
- 3) กำหนดค่าถ่วงน้ำหนักของความสำเร็จของแต่ละเกณฑ์ให้อยู่ในช่วง 0-1 โดยเมื่อรวมค่าที่ถ่วงน้ำหนักของทุกข้อมูลแล้ว ต้องมีค่าเท่ากับ 1
- 4) คูณค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละชั้นข้อมูลกับข้อมูลเรื่องนั้น ๆ
- 5) ให้แต่ละชั้นของข้อมูลกำหนดค่าสูงสุดที่เป็นค่าในอุดมคติเชิงบวกคือค่าที่ดีที่สุดในแต่ละเกณฑ์ เมื่อเปรียบเทียบจากทางเลือกทั้งหมดที่มี รวมถึงกำหนดค่าต่ำสุดที่เป็นค่าในอุดมคติเชิงลบ คือค่าที่ต่ำที่สุดในแต่ละเกณฑ์เมื่อเปรียบเทียบจากทางเลือกทั้งหมดที่มี
- 6) คำนวณระยะห่างระหว่างจุดในอุดมคติเชิงบวกแต่ละชั้นใช้สมการ (2-27) และอุดมคติเชิงลบแต่ละชั้นใช้สมการ (2-28)

$$s_{i+} = \sqrt{\sum (v_{ij} - v_{+i})^2} \quad (2-27)$$

$$s_{i-} = \sqrt{\sum (v_{ij} - v_{-i})^2} \quad (2-28)$$

โดยที่

s_{i+} = ระยะห่างระหว่างจุดในอุดมคติเชิงบวก

v_{+i} = ค่าสูงสุดในอุดมคติเชิงบวก

s_{i-} = ระยะห่างระหว่างจุดในอุดมคติเชิงลบ

v_{-i} = ค่าสูงสุดในอุดมคติเชิงลบ

v_{ij} = ข้อมูลคุณลักษณะ

- 7) คำนวณความสัมพันธ์ในการเข้าใกล้จุดอุดมคติ (C_{i+}) โดยใช้สมการ (2-29) ค่า C_{i+} จะมีค่าอยู่ระหว่าง $0 < C_{i+} < 1$ ถ้าเข้าใกล้หนึ่งแสดงว่าเข้าใกล้จุดอุดมคติเชิงบวก

$$c_{i+} = \frac{S_{i+}}{S_{i+} + S_{i-}} \quad (2-29)$$

8) เรียงลำดับทางเลือกทั้งหมดตามค่า c_{i+} โดยทางเลือกที่ดีที่สุดคือทางเลือกที่มีค่า c_{i+} มากที่สุด

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 งานวิจัยต่างประเทศ

งานวิจัยที่ประยุกต์ใช้เครือข่ายบริเวณกว้างที่ใช้พลังงานต่ำ (LPWAN) ในเรื่อง การเปรียบเทียบเทคโนโลยี LPWAN สำหรับการประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยี IoT ที่มีขนาดใหญ่ (Mekki et al., 2019) โดยทำการเปรียบเทียบ 3 เทคโนโลยีคือ Sigfox, LoRa และ NB-IoT ซึ่งผลสรุป เทคโนโลยี LoRa มีความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยี IoT ที่มีขนาดใหญ่

งานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาการเลือกแพ็คเกจการกระจายในเครือข่าย LoRaWAN ที่มีหลายเกตเวย์ (Loubany et al., 2020) เป็นการประเมินประสิทธิภาพของเครือข่าย LoRaWAN ด้วยการเข้าถึงในรูปแบบ Aloha โดยมีการเลือกแพ็คเกจการกระจายจำนวน 3 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1 จำนวน 1 เกตเวย์ รูปแบบที่ 2 จำนวน 2 เกตเวย์ และรูปแบบที่ 3 จำนวน 4 เกตเวย์ ผลการทดลองรูปแบบที่ 3 มีการครอบคลุมพื้นที่ได้มากที่สุด และในระยะพื้นที่การส่งสัญญาณมากกว่า 10 กิโลเมตร รูปแบบที่ 3 จะมีประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นการเลือกตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่อย่างเหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญ

งานวิจัยผลกระทบของระยะทางระหว่างเกตเวย์ต่อประสิทธิภาพของ LoRaWAN (Citoni et al., 2021) ได้ศึกษาเงื่อนไขการหยุดทำงานในเครือข่าย LoRaWAN ใช้การจำลองเวลาแบบไม่ต่อเนื่องของเครื่องจำลองเครือข่าย (Network Simulator 3: NS-3) และเงื่อนไขการหยุดทำงานของเครือข่าย LoRaWAN เช่น ข้อจำกัดของรอบการทำงาน (Duty Cycle Limitations) และ อุปกรณ์อยู่นอกช่วงครอบคลุม (Device out of Coverage Range) เป็นต้น ผลการวิจัยพบว่า 2 เกตเวย์ จะมีการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางสัมพันธ์กับคุณภาพการให้บริการ (Quality of Service: QoS) ของเครือข่ายผ่านเครื่องจำลองเครือข่าย NS-3 โดยมีความเกี่ยวข้องกับอัตราการความสำเร็จในการส่งข้อมูล (Packet Delivery Ratio: PDR) และเงื่อนไขการหยุดทำงานในสถานการณ์อัปลิงค์ (Uplink) ซึ่งไม่ควรเลือกตำแหน่งที่ตั้งของเกตเวย์สองเกตเวย์ในระยะใกล้ หรือ ไกลกันเกินไปและควรหลีกเลี่ยงแพ็คเกจการกระจายที่ SF11 และ SF12

งานวิจัยการเลือกตำแหน่งเกตเวย์ที่เหมาะสมที่สุดของเครือข่าย LPWAN โดยใช้ Fuzzy C-Means (Matni et al., 2019) การวิเคราะห์มีการใช้คุณภาพของการให้บริการ ค่าใช้จ่าย ด้านต้นทุน และการดำเนินการ ในการพิจารณา สำหรับการเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมของเกตเวย์ จำนวน 16 และ 25 เกตเวย์ ด้วยกลยุทธ์ที่แตกต่างกัน ซึ่งโดยทั่วไปเกตเวย์ 25 เกตเวย์จะมี

ประสิทธิภาพดีกว่า 16 เกตเวย์ แต่การเลือกตำแหน่งเกตเวย์ที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้อัลกอริทึม Fuzzy C-Means สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเกตเวย์ 16 ให้เทียบเท่า 25 เกตเวย์

งานวิจัยการใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกสำหรับการเลือกตำแหน่งเกตเวย์ในเครือข่าย LoRa ขนาดใหญ่ (Grochla & Potys, 2020) เป็นการเลือกตำแหน่งเกตเวย์สำหรับกระจายสัญญาณให้กับอุปกรณ์สมาร์ตมิเตอร์ที่กระจายอยู่ทั่วเมือง โดยใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกเพื่อเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด และให้สัญญาณ LoRa สามารถกระจายสัญญาณให้กับอุปกรณ์สมาร์ตมิเตอร์ได้อย่างครอบคลุม ซึ่งมีการกำหนดขีดจำกัดของเกตเวย์เกี่ยวกับขนาดความจุตามแพ็คเกจการกระจายการใช้ช่องสัญญาณ และขีดจำกัดของความน่าจะเป็นที่จะเกิดการชนกันของแพ็คเกจ (Package collisions) ผลการวิจัยพบว่า อัลกอริทึมฮิวริสติกสามารถเลือกตำแหน่งที่ใกล้เคียงที่สุด และกระจายสัญญาณได้อย่างครอบคลุม

งานวิจัยการประยุกต์ใช้วิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้ (VaNSAS) สำหรับปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบเย็บเสื้อผ้าสำเร็จรูปแบบเส้นตรงประเภทที่ 2 ของกรณีศึกษา และสำหรับปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบเส้นตรงประเภทที่ 2 ของปัญหามาตรฐาน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหารอบเวลาการผลิตที่น้อยที่สุด (Jirasirerd et al., 2020) การทดสอบกับสองกลุ่มคือชุดข้อมูล (1) SALBP-2 และ (2) SALBP-2M ผลการวิจัยพบว่าวิธีการที่เสนอนั้นมีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีการแบบเดิมที่มีอยู่

งานวิจัยการประยุกต์ใช้วิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้ (VaNSAS) สำหรับปัญหาการปรับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการเชื่อมอลูมิเนียมด้วยแรงเสียดทาน (Chainarong et al., 2021) พารามิเตอร์ในการเชื่อม ได้แก่ ความเร็วในการหมุน ความเร็วในการเชื่อม ความเอียงของเครื่องมือ รูปแบบของหัวพิน และทิศทางการหมุน ผลการวิจัยพบว่า ความต้านทานแรงดึงที่เกิดจากวิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้ สูงกว่าค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้รับจากพารามิเตอร์ตัวเพิ่มประสิทธิภาพ RSM 3.67% พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด คือ ความเร็วในการหมุน 2200 รอบต่อนาที ความเร็วในการเชื่อม 108.34 มม./นาที ความเอียงของเครื่องมือ 1.23 องศา รูปแบบของหัวพินเป็นแบบหกเหลี่ยม และทิศทางการหมุนตามเข็มนาฬิกา

งานวิจัยการประยุกต์ใช้วิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้ (VaNSAS) สำหรับปัญหาการจัดตารางเครื่องจักรคู่ขนาน เพื่อลดการใช้พลังงานโดยพิจารณาจากลำดับความสำคัญของงาน และการควบคุมเวลาที่งานทุกงานเสร็จสมบูรณ์ (Nanthapodej et al., 2021) ตัวอย่างในการวิจัยใช้สามกลุ่ม ได้แก่ ขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ ผลการทดลองพบว่า วิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้ มีประสิทธิภาพดีที่ที่สุด สามารถค้นหาวิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุด

งานวิจัยการประยุกต์ใช้วิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้ (VaNSAS) สำหรับการหาตำแหน่งที่ตั้งของศูนย์จัดซื้อและการจัดการเส้นทางในการขนส่งทาง

การเกษตรที่เหมาะสมเพื่อลดต้นทุนเชื้อเพลิง (Theeraviriya et al., 2020) ผลการวิจัยพบว่า วิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้ สามารถค้นหาวิธีแก้ปัญหสำหรับปัญหาทุกขนาด โดยใช้เวลาประมวลผลน้อยเมื่อเทียบกับ Lingo ในตัวอย่างขนาดกลาง และขนาดใหญ่ VaNSAS สามารถลดเวลาในการประมวลผลได้ 99.91% และ 99.86% ตามลำดับ

งานวิจัยการประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาย่านใกล้เคียงผันแปรแบบ 2 เฟส สำหรับแก้ปัญหาการจัดเส้นทางสินค้าคงคลังแบบหลายผลิตภัณฑ์ (Mjirda et al., 2014) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดระยะทาง สำหรับการแก้ปัญหาผู้วิจัยเสนออัลกอริทึม 2 แบบคือ Variable Neighborhood Descent และ Variable Neighborhood Search จากผลการวิจัยพบว่าอัลกอริทึมทั้ง 2 แบบที่ผู้วิจัยได้นำเสนอนั้นสามารถหาคำตอบที่ดีที่สุด และมีประสิทธิภาพในการประมวลผลที่ดี

งานวิจัยการประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาย่านใกล้เคียงผันแปร สำหรับแก้ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่มีเงื่อนไขความจุของยานพาหนะ (Amous et al., 2017) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดระยะทาง จากผลการวิจัยพบว่าวิธีการค้นหาย่านใกล้เคียงผันแปร (Variable Neighborhood Search: VNS) สามารถประมวลผล และสามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้

2.10.2 งานวิจัยในประเทศ

งานวิจัยการสร้างแบบจำลองการสูญเสียคลื่นสัญญาณวิทยุในเขตพื้นที่เมืองของประเทศไทยโดยใช้สายอากาศชนิดทิศทางเดียว บนเทคโนโลยีการสื่อสาร LoRaWAN สำหรับสมาร์ตมิเตอร์ (เอกพงศ์ คงสวัสดิ์, 2562) ได้สร้างแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทาง (Path Loss Model) ของคลื่นสัญญาณวิทยุในพื้นที่เขตเมืองของประเทศไทย โดยการใช้วิธีการเชิงประจักษ์ (Empirical Method) และการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) ผลการวิจัยพบว่าสายอากาศไมโครสตริปมีสมรรถนะใกล้เคียงกับสายอากาศเชิงพาณิชย์ในสภาพแวดล้อมเดียวกัน

งานวิจัยการประยุกต์ใช้วิธีเมตาฮิวริสติกส์ (นันทพงศ์ นันทสำเริง, 2553) โดยได้ออกแบบอัลกอริทึม 2 แบบคือ วิธีการค้นหาคำตอบเฉพาะที่วนซ้ำ และวิธีการค้นหาคำตอบแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียง เพื่อแก้ปัญหาการเลือกสถานที่ตั้งและจัดเส้นทางขนส่งแบบหลายลำดับขั้นและหลายวัตถุประสงค์เป็นปัญหาขนาดเล็กที่มีจำนวนโรงงาน 13 แห่ง และนำมาแก้กับปัญหาจำลองที่มีขนาดเล็ก 20 แห่ง ขนาดกลาง 30 แห่ง และขนาดใหญ่ 50 แห่ง ตามลำดับ จากผลการวิจัยพบว่าวิธีการค้นหาคำตอบเฉพาะที่วนซ้ำ และวิธีการค้นหาคำตอบแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียง สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ทั้งปัญหาขนาดเล็กและขนาดกลาง แต่เมื่อเทียบเวลาในการค้นหาคำตอบวิธีการค้นหาคำตอบแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียง สามารถใช้เวลาค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดน้อยกว่าวิธีการค้นหาคำตอบเฉพาะที่วนซ้ำ และสำหรับปัญหาขนาดใหญ่ที่โรงงาน 50 แห่ง วิธีการค้นหาคำตอบแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงนั้น มีประสิทธิภาพในการหาคำตอบที่ดีกว่าวิธีการค้นหาคำตอบเฉพาะที่วนซ้ำ

งานวิจัยการประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาในย่านใกล้เคียงแปรผัน สำหรับแก้ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะแบบพลวัตที่มีกรอบเวลา (ยุทธพงษ์ พรหมสีนอง, 2558) โดยมีเป้าหมายเพื่อ

พยายามให้เกิดค่าใช้จ่ายรวมในการขนส่งน้อยที่สุด ซึ่งค่าใช้จ่ายประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการเลือกใช้นานพาหนะ (Fixed Cost) ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการเดินทาง (Variable Cost) และค่าปรับที่เกิดขึ้นเนื่องจากการละเมิดกรอบเวลา (Penalty Cost) โดยการศึกษาได้นำวิธีการค้นหาในย่านใกล้เคียงแปรผันไปเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับวิธีการเมตาฮิวริสติกส์ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น ได้แก่ วิธีการค้นหาเฉพาะที่แบบวนรอบซ้ำ วิธีการจำลองการอบอ่อน วิธีการเชิงพันธุกรรม และวิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค จากผลการวิจัยพบว่าวิธีการค้นหาในย่านใกล้เคียงแปรผันให้คุณภาพคำตอบที่ดีกว่าวิธีการเมตาฮิวริสติกส์ที่พัฒนาขึ้น



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอวิธีดำเนินการวิจัย การเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ ด้วยวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง (Modified Variable Neighborhood Strategy Adaptive Search: M-VaNSAS) ผู้วิจัยได้แบ่งการนำเสนอผลการวิจัยออกเป็น 4 ส่วน คือ (1) การออกแบบงานวิจัย (2) กรณีศึกษา (3) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหากรณีศึกษา และ (4) การหาความเหมาะสมที่สุดสำหรับการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การออกแบบงานวิจัย

ขั้นตอนดำเนินการวิจัย การหาความเหมาะสมที่สุดสำหรับการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ ด้วยวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง สามารถกำหนดได้เป็น 3 ระยะ คือ ระยะเตรียมการ ระยะดำเนินการ และระยะหลังดำเนินการ ซึ่งขั้นตอนดำเนินการวิจัยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1.1 ระยะเตรียมการ

- 1) ศึกษาเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) การเก็บรวบรวมข้อมูล
- 3 ออกแบบและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาความเหมาะสมที่สุดสำหรับการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ ด้วยวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง

3.1.2 ระยะดำเนินการ

ในระยะดำเนินการจะเป็นขั้นตอนของการหาความเหมาะสมที่สุดสำหรับการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ โดยใช้กรณีศึกษาในเขตพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี ซึ่งในระยะดำเนินการประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) พัฒนาอัลกอริทึมการถอดรหัสคำตอบสำหรับหาความเหมาะสมที่สุดสำหรับการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่
- 2) เขียนโปรแกรมเพื่อทดสอบอัลกอริทึมในการหาความเหมาะสมที่สุดสำหรับการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ โดยในขั้นตอนนี้เป็นการเขียนโปรแกรมสำหรับนำอัลกอริทึมการถอดรหัสคำตอบ ให้ทำงานร่วมกับวิธีการทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (Differential Evolution: DE) วิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) และ

วิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง (Modified Variable Neighborhood Strategy Adaptive Search: M-VaNSAS) สำหรับหาความเหมาะสมที่สุดสำหรับการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ กับกรณีศึกษาในเขตพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี

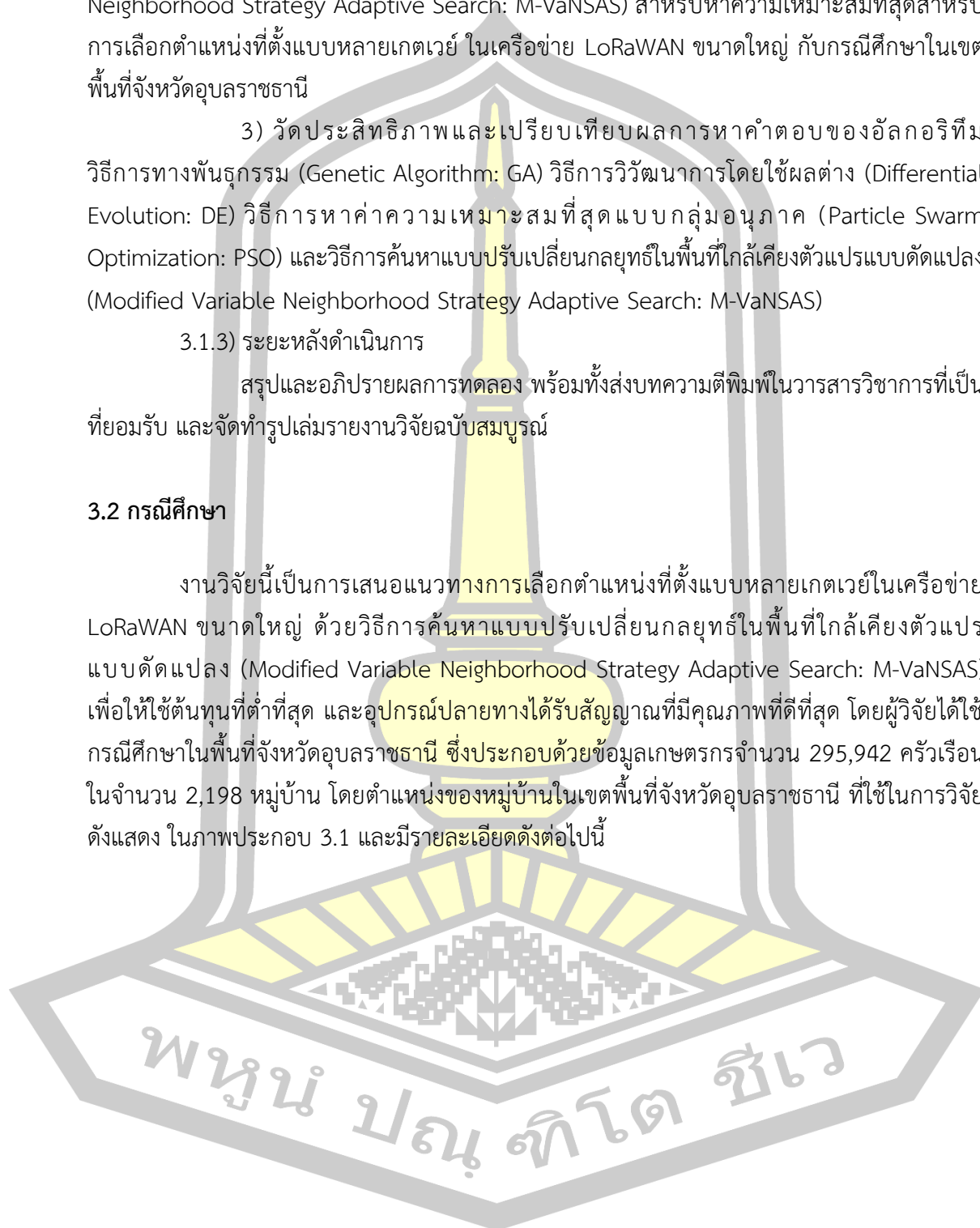
3) วัดประสิทธิภาพและเปรียบเทียบผลการหาค่าตอบของอัลกอริทึมวิธีการทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (Differential Evolution: DE) วิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) และวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง (Modified Variable Neighborhood Strategy Adaptive Search: M-VaNSAS)

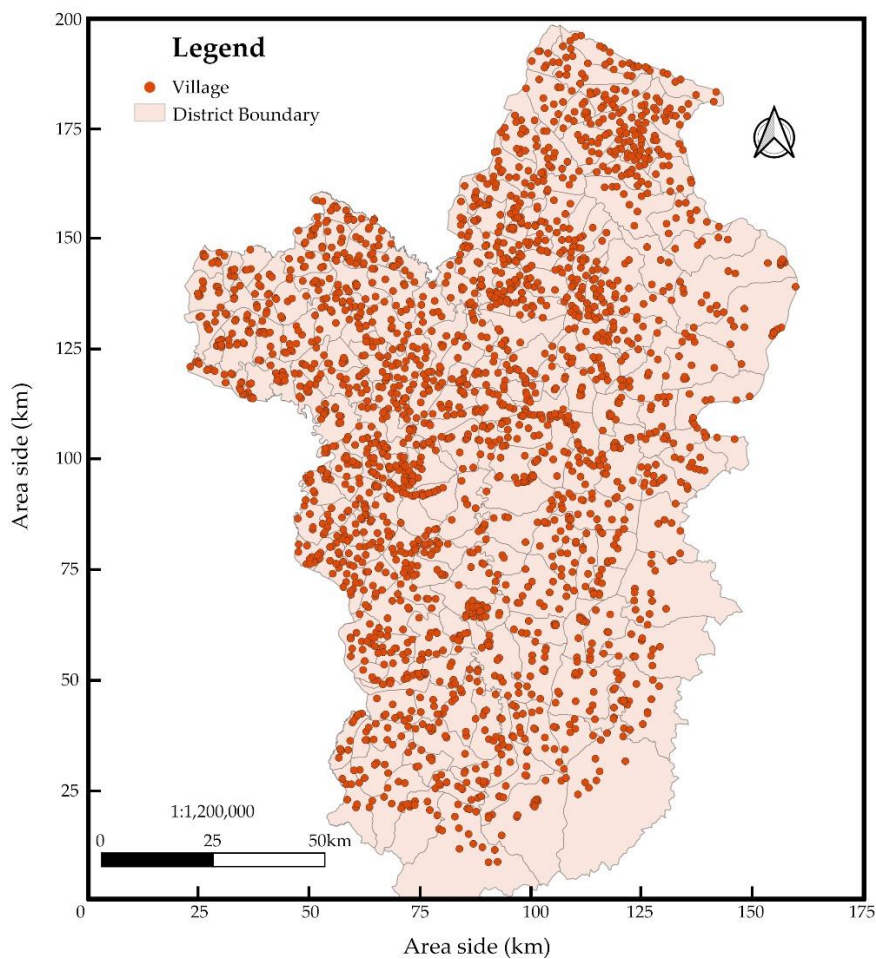
3.1.3) ระยะเวลาดำเนินการ

สรุปและอภิปรายผลการทดลอง พร้อมทั้งส่งบทความตีพิมพ์ในวารสารวิชาการที่เป็นที่ยอมรับ และจัดทำรูปเล่มรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

3.2 กรณีศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการเสนอแนวทางการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ ด้วยวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง (Modified Variable Neighborhood Strategy Adaptive Search: M-VaNSAS) เพื่อให้ใช้ต้นทุนที่ต่ำที่สุด และอุปกรณ์ปลายทางได้รับสัญญาณที่มีคุณภาพที่ดีที่สุด โดยผู้วิจัยได้ใช้กรณีศึกษาในพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลเกษตรกรจำนวน 295,942 ครัวเรือน ในจำนวน 2,198 หมู่บ้าน โดยตำแหน่งของหมู่บ้านในเขตพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี ที่ใช้ในการวิจัย ดังแสดง ในภาพประกอบ 3.1 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้





ภาพประกอบ 3.1 แผนที่แสดงพื้นที่หมู่บ้านของจังหวัดอุบลราชธานี

สำหรับข้อมูลที่ใช้ในการหาความเหมาะสมที่สุด (Optimization) ในการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ (Gateway) ในเครือข่ายขนาดใหญ่ เพื่อให้สัญญาณสามารถครอบคลุมอุปกรณ์ปลายทาง (End Nodes) ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลพื้นฐานสำหรับการหาความเหมาะสมที่สุด ดังแสดงในตาราง 3.1 และข้อมูลด้านอุปกรณ์ LoRaWAN Gateway ดังแสดงในตาราง 3.2 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1 ข้อมูลพื้นฐาน

- 1) จำนวนอุปกรณ์ปลายทาง (End Nodes) ที่รับสัญญาณจาก LoRaWAN gateway ใช้ข้อมูลจำนวนครัวเรือนของประชาชนแต่ละหมู่บ้าน จำนวน 295,942 ครัวเรือน
- 2) ข้อมูลหมู่บ้าน (Villages) ที่มีข้อมูลพิกัดของหมู่บ้านจำนวน 2,198 หมู่บ้าน สำหรับใช้เป็นตำแหน่งในการสร้างสถานี LoRaWAN gateway
- 3) ต้นทุน (Base cost) ในการสร้างสถานีให้บริการ LoRaWAN gateway จำนวน 100,000 บาท ต่อหนึ่งสถานี

4) ค่าเช่าพื้นที่รายปี (Variable cost) สำหรับสร้างสถานีให้บริการ LoRaWAN gateway ในแต่ละพื้นที่ใช้วิธีการสุ่มตัวเลขในช่วง 5,000-30,000

5) ความสามารถของ LoRaWAN Gateway ในการรองรับการให้บริการอุปกรณ์ปลายทาง จำนวน 2,500 อุปกรณ์

ตาราง 3.1 ข้อมูลพื้นฐานสำหรับหาความเหมาะสมที่สุด

รายการ	ค่า	คำอธิบาย
End Nodes	295,942	อุปกรณ์ปลายทางที่จะรับสัญญาณจาก LoRaWAN gateway
Villages	2,198	หมู่บ้านต่าง ๆ ใน 25 อำเภอ ของจังหวัดอุบลราชธานี
Base cost	100,000	ต้นทุนในการสร้างสถานี LoRaWAN gateway ต่อหนึ่งสถานี
Variable cost	5,000-30,000	ค่าเช่าพื้นที่สำหรับสร้างสถานีให้บริการ LoRaWAN gateway ในแต่ละพื้นที่ใช้วิธีการสุ่มตัวเลข
Capacity	2,500	การรองรับการให้บริการอุปกรณ์ปลายทาง

3.2.2 ข้อมูลด้านอุปกรณ์ LoRaWAN Gateway

- 1) ปัจจัยการแพร่กระจายสัญญาณ (Spreading factor) ใช้ระหว่าง SF7-SF10
- 2) อัตราการส่งข้อมูล (Bitrate)
- 3) คะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate)
- 4) และระยะทางการส่งข้อมูล (Range) ของ LoRaWAN Gateway

ตาราง 3.2 ข้อมูลด้านอุปกรณ์ LoRaWAN Gateway สำหรับหาความเหมาะสมที่สุด

Spreading factor	Bitrate	Score of Bitrate	Range
SF7	5470 bps	4	2 km
SF8	3125 bps	3	4 km
SF9	1760 bps	2	6 km
SF10	980 bps	1	8 km

3.2.3 ความเหมาะสมที่สุดสำหรับการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์

รูปแบบของตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ที่สามารถใช้ต้นทุนต่ำที่สุด (Minimize the total costs) และมีค่าคะแนนของอัตราการส่งข้อมูลสูงที่สุด (Maximize the Bitrate) สำหรับให้บริการสัญญาณอุปกรณ์ปลายทาง

3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหากรณีศึกษา

งานวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเขตเวทย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ โดยทำการเปรียบเทียบการหาคำตอบของอัลกอริทึม วิธีการทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (Differential Evolution: DE) วิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) และวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง (Modified Variable Neighborhood Strategy Adaptive Search: M-VaNSAS) ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหา มีดังต่อไปนี้

ดัชนี (Indices)

r, l LoRaWAN gateway location, where $r, l = 1 \dots R$

v Village, where $v = 1 \dots V$

พารามิเตอร์ (Parameters)

R Maximum allowable locations to deploy LoRaWAN gateways, R

V Total number of villages, V

T^1 Maximum allowed distance between a LoRaWAN gateway and a village

P_v Number of populations utilizing a LoRaWAN gateway in village v

D_{rv} Distance between location r and village v

B_{rv} Bitrate score between gateway r and village v

C_r Capacity of LoRaWAN gateway r

U_r Rental cost associated with LoRaWAN gateway r

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables)

$$Y_r = \begin{cases} 1 & \text{if location } r \text{ is used to locate the LoRaWAN} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$X_{rv} = \begin{cases} 1 & \text{if location } r \text{ serve village } v \text{ and the distance of } r \text{ and } v \text{ higher than } T^1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Functions)

$$\text{Min } Z1 = \sum_{r=1}^R U_r Y_r \quad (3-1)$$

$$\text{Max } Z2 = \sum_{v=1}^V \sum_{r=1}^R X_{rv} B_{rv} \quad (3-2)$$

สมการข้อบ่งชี้ (Subject To)

$$\sum_{r=1}^R X_{rv} \geq 1 \quad \forall v=1 \dots V \quad (3-3)$$

$$X_{rv} \leq Y_r \quad \forall v=1 \dots V, r=1 \dots R \quad (3-4)$$

$$X_{rv} D_{rv} \leq T^1 Z_{rv} \quad \forall v=1 \dots V, r=1 \dots R \quad (3-5)$$

$$\sum_{v=1}^V X_{rv} P_v \leq C_r \quad \forall r=1 \dots R \quad (3-6)$$

$$X_{rv}, Y_r \in \{0, 1\} \quad \forall v=1 \dots V, r=1 \dots R \quad (3-7)$$

สมการ (3-1) คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ลำดับที่ 1 มีหน้าที่ลดต้นทุน (Cost) ในระบบให้ต่ำที่สุด สมการ (3-2) คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ลำดับที่ 2 มีหน้าที่ทำให้ค่าคะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Bitrate) สูงสุด สมการ (3-3) คือ สมการข้อบ่งชี้ที่จะกำหนดให้แต่ละหมู่บ้านจะต้องได้รับการจัดสรรสัญญาณจาก LoRaWAN gateway อย่างน้อยจำนวน 1 เกตเวย์ สมการ (3-4) คือ สมการข้อบ่งชี้ LoRaWAN gateway ที่ r สามารถให้บริการสัญญาณกับหมู่บ้านที่ v เมื่อตำแหน่งของ LoRaWAN gateway อยู่ภายใต้ระยะทางที่สามารถให้บริการสัญญาณได้ สมการ (3-5) คือ สมการข้อบ่งชี้ที่จะกำหนดระยะทางที่ไกลสุดที่ LoRaWAN gateway ที่ r สามารถให้บริการสัญญาณแก่หมู่บ้านที่ v ได้ โดยระยะทางต้องน้อยกว่า T^1 สมการ (3-6) คือ สมการข้อบ่งชี้ที่จะกำหนด Capacity สูงสุดที่สามารถรองรับจำนวนอุปกรณ์ปลายทางในการให้บริการสัญญาณของ LoRaWAN gateway ที่ r ได้ สมการ (3-7) คือ สมการข้อบ่งชี้ที่จะกำหนดค่าตัวแปรที่เป็น binary สำหรับการจัดสรรสัญญาณของ LoRaWAN gateway ที่ r กับหมู่บ้านที่ v

3.4 การหาความเหมาะสมที่สุดสำหรับการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้นำเสนอวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง (Modified Variable Neighborhood Strategy Adaptive Search: M-VaNSAS) สำหรับการหาความเหมาะสมที่สุดสำหรับการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ ซึ่งมีขั้นตอนการค้นหาประกอบด้วย 5 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การสร้างชุดคำตอบเริ่มต้น 2) การเลือกใช้กล่องดำที่จะดำเนินการหาคำตอบของชุดคำตอบเริ่มต้น 3) การดำเนินการของกล่องดำ 4) การอัปเดตคำตอบ และ 5) การทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2) ถึง 4) จนกว่าจะครบรอบที่กำหนด และรายงานคำตอบที่ดีที่สุด การเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ด้วยวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง (Modified Variable Neighborhood Strategy Adaptive Search: M-VaNSAS) เพื่อให้ใช้ต้นทุนที่ต่ำที่สุดและค่าคะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Bitrate) สูงสุด สามารถอธิบายรายละเอียดของขั้นตอนการค้นหาคำตอบซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.1 การสร้างชุดคำตอบเริ่มต้น

การสร้างชุดคำตอบเริ่มต้น (Generate the Initial Population) เป็นการสร้างประชากรต้นแบบขึ้นมาเพื่อใช้เป็นจุดเริ่มต้นของขั้นตอนการวิวัฒนาการ ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนแรกที่เกิดขึ้นก่อนที่จะเริ่มเข้ากระบวนการของวิธีการ M-VaNSAS โดยประชากรกลุ่มแรกเกิดจากการสุ่มเพื่อให้ได้ประชากรต้นแบบจำนวนหนึ่ง ซึ่งเป็นการสุ่มแบบมีความน่าจะเป็นเท่ากัน ซึ่งการสร้างชุดคำตอบเริ่มต้น ดังแสดงในสมการ (3-8)

$$X_{ij1} = U(0,1) \quad (3-8)$$

โดยที่ X_{ij1} คือค่าในแถว i ตำแหน่ง j ในการวนซ้ำครั้งที่ 1 โดยที่ j ถูกกำหนดเป็นจำนวนหมู่บ้าน และ i เป็นจำนวนแถวที่กำหนดไว้ล่วงหน้า โดยในขั้นตอนนี้จะมีการสุ่มในรอบการวนซ้ำครั้งแรก เพื่อสร้างแถวอีกสองชุด คือชุดของแถวที่ดีที่สุด (Best tracks : BT) และชุดของแถวสุ่ม (Random tracks : RT) ดังแสดงในสมการ (3-9) และ (3-10)

$$B_{ij1} = U(0,1) \quad (3-9)$$

$$R_{ij1} = U(0,1) \quad (3-10)$$

โดยที่ B_{ijt} คือเซตของโซลูชัน (Solution) ที่ดีที่สุดที่เก็บได้จากการค้นหาโซลูชันที่ดีที่สุดตั้งแต่การทำซ้ำ (Iteration) ในรอบแรกจนถึงการทำซ้ำ t ในขณะที่ R_{ijt} ถูกเลือกสุ่มในสมการ ซึ่งการสร้างแถวสองชุดโดย B_{ijt} และ R_{ijt} จะถูกสร้างในการทำซ้ำในรอบแรก โดยใช้สมการ (3-9)

และ (3-10) ตามลำดับ ในขณะที่สมการ (3-11) ถูกใช้ในการปรับปรุง R_{ijt} ค่าของ R_{ij} ในการวนซ้ำครั้งที่ $t + 1$ เท่ากับค่าของ R_{ij} ในการวนซ้ำครั้งที่ t โดยใช้ตัวดำเนินการในการเลือกกล่องดำ (Black Box) ที่เลือกไว้ ตัวอย่างชุดคำตอบเริ่มต้น ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตาราง 3.3 ตัวอย่างชุดคำตอบเริ่มต้น

Tracks	Villages									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.74	0.20	0.73	0.84	0.12	0.32	0.09	0.29	0.27	0.82
2	0.12	0.52	0.64	0.88	0.91	0.13	0.62	0.70	0.83	0.29
3	0.66	0.79	0.64	0.07	0.08	0.90	0.94	0.23	0.10	1.00
4	0.86	0.37	0.31	0.99	0.87	0.97	0.61	0.11	0.28	0.48
5	0.10	0.07	0.42	0.79	0.10	0.61	0.92	0.68	0.77	0.61

ตาราง 3.3 แสดงตัวอย่างชุดคำตอบเริ่มต้น โดยส่วนที่เป็นคอลัมน์จะประกอบด้วยหมู่บ้านต่าง ๆ จำนวน 10 หมู่บ้าน และในส่วนของแถวจะเป็นแทร็ก โดยจะขอยกตัวอย่างในแทร็กที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยหมู่บ้านจำนวน 10 หมู่บ้านที่มีค่า 0.74, 0.20, 0.73, 0.84, 0.12, 0.32, 0.09, 0.29, 0.27 และ 0.82 ตามลำดับ ค่าเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการหาคำตอบต่อไป

ขั้นตอนการถอดรหัสคำตอบ (Decoding) คือการนำชุดคำตอบเริ่มต้นที่ได้จากการสุ่มทำการถอดรหัสคำตอบ ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

1) การกำหนดเงื่อนไขการบริการสัญญาณของเกตเวย์ โดยแต่ละหมู่บ้านต้องได้รับสัญญาณอย่างน้อย 1 เกตเวย์ และระยะทางสูงสุดระหว่างหมู่บ้านกับเกตเวย์ต้องอยู่ในเงื่อนไขที่กำหนด และการรองรับการให้บริการ (Capacity) อุปกรณ์ปลายทาง ของเกตเวย์ จะต้องไม่เกินจำนวนที่กำหนด

2) เรียงค่าของข้อมูลแทร็กที่ประกอบด้วยหมู่บ้านต่าง ๆ โดยเรียงข้อมูลจากน้อยไปหามาก โดยตัวอย่างการเรียงค่าของข้อมูลแทร็กที่ 1 ดังแสดงในตาราง 3.4

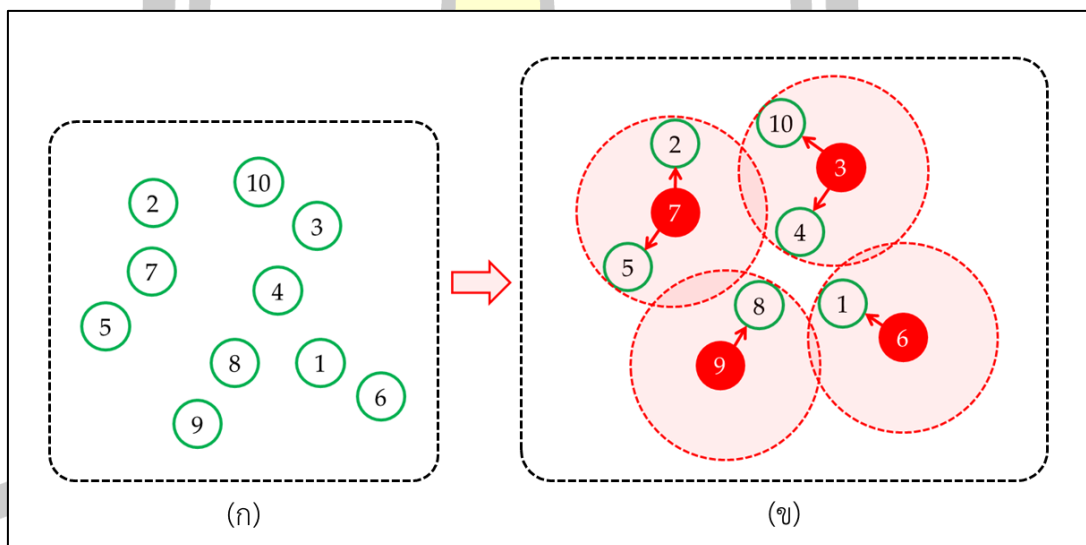
ตาราง 3.4 การเปรียบเทียบก่อนและหลังการเรียงข้อมูลแทร็กที่ 1

Before	Villages	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Value	0.74	0.20	0.73	0.84	0.12	0.32	0.09	0.29	0.27	0.82
After	Villages	7	5	2	9	8	6	3	1	10	4
	Value	0.09	0.12	0.20	0.27	0.29	0.32	0.73	0.74	0.82	0.84

จากตาราง 3.4 เป็นการเปรียบเทียบก่อนและหลังการเรียงค่าของข้อมูลแทร็กที่ 1 โดยก่อนการเรียงค่าของข้อมูลหมู่บ้าน (Before sort) หมู่บ้านจะเรียงลำดับหมายเลข 1-10 และค่าข้อมูลของ

หมู่บ้านประกอบด้วย 0.74, 0.20, 0.73, 0.84, 0.12, 0.32, 0.09, 0.29, 0.27 และ 0.82 ตามลำดับ และหลังจากทำการเรียงค่าของข้อมูล (After sort) โดยทำการเรียงค่าของข้อมูลจากน้อยไปหามาก ซึ่งลำดับของหมู่บ้านจะถูกเรียงลำดับหมายเลข 7, 5, 2, 9, 8, 6, 3, 1, 10 และ 4 ตามลำดับ และค่าข้อมูลของหมู่บ้านประกอบด้วย 0.09, 0.12, 0.20, 0.27, 0.29, 0.32, 0.73, 0.74, 0.82 และ 0.84 ตามลำดับ

3) อัลกอริทึมการถอดรหัสคำตอบ ซึ่งจะเป็นวิธีการจัดสรร (Assign) การบริการสัญญาของเกตเวย์ให้กับหมู่บ้าน โดยหลังจากการเรียงค่าของข้อมูลแทรกเรียบร้อยแล้ว ตำแหน่งแรกจะถูกกำหนดเป็นตำแหน่งในการตั้งเกตเวย์ และหมู่บ้านที่ถูกตั้งเป็นเกตเวย์จะได้รับการจัดสรรสัญญาของเกตเวย์นั้นด้วย จากนั้นจะทำการจัดสรรสัญญาของเกตเวย์ให้กับหมู่บ้านถัดไปตามเงื่อนไขของระยะห่างระหว่างหมู่บ้านกับเกตเวย์และการรองรับการให้บริการ (Capacity) อุปกรณ์ปลายทางของเกตเวย์ ซึ่งถ้าหากเกตเวย์นั้นไม่สามารถให้บริการสัญญาแก่หมู่บ้านได้ตามเงื่อนไข ก็จะทำการเลือกตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์และเปิดเกตเวย์ใหม่สำหรับให้บริการหมู่บ้านเพิ่มขึ้น ขั้นตอนเหล่านี้จะถูกทำซ้ำจนกว่าจะพบกับคำตอบที่เป็นไปได้ ในการจัดสรรสัญญาของเกตเวย์ให้กับหมู่บ้าน โดยแนวคิดของอัลกอริทึมการถอดรหัสคำตอบ ดังแสดงในภาพประกอบ 3.2



ภาพประกอบ 3.2 แนวคิดของอัลกอริทึมการถอดรหัสคำตอบ

ภาพประกอบ 3.2 แสดงแนวคิดของอัลกอริทึมการถอดรหัสคำตอบ โดยจากภาพ 3.2 (ก) คือหมู่บ้านตามพิกัดต่าง ๆ หลังจากมีการเรียงค่าของข้อมูลแทรกใหม่เพื่อค้นหาตำแหน่งของเกตเวย์และการจัดสรรสัญญาของเกตเวย์ให้กับหมู่บ้านดังแสดงในภาพ 3.2 (ข) โดยเริ่มต้นจากหมู่บ้านหมายเลข 7 ซึ่งเป็นหมู่บ้านแรกที่ใช้เป็นตำแหน่งที่ตั้งของเกตเวย์ และหมู่บ้านหมายเลข 7, 5 และ 2 ซึ่งตรงตามเงื่อนไขจะถูกจัดสรรให้ได้รับสัญญาจากเกตเวย์ลำดับที่ 1 ต่อมา หมู่บ้าน

หมายเลข 9 ซึ่งเป็นหมู่บ้านลำดับที่ 2 จะถูกใช้เป็นตำแหน่งของเกตเวย์ และหมู่บ้านหมายเลข 9 และ 8 ซึ่งตรงตามเงื่อนไขจะถูกจัดสรรให้ได้รับสัญญาจากเกตเวย์ลำดับที่ 2 ต่อมา หมู่บ้านหมายเลข 6 ซึ่งเป็นหมู่บ้านลำดับที่ 3 จะถูกใช้เป็นตำแหน่งของเกตเวย์ และหมู่บ้านหมายเลข 6 และ 1 ซึ่งตรงตามเงื่อนไขจะถูกจัดสรรให้ได้รับสัญญาจากเกตเวย์ลำดับที่ 3 ต่อมา หมู่บ้านหมายเลข 3 ซึ่งเป็นหมู่บ้านลำดับที่ 4 จะถูกใช้เป็นตำแหน่งของเกตเวย์ และหมู่บ้านหมายเลข 3, 10 และ 4 ซึ่งตรงตามเงื่อนไขจะถูกจัดสรรให้ได้รับสัญญาจากเกตเวย์ลำดับที่ 4

3.4.2 การเลือกใช้กล่องดำ

การเลือกใช้กล่องดำ (Select Black Box) ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้นำเสนอวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง สำหรับการหาความเหมาะสมที่สุดสำหรับการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ ซึ่งได้ออกแบบวิธีการในการหาคำตอบในกล่องดำทั้งหมด 4 วิธีการ ได้แก่วิธีการ DE-inspired Move (DIM), Random-transit (RT), Best-transit (BT) และ Inter-transit (IT) สำหรับกระบวนการตัดสินใจในการเลือกกล่องดำทั้ง 4 วิธีการ ในการหาคำตอบจะใช้การเลือกแบบวงล้อรูเล็ต (Roulette wheel selection) ซึ่งกระบวนการตัดสินใจในการเลือกกล่องดำ ดังในสมการ (3-11)

$$P_{bt} = \frac{FN_{bt-1} + (1 - F)A_{bt-1} + KI_{bt-1} + \rho|A_{bt-1} - A_{t-1}^{best}|}{\sum_{b=1}^B FN_{bt-1} + (1 - F)A_{bt-1} + KI_{bt-1} + \rho|A_{bt-1} - A_{t-1}^{best}|} \quad (3-11)$$

โดยที่

- P_{bt} = ความน่าจะเป็นของการเลือกกล่องดำมาปรับปรุงในการคำนวณแต่ละรอบ
- N_{bt-1} = จำนวนแตรีกที่เลือกกล่องดำมาปรับปรุงในรอบการคำนวณก่อนหน้านี้
- A_{bt-1} = ค่าวัตถุประสงค์เฉลี่ยของแตรีกทั้งหมดที่เลือกกล่องดำในรอบการคำนวณก่อนหน้านี้
- A_{t-1}^{best} = ค่าที่ดีที่สุดที่พบในรอบการคำนวณก่อนหน้านี้
- I_{bt-1} = ค่าคะแนนสะสม มีค่าเป็นไบนารี 0 และ 1
1 คือ กล่องดำค้นพบผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในรอบการคำนวณล่าสุด
0 คือ ไม่พบผลลัพธ์ที่ดีที่สุด
- B = จำนวนรวมของกล่องดำ
- F = ปัจจัยปรับขนาด (Scale Factor) เป็นจำนวนจริงที่มีค่าคงที่ระหว่าง 0 ถึง 1 (กำหนดให้ค่า $F = 0.5$)
- K = ตัวปัจจัยตั้งค่า (Parameter Factor) เป็นจำนวนจริงที่มีค่าคงที่ระหว่าง 0 ถึง 1 (กำหนดให้ค่า $K = 1$)

จากสมการ (3-11) เป็นกระบวนการตัดสินใจในการเลือกกล่องดำในแต่ละรอบการคำนวณ โดยการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดของสมการนี้จะประกอบด้วย (1) จำนวนครั้งที่เลือก

กล่องดำนั้น ๆ ในรอบการคำนวณที่ผ่านมา (2) ค่าวัตถุประสงค์เฉลี่ยในการแก้ปัญหาของการเลือกกล่องดำนั้น ๆ (3) กล่องดำนั้นให้ค่าที่ดีที่สุดในปัจจุบันหรือไม่ และ (4) ระยะห่างของค่าวัตถุประสงค์เฉลี่ยในการแก้ปัญหาของการเลือกกล่องดำนั้น ๆ จากการแก้ปัญหาของกล่องดำที่ดีที่สุด ซึ่งหากกล่องดำให้ค่าที่ดีที่สุดในรอบการคำนวณก่อนหน้านี้ ความน่าจะเป็นที่จะถูกเลือกในรอบการคำนวณปัจจุบันจะเพิ่มขึ้น แต่ในกรณีรอบคำนวณที่ 1 ยังไม่มีข้อมูลในการหาค่าตอบรอบล่าสุดจึงไม่จำเป็นต้องคำนวณตามสมการ (3-11) สำหรับเลือกกล่องดำ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ในการคำนวณหาค่าตอบรอบที่ 1 จึงกำหนดค่าความน่าจะเป็นของการเลือกกล่องดำให้มีค่าเท่ากับ 0.25 จากนั้นจึงคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นสะสม

3.4.3 การดำเนินการของกล่องดำ

การดำเนินการของกล่องดำ (Black Box Operations) ของวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบตัดแปลง (M-VaNSAS) สำหรับการหาความเหมาะสมที่สุดสำหรับการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ ประกอบด้วย 4 วิธีการ ได้แก่วิธีการ DE-inspired Move (DIM), Random-transit (RT), Best-transit (BT) และ Inter-transit (IT) ดังแสดงในสมการ (3-12) - (3-15) ซึ่งได้อ้างอิงจากงานวิจัยของ (Sangkaphet et al., 2022) และ (Pitakaso et al., 2022) สำหรับการนิยามเซตของรางวัลในการทำงานในหนึ่งรอบ สมมติว่า B คือจำนวนรางวัลที่ประกอบด้วยในหนึ่งรอบ กำหนดเซต A เป็นรางวัลที่เลือกกล่องดำ b และกำหนดเซต Z เป็นรางวัลที่ไม่ได้รับการเลือกในการดำเนินการในกล่องดำ b ในขณะที่จำนวนรางวัลในเซต A บวกกับเซต Z เท่ากับ B ใช้ตัวแทน n เพื่อแทนรางวัลที่ถูกเลือกแบบสุ่มจากเซตรางวัล Z และตัวแทน i แทนรางวัลที่ถูกเลือกจากเซตรางวัล A

$$\text{DE-inspired Move (DIM)} \quad Z_{ijt} = X_{rjt} + Q_{ij}(X_{rjt} - X_{njt}) \quad (3-12)$$

$$\text{Random-transit (RT)} \quad Z_{ijt} = \begin{cases} X_{ijt} & \text{if } Q_{ij} \leq CR \\ R_{ijt} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-13)$$

$$\text{Best-transit (BT)} \quad Z_{ijt} = \begin{cases} X_{ijt} & \text{if } Q_{ij} \leq CR \\ B_{ijt} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-14)$$

$$\text{Inter-transit (IT)} \quad Z_{ijt} = \begin{cases} X_{ijt} & \text{if } Q_{ij} \leq CR \\ X_{njt} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-15)$$

ในสมการ (3-12) และ (3-13) เป็นสมการในการเพิ่มความหลากหลายของการหารูปแบบของตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ ที่สามารถใช้ต้นทุนต่ำที่สุด (Minimize the total costs) และมีค่าคะแนนของอัตราการส่งข้อมูลสูงที่สุด (Maximize the Bitrate) สำหรับให้บริการสัญญาณอุปกรณ์ปลายทาง สมการ (3-14) และ (3-15) ใช้สำหรับการเพิ่มความเข้มข้นในการค้นหาแบบหลายเกตเวย์

3.4.4 การอัปเดตคำตอบ

การอัปเดตคำตอบ (Update the Tracks) ในขั้นตอนนี้เป็นการเปรียบเทียบคำตอบกับค่าเดิม เพื่อให้ได้คำตอบสำหรับการคำนวณในรอบถัดไป ดังแสดงในสมการ (3-16)

$$X_{ijt+1} = \begin{cases} Z_{ijt} & \text{if } f(Z_{ijt}) \geq f(X_{ijt}) \\ X_{ijt} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-16)$$

จากสมการ (3-16) โดยที่ $f(Z_{ijt})$ แทนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ Z_{ijt} และ $f(X_{ijt})$ แทนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ X_{ijt} เพื่อเพิ่มค่าคะแนนสะสมสำหรับรอบการคำนวณต่อไป จะเลือกค่าคะแนนสะสมที่มีค่ามากกว่าระหว่าง Z_{ijt} และ X_{ijt} ในการประเมินคำตอบ

3.4.5 การทำซ้ำจนกว่าจะครบรอบที่กำหนด

การทำซ้ำในขั้นตอนที่ 3.4.2 ถึง 3.4.4 จนกว่าจะครบตามเงื่อนไขที่กำหนด ซึ่งเงื่อนไขการหยุดการทำงาน ผู้วิจัยได้กำหนดจำนวนสูงสุดของการวนซ้ำ ที่ 2,000 รอบ โดยรหัสเทียม (Pseudocode) ของวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง ดังแสดงในภาพประกอบ 3.3



Algorithm: M-VaNSAS	
1	Input: Number of tracks (NT), Number of parameters (D),
2	Scaling factor (F), Improvement factor (K), Value of CR,
3	Number of improvement box (IBPop)
4	Output: Best_Track_Solution
5	Begin
6	Population = Generate Tracks (NT, D)
7	IBPop = Initialize InformationIB (NIB)
8	while the stopping criterion is not met do
9	Update Probability of Black Boxes
10	for i = 1: NT
11	//selected improvement box by roulette wheel selection
12	selected_IB = RouletteWheelSelection(IBPop)
13	if(selected_IB = 1) Then
14	$Z_{ijt} = \text{Operation } X_{rjt}$ Black Box in equation (3-12)
15	else if(selected_IB = 2)
16	$Z_{ijt} = \text{Operation } X_{rjt}$ Black Box in equation (3-13)
17	else if(selected_IB = 3)
18	$Z_{ijt} = \text{Operation } X_{rjt}$ Black Box in equation (3-14)
19	else if(selected_IB = 4)
20	$Z_{ijt} = \text{Operation } X_{rjt}$ Black Box in equation (3-15)
21	
22	$X_{ijt+1} = \text{Update Track } (Z_{ijt}, X_{ijt})$ //in equation (3-16)
23	
24	End for loop //end update heuristics information
25	End while loop
26	End

ภาพประกอบ 3.3 รหัสเทียมของวิธีการ M-VaNSAS

จากภาพประกอบ 3.4 แสดงรหัสเทียมของวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง (M-VaNSAS) มีขั้นตอนในการค้นหาคำตอบ ซึ่งประกอบด้วย 5 ขั้นตอน คือ (1) การสร้างชุดคำตอบเริ่มต้นสำหรับการสร้างประชากรต้นแบบขึ้นมาเพื่อใช้เป็นจุดเริ่มต้นของขั้นตอนการวิวัฒนาการ (2) การเลือกใช้กล่องดำ เป็นกระบวนการตัดสินใจในการเลือกกล่องดำเพื่อหาคำตอบ (3) การดำเนินการของกล่องดำ เป็นกระบวนการของการหาค่าความเหมาะสมที่สุดประกอบด้วย 4 วิธีการ ได้แก่วิธีการ DE-inspired Move (DIM), Random-transit (RT), Best-transit (BT) และ Inter-transit (IT) ดังแสดงในสมการ (3-12) - (3-15) (4) การอัปเดตคำตอบ เป็นการเปรียบเทียบคำตอบกับค่าเดิม เพื่อให้ได้คำตอบสำหรับการคำนวณใน

รอบถัดไป ดังแสดงในสมการ (3-15) และ (5) การทำซ้ำขั้นตอนที่ (2) ถึง (4) จากนั้นทำซ้ำจนกว่าจะครบรอบที่กำหนด และรายงานคำตอบที่ดีที่สุด

3.4.6 การหาค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์

การหาค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Pareto Front) เป็นวิธีการสำหรับหาค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ ที่มีความขัดแย้งกัน หรือไปในทิศทางเดียวกัน (ภรณ์ยา อำนวยรัตน์ และพยุ่ง มีสัจ, 2555) ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการแก้ปัญหาการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเขตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ ที่มีสองวัตถุประสงค์ ที่มีความขัดแย้งกัน คือ การหาต้นทุนต่ำที่สุด (Minimize the total costs) และมีค่าคะแนนของอัตราการส่งข้อมูลสูงที่สุด (Maximize the Bitrate) สำหรับให้บริการสัญญาณอุปกรณ์ปลายทาง สมการโดยทั่วไปที่เป็นการหาค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีสองวัตถุประสงค์ ดังแสดงในสมการ (3-17)

$$f_{iq} = w^1 f_{iq}^1 + w^2 f_{iq}^2 \quad (3-17)$$

โดยที่ f_{iq} เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแทรีก i ในรอบการคำนวณย่อย q ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้สำหรับสมการ (3-17) สำหรับการแก้ปัญหาการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเขตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ ที่สามารถใช้ต้นทุนต่ำที่สุดและมีค่าคะแนนของอัตราการส่งข้อมูลสูงที่สุดสำหรับให้บริการสัญญาณอุปกรณ์ปลายทาง ดังแสดงในสมการ (3-18) โดยที่ w^1 เป็นน้ำหนักของการสุ่มสำหรับวัตถุประสงค์ที่ 1 สำหรับ $w^2 = (1-w^1)$ และ $w^1 = U(0,1)$ โดยที่ f_{iq}^1 และ f_{iq}^2 เป็นวัตถุประสงค์ของวัตถุประสงค์ z^1 และ z^2 ตามลำดับ

$$Max Z = \left(-w^1 \sum_{r=1}^R U_r Y_r \right) + \left(w^2 \sum_{v=1}^V \sum_{r=1}^R X_{rv} B_{rv} \right) \quad (3-18)$$

โดยที่ค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Pareto Front) ถูกใช้เพื่อเก็บคำตอบจากตัวเลือกที่ดีที่สุด ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้เพื่อค้นหารูปแบบการหาตำแหน่งที่ตั้งเขตเวย์ที่มีหลายวัตถุประสงค์ และมีความขัดแย้งกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้มีสองวัตถุประสงค์ที่ขัดแย้งกัน กล่าวคือต้องการเลือกตำแหน่งที่ตั้งเขตเวย์ที่มีต้นทุนต่ำที่สุด และต้องการคะแนนของอัตราการส่งข้อมูลมากที่สุด โดยกำหนด $f^1(y_r)$ และ $f^2(y_r)$ เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของวัตถุประสงค์ 1 และ 2 ของแทรีก r ตามลำดับ ให้ R เป็นเซตของตัวเลือกที่เป็นไปได้แทน $y = (y_1, y_2, \dots, y_i)$ ซึ่งเป็นเซตของเวกเตอร์การตัดสินใจ และ $f^v(y) = (f^1(y), f^2(y), \dots, f^v(y))$ เป็นเซตของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของเวกเตอร์ y จะได้รับความสำคัญกว่า y' และ $f^v(y) \leq f^v(y')$ สำหรับทุก $v = 1, 2, 3, \dots, V$

3.4.7 วิธีการ TOPSIS

วิธีการ TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution) เป็นวิธีการในการวิเคราะห์การตัดสินใจแบบหลายทางเลือกเพื่อค้นหาทางเลือกที่ดีที่สุด

ที่เน้นถึงความเหมาะสมกับการตัดสินใจทั้งด้านบวกและด้านลบ (Hwang & Yoon, 1981) โดยในงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยใช้วิธีการ TOPSIS ในการถ่วงน้ำหนัก เพื่อเลือกค่าที่ดีที่สุดจาก Pareto front ในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด เพื่อให้ได้รูปแบบของตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ ที่สามารถใช้ต้นทุนต่ำที่สุด และมีค่าคะแนนของอัตราการส่งข้อมูลสูงที่สุด สำหรับให้บริการสัญญาณอุปกรณืปลายทางเพียงหนึ่งรูปแบบ ดังสมการ (3-19) - (3-25)

$$r_{lv} = \frac{x_{lv}}{\sqrt{\sum_{l=1}^L (X_{lv})^2}} \quad (3-19)$$

$$U_{lv} = w_v r_{lv} \quad (3-20)$$

$$U_v^* = \{ \max_L U_{lv} \text{ if } v \in V ; \min_L U_{lv} \text{ if } v \in V^* \} \quad (3-21)$$

$$U_v' = \{ \min_L U_{lv} \text{ if } v \in V ; \max_L U_{lv} \text{ if } v \in V' \} \quad (3-22)$$

$$S_l^* = \sqrt{\sum_{v=1}^v (U_v^* - U_{lv})^2} \quad (3-23)$$

$$S_l' = \sqrt{\sum_{v=1}^v (U_v' - U_{lv})^2} \quad (3-24)$$

$$C_l^* = \frac{S_l'}{S_l^* + S_l'} \quad (3-25)$$

โดยที่ x_{lv} คือค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของจุด l ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ v โดย l คือจำนวนของจุดใน Pareto front และ v^* เป็นเซตของฟังก์ชันวัตถุประสงค์บวก และ v' เป็นเซตของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ลบ พารามิเตอร์ w_v เป็นค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดล่วงหน้าซึ่งเป็นน้ำหนักของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ในส่วนของ $U^* (U^* = \{U_1^*, U_2^*, \dots, U_n^*\})$ และ $U' (U' = \{U_1', U_2', \dots, U_n'\})$ คือคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์บวกและลบตามลำดับ ค่า S_l^* และ S_l' คือการวัดความห่างของแต่ละตัวเลือกจากทั้งสองฟังก์ชันวัตถุประสงค์บวกและลบตามลำดับ (C_l^*) คือเซตของพารามิเตอร์ที่มีค่า C_l^* ใกล้เคียงกับ 1 ที่สุด จะถูกเลือกเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในการแก้ปัญหา

บทที่ 4

ผลการวิจัย

ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอผลการวิจัย การเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการทดลองโดยใช้อัลกอริทึมเพื่อหาคำตอบ และทำการเปรียบเทียบ จำนวน 4 วิธีการ คือ วิธีการทางพันธุกรรม (GA) วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE) วิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) และวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบตัดแปลง (M-VaNSAS) ผู้วิจัยได้แบ่งการนำเสนอผลการวิจัย ออกเป็น 4 ส่วน คือ (1) ผลการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ (2) การเปรียบเทียบค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ (3) ผลการคัดเลือกรูปแบบตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์โดยใช้วิธีการ TOPSIS และ (4) รูปแบบตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์

การหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุด (Optimization algorithm) ของตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ จากวิธีการทางพันธุกรรม (GA) วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE) วิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) และวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบตัดแปลง (M-VaNSAS) ซึ่งผลการหาคำตอบในแต่ละวิธีการ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1.1 ผลการหาคำตอบของวิธีการทางพันธุกรรม

ผลการหาคำตอบของวิธีการทางพันธุกรรม (GA) ในการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุด (Optimization algorithm) ของตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ พบว่ามีรูปแบบ (Solutions) สำหรับการแก้ปัญหาจำนวน 69 รูปแบบ ดังแสดงในตาราง 4.1

ตาราง 4.1 ผลการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ GA

รูปแบบ (Solution)	ต้นทุน (Cost)	คะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate)
1	17,199,066	2.652
2	17,206,008	2.646
3	17,210,995	2.647
4	17,245,456	2.647
5	17,246,117	2.648

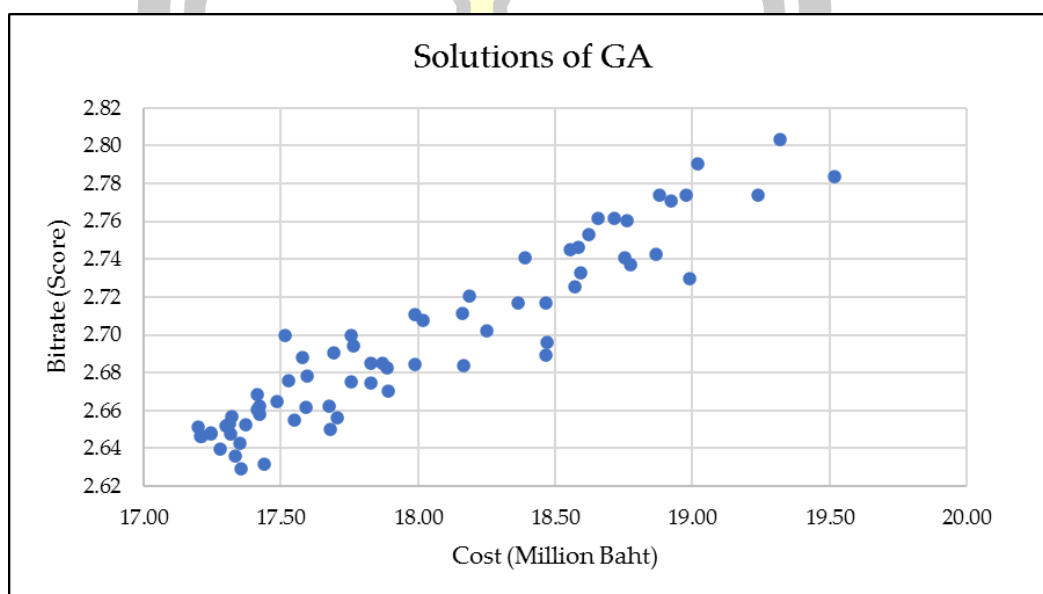
ตาราง 4.1 ผลการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ GA (ต่อ)

รูปแบบ (Solution)	ต้นทุน (Cost)	คะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate)
6	17,280,297	2.640
7	17,300,148	2.652
8	17,312,678	2.653
9	17,317,400	2.647
10	17,321,326	2.657
11	17,335,043	2.636
12	17,353,090	2.643
13	17,354,397	2.629
14	17,372,264	2.653
15	17,412,846	2.661
16	17,414,942	2.669
17	17,424,163	2.658
18	17,424,766	2.662
19	17,442,038	2.632
20	17,487,039	2.665
21	17,514,961	2.700
22	17,528,171	2.676
23	17,547,927	2.655
24	17,580,162	2.688
25	17,590,460	2.662
26	17,595,063	2.678
27	17,675,152	2.663
28	17,682,647	2.650
29	17,692,260	2.691
30	17,706,679	2.656
31	17,754,869	2.700
32	17,758,500	2.675
33	17,766,797	2.694
34	17,828,326	2.685
35	17,830,418	2.675
36	17,872,387	2.685
37	17,889,574	2.683

ตาราง 4.1 ผลการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ GA (ต่อ)

รูปแบบ (Solution)	ต้นทุน (Cost)	คะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate)
38	17,891,587	2.671
39	17,988,424	2.711
40	17,990,138	2.685
41	18,018,824	2.708
42	18,162,683	2.712
43	18,167,244	2.684
44	18,188,724	2.721
45	18,252,683	2.702
46	18,365,334	2.717
47	18,388,784	2.741
48	18,465,334	2.717
49	18,465,464	2.689
50	18,472,205	2.696
51	18,555,918	2.745
52	18,570,667	2.726
53	18,586,285	2.746
54	18,594,065	2.733
55	18,621,772	2.753
56	18,655,918	2.762
57	18,715,035	2.762
58	18,754,239	2.741
59	18,761,745	2.761
60	18,774,373	2.737
61	18,868,294	2.743
62	18,878,803	2.774
63	18,920,279	2.771
64	18,978,873	2.774
65	18,988,535	2.730
66	19,020,279	2.791
67	19,239,163	2.774
68	19,318,163	2.803
69	19,518,142	2.784

จากตาราง 4.1 แสดงผลการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการทางพันธุกรรม (GA) ซึ่งพบว่า มีจำนวน 69 รูปแบบ (Solution) และรูปแบบที่ให้ค่าต้นทุน (Cost) ต่ำที่สุด คือ รูปแบบที่ 1 มีต้นทุน 17,199,066 บาท และคะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate) เท่ากับ 2.652 รูปแบบที่ให้คะแนนของอัตราการส่งข้อมูลสูงสุด คือรูปแบบที่ 68 คะแนนของอัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 2.803 และมีต้นทุนเท่ากับ 19,318,163 บาท ซึ่งรูปแบบทั้งหมดสามารถนำเสนอในรูปแบบของกราฟ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.1



ภาพประกอบ 4.1 รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ GA

จากภาพประกอบ 4.1 แสดงผลการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุด (Optimization algorithm) ของตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ ด้วยวิธีการทางพันธุกรรม (GA) ซึ่งมีจำนวน 69 รูปแบบ (Solution) โดยค่าต้นทุน (Cost) อยู่ในช่วงระหว่าง 17,000,000 บาท ถึง 20,000,000 บาท และคะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate) อยู่ระหว่าง 2.62 ถึง 2.82

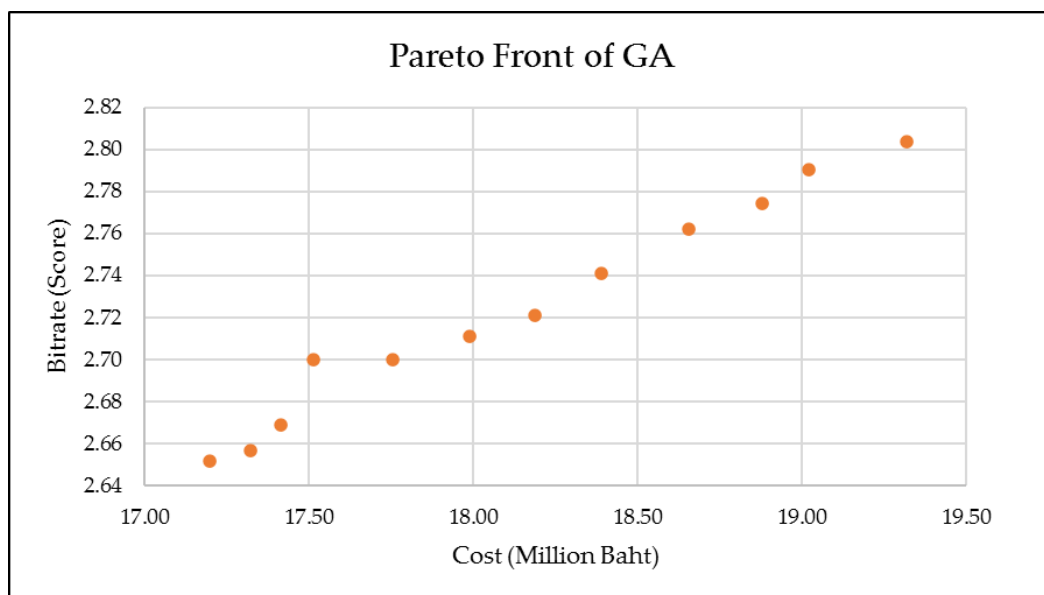
ผลการหาค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Pareto Front) ของวิธีการทางพันธุกรรม (GA) ซึ่งเป็นการเลือกรูปแบบ (Solution) ที่ดีที่สุดจากจำนวน 69 รูปแบบ โดยการหาค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ของวิธีการทางพันธุกรรม (GA) พบว่ามีรูปแบบ (Solutions) สำหรับการแก้ปัญหาจำนวน 12 รูปแบบ ดังแสดงในตาราง 4.2

ตาราง 4.2 ค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ของวิธีการ GA

รูปแบบ (Solution)	ต้นทุน (Cost)	คะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate)
1	17,199,066	2.652
2	17,321,326	2.657
3	17,414,942	2.669
4	17,514,961	2.700
5	17,754,869	2.700
6	17,988,424	2.711
7	18,188,724	2.721
8	18,388,784	2.741
9	18,655,918	2.762
10	18,878,803	2.774
11	19,020,279	2.791
12	19,318,163	2.803

จากตาราง 4.2 แสดงผลการหาค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Pareto Front) ของวิธีการทางพันธุกรรม (GA) ซึ่งพบว่า มีจำนวน 12 รูปแบบ (Solution) และรูปแบบที่ให้ค่าต้นทุน (Cost) ต่ำที่สุด คือรูปแบบที่ 1 มีต้นทุน 17,199,066 บาท และคะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate) เท่ากับ 2.652 รูปแบบที่ให้คะแนนของอัตราการส่งข้อมูลสูงสุด คือรูปแบบที่ 68 คะแนนของอัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 2.803 และมีต้นทุนเท่ากับ 19,318,163 ซึ่งเมื่อนำค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Pareto Front) ของวิธีการทางพันธุกรรม (GA) มานำเสนอในรูปแบบของกราฟ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.2





ภาพประกอบ 4.2 ค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ของวิธีการ GA

จากภาพประกอบ 4.2 แสดงผลของค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Pareto Front) รูปแบบของตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ที่ได้จากวิธีการทางพันธุกรรม (GA) โดยรูปแบบที่ถูกเลือกด้วย Pareto front จะเป็นรูปแบบที่ดีที่สุดของกลุ่มรูปแบบ (Solutions) ที่ได้จากวิธีการทางพันธุกรรม (GA) ซึ่งรูปแบบที่ถูกเลือกโดย Pareto front มีจำนวน 12 รูปแบบ (Solution) โดยช่วงของค่าต้นทุน (Cost) อยู่ระหว่าง 17,000,000 บาท ถึง 19,500,000 บาท และช่วงของคะแนนอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate) อยู่ระหว่าง 2.62 ถึง 2.82

4.1.2 ผลการหาคำตอบของวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง

ผลการหาคำตอบของวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE) ในการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุด (Optimization algorithm) ของตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ พบว่ามีรูปแบบ (Solutions) สำหรับการแก้ปัญหาจำนวน 60 รูปแบบ ดังแสดงในตาราง 4.3

ตาราง 4.3 ผลการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ DE

รูปแบบ (Solution)	ต้นทุน (Cost)	คะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate)
1	17,110,691	2.646
2	17,147,385	2.648
3	17,221,326	2.677
4	17,222,434	2.663
5	17,243,439	2.653

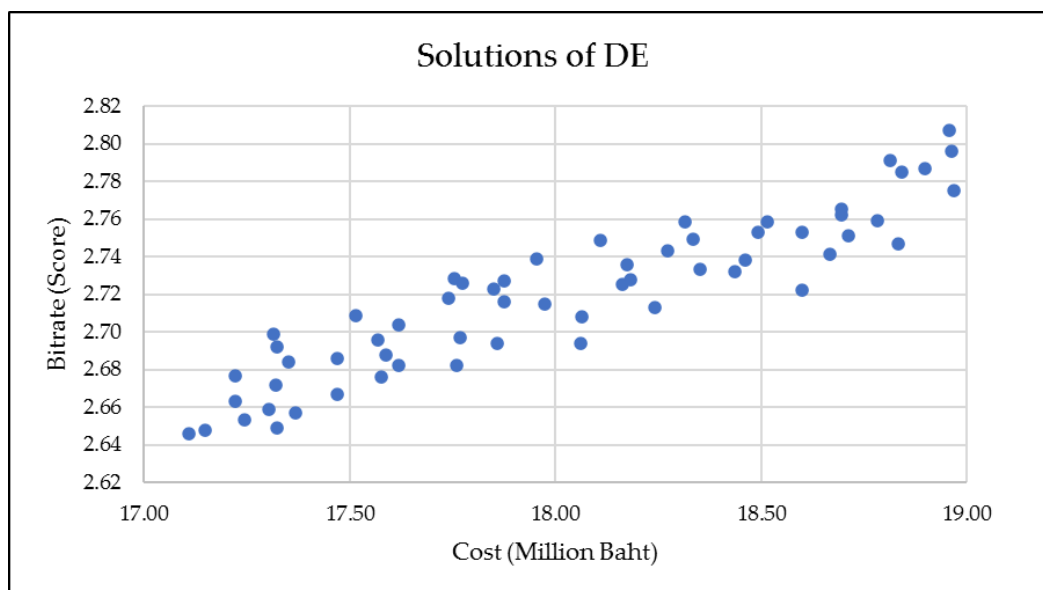
ตาราง 4.3 ผลการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ DE (ต่อ)

รูปแบบ (Solution)	ต้นทุน (Cost)	คะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate)
6	17,304,726	2.659
7	17,315,962	2.699
8	17,319,740	2.672
9	17,322,435	2.692
10	17,324,726	2.649
11	17,351,632	2.684
12	17,369,025	2.657
13	17,469,874	2.667
14	17,470,440	2.686
15	17,514,961	2.709
16	17,567,448	2.696
17	17,578,261	2.676
18	17,588,483	2.688
19	17,618,585	2.704
20	17,619,740	2.682
21	17,741,549	2.718
22	17,754,964	2.729
23	17,759,099	2.682
24	17,767,307	2.697
25	17,774,870	2.726
26	17,851,021	2.723
27	17,859,099	2.694
28	17,874,826	2.716
29	17,875,423	2.727
30	17,954,977	2.739
31	17,973,652	2.715
32	18,062,387	2.694
33	18,064,325	2.708
34	18,110,352	2.748
35	18,162,002	2.725
36	18,175,186	2.736
37	18,182,462	2.728

ตาราง 4.3 ผลการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ DE (ต่อ)

รูปแบบ (Solution)	ต้นทุน (Cost)	คะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate)
38	18,241,425	2.713
39	18,271,449	2.743
40	18,314,881	2.759
41	18,335,121	2.749
42	18,351,021	2.733
43	18,435,368	2.732
44	18,462,179	2.738
45	18,491,241	2.753
46	18,514,935	2.759
47	18,598,708	2.722
48	18,599,874	2.753
49	18,667,307	2.741
50	18,694,467	2.765
51	18,694,527	2.762
52	18,712,412	2.751
53	18,783,439	2.759
54	18,812,312	2.791
55	18,832,177	2.747
56	18,841,549	2.785
57	18,898,206	2.787
58	18,958,206	2.807
59	18,962,434	2.796
60	18,968,870	2.775

จากตาราง 4.3 แสดงผลการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE) ซึ่งพบว่า มีจำนวน 60 รูปแบบ (Solution) และรูปแบบที่ให้ค่าต้นทุน (Cost) ต่ำที่สุดคือ รูปแบบที่ 1 มีต้นทุน 17,110,691 บาท และคะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate) เท่ากับ 2.646 รูปแบบที่ให้คะแนนของอัตราการส่งข้อมูลสูงสุด คือรูปแบบที่ 58 คะแนนของอัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 2.807 และมีต้นทุนเท่ากับ 18,958,206 บาท ซึ่งรูปแบบทั้งหมดสามารถนำเสนอในรูปแบบของกราฟ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.3



ภาพประกอบ 4.3 รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ DE

จากภาพประกอบ 4.3 แสดงผลการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุด (Optimization algorithm) ของตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ ด้วยวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง ซึ่งมีจำนวน 60 รูปแบบ (Solution) โดยค่าต้นทุน (Cost) อยู่ในช่วงระหว่าง 17,000,000 บาท ถึง 19,000,000 บาท และคะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate) อยู่ระหว่าง 2.62 ถึง 2.82

ผลการหาค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Pareto Front) ของวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE) ซึ่งเป็นการเลือกรูปแบบ (Solution) ที่ดีที่สุดจากจำนวน 60 รูปแบบ โดยการหาค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ของวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง พบว่ามีรูปแบบ (Solutions) สำหรับการแก้ปัญหาจำนวน 12 รูปแบบ ดังแสดงในตาราง 4.4

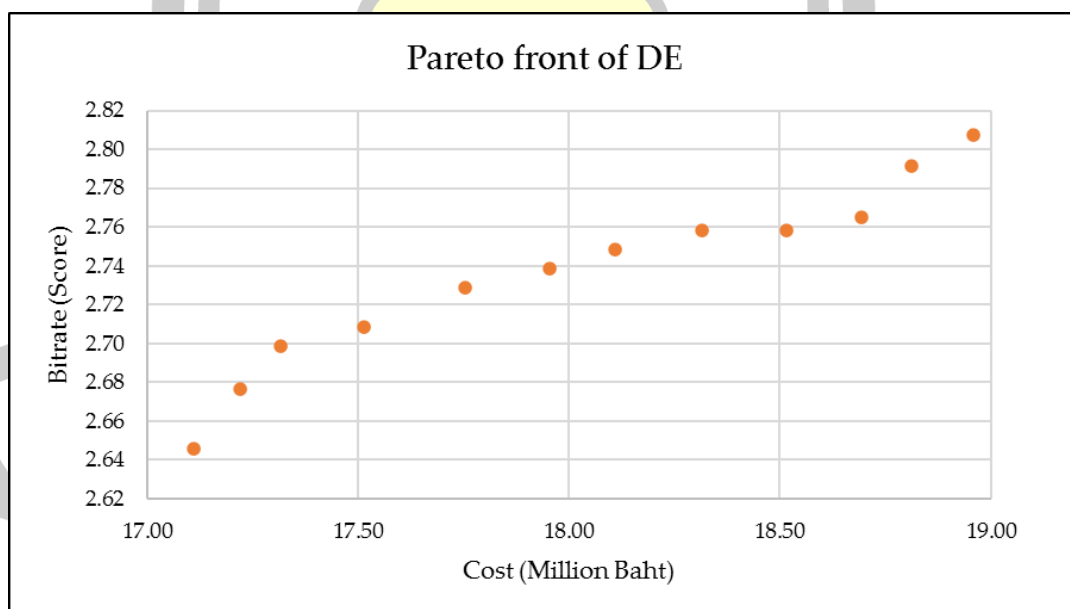
ตาราง 4.4 ค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ของวิธีการ DE

รูปแบบ (Solution)	ต้นทุน (Cost)	คะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate)
1	17,110,691	2.646
2	17,221,326	2.677
3	17,315,962	2.699
4	17,514,961	2.709
5	17,754,964	2.729
6	17,954,977	2.739
7	18,110,352	2.748

ตาราง 4.4 ค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ของวิธีการ DE (ต่อ)

รูปแบบ (Solution)	ต้นทุน (Cost)	คะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate)
8	18,314,881	2.759
9	18,514,935	2.759
10	18,694,467	2.765
11	18,812,312	2.791
12	18,958,206	2.807

จากตาราง 4.4 แสดงผลการหาค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Pareto Front) ของวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE) ซึ่งพบว่า มีจำนวน 12 รูปแบบ (Solution) และรูปแบบที่ให้ค่าต้นทุน (Cost) ต่ำที่สุด คือรูปแบบที่ 1 มีต้นทุน 17,110,691 บาท และคะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate) เท่ากับ 2.646 รูปแบบที่ให้คะแนนของอัตราการส่งข้อมูลสูงสุด คือรูปแบบที่ 12 คะแนนของอัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 2.807 และมีต้นทุนเท่ากับ 18,958,206 บาท ซึ่งเมื่อนำค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Pareto Front) ของวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE) ซึ่งรูปแบบทั้งหมดสามารถนำเสนอในรูปแบบของกราฟ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.4



ภาพประกอบ 4.4 ค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ของวิธีการ DE

จากภาพประกอบ 4.4 แสดงผลของค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Pareto Front) รูปแบบของตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ที่ได้จากวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE) โดยรูปแบบที่ถูกเลือกด้วย Pareto front จะเป็นรูปแบบที่ดีที่สุดของกลุ่มรูปแบบ (Solutions) ที่ได้จากวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE) ซึ่งรูปแบบที่ถูกเลือกโดย Pareto front มีจำนวน 12 รูปแบบ (Solution) โดยช่วงของค่าต้นทุน (Cost) อยู่ระหว่าง 17,000,000 บาท ถึง 19,000,000 บาท และช่วงของคะแนนอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate) อยู่ระหว่าง 2.64 ถึง 2.82

4.1.3 ผลการหาค่าตอบของวิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค

ผลการหาค่าตอบของวิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) ในการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุด (Optimization algorithm) ของตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ พบว่ามีรูปแบบ (Solutions) สำหรับการแก้ปัญหาจำนวน 81 รูปแบบ ดังแสดงในตาราง 4.5

ตาราง 4.5 รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ PSO

รูปแบบ (Solution)	ต้นทุน (Cost)	คะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate)
1	17,020,510	2.654
2	17,033,243	2.673
3	17,055,891	2.680
4	17,067,315	2.663
5	17,111,523	2.646
6	17,115,177	2.666
7	17,120,630	2.644
8	17,145,411	2.686
9	17,146,841	2.654
10	17,167,132	2.689
11	17,168,912	2.678
12	17,208,063	2.694
13	17,209,587	2.682
14	17,218,460	2.710
15	17,234,523	2.669
16	17,240,859	2.666
17	17,246,715	2.659
18	17,255,550	2.674
19	17,321,259	2.689

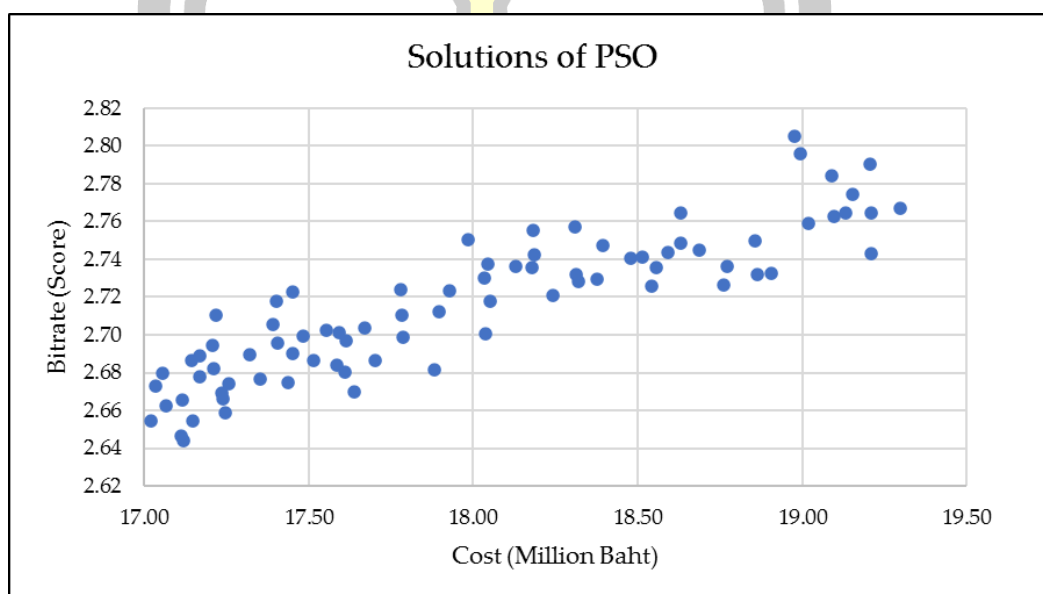
ตาราง 4.5 รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ PSO (ต่อ)

รูปแบบ (Solution)	ต้นทุน (Cost)	คะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate)
20	17,351,105	2.677
21	17,389,532	2.705
22	17,403,181	2.718
23	17,405,214	2.696
24	17,435,351	2.675
25	17,451,993	2.723
26	17,452,587	2.690
27	17,484,780	2.699
28	17,516,359	2.686
29	17,554,270	2.703
30	17,584,734	2.684
31	17,592,751	2.701
32	17,610,766	2.681
33	17,615,361	2.697
34	17,637,473	2.670
35	17,671,268	2.703
36	17,701,679	2.686
37	17,779,202	2.724
38	17,784,142	2.710
39	17,785,214	2.699
40	17,883,431	2.682
41	17,896,460	2.712
42	17,928,601	2.723
43	17,984,142	2.750
44	18,032,763	2.730
45	18,038,682	2.701
46	18,044,056	2.738
47	18,051,853	2.718
48	18,127,833	2.736
49	18,179,499	2.736
50	18,183,687	2.755
51	18,184,213	2.742

ตาราง 4.5 รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ PSO (ต่อ)

รูปแบบ (Solution)	ต้นทุน (Cost)	คะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate)
52	18,240,969	2.721
53	18,310,776	2.757
54	18,311,586	2.732
55	18,321,130	2.728
56	18,374,580	2.729
57	18,392,324	2.747
58	18,478,589	2.741
59	18,514,080	2.741
60	18,542,353	2.726
61	18,555,254	2.735
62	18,591,786	2.744
63	18,630,940	2.765
64	18,631,493	2.749
65	18,688,802	2.745
66	18,762,087	2.727
67	18,772,370	2.736
68	18,856,713	2.750
69	18,862,155	2.732
70	18,905,956	2.733
71	18,974,922	2.805
72	18,995,522	2.796
73	19,018,032	2.759
74	19,089,010	2.784
75	19,098,378	2.763
76	19,130,510	2.764
77	19,153,289	2.774
78	19,206,214	2.790
79	19,208,399	2.743
80	19,208,673	2.764
81	19,296,754	2.767

จากตาราง 4.5 แสดงผลการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) ซึ่งพบว่า มีจำนวน 81 รูปแบบ (Solution) และรูปแบบที่ให้ค่าต้นทุน (Cost) ต่ำที่สุด คือ รูปแบบที่ 1 มีต้นทุน 17,020,510 บาท และคะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate) เท่ากับ 2.654 รูปแบบที่ให้คะแนนของอัตราการส่งข้อมูลสูงสุด คือ รูปแบบที่ 71 คะแนนของอัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 2.805 และมีต้นทุนเท่ากับ 18,974,922 บาท ซึ่งรูปแบบทั้งหมดสามารถนำเสนอในรูปแบบของกราฟ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.5



ภาพประกอบ 4.5 รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ PSO

จากภาพประกอบ 4.5 แสดงผลการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุด (Optimization algorithm) ของตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ ด้วยวิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) ซึ่งมีจำนวน 81 รูปแบบ (Solution) โดยค่าต้นทุน (Cost) อยู่ในช่วงระหว่าง 17,000,000 บาท ถึง 19,500,000 บาท และคะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate) อยู่ระหว่าง 2.64 ถึง 2.82

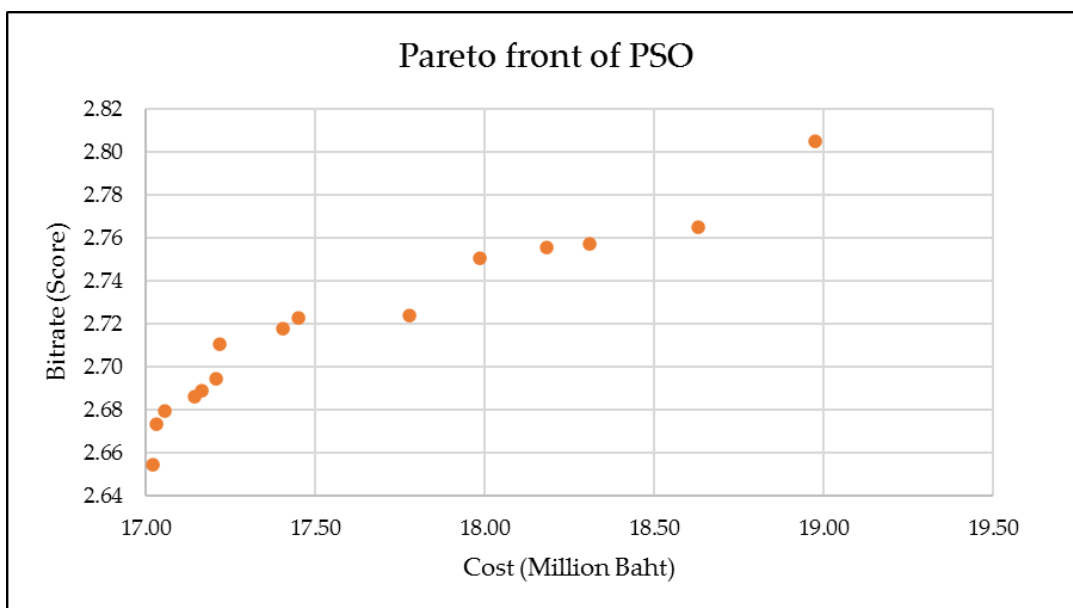
ผลการหาค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Pareto Front) ของวิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) ซึ่งเป็นการเลือกรูปแบบ (Solution) ที่ดีที่สุดจากจำนวน 81 รูปแบบ โดยการหาค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ของวิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) พบว่ามีรูปแบบ (Solutions) สำหรับการแก้ปัญหาจำนวน 15 รูปแบบ ดังแสดงในตาราง 4.6

ตาราง 4.6 ค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ของวิธีการ PSO

รูปแบบ (Solution)	ต้นทุน (Cost)	คะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate)
1	17,020,510	2.654
2	17,033,243	2.673
3	17,055,891	2.680
4	17,145,411	2.686
5	17,167,132	2.689
6	17,208,063	2.694
7	17,218,460	2.710
8	17,403,181	2.718
9	17,451,993	2.723
10	17,779,202	2.724
11	17,984,142	2.750
12	18,183,687	2.755
13	18,310,776	2.757
14	18,630,940	2.765
15	18,974,922	2.805

จากตาราง 4.6 แสดงผลการหาค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Pareto Front) ของวิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) ซึ่งพบว่า มีจำนวน 15 รูปแบบ (Solution) และรูปแบบที่ให้ค่าต้นทุน (Cost) ต่ำที่สุด คือรูปแบบที่ 1 มีต้นทุน 17,020,510 บาท และคะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate) เท่ากับ 2.654 รูปแบบที่ให้คะแนนของอัตราการส่งข้อมูลสูงสุด คือรูปแบบที่ 15 คะแนนของอัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 2.805 และมีต้นทุนเท่ากับ 18,974,922 บาท ซึ่งเมื่อนำค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Pareto Front) ของวิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) มานำเสนอในรูปแบบของกราฟ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.6

พหุ ประสิทธิภาพ



ภาพประกอบ 4.6 ค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ของวิธีการ PSO

จากภาพประกอบ 4.6 แสดงผลของค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Pareto Front) รูปแบบของตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ที่ได้จากวิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) โดยรูปแบบที่ถูกเลือกด้วย Pareto front จะเป็นรูปแบบที่ดีที่สุดของกลุ่มรูปแบบ (Solutions) ที่ได้จากวิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) ซึ่งรูปแบบที่ถูกเลือกโดย Pareto front มีจำนวน 15 รูปแบบ (Solution) โดยช่วงของค่าต้นทุน (Cost) อยู่ระหว่าง 17,000,000 บาท ถึง 19,000,000 บาท และช่วงของคะแนนอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate) อยู่ระหว่าง 2.64 ถึง 2.82

4.1.4 ผลการหาค่าตอบของวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง

ผลการหาค่าตอบของวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง (M-VaNSAS) ในการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุด (Optimization algorithm) ของตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ พบว่ามีรูปแบบ (Solutions) สำหรับการแก้ปัญหาจำนวน 272 รูปแบบ ดังแสดงในตาราง 4.7

ตาราง 4.7 รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ M-VaNSAS

รูปแบบ (Solution)	ต้นทุน (Cost)	คะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate)
1	16,319,264	2.662
2	16,323,183	2.657

ตาราง 4.7 รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ M-VaNSAS (ต่อ)

รูปแบบ (Solution)	ต้นทุน (Cost)	คะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate)
3	16,324,898	2.651
4	16,327,764	2.644
5	16,328,138	2.646
6	16,344,746	2.642
7	16,349,281	2.659
8	16,352,722	2.647
9	16,353,115	2.690
10	16,354,492	2.689
11	16,356,037	2.686
12	16,356,527	2.686
13	16,356,606	2.688
14	16,366,786	2.645
15	16,371,128	2.650
16	16,373,319	2.689
17	16,373,969	2.649
18	16,374,069	2.647
19	16,374,133	2.686
20	16,383,690	2.685
21	16,387,583	2.688
22	16,391,288	2.652
23	16,393,042	2.680
24	16,401,418	2.698
25	16,403,558	2.695
26	16,412,228	2.700
27	16,415,893	2.697
28	16,418,810	2.698
29	16,420,835	2.651
30	16,421,357	2.692
31	16,421,456	2.649
32	16,424,598	2.649
33	16,425,555	2.697
34	16,427,541	2.651

ตาราง 4.7 รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ M-VaNSAS (ต่อ)

รูปแบบ (Solution)	ต้นทุน (Cost)	คะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate)
35	16,429,378	2.692
36	16,430,148	2.689
37	16,431,567	2.692
38	16,437,270	2.697
39	16,449,447	2.693
40	16,451,435	2.696
41	16,454,944	2.696
42	16,464,458	2.716
43	16,470,495	2.712
44	16,492,016	2.653
45	16,492,425	2.698
46	16,498,462	2.654
47	16,501,093	2.708
48	16,541,096	2.661
49	16,552,723	2.698
50	16,552,780	2.659
51	16,558,227	2.655
52	16,558,227	2.658
53	16,565,548	2.704
54	16,573,078	2.697
55	16,577,245	2.696
56	16,582,944	2.692
57	16,583,437	2.689
58	16,585,406	2.696
59	16,587,510	2.696
60	16,592,730	2.698
61	16,594,290	2.695
62	16,599,352	2.703
63	16,600,029	2.704
64	16,600,580	2.696
65	16,622,244	2.698
66	16,622,898	2.716

ตาราง 4.7 รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ M-VaNSAS (ต่อ)

รูปแบบ (Solution)	ต้นทุน (Cost)	คะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate)
67	16,655,943	2.721
68	16,670,429	2.657
69	16,676,113	2.680
70	16,678,714	2.698
71	16,681,311	2.673
72	16,683,436	2.678
73	16,688,828	2.663
74	16,695,829	2.693
75	16,711,150	2.712
76	16,712,059	2.640
77	16,714,390	2.643
78	16,718,610	2.705
79	16,724,807	2.706
80	16,733,384	2.640
81	16,736,924	2.706
82	16,752,671	2.640
83	16,753,917	2.695
84	16,755,823	2.720
85	16,758,605	2.683
86	16,760,307	2.683
87	16,761,725	2.692
88	16,765,711	2.672
89	16,765,711	2.683
90	16,767,622	2.639
91	16,768,482	2.666
92	16,779,985	2.644
93	16,784,202	2.689
94	16,788,791	2.690
95	16,789,532	2.640
96	16,790,745	2.728
97	16,794,189	2.646
98	16,812,629	2.649

ตาราง 4.7 รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ M-VaNSAS (ต่อ)

รูปแบบ (Solution)	ต้นทุน (Cost)	คะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate)
99	16,819,149	2.666
100	16,834,421	2.683
101	16,856,077	2.675
102	16,858,884	2.691
103	16,869,138	2.668
104	16,873,123	2.670
105	16,874,659	2.670
106	16,877,830	2.667
107	16,880,640	2.699
108	16,880,690	2.669
109	16,885,545	2.666
110	16,886,767	2.669
111	16,890,433	2.725
112	16,891,007	2.675
113	16,937,421	2.658
114	16,991,045	2.690
115	16,997,449	2.677
116	17,016,222	2.679
117	17,034,092	2.678
118	17,043,297	2.731
119	17,049,159	2.678
120	17,050,412	2.681
121	17,051,297	2.693
122	17,094,838	2.626
123	17,095,921	2.630
124	17,104,532	2.628
125	17,125,356	2.703
126	17,143,443	2.729
127	17,148,339	2.738
128	17,151,410	2.732
129	17,156,427	2.686
130	17,157,841	2.709

ตาราง 4.7 รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ M-VaNSAS (ต่อ)

รูปแบบ (Solution)	ต้นทุน (Cost)	คะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate)
131	17,167,688	2.687
132	17,178,149	2.731
133	17,224,428	2.639
134	17,243,087	2.680
135	17,243,543	2.679
136	17,243,941	2.684
137	17,248,443	2.736
138	17,251,807	2.678
139	17,266,033	2.683
140	17,266,630	2.682
141	17,268,946	2.737
142	17,270,442	2.736
143	17,273,082	2.684
144	17,291,428	2.679
145	17,296,938	2.682
146	17,298,770	2.674
147	17,300,397	2.699
148	17,306,291	2.679
149	17,310,186	2.705
150	17,316,744	2.706
151	17,317,630	2.657
152	17,320,633	2.696
153	17,320,750	2.704
154	17,329,331	2.708
155	17,335,559	2.702
156	17,372,040	2.696
157	17,375,225	2.696
158	17,378,366	2.697
159	17,393,266	2.697
160	17,400,222	2.684
161	17,400,952	2.687
162	17,404,430	2.684

ตาราง 4.7 รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ M-VaNSAS (ต่อ)

รูปแบบ (Solution)	ต้นทุน (Cost)	คะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate)
163	17,404,430	2.686
164	17,410,754	2.667
165	17,411,767	2.681
166	17,417,012	2.683
167	17,417,988	2.674
168	17,418,653	2.679
169	17,421,108	2.683
170	17,422,552	2.679
171	17,445,110	2.710
172	17,446,489	2.705
173	17,446,489	2.709
174	17,454,248	2.705
175	17,472,056	2.704
176	17,514,497	2.686
177	17,536,130	2.685
178	17,551,586	2.690
179	17,553,684	2.684
180	17,577,200	2.694
181	17,577,446	2.693
182	17,580,594	2.691
183	17,613,525	2.675
184	17,613,922	2.683
185	17,691,438	2.694
186	17,697,158	2.717
187	17,700,401	2.704
188	17,704,599	2.733
189	17,715,091	2.703
190	17,715,171	2.727
191	17,722,500	2.733
192	17,726,181	2.692
193	17,733,606	2.772
194	17,738,901	2.768

ตาราง 4.7 รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ M-VaNSAS (ต่อ)

รูปแบบ (Solution)	ต้นทุน (Cost)	คะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate)
195	17,749,028	2.692
196	17,820,621	2.741
197	17,828,015	2.729
198	17,833,604	2.769
199	17,854,345	2.731
200	17,866,747	2.692
201	17,872,042	2.717
202	17,888,224	2.716
203	17,902,726	2.752
204	17,910,908	2.716
205	17,911,300	2.721
206	17,922,668	2.718
207	17,980,329	2.720
208	17,998,117	2.755
209	18,002,110	2.756
210	18,002,619	2.723
211	18,017,334	2.732
212	18,019,478	2.734
213	18,020,997	2.726
214	18,042,819	2.724
215	18,068,327	2.714
216	18,076,432	2.710
217	18,082,122	2.708
218	18,114,221	2.767
219	18,121,714	2.763
220	18,146,453	2.749
221	18,149,979	2.765
222	18,150,749	2.735
223	18,154,110	2.732
224	18,161,142	2.750
225	18,181,816	2.749
226	18,197,528	2.733

ตาราง 4.7 รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ M-VaNSAS (ต่อ)

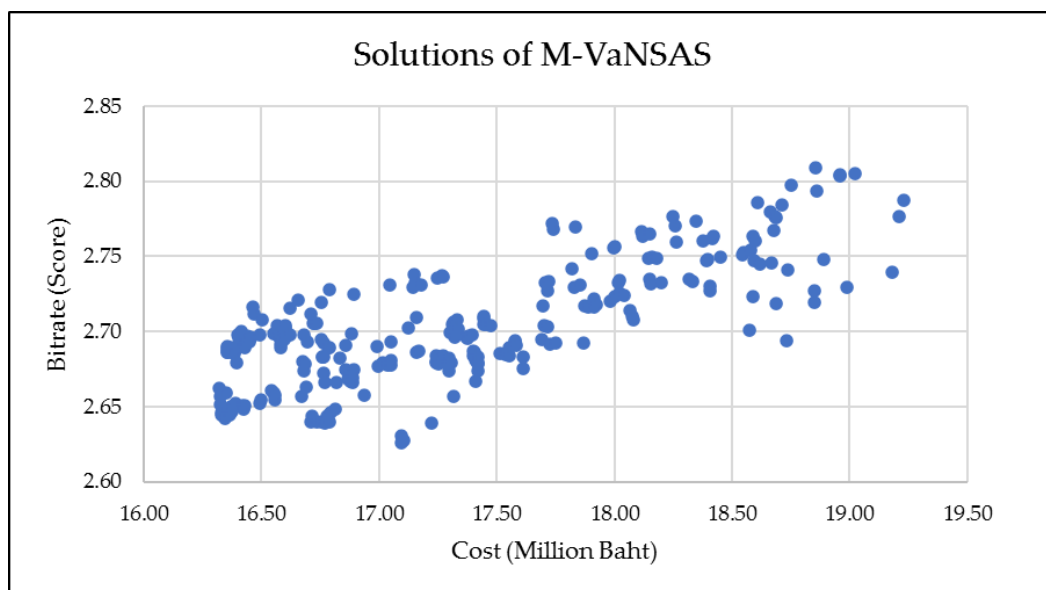
รูปแบบ (Solution)	ต้นทุน (Cost)	คะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate)
227	18,246,791	2.776
228	18,256,903	2.770
229	18,261,753	2.760
230	18,315,506	2.735
231	18,333,851	2.733
232	18,346,312	2.773
233	18,378,695	2.761
234	18,391,108	2.747
235	18,397,596	2.748
236	18,404,723	2.730
237	18,406,200	2.727
238	18,417,677	2.762
239	18,420,098	2.763
240	18,448,830	2.749
241	18,544,160	2.751
242	18,549,772	2.753
243	18,572,741	2.701
244	18,578,978	2.754
245	18,589,708	2.724
246	18,590,331	2.763
247	18,594,847	2.747
248	18,598,920	2.760
249	18,610,309	2.786
250	18,617,346	2.745
251	18,663,371	2.780
252	18,669,547	2.746
253	18,677,897	2.767
254	18,684,415	2.777
255	18,685,621	2.776
256	18,688,502	2.718
257	18,713,621	2.784
258	18,730,620	2.694

ตาราง 4.7 รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ M-VaNSAS (ต่อ)

รูปแบบ (Solution)	ต้นทุน (Cost)	คะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate)
259	18,735,891	2.741
260	18,750,295	2.797
261	18,849,533	2.727
262	18,849,810	2.719
263	18,854,515	2.809
264	18,858,543	2.793
265	18,890,351	2.748
266	18,958,456	2.803
267	18,959,509	2.805
268	18,988,535	2.730
269	19,024,769	2.805
270	19,179,477	2.739
271	19,212,646	2.777
272	19,228,385	2.787

จากตาราง 4.7 แสดงผลการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบตัดแปลง (M-VaNSAS) ซึ่งพบว่า มีจำนวน 272 รูปแบบ (Solution) และรูปแบบที่ให้ค่าต้นทุน (Cost) ต่ำที่สุด คือ รูปแบบที่ 1 มีต้นทุน 16,319,264 บาท และคะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate) เท่ากับ 2.662 รูปแบบที่ให้คะแนนของอัตราการส่งข้อมูลสูงสุด คือรูปแบบที่ 263 คะแนนของอัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 2.809 และมีต้นทุนเท่ากับ 18,854,515 บาท ซึ่งรูปแบบทั้งหมดสามารถนำเสนอในรูปแบบของกราฟดังแสดงในภาพประกอบ 4.7

พหุ ประสิทธิภาพ



ภาพประกอบ 4.7 รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการ M-VaNSAS

จากภาพประกอบ 4.7 แสดงผลการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุด (Optimization algorithm) ของตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ ด้วยวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบตัดแปลง (M-VaNSAS) ซึ่งมีจำนวน 272 รูปแบบ (Solution) โดยค่าต้นทุน (Cost) อยู่ในช่วงระหว่าง 16,000,000 บาท ถึง 19,500,000 บาท และคะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate) อยู่ระหว่าง 2.62 ถึง 2.82

ผลการหาค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Pareto Front) ของวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบตัดแปลง (M-VaNSAS) ซึ่งเป็นการเลือกรูปแบบ (Solution) ที่ดีที่สุดจากจำนวน 272 รูปแบบ โดยการหาค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ของวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบตัดแปลง (M-VaNSAS) พบว่ามีรูปแบบ (Solutions) สำหรับการแก้ปัญหาจำนวน 12 รูปแบบ ดังแสดงในตาราง 4.8

ตาราง 4.8 ค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ของวิธีการ M-VaNSAS

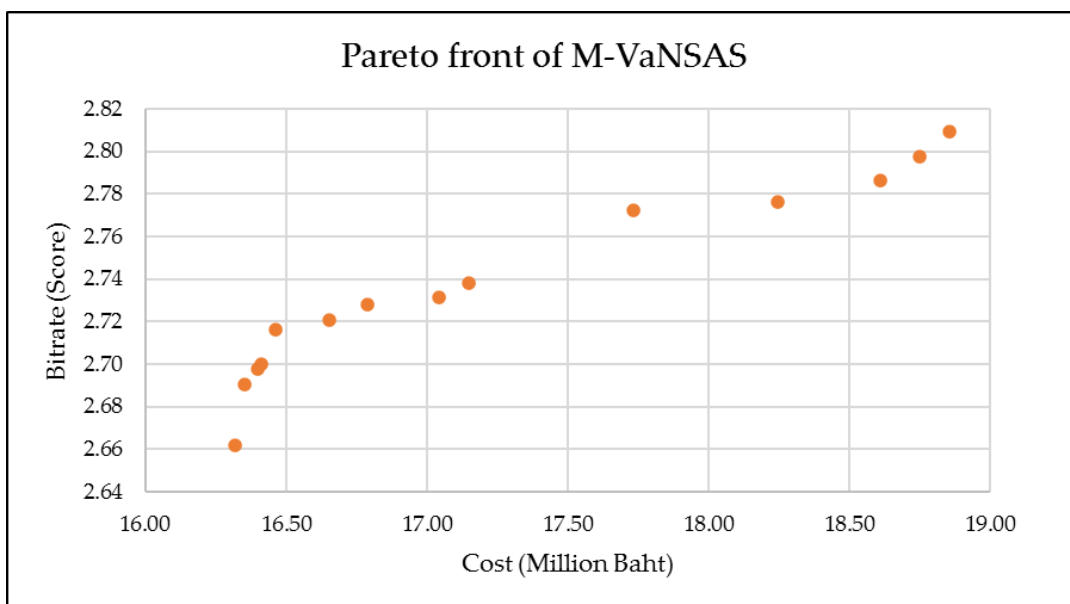
รูปแบบ (Solution)	ต้นทุน (Cost)	คะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate)
1	16,319,264	2.662
2	16,353,115	2.690
3	16,401,418	2.698
4	16,412,228	2.700

ตาราง 4.8 ค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ของวิธีการ M-VaNSAS (ต่อ)

รูปแบบ (Solution)	ต้นทุน (Cost)	คะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate)
5	16,464,458	2.716
6	16,655,943	2.721
7	16,790,745	2.728
8	17,043,297	2.731
9	17,148,339	2.738
10	17,733,606	2.772
11	18,246,791	2.776
12	18,610,309	2.786
13	18,750,295	2.797
14	18,854,515	2.809

จากตาราง 4.8 แสดงผลการหาค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Pareto Front) ของวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง (M-VaNSAS) ซึ่งพบว่า มีจำนวน 14 รูปแบบ (Solution) และรูปแบบที่ให้ค่าต้นทุน (Cost) ต่ำที่สุด คือ รูปแบบที่ 1 มีต้นทุน 16,319,264 บาท และคะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate) เท่ากับ 2.662 รูปแบบที่ให้คะแนนของอัตราการส่งข้อมูลสูงสุด คือรูปแบบที่ 14 คะแนนของอัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 2.809 และมีต้นทุนเท่ากับ 18,854,515 บาท ซึ่งเมื่อนำค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Pareto Front) ของวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง (M-VaNSAS) มานำเสนอในรูปแบบของกราฟ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.8





ภาพประกอบ 4.8 ค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ของวิธีการ M-VaNSAS

จากภาพประกอบ 4.8 แสดงผลของค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Pareto Front) รูปแบบของตำแหน่งที่ตั้งเกิดเวทย์ที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง (M-VaNSAS) โดยรูปแบบที่ถูกเลือกด้วย Pareto front จะเป็นรูปแบบที่ดีที่สุดของกลุ่มรูปแบบ (Solutions) ที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง (M-VaNSAS) ซึ่งรูปแบบที่ถูกเลือกโดย Pareto front มีจำนวน 14 รูปแบบ (Solution) โดยช่วงของค่าต้นทุน (Cost) อยู่ระหว่าง 16,000,000 บาท ถึง 19,000,000 บาท และช่วงของคะแนนอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate) อยู่ระหว่าง 2.64 ถึง 2.82

4.2 เปรียบเทียบค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์

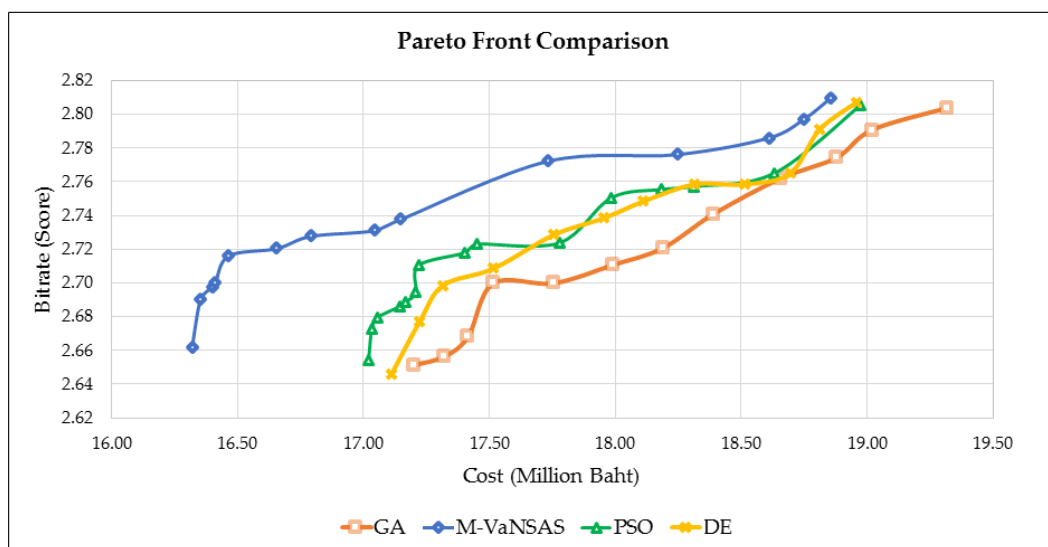
การหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของตำแหน่งที่ตั้งเกิดเวทย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ในแต่ละอัลกอริทึม จะได้รูปแบบสำหรับการแก้ปัญหาที่หลากหลาย ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้วิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Pareto Front) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้เพื่อค้นหารูปแบบการหาตำแหน่งที่ตั้งเกิดเวทย์ที่มีหลายวัตถุประสงค์ และมีความขัดแย้งกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้มีสองวัตถุประสงค์ที่ขัดแย้งกัน กล่าวคือต้องการเลือกตำแหน่งที่ตั้งเกิดเวทย์ที่มีต้นทุนต่ำที่สุด และต้องการคะแนนของอัตราการส่งข้อมูลสูงที่สุด ซึ่งการเปรียบเทียบค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ ของวิธีการทางพันธุกรรม (GA) วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE) วิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) และวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่

ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง (M-VaNSAS) โดยการเปรียบเทียบค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ ดังแสดงในตาราง 4.9 และภาพประกอบ 4.9

ตาราง 4.9 การเปรียบเทียบค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์

รูปแบบ (Solution)	วิธีการ GA		วิธีการ DE		วิธีการ PSO		วิธีการ M-VaNSAS	
	ต้นทุน (Cost)	คะแนน Bitrate	ต้นทุน (Cost)	คะแนน Bitrate	ต้นทุน (Cost)	คะแนน Bitrate	ต้นทุน (Cost)	คะแนน Bitrate
1	17,199,066	2.652	17,110,691	2.646	17,020,510	2.654	16,319,264	2.662
2	17,321,326	2.657	17,221,326	2.677	17,033,243	2.673	16,353,115	2.690
3	17,414,942	2.669	17,315,962	2.699	17,055,891	2.680	16,401,418	2.698
4	17,514,961	2.700	17,514,961	2.709	17,145,411	2.686	16,412,228	2.700
5	17,754,869	2.700	17,754,964	2.729	17,167,132	2.689	16,464,458	2.716
6	17,988,424	2.711	17,954,977	2.739	17,208,063	2.694	16,655,943	2.721
7	18,188,724	2.721	18,110,352	2.748	17,218,460	2.710	16,790,745	2.728
8	18,388,784	2.741	18,314,881	2.759	17,403,181	2.718	17,043,297	2.731
9	18,655,918	2.762	18,514,935	2.759	17,451,993	2.723	17,148,339	2.738
10	18,878,803	2.774	18,694,467	2.765	17,779,202	2.724	17,733,606	2.772
11	19,020,279	2.791	18,812,312	2.791	17,984,142	2.750	18,246,791	2.776
12	19,318,163	2.803	18,958,206	2.807	18,183,687	2.755	18,610,309	2.786
13					18,310,776	2.757	18,750,295	2.797
14					18,630,940	2.765	18,854,515	2.809
15					18,974,922	2.805		
ค่าเฉลี่ย	18,137,022	2.723	18,023,170	2.736	17,637,837	2.719	17,270,237	2.737

จากตาราง 4.9 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ของวิธีการทางพันธุกรรม (GA) วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE) วิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) และวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง (M-VaNSAS) ซึ่งพบว่า วิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง (M-VaNSAS) มีค่าเฉลี่ยของต้นทุน (Cost) ต่ำที่สุดที่ 17,270,237 บาท และค่าเฉลี่ยของคะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Score of Bitrate) มากที่สุด เท่ากับ 2.652 ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง (M-VaNSAS) มีประสิทธิภาพสูงสุดในการหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ รองลงมาคือ วิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE) และวิธีการทางพันธุกรรม (GA) ตามลำดับ โดยเมื่อนำข้อมูลการเปรียบเทียบค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ ของแต่ละอัลกอริทึม มานำเสนอในรูปแบบของกราฟ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.9



ภาพประกอบ 4.9 การเปรียบเทียบค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์

จากภาพประกอบ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบผลของค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Pareto Front) ของรูปแบบของตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ที่ได้จากวิธีการทางพันธุกรรม (GA) วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE) วิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) และวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลุยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง (M-VaNSAS) ซึ่งจากภาพแสดงให้เห็นว่ากราฟของวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลุยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง (M-VaNSAS) อยู่เหนือจากวิธีการอื่น ๆ จึงเป็นวิธีการที่ดีที่สุดในการเลือกตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่

4.3 ผลการคัดเลือกรูปแบบตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์โดยใช้วิธีการ TOPSIS

จากการหาค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Pareto Front) พบว่า วิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลุยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง (M-VaNSAS) เป็นวิธีการที่ดีที่สุดในการเลือกตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN สำหรับรูปแบบตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ที่เหมาะสมที่ได้จากการหาค่าความเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Pareto Front) ซึ่งประกอบด้วย 14 รูปแบบ (Solution) ดังนั้นจึงต้องมีการตัดสินใจคัดเลือกรูปแบบตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ที่เหมาะสม โดยในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ใช้วิธีการ TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution) สำหรับการคัดเลือกตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ที่เหมาะสม โดยใช้ค่าถ่วงน้ำหนัก w^1 และ w^2 ซึ่งเป็นการให้ค่าน้ำหนักความสำคัญของการตัดสินใจการเลือกรูปแบบที่ดีที่สุด โดยที่ w^1 คือ ต้นทุน (Cost) และ w^2 คือ ค่าคะแนนของอัตราการส่งข้อมูล

(Bitrate) โดยผลการคำนวณน้ำหนักความสำคัญของการตัดสินใจด้วยวิธีการ TOPSIS ดังแสดงในตาราง 4.10 และภาพประกอบ 4.10

ตาราง 4.10 ผลการคำนวณน้ำหนักของหลักเกณฑ์ในการตัดสินใจด้วยวิธีการ TOPSIS

รูปแบบ (Solution)	ค่าถ่วงน้ำหนัก		ต้นทุน (Cost)	คะแนน Bitrate
	w^1	w^2		
1	0.1	0.9	18,854,515	2.809
2	0.2	0.8	17,734,606	2.772
3	0.3	0.7	16,464,458	2.716
4	0.4	0.6	16,464,458	2.716
5	0.5	0.5	16,464,458	2.716
6	0.6	0.4	16,464,458	2.716
7	0.7	0.3	16,464,458	2.716
8	0.8	0.2	16,353,115	2.690
9	0.9	0.1	16,353,115	2.690

จากตาราง 4.10 แสดงผลการคำนวณน้ำหนักของหลักเกณฑ์ในการตัดสินใจด้วยวิธีการ TOPSIS ซึ่งมีการกำหนดช่วงของการคำนวณน้ำหนักของต้นทุน (Cost) และค่าคะแนนของอัตราการส่งข้อมูล (Bitrate) จำนวน 9 รูปแบบ (Solution) จากการวิเคราะห์การคำนวณน้ำหนัก พบว่ามีรูปแบบการเลือกตำแหน่งที่ตั้งเกิดเวทย์ จำนวน 4 กลุ่ม ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

4.3.1 ผลการคำนวณน้ำหนักกลุ่มที่ 1

ผลการคำนวณน้ำหนักกลุ่มที่ 1 มีเพียงหนึ่งรูปแบบ (Solution) คือรูปแบบที่ 1 ค่าถ่วงน้ำหนักที่ $w^1 = 0.1$ และ $w^2 = 0.9$ มีต้นทุน 18,854,515 บาท และคะแนนของอัตราการส่งข้อมูล เท่ากับ 2.809

4.3.2 ผลการคำนวณน้ำหนักกลุ่มที่ 2

ผลการคำนวณน้ำหนักกลุ่มที่ 2 มีเพียงหนึ่งรูปแบบ (Solution) เช่นเดียวกับกลุ่มที่ 1 ซึ่งรูปแบบในกลุ่มนี้คือ รูปแบบที่ 2 ค่าถ่วงน้ำหนักที่ $w^1 = 0.2$ และ $w^2 = 0.8$ มีต้นทุน 17,734,606 บาท และคะแนนของอัตราการส่งข้อมูล เท่ากับ 2.772

4.3.3 ผลการคำนวณน้ำหนักกลุ่มที่ 3

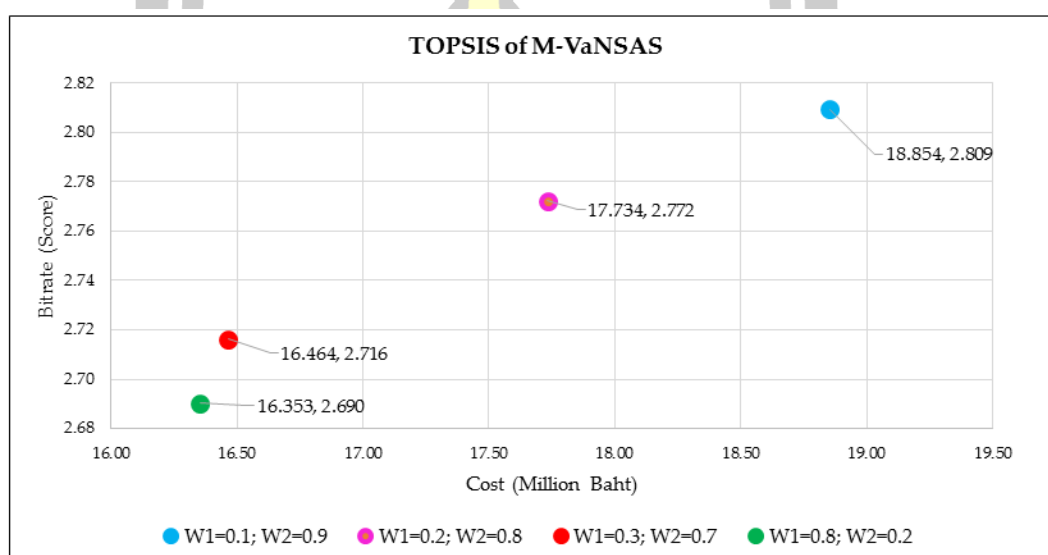
ผลการคำนวณน้ำหนักกลุ่มที่ 3 ประกอบด้วย 5 รูปแบบ (Solution) คือรูปแบบที่ 3 ถึง รูปแบบที่ 7 โดยรูปแบบที่ 3 ค่าถ่วงน้ำหนักที่ $w^1 = 0.3$ และ $w^2 = 0.7$ รูปแบบที่ 4 ค่าถ่วงน้ำหนักที่ $w^1 = 0.4$ และ $w^2 = 0.6$ รูปแบบที่ 5 ค่าถ่วงน้ำหนักที่ $w^1 = 0.5$ และ $w^2 = 0.5$ รูปแบบที่ 6 ค่าถ่วงน้ำหนักที่ $w^1 = 0.6$ และ $w^2 = 0.4$ และรูปแบบที่ 7 ค่าถ่วงน้ำหนักที่ $w^1 = 0.7$

และ $w^2 = 0.3$ ซึ่งในกลุ่มนี้มีต้นทุนและคะแนนของอัตราการส่งข้อมูลที่เท่ากัน คือ มีต้นทุน 16,464,458 บาท และคะแนนของอัตราการส่งข้อมูล เท่ากับ 2.716

4.3.4 ผลการคำนวณน้ำหนักกลุ่มที่ 4

ผลการคำนวณน้ำหนักกลุ่มที่ 3 ประกอบด้วย 2 รูปแบบ (Solution) คือ รูปแบบที่ 8 และรูปแบบที่ 9 โดยรูปแบบที่ 8 ค่าถ่วงน้ำหนักที่ $w^1 = 0.8$ และ $w^2 = 0.2$ และรูปแบบที่ 9 ค่าถ่วงน้ำหนักที่ $w^1 = 0.9$ และ $w^2 = 0.1$ ซึ่งในกลุ่มนี้มีต้นทุนและคะแนนของอัตราการส่งข้อมูลที่เท่ากัน คือ มีต้นทุน 16,353,115 บาท และคะแนนของอัตราการส่งข้อมูล เท่ากับ 2.690

โดยผลการคำนวณน้ำหนักสำหรับคัดเลือกรูปแบบตำแหน่งที่ตั้งเกิดเวทย์ด้วยวิธีการ TOPSIS ดังแสดงใน 4.10



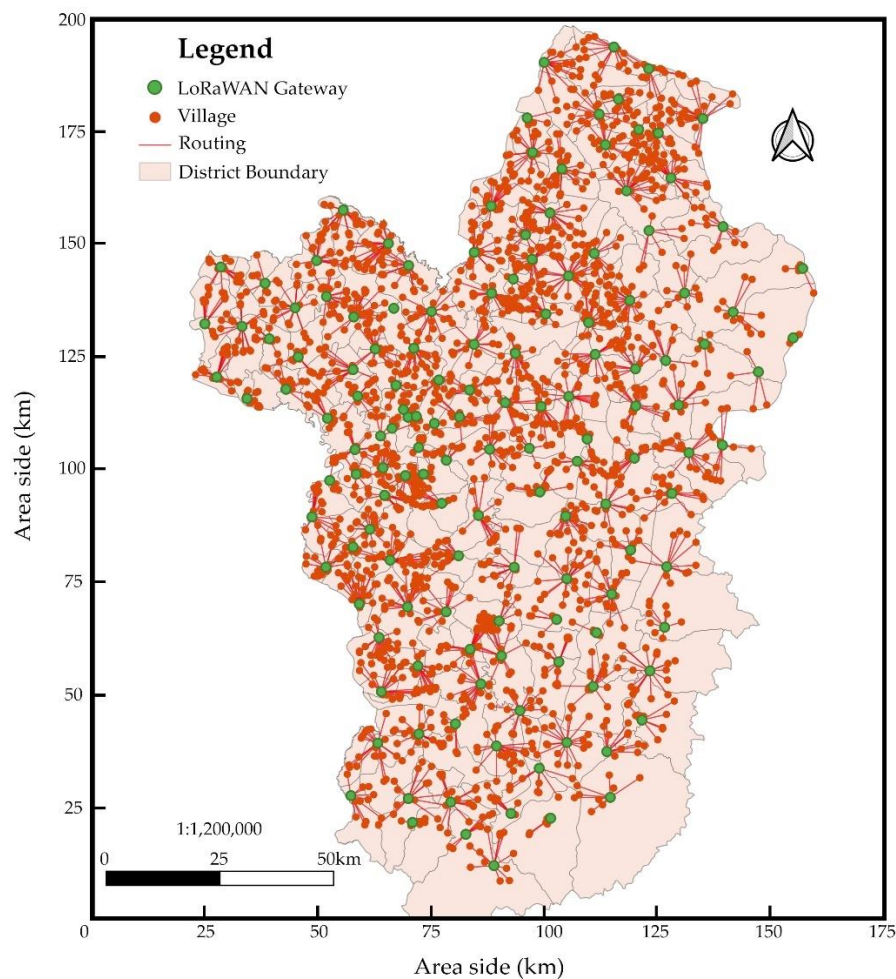
ภาพประกอบ 4.10 คำนวณน้ำหนักของหลักเกณฑ์ในการตัดสินใจด้วยวิธีการ TOPSIS

จากภาพประกอบ 4.10 แสดงให้เห็นถึงการคัดเลือกรูปแบบ (Solution) ด้วยการคำนวณน้ำหนักของหลักเกณฑ์ในการตัดสินใจด้วยวิธีการ TOPSIS พบว่า มีรูปแบบการเลือกตำแหน่งที่ตั้งเกิดเวทย์จำนวน 4 กลุ่ม คือ กลุ่ม 1 มีต้นทุน 18,854,515 บาท และคะแนนของอัตราการส่งข้อมูล เท่ากับ 2.809 กลุ่มที่ 2 มีต้นทุน 17,734,606 บาท และค่าคะแนนของอัตราการส่งข้อมูล เท่ากับ 2.772 กลุ่มที่ 3 มีต้นทุน 16,464,458 บาท และค่าคะแนนของอัตราการส่งข้อมูล เท่ากับ 2.716 และ กลุ่มที่ 4 มีต้นทุน 16,353,115 บาท และค่าคะแนนของอัตราการส่งข้อมูล เท่ากับ 2.690

จากวิเคราะห์ผลการคำนวณน้ำหนักของหลักเกณฑ์ในการตัดสินใจด้วยวิธีการ TOPSIS สามารถสรุปได้ว่า วิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง (M-VaNSAS) ในช่วงการคำนวณน้ำหนักในกลุ่มที่ 3 เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีต้นทุนที่น้อย และค่าคะแนนของอัตราการส่งข้อมูลที่สูง

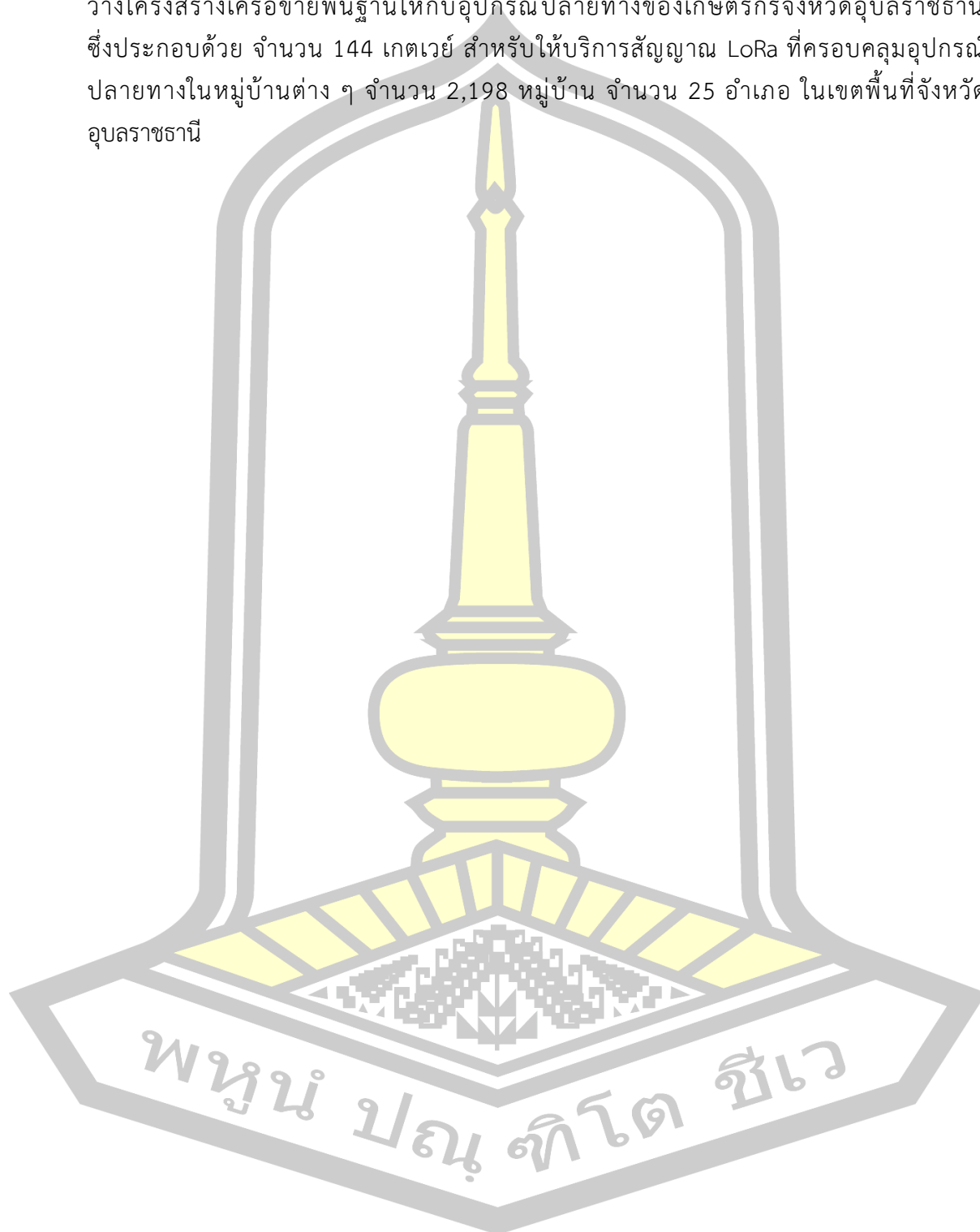
4.4 รูปแบบตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่

การหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของตำแหน่งที่ตั้งเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ ด้วยวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง (M-VaNSAS) พบว่า ผลการคำนวณน้ำหนักที่ $w^1 = 0.3$ และ $w^2 = 0.7$ มีต้นทุน 16,464,458 บาท ค่าคะแนนของอัตราการส่งข้อมูล เท่ากับ 2.716 และมี LoRaWAN gateway จำนวน 144 เกตเวย์ (Gateway) เมื่อนำรูปแบบที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง (M-VaNSAS) มาจัดในรูปแบบแผนที่ ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้โปรแกรม QGIS (Quantum Geographic Information System) สำหรับแสดงตำแหน่งที่ตั้ง LoRaWAN Gateway จำนวน 144 เกตเวย์ (Gateway) ที่จะให้บริการสัญญาณเครือข่าย LoRaWAN กับเกษตรกรสำหรับการทำเกษตรแบบอัจฉริยะ จำนวน 295,942 ครัวเรือน ใน 2,198 หมู่บ้าน ภายในเขตพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี ดังแสดงในภาพประกอบ 4.11



ภาพประกอบ 4.11 แผนที่แสดงที่ตั้ง LoRaWAN Gateway ที่เหมาะสมที่สุดของจังหวัดอุบลราชธานี

จากภาพประกอบ 4.11 แสดงรูปแบบเครือข่าย LoRaWAN ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการวางโครงสร้างเครือข่ายพื้นฐานให้กับอุปกรณ์ปลายทางของเกษตรกรจังหวัดอุบลราชธานี ซึ่งประกอบด้วย จำนวน 144 เกตเวย์ สำหรับให้บริการสัญญาณ LoRa ที่ครอบคลุมอุปกรณ์ปลายทางในหมู่บ้านต่าง ๆ จำนวน 2,198 หมู่บ้าน จำนวน 25 อำเภอ ในเขตพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี



สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะในการหาความเหมาะสมที่สุดสำหรับการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ ที่สามารถลดต้นทุนให้น้อยที่สุด และมีอัตราการส่งข้อมูลสูงสุด ที่จะให้บริการสัญญาณเครือข่าย LoRaWAN กับเกษตรกรสำหรับการทำเกษตรแบบอัจฉริยะ จำนวน 295,942 ครัวเรือน ใน 2,198 หมู่บ้าน จำนวน 25 อำเภอ ภายในเขตพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี โดยการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาเมืองอัจฉริยะเป็นการนำเทคโนโลยีและนวัตกรรมมาใช้ประโยชน์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการเมือง ภายใต้แนวคิดการพัฒนาเมืองน่าอยู่ เมืองทันสมัย ให้ประชาชนในเมืองมีคุณภาพชีวิตที่ดี มีความสุข อย่างยั่งยืน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำเทคโนโลยีเกษตรอัจฉริยะเข้ามาใช้กับภาคการเกษตร ซึ่งสามารถช่วยลดค่าแรงงาน และปรับปรุงคุณภาพผลผลิตทางการเกษตรได้ สำหรับการเกษตรอัจฉริยะในเขตพื้นที่ชนบทสามารถนำเทคโนโลยี LoRa เข้ามาสนับสนุนการเกษตรอัจฉริยะเพื่อให้โครงสร้างพื้นฐานด้านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตสามารถครอบคลุมพื้นที่การเกษตรขนาดใหญ่และห่างไกลจากเมืองได้ สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์เซนเซอร์ต่าง ๆ ผ่านโปรโตคอลการสื่อสาร LoRaWAN ให้สามารถเข้าถึงระบบคลาวด์ (Cloud) สำหรับการประมวลผลข้อมูล เกษตรกรสามารถควบคุมและเฝ้าติดตามพืชผลทางการเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การหาความเหมาะสมที่สุดสำหรับการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ ที่จะต้องคำนึงถึงการกระจายของสัญญาณเพื่อให้สามารถครอบคลุมอุปกรณ์ปลายทาง (End node) และข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ให้บริการ ที่สามารถลดต้นทุนให้น้อยที่สุด และมีอัตราการส่งข้อมูลสูงสุด ที่จะให้บริการสัญญาณเครือข่าย LoRaWAN กับเกษตรกรสำหรับการทำเกษตรแบบอัจฉริยะ จำนวน 295,942 ครัวเรือน ใน 2,198 หมู่บ้าน จำนวน 25 อำเภอ ภายในเขตพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี ซึ่งผู้วิจัยได้นำเสนอวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบดัดแปลง (M-VaNSAS) เพื่อใช้ในการหาความเหมาะสมที่สุดสำหรับการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่

ผลการวิจัย พบว่า ตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ สำหรับให้บริการสัญญาณ LoRa เพื่อให้เกษตรกรสามารถทำเกษตรแบบอัจฉริยะในเขตพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี ต้องใช้ LoRaWAN gateway มีจำนวน 144 เกตเวย์ มีต้นทุน 16,464,458 บาท ค่าคะแนนของอัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 2.716 ประสิทธิภาพของวิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยน

กลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบตัดแปลง (M-VaNSAS) มีประสิทธิภาพสูงสุด สำหรับการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ รองลงมาคือ วิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE) และวิธีการทางพันธุกรรม (GA) ตามลำดับ โดยสามารถนำรูปแบบตำแหน่งที่ตั้ง LoRaWAN gateway ไปใช้เป็นแนวทางในการวางโครงสร้างเครือข่ายพื้นฐาน เพื่อส่งเสริมการพัฒนาเกษตรอัจฉริยะในเขตพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี เพื่อให้เกิดโมเดลการพัฒนาเมืองอัจฉริยะ และนวัตกรรมใหม่ๆ สำหรับการพัฒนาประเทศต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการวิจัยในครั้งนี้เป็นการหารูปแบบเครือข่าย LoRaWAN ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับจังหวัดอุบลราชธานี ซึ่งการเป็นหาความเหมาะสมที่สุดสำหรับการเลือกตำแหน่งที่ตั้งแบบหลายเกตเวย์ในเครือข่าย LoRaWAN ขนาดใหญ่ โดยใช้วิธีการค้นหาแบบปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในพื้นที่ใกล้เคียงตัวแปรแบบตัดแปลง (M-VaNSAS) เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับวิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE) และวิธีการทางพันธุกรรม (GA) เพื่อลดต้นทุนให้ต่ำที่สุด และมีค่าคะแนนของอัตราการส่งข้อมูลสูงสุด สำหรับการวิจัยในครั้งต่อไปควรศึกษาการเพิ่มวัตถุประสงค์อื่น ๆ ยกตัวอย่างเช่น คุณภาพของการให้บริการ (Quality of Service) การชนกันของแพ็กเกจ (Packet collision) การจัดสรรพลังงาน (Power allocation) และปริมาณงาน (Throughput) ทั้งในพื้นที่ในเขตเมืองและชนบท เป็นต้น

พูน ปรนุ ทิโต ชีเว

บรรณานุกรม



- กรมพัฒนาที่ดิน. (2562). *การใช้ที่ดินประเทศไทย พ.ศ. 2560-2561*. (ออนไลน์). (อ้างอิงเมื่อ 10 พฤศจิกายน 2565). จาก: http://www1.ldd.go.th/web_OLP/result/luse_result60-61.htm
- กอบเกียรติ สระอุบล. (2561). *พัฒนา IoT บนแพลตฟอร์ม Arduino และ Raspberry Pi*. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด(มหาชน).
- กิตติศักดิ์ ทองมีทิพย์. (2564). พัฒนาการเกษตรกรรมของประเทศไทย:ในมิติด้านการพัฒนาชุมชนและคุณภาพชีวิต. *PSDS Journal of Development Studies*, 4(1), 132–162.
- ณัฐกิตติ์ ปัทมะ. (2563). *การพัฒนาาระบบเกษตรอัจฉริยะของประเทศไทย*. (ออนไลน์). (อ้างอิงเมื่อ 1 พฤศจิกายน 2565). จาก: https://www.senate.go.th/view/1/article_detail/เอกสารวิชาการสำนักวิชาการ/6303/TH-TH
- ธีรยุทธ มูเล็ง. (2562). *การตัดสินใจเลือกที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าเกษตรในจังหวัดยะลาด้วยวิธี FUZZY TOPSIS* [มหาวิทยาลัยศรีปทุม]. <http://dspace.spu.ac.th/handle/123456789/6176>
- นันทพงษ์ นันทสำเร็จ. (2553). *การพัฒนาเมตาฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาการเลือกสถานที่ตั้งและจัดเส้นทางการขนส่งแบบหลายขั้นตอน และหลายวัตถุประสงค์*. วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- ภรณ์ยา อามฤครัตน์, & พยุง มีสัง. (2555). การหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ด้วยขั้นตอนวิธีด้านวิวัฒนาการ. *วารสารเทคโนโลยีสารสนเทศ*, 8(2), 73–80. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/IT_Journal/article/view/54254/45039
- ภัษริ นิมศรีกุล. (2551). การประยุกต์การตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ในการคัดเลือกศูนย์กลางโลจิสติกส์ด้านการขนส่งสินค้าในประเทศไทย. *การประชุมเชิงวิชาการประจำปีด้านการจัดการโซ่อุปทานและโลจิสติกส์ ครั้งที่ 8*, 930–941.
- ยุทธพงษ์ พรหมสีนอง. (2558). *การแก้ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะแบบพลวัตที่มีกรอบเวลาด้วยวิธีการค้นหาในย่านใกล้เคียงแปรผัน*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- ระพีพันธ์ ปิตาคะโส. (2559). *วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง สำหรับแก้ไขปัญหาการขนส่งโลจิสติกส์*. อุบลราชธานี : ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- สำนักงานคณะกรรมการข้อมูลข่าวสารของราชการ. (2563). *ปฏิทินผลผลิตและปฏิทินการเพาะปลูก ปี 2563/64*. (อ้างอิงเมื่อ 20 พฤศจิกายน 2565). จาก: <http://thaisdi.gistda.or.th/dataset/oae0018/resource/0595db04-975b-4d2f-a935-b9b2a05af632>
- สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. (2559). *แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับที่สิบสอง พ.ศ. 2560-2564*. (ออนไลน์). (อ้างอิงเมื่อ 2 ตุลาคม 2565). จาก: https://www.nesdc.go.th/ewt_dl_link.php?nid=6422
- สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. (2561). *ยุทธศาสตร์ชาติ พ.ศ. 2561-2580*. (ออนไลน์). (อ้างอิงเมื่อ 2 ตุลาคม 2565). จาก:

- https://www.nesdc.go.th/download/document/SAC/NS_PlanOct2018.pdf
สำนักงานส่งเสริมเศรษฐกิจดิจิทัล. (2564). *การส่งเสริมเมืองอัจฉริยะ*. (ออนไลน์). (อ้างอิงเมื่อ 1 ธันวาคม 2565). จาก: <https://www.depa.or.th/th/smart-city-plan/smart-city-office>
- สำนักงานสถิติแห่งชาติ. (2564). *การสำรวจภาวะการทำงานของประชากรทั่วราชอาณาจักร ไตรมาสที่ 2 : เมษายน-มิถุนายน 2564*. (ออนไลน์). (อ้างอิงเมื่อ 1 พฤศจิกายน 2565). จาก: <http://www.nso.go.th/sites/2014/Pages/home.aspx>
- อภิรดี สรวีสุต. (2559). การตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์:เปรียบเทียบแนวคิดและวิธีการระหว่าง SAW AHP และ TOPSIS. *วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏวราชนครินทร์*, 8(2), 180–192. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/pnujr/article/view/56222>
- เอกพงศ์ คงสวัสดิ์. (2562). *การสร้างแบบจำลองการสูญเสียคลื่นสัญญาณวิทยุในเขตพื้นที่เมืองของประเทศไทยโดยใช้สายอากาศชนิดทิศทางเดี่ยวบนเทคโนโลยีการสื่อสารลอร์ว้าแวนสำหรับสมาร์ทมิเตอร์*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- Amous, M., Toumi, S., Jarboui, B., & Eddaly, M. (2017). A variable neighborhood search algorithm for the capacitated vehicle routing problem. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 58, 231–238. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.endm.2017.03.030>
- Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., & Townsley, W. M. (2016). A study of Lora: Long range & low power networks for the internet of things. *Sensors (Switzerland)*, 16(9), 1–18. <https://doi.org/10.3390/s16091466>
- Blum, C., & Roli, A. (2003). Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison. *ACM Comput. Surv.*, 35(3), 268–308. <https://doi.org/10.1145/937503.937505>
- Chainarong, S., Pitakaso, R., Sirirak, W., Srichok, T., Khonjun, S., Sethanan, K., & Sangthean, T. (2021). Multi-objective variable neighborhood strategy adaptive search for tuning optimal parameters of ssm-adc12 aluminum friction stir welding. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 5(4). <https://doi.org/10.3390/jmmp5040123>
- Citoni, B., Ansari, S., Abbasi, Q. H., Imran, M. A., & Hussain, S. (2021). Impact of inter-gateway distance on lorawan performance. *Electronics (Switzerland)*, 10(18). <https://doi.org/10.3390/electronics10182197>
- Clohesy, T., Acton, T., & Morgan, L. (2014). Smart City as a Service (SCaaS): A Future

- Roadmap for E-Government Smart City Cloud Computing Initiatives. *2014 IEEE/ACM 7th International Conference on Utility and Cloud Computing*, 836–841. <https://doi.org/10.1109/UCC.2014.136>
- Eberhart, R., & Kennedy, J. (1995). A new optimizer using particle swarm theory. *MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 39–43. <https://doi.org/10.1109/MHS.1995.494215>
- Gassmann, O., Böhm, J., & Palmié, M. (2019). *Smart Cities: Introducing Digital Innovation to Cities*. Emerald Publishing Limited.
- Gaur, A., Scotney, B., Parr, G., & McClean, S. (2015). Smart City Architecture and its Applications Based on IoT. *Procedia Computer Science*, 52, 1089–1094. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.05.122>
- Grochla, K., & Potys, K. (2020). Heuristic Algorithm for Gateway Location Selection in Large Scale LoRa Networks. *2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, 777–782. <https://doi.org/10.1109/IWCMC48107.2020.9148435>
- Hashem, I. A. T., Chang, V., Anuar, N. B., Adewole, K., Yaqoob, I., Gani, A., Ahmed, E., & Chiroma, H. (2016). The role of big data in smart city. *International Journal of Information Management*, 36(5), 748–758. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2016.05.002>
- Hassan, W., Føre, M., Ulvund, J. B., & Alfredsen, J. A. (2019). Internet of Fish: Integration of acoustic telemetry with LPWAN for efficient real-time monitoring of fish in marine farms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 163(September 2018), 104850. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.06.005>
- Hwang, C.-L., & Yoon, K. (1981). Methods for Multiple Attribute Decision Making. In *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications A State-of-the-Art Survey* (pp. 58–191). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9_3
- Jirasirilerd, G., Pitakaso, R., Sethanan, K., Kaewman, S., Sirirak, W., & Kosacka-Olejnik,

- M. (2020). Simple assembly line balancing problem type 2 by variable neighborhood strategy adaptive search: A case study garment industry. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 6(1).
<https://doi.org/10.3390/JOITMC6010021>
- Kim, T., Ramos, C., & Mohammed, S. (2017). Smart City and IoT. *Future Generation Computer Systems*, 76, 159–162.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.future.2017.03.034>
- Latre, S., Leroux, P., Coenen, T., Braem, B., Ballon, P., & Demeester, P. (2016). City of things: An integrated and multi-technology testbed for IoT smart city experiments. *2016 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, 1–8.
<https://doi.org/10.1109/ISC2.2016.7580875>
- Li, S., Xu, L. Da, & Zhao, S. (2018). 5G Internet of Things: A survey. *Journal of Industrial Information Integration*, 10, 1–9.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jii.2018.01.005>
- LoRa Alliance. (2020). *LoRaWAN regional parameters*. (Online). (Cited 8 November 2022). Available From: https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/rp_2-1.0.1.pdf
- Loubany, A., Lahoud, S., & El Chall, R. (2020). Adaptive algorithm for spreading factor selection in LoRaWAN networks with multiple gateways. *Computer Networks*, 182, 107491. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107491>
- Matni, N., Moraes, J., Rosário, D., Cerqueira, E., & Neto, A. (2019). Optimal Gateway Placement Based on Fuzzy C-Means for Low Power Wide Area Networks. *2019 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, 1–6.
<https://doi.org/10.1109/LATINCOM48065.2019.8937899>
- Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., & Meyer, F. (2019). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*, 5(1), 1–7.
<https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.005>
- Miles, B., Bourenane, E. B., Boucherkha, S., & Chikhi, S. (2020). A study of LoRaWAN

protocol performance for IoT applications in smart agriculture. *Computer Communications*, 164(September), 148–157.

<https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.10.009>

Mjirda, A., Jarboui, B., Macedo, R., Hanafi, S., & Mladenović, N. (2014). A two phase variable neighborhood search for the multi-product inventory routing problem. *Computers & Operations Research*, 52, 291–299.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.06.006>

Montagny, S. (2021). *LoRa-LoRaWAN and Internet of Things*. (Online). (Cited 1 March 2022). Available From: <https://www.univ-smb.fr/lorawan/wp-content/uploads/2022/01/Book-LoRa-LoRaWAN-and-Internet-of-Things.pdf>

Moysiadis, V., Sarigiannidis, P., Vitsas, V., & Khelifi, A. (2021). Smart Farming in Europe. *Computer Science Review*, 39, 100345.

<https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2020.100345>

Nanthapodej, R., Liu, C. H., Nitisiri, K., & Pattanapairoj, S. (2021). Variable neighborhood strategy adaptive search to solve parallel-machine scheduling to minimize energy consumption while considering job priority and control makespan. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(11).

<https://doi.org/10.3390/app11115311>

Nicolas, D., Dominique, R., Ahmed, S., Olivier, H., Gabor POP, & Guillaume REMOND. (2016). *Lora device developer guide Orange Connected Objects & Partnerships*. (Online). (Cited 1 March 2022). Available From:

https://www.multitech.com/documents/publications/marketing-guides/lora_device_dev_guide_orange.pdf

Pitakaso, R., Nanthasamroeng, N., Dinkoksung, S., Chindaprasert, K., Sirirak, W., Srichok, T., Khonjun, S., Sirisan, S., Jirasirlerd, G., & Chomchalao, C. (2022). Solving the Optimal Selection of Wellness Tourist Attractions and Destinations in the GMS Using the AMIS Algorithm. *Computation*, 10(9).

<https://doi.org/10.3390/computation10090165>

Pitakaso, R., Sethanan, K., & Theeraviriya, C. (2020). Variable neighborhood strategy adaptive search for solving green 2-echelon location routing problem.

Computers and Electronics in Agriculture, 173, 105406.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105406>

Qin, A. K., Huang, V. L., & Suganthan, P. N. (2009). Differential Evolution Algorithm With Strategy Adaptation for Global Numerical Optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 13(2), 398–417.

<https://doi.org/10.1109/TEVC.2008.927706>

Sangkaphet, P., Pitakaso, R., Sethanan, K., Nanthasamroeng, N., Pranet, K., Khonjun, S., Srichok, T., Kaewman, S., & Kaewta, C. (2022). A Multiobjective Variable Neighborhood Strategy Adaptive Search to Optimize the Dynamic EMS Location–Allocation Problem. *Computation*, 10(6), 103.

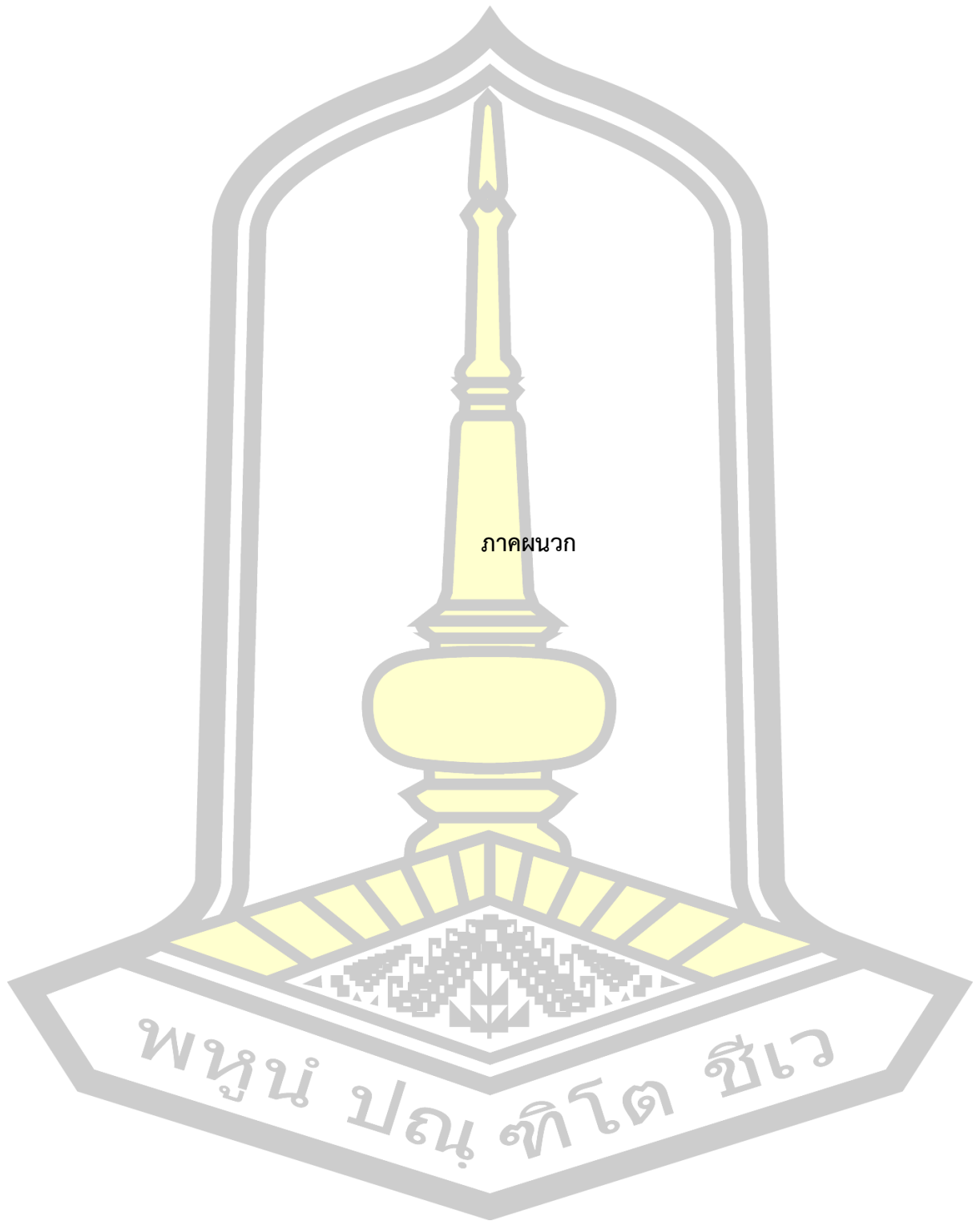
<https://doi.org/10.3390/computation10060103>

Semtech Corporation. (2019). *LoRa® and LoRaWAN®: A Technical Overview*.

(Online). (Cited 8 November 2022). Available From: https://loradevelopers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf

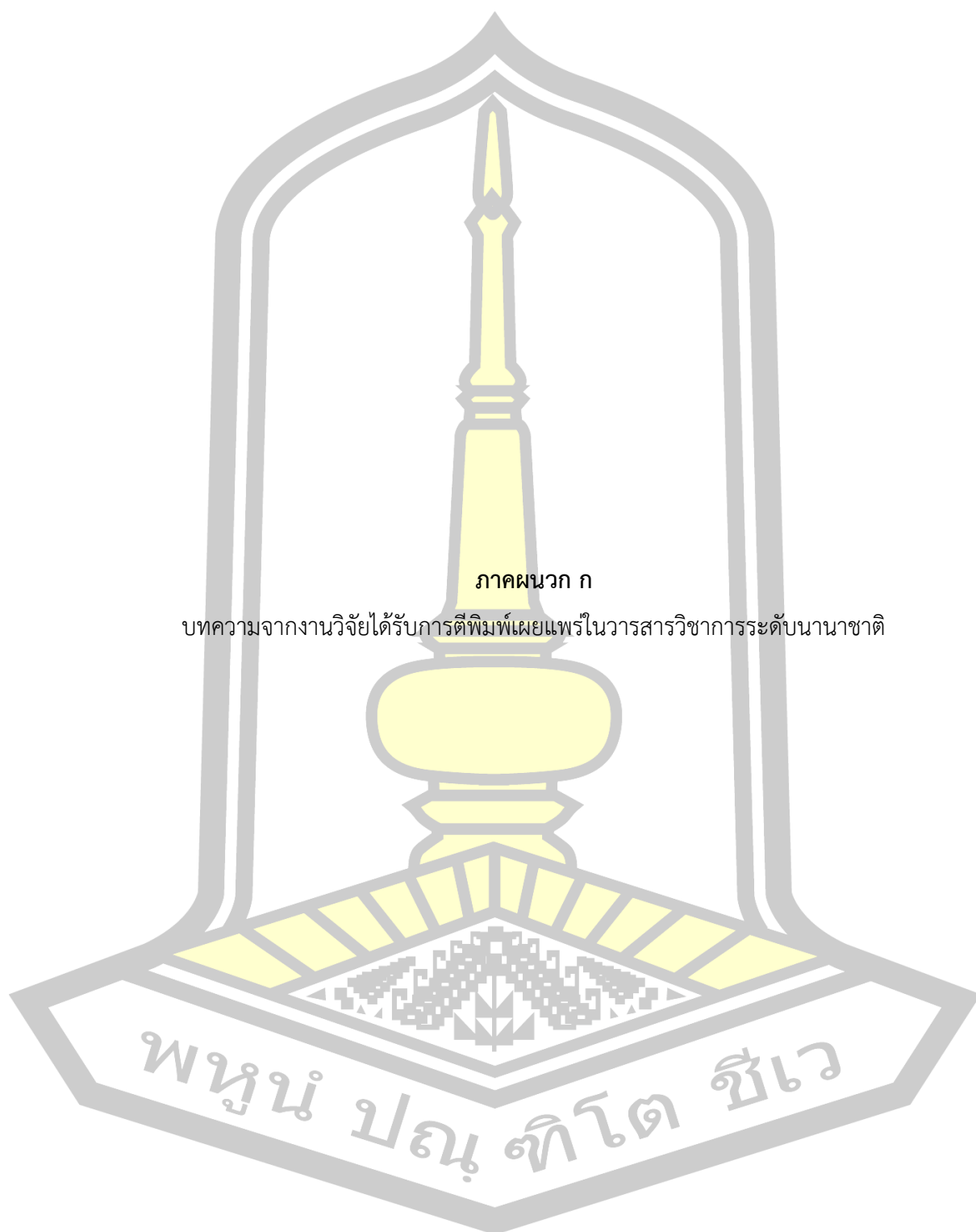
Storn, R., & Price, K. (1997). Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, 11(4), 341–359. <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>

Theeraviriya, C., Pitakaso, R., Sethanan, K., Kaewman, S., & Kosacka-Olejnik, M. (2020). A new optimization technique for the location and routing management in agricultural logistics. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 6(1), 1–21. <https://doi.org/10.3390/joitmc6010011>



ภาคผนวก

พหุณฺ์ ปณฺุ ทิโต ชีเว



ภาคผนวก ก

บทความจากงานวิจัยได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

พหุณฺ์ ปณฺุ ทิโต สีเว

บทความจากงานวิจัยเรื่อง “An optimization of multiple gateway location selection in long range wide area network networks”

Kaewta, C., Savithi, C., & Naenudorn, E. (2023). An optimization of multiple gateway location selection in long range wide area network networks. 30(2), 1011–1020. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v30.i2.pp1011-1020>

ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ ชื่อวารสาร Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science หมายเลข ISSN 2502-4752 ซึ่งถูกจัดให้อยู่ในฐานข้อมูล Scopus กลุ่ม Q3 ที่มีค่า SJR (Scimago Journal & Country Rank) ณ ปี ค.ศ. 2022 เท่ากับ 0.276 เผยแพร่ในปี ค.ศ. 2023 เล่มที่ 30 ฉบับที่ 2 หน้า 1011-1020 (Vol. 30, No. 2, May 2023, pp. 1011~1020)



An optimization of multiple gateway location selection in long range wide area network networks

Chutchai Kaewta^{1,2}, Charuay Savithi², Ekkachai Naenudorn²

¹Digital Innovation, Faculty of Computer Science, Ubon Ratchathani Rajabhat University, Ratchathani, Thailand

²Smart City Management and Digital Innovation, Mahasarakham Business School, Mahasarakham University, Mahasarakham, Thailand

Article Info

Article history:

Received Aug 26, 2022

Revised Jan 19, 2023

Accepted Jan 22, 2023

Keywords:

Gateway location selection
 Long range wide area network
 Optimization
 Radio planning
 Smart agriculture

ABSTRACT

The adoption of smart agricultural technology in rural areas is still limited in terms of network infrastructure supported. As a result, farmers continue to practice traditional farming that mainly focuses on human labor and requires experience in planning the production of agricultural products in unstable weather conditions, which makes the farmers highly risky. Currently, long range (LoRa) technology is a smart agriculture support tool that will enable the Internet of Things devices to a large number of end nodes distributed over a wide geographical area. They could access cloud computing from a long distance, kilometers, for processing via long range wide area network (LoRaWAN) communication protocol. When choosing a multiple gateway location for LoRaWAN networks, big networks must consider the spatial distribution of clients, radio signal propagation, and the cap on the number of devices served access. In this study, a mathematical model is developed to optimize coverage. The LINGO modeling program, an exact software method, was used to test the model. The findings indicated that the best six gateways at the optimal LoRaWAN gateway location. The gateways can provide signal coverage for all end nodes and can manage the capacity of the LoRaWAN gateway to support the proper number of end nodes.

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



Corresponding Author:

Charuay Savithi
 Smart City Management and Digital Innovation, Mahasarakham Business School
 Mahasarakham University
 Kantharawichai, Mahasarakham 44150, Thailand
 Email: charuay.s@msu.ac.th

1. INTRODUCTION

Farmers in Thailand still encounter high production costs. In addition, the soil and weather conditions are uncertain. Agricultural products are low in price, as well as the population entering the aging society. Therefore, the idea of using Smart agriculture to replace human labor [1]. Smart agriculture is to take the innovation and to use data analytics in farm management to better accurately plan the production of agricultural products [2]. This reduces costs and ensures quality agricultural products. However, the adoption of smart agricultural technology in rural areas in Thailand is still limited in terms of internet networks which have not been yet supported due to the farmer's farm's large size and remote location from the city. It is not worth to invest in an Internet service provider's infrastructure, particularly in Warin Chamrab, Ubon Ratchathani province, Thailand. This area is 600 kilometers away from Bangkok, the capital city of Thailand. However, some argucultureres bring internet of things (IoT) into farming by installing a Wi-Fi router using a subscriber identity module (SIM) card to distribute the Internet wirelessly to enable internet of things devices to log into cloud computing for processing to control and monitor agricultural crops. These devices are still limited in terms of signal transmission over a long distance. One of the most widely utilized technologies is

Journal homepage: <http://ijeecs.iaescore.com>

cellular networks. Wi-Fi is best used at communication distances is less than 100 meters [3]. It cannot reach vast agricultural areas. Smart agriculture in rural areas may still not be financially feasible if the signal reaches the entire region, because it may require significant network infrastructure expenditure.

Low power wide area networks (LPWAN) technology is a smart agriculture support tool that will enable the internet of things devices to access cloud computing for processing [4]–[6] which [7], [8] compared LPWAN networks technologies and found that LoRa technology was well suited for application to large-scale internet of things technologies. Truong *et al.* [9] studied the performance of different wireless sensor networks by using LoRa-Zigbee hybrid communication, and they could work together efficiently. [4] they have investigated the acoustic fish telemetry and LoRa-based LPWAN networks to provide real-time access to the telemetry data enabling farmers to obtain remote fish behavior data in their fish farms. For LPWANs used in smart agriculture IoT applications, LoRaWAN is regarded as the most appropriate communication network [3] and suitable for smart agriculture in rural areas. For the application of LoRa technology to communicate with IoT devices with a large number of nodes distributed over a wide geographical area over a distance of several kilometers via the LoRaWAN communication protocol, multiple gateways are used. To choose the most suitable gateway location In a LoRaWAN network, the distribution of the signal must be considered to cover the end nodes, and the service gateway limitations such as the gateway capacity must be considered to support the number of end nodes [10].

A large-scale long range wide area network (LoRaWAN) network has been the subject of numerous investigations on multiple gateways [11], they have explored the impact of nodes and gateway scaling and densification while accounting for the capture effect, on the system's reliability, and suggest an optimization problem to determine the end nodes distribution at various spreading factors in LoRaWAN with multiple gateways. The results show the performance of the algorithm improves the throughput and packet delivery ratio in the networks [12]. A comprehensive study of long range (LoRa) scalability is carried out by taking into account various channel parameters and employing various tools from stochastic geometry. The results show that including more gateways in the model reduces the coverage probability even further. Matni *et al.* [13], proposed the DPLACE model for LoRaWAN gateway placement, which accounts for buildings, device behavior following the Poisson pattern, and gateway failure. The simulation results demonstrated that DPLACE model performance in terms of operational expenditure, capital expenditure, and quality of service. Romero *et al.* [14], a collision avoidance resource allocation algorithm, was created with the goal of increasing the capacity of LoRaWAN. The results show the performance of the solution outperforms standard LoRaWAN networks, achieving a capacity gain of 95.2%. Matni *et al.* [15], study of placing multiple gateways in an area considering quality of service (QoS), capital expenditure, and operational expenditure requirements. The algorithm used the fuzzy C-means to compute the gateway placement. The results show that PLACE was reduced by 36% of the Capital expenditure. Based on gradient optimization, [16]'s research proposes a heuristic algorithm for selecting access point locations from a given set of candidate locations. The proposed method allows for the selection of a sub-optimal set of locations that provide full coverage while taking capacity dimensioning based on the Spreading Factor and expected channel utilization into account. Lavric and Popa [17]' work examines the LoRaWAN performance level by focusing on the maximum number of end nodes that can communicate on a LoRa. The results show the configuration with the lowest transfer rate is the source of collisions. At the application level, a possible solution for raising the transfer rate or declining the duty cycle parameter. The impact of known causes of packet loss in an uplink-only LoRaWAN on the overall quality of service for two gateways is also investigated [18]. To maximize the packet delivery ratio, two gateways should not be placed too close or too far apart, and should avoid SF11 and 12. Bor *et al.* [19] investigated the capacity limits of LoRa networks to develop models describing LoRa communication behavior, and he used models to parameterize a LoRa simulation to study scalability. According to the results, a typical smart city deployment can support 120 end nodes per 3.8 ha, which is insufficient for future IoT deployments. LoRa networks can scale quite well if dynamic communication parameter selection is used. Petäjäjärvi *et al.* [20] analyzed and reported on experimental validation of the LoRaWAN technology's various performance metrics. The results revealed that using a transmit power of 14 dBm and the highest spreading Factor of 12, more than 60% of packets were received from a distance of 30 km on water. When lower spreading factors are used, the communication link becomes more reliable. Georgiou and Raza [21]'s has been analyzed and modeled using stochastic geometry for a single cell. Due to signal interference when using the same spreading sequence, the probability of coverage decreased exponentially as the number of end devices increased.

This article proposes radio planning with a solution of an optimization of multiple gateway location selection in LoRaWAN. The problem is based on a real-life case study in Warin Chamrap district, Ubon Ratchathani Province, Thailand. The project site consists of 50 villages with 7,139 end nodes. Gateway location selections were considered from gateway maximal capacity and the distance between the gateway locations for deciding proper gateway locations [11], [16] by considering the distance between gateways that

should not be too short or to far also, spreading of the end nodes according to the gateway distance should avoid spreading factors SF11 and SF12 [17]. In this paper, a mathematical model with the objective function of coverage maximization is developed. The model was validated using the LINGO modeling program, which is a precise software method. After that, the results were analyzed and the quantum geographic information system program was used to display the location and coverage of each signal gateway in a map format. This is to be a guideline for setting up a network infrastructure for IoT devices in rural areas for community development to be ready to produce quality agricultural products that are sufficient to meet consumer demand. This study's method is divided into five sections: introduction, overview of LoRa and LoRaWAN, mathematical model formulation, results and discussion, and conclusions.

2. LORA AND LORAWAN OVERVIEW

LoRa is a physical layer radio frequency modulation technology for low-power and wide-area networks (LPWANs). LoRa, enables long-distance communications of up to 5 kilometers in urban areas and up to 15 kilometers in rural areas [6]. LoRa uses chirp spread spectrum (CSS) signal modulation to spread a narrow-band signal over a wider channel bandwidth. Because of the processing gain of the spread spectrum technique, this technique makes the signal resistant to interference. The end nodes located close to a gateway should transmit data at a low spreading factor. An end node located several kilometers from a gateway will need to transmit with a higher spreading factor. LoRa is standardized to support multiple frequency bands. For Thailand, it is licensed to operate in the 920-925 MHz frequency band, which meets the AS923 MHz standard, which is an unlicensed band [22]. Important parameters for the modulation are bandwidth (BW), spreading factor (SF), and code rate (CR). LoRa modulation has a total of six spreading factors (SF7 to SF12) [5], [23]. The LoRa transmission speed depends on the frequency change of each chip signal determined by the spreading factor, bandwidth, bitrate, time on air (ToA), and transmission distance (Range) as shown in Table 1 [6], [24].

Table 1. Spreading factor (SF) versus bitrate, time on air (ToA) and range

Spreading factor	Bitrate (bps)	Time on air (ms)	Range (km)
SF7	5470	56	2
SF8	3125	100	4
SF9	1760	200	6
SF10	980	370	8
SF11	440	740	11
SF12	290	1400	14

Table 1 shows the LoRaWAN protocol spreading factor versus bitrate, range, and time on air, which can be used for uplink messages on bandwidth 125 kHz. It shows the equivalent bit rate as well as the estimated range in the rural environment. It also shows the dwell time, or Time on Air, values for a 10-byte payload for each of the six spreading factors. If the spreading factors are low, the transmission rate (Bitrate) is large, the time on air is less, and the transmission distance (Range) will be short. On the other hand, if the Spreading Factors are a lot, the bitrate is small, and time on air; the transmission distance (Range) will be distant.

Long range wide area network (LoRaWAN) is a medium access control (MAC) layer protocol above it. LoRa communication could reduce noise, interference, and increase channel capacity and expand wide area network (WAN) which can connect the end nodes with cloud computing through LoRaWAN gateway. The LoRaWAN is appropriate for sending data with small data packets, such as sensor reading data [25]. The LoRaWAN standard is based on the LoRa Alliance, a leading non-profit organization for communications worldwide, to drive and standardization of LoRaWAN communication network technology by LoRaWAN network architecture as shown in Figure 1.

From Figure 1, it shows the LoRaWAN architecture consisting of four parts: end nodes, gateway, network server, and application server, which can be applied in a variety of applications. Examples include smart agriculture, smart home, wireless sensor networks, the internet of things, early warning, and smart city. The LoRaWAN architecture is composed of end nodes that transmit sensor data or receive commands from a network server for data access or device control. By accessing data or controlling devices according to LoRaWAN requirements, there are three classes which are classes A, B, and C. All devices must be responsible for class A operation. These modes of operation deal with how the devices interact with the network. Gateway is an intermediary connection between end nodes and network server by intercepting the preamble of LoRa signals sent from each end nodes and forwarding the data set to the server through internet protocol (IP) which can have a gateway, which could be more than one gateway (multi gateway). Network

An optimization of multiple gateway location selection in long range wide area ... (Chutchai Kaewta)

server or computer server that provides services in the LoRaWAN network brings data sets from the gateway to the process. The application server or application is a part of the use of data obtained from the server such as a data reporting system or display data with graphs, database system or reporting data to smartphone applications, etc. The capacity of a LoRaWAN network is determined by the density of its gateways. Using an adaptive data rate (ADR) mechanism to maximize network capacity is important. End nodes closest to a gateway transmit with the lowest spreading factor, reducing their time on air. More distant end nodes transmit at a greater spreading factor.

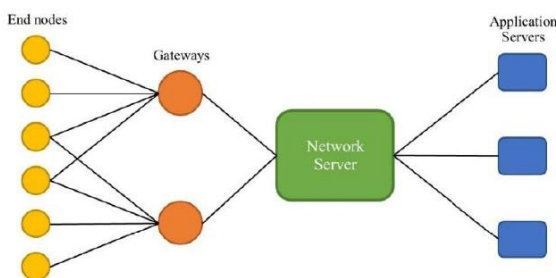


Figure 1. LoRaWAN architecture

3. MATHEMATICAL MODEL FORMULATION

The multiple gateway location selections in LoRaWAN and extensive networks must consider the spatial distribution of the end node, radio signal propagation, and the cap on the number of devices served access. This section presents the construction of the problem definitions and the mathematical model formulation, which is applied to compute radio planning with a solution for optimizing multiple gateway location selections in LoRaWAN, a case study based on a real-life in Warin Chamrap district, Ubon Ratchathani Province, Thailand, which is defined as shown in problem definitions and mathematical model.

3.1. Problem definitions

To select a gateway location in a large LoRaWAN network where the signal can cover end nodes in every village, it is possible to set 50 gateways according to the coordinates of the villages and 7,139 end nodes distributed in each village, as an example shown in Table 2. gateway location selections are based on i) gateway maximal capacity that can support 2,000 end nodes, ii) the signal service range of each gateways that allows end nodes to transmit in a spreading factor of SF7-SF10 using distance. Determine, and iii) the distance between gateways by defining the maximum distance between a LoRaWAN gateway and a village (T^1) is 8 kilometers, while the minimum distance between two LoRaWAN gateways (T^2) is 10 kilometers. Table 2 shows an example of possible locations to set a gateway based on village coordinates. Variables containing id is Village id, x is Longitude, y is Latitude, and pop is the number of end nodes in the village. The possible number of the gateway location set up is 50 according to the coordinates of the villages.

Table 2. Examples of possible locations to set up a gateway

Variables	Description				
id	1	2	3	...	50
x	104.891022	104.901194	104.71463	...	104.915719
y	15.147308	15.15089263	15.135502	...	15.216261
pop	95	184	161	...	214

3.2. Mathematical model

The gateway location selections must consider the spatial distribution of the end node, radio signal propagation, maximal gateway capacity, and the distance between the gateway locations for deciding the proper gateway locations. The mathematical model developed for the proposed problem is applied to compute the radio planning with a solution of optimization of multiple gateway location selection in

LoRaWAN. In this study, a mathematical model is developed to optimize coverage. The mathematical model is defined as shown in Indices, Parameters, Decision Variables, Objective Function, and Subject To.

Indices

r	LoRaWAN gateway location $r=1 \dots R$
l	LoRaWAN gateway location $l=1 \dots R$
v	Village $v=1 \dots V$

Parameters

R	Maximum possible location to locate LoRaWAN gateway
V	Total number of villages
T^1	Maximum allowed distance of LoRaWAN gateway and village
T^2	Minimum distance between two LoRaWAN gateways
P_v	Number of populations used LoRaWAN gateway in village v
D_{rv}	Distance between r and v
C_r	Capacity of LoRaWAN gateway r
M	Big M, great number
S_{rl}	Distance between r and l

Decision variables

Y_r	$= \begin{cases} 1 & \text{if location } r \text{ is used to locate the LoRaWAN} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$
X_{rv}	$= \begin{cases} 1 & \text{if location } r \text{ serve village } v \text{ and the distance of } r \text{ and } v \text{ higher than } T^1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$
Z_{rv}	$= \begin{cases} 1 & \text{if location } r \text{ and village } v \text{ has distance more than } T^1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$
W_{rl}	$= \begin{cases} 1 & \text{if location } r \text{ and } l \text{ is in used} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$
H_{rl}	Distance between LoRaWAN r to LoRaWAN l

Objective function

$$\text{Max } Z = \sum_{v=1}^V \sum_{r=1}^R (1 - X_{rv}) P_v \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{r=1}^R X_{rv} \geq 1 \quad \forall v = 1 \dots V \quad (2)$$

$$X_{rv} \leq Y_r \quad \forall v = 1 \dots V, r = 1 \dots R \quad (3)$$

$$X_{rv} D_{rv} \leq T^1 Z_{rv} \quad \forall v = 1 \dots V, r = 1 \dots R \quad (4)$$

$$\sum_{v=1}^V X_{rv} P_v \leq C_r \quad \forall r = 1 \dots R \quad (5)$$

$$W_{rl} = Y_r Y_l \quad \forall r = 1 \dots R, l = 1 \dots R \quad (6)$$

$$H_{rl} = (1 - W_{rl})M + S_{rl} \quad \forall r = 1 \dots R, l = 1 \dots R \quad (7)$$

$$H_{rl} \geq T^2 \quad \forall r = 1 \dots R, l = 1 \dots R \quad (8)$$

The objective function is (1), which attempts to maximize the number of populations covered by the LoRaWAN. According to (2) specifies that each village must have at least one LoRaWAN. As shown in (3) ensures that LoRaWAN r can only serve village v when it is operational and located, whereas (4) ensures that the maximum distance between LoRaWAN r and village v must be less than T^1 . According to (5) ensures that the total population of LoRaWAN r is less than its capacity. According to (6), (7), and (8) are used to ensure

that the distance between two LoRaWAN gateways is greater than T^2 . To calculate the distance between villages, as shown in (9) is employed.

$$\sqrt{((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2)} \quad (9)$$

where:

x_1 = Longitude of location 1

y_1 = Latitude of location 1

x_2 = Longitude of location 2

y_2 = Latitude of location 2

4. RESULTS AND DISCUSSION

LoRaWAN gateway location is selected by using mathematical modeling for multi-gateway location selection problems in large LoRaWAN networks. The samples in this experiment were from 50 villages in Warin Chamrap district, Ubon Ratchathani Province, with 7,139 end nodes using Lingo version 13 to process. The results of the experiment found that the most suitable LoRaWAN gateway location is 6 gateways, each gateway sends a signal to different villages. The results of the LoRaWAN gateway location selection are as follows.

Table 3 shows the most appropriate number of LoRaWAN gateways is 6, and each sends the signal to different villages. Gateway 1 located in village 5 serves 11 villages, gateway 2 located in village 19 serves 11 villages, gateway 3 located in village 23 serves 8 villages, gateway 4 located in village 31 serves 8 villages, gateway 5 located in 40 serves 6 villages, and gateway 6 located in village 49 serves 6 villages. The Spreading Factor covering end nodes from the LoRaWAN gateway signaling service is shown in Figure 2. Figure 2 shows spreading Factor values covering 7,139 End nodes by using LoRaWAN gateway signal service with SF7 covering 1,427, SF9 covering 874 end nodes, SF9 covering 2,243 end nodes, and SF10 covering 2,595 end nodes. LoRaWAN capacity of the end nodes service is shown in Figure 3.

Table 3. LoRaWAN gateways location serving to villages

Gateways	Gateways location	Villages ID
GW 1	5	5, 6, 7, 8, 15, 26, 35, 36, 37, 38, 39
GW 2	19	1, 2, 17, 18, 19, 20, 27, 33, 43, 44, 48
GW 3	23	13, 16, 23, 24, 25, 42, 46, 47
GW 4	31	14, 21, 22, 31, 41, 32, 45, 50
GW 5	40	9, 10, 11, 12, 28, 40
GW 6	49	3, 4, 29, 30, 34, 49

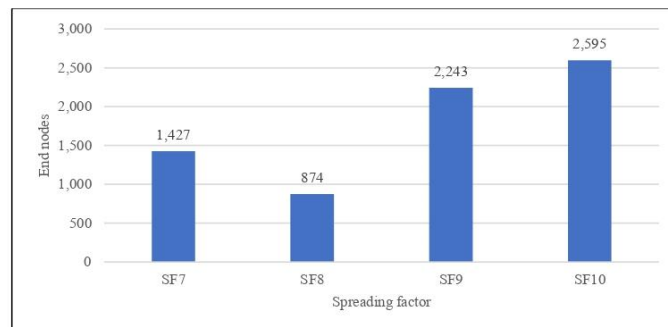


Figure 2. Spreading factor values covering end nodes

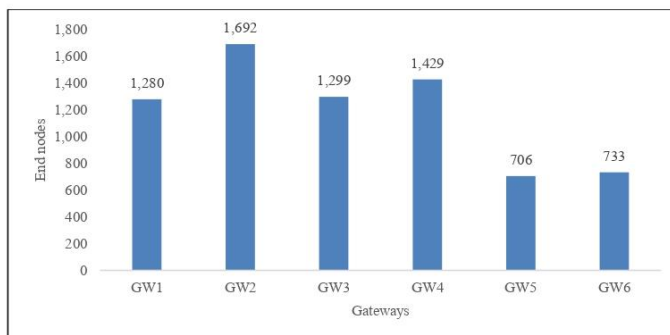


Figure 3. LoRaWAN capacity of end nodes service

Figure 3 shows the LoRaWAN capacity of the end nodes service of each LoRaWAN gateway. Gateway 1 serves 1,280 end nodes, gateway 2 serves 1,692 end nodes, gateway 3 serves 1,299 end nodes, gateway 4 serves 1,429 end nodes, gateway 5 serves 706 end nodes, and gateway 6 serves 733 end nodes. LoRaWAN gateway signal service covers the end nodes of each gateway by 1 to 8-kilometer distance as shown in Figure 4.

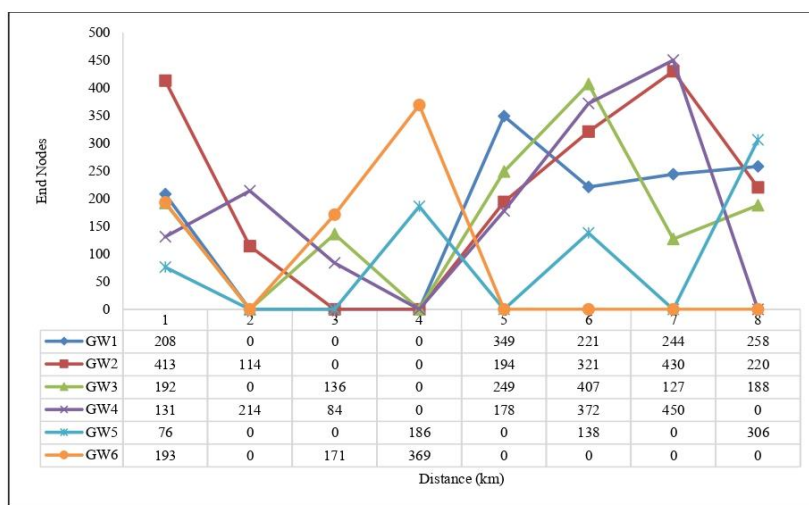


Figure 4. LoRaWAN gateway signal service covering end nodes based on the distance

From Figure 4, the LoRaWAN gateway signal service covers end nodes based on distance (km). In the first kilometer, gateway 2 covers the highest number, 413 end nodes, while gateway 5 covers the lowest number of 413 end nodes. In the 2nd kilometer, gateway 4 covers the highest number of 214 end nodes, gateways 1, 3, 5, and 6 do not cover any end nodes. In the 3rd kilometer, gateway 6 covers the highest number of 717 end nodes, gateways 1, 2, and 5 do not cover any end nodes. In the 4th kilometer, gateway 6 covers the highest number of 369 end nodes, gateways 1, 2, 3, and 4 do not cover any end nodes. In the 5th

kilometer, gateway 1 covers the highest number of 349 end nodes, gateways 5 and 6 do not cover any end nodes. In the 6th kilometer, gateway 3 covers the highest number of 407 end nodes, gateway 6 does not cover any end nodes. In the 7th kilometer, gateway 4 covers the highest number of 450 end nodes, gateways 5 and 6 do not cover any end nodes. In the 8th kilometer, gateway 5 covers the highest number of 306 end nodes, gateways 4 and 6 do not cover any end nodes.

The experiment conclusions of optimizing multiple gateway location selection in LoRaWAN networks indicate six gateways could cover all end nodes. Gateway 1 located in village 5 serves 11 villages with 1,280 end nodes, gateway 2 located in village 19 serves 11 villages with 1,692 end nodes, gateway 3 located in village 23 serves 8 villages with 1,299 end nodes, gateway 4 located in village 31 serves 8 villages with 1,429 end nodes, gateway 5 located in 40 serves 6 villages with 706 end nodes, and gateway 6 located in village 49 serves 6 villages with 733 end nodes. Moreover, LoRaWAN gateway could appropriately manage the supporting capacity of end nodes. When the data is processed in the quantum geographic information system program, it concludes the LoRaWAN gateway location that provides signal services to end nodes in villages on a map as shown in Figure 5.

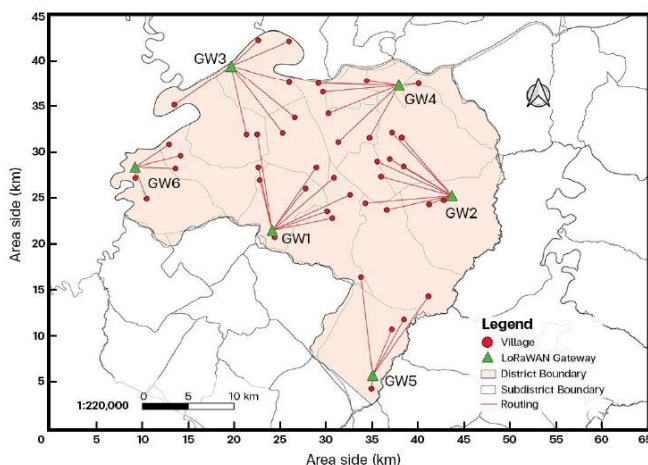


Figure 5. LoRaWAN gateway location

Figure 5 shows map data in Warin Chamrap district, Ubon Ratchathani Province, Thailand. It consists of the LoRaWAN gateway location of the six gateways connecting with the 50 villages. end nodes provided in each village receive signals sent from LoRaWAN gateway, which could be directions for setting up the Network Infrastructure in the rural area. This possibly promises sufficient quality of agricultural products responding to the consumers' requirements.

5. CONCLUSION




We proposed a method for optimizing the location of multiple gateways in LoRaWAN networks. The problem is based on a real-life case study in Warin Chamrap district, Ubon Ratchathani Province, Thailand. We want to reduce network infrastructure constraints. in bringing the Smart agriculture system into rural areas of Thailand so that farmers can reduce production costs and make agricultural products of good quality. As a result, a solution for gateway location selection in LoRaWAN has been proposed using a mathematical model with the objective function of coverage-maximizing. The model was validated using the LINGO modeling program, which is a precise software method. The results demonstrate that an optimization of multiple gateway location selection in LoRaWAN with six gateways could support signal service for all end nodes. Besides, the supporting capacity of end nodes by LoRaWAN gateway could be appropriately

managed. The solution could also define gateway location in LoRaWAN to plan and improve the network infrastructure in the rural areas to be ready for producing sufficient and quality agricultural products responding to the consumers' requirements. Suggestions for further studies are expanding the experimental area, increasing end nodes, and using metaheuristic algorithms or other algorithms capable of potentially better processing experimental results.




REFERENCES

- [1] N. Pattama, "The development of smart farming systems in Thailand," 2021. <https://online.fliptml5.com/pyepem/stjp> (accessed Feb. 02, 2022).
- [2] V. Moysiadis, P. Sarigiannidis, V. Vitsas, and A. Khelifi, "Smart farming in Europe," *Computer Science Review*, vol. 39, p. 100345, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.csc.2020.100345.
- [3] B. Miles, E. B. Bouremane, S. Boucherka, and S. Chikhi, "A study of LoRaWAN protocol performance for IoT applications in smart agriculture," *Computer Communications*, vol. 164, pp. 148–157, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.comcom.2020.10.009.
- [4] W. Hassan, M. Fore, J. B. Ulvund, and J. A. Alfreidsen, "Internet of fish: Integration of acoustic telemetry with LPWAN for efficient real-time monitoring of fish in marine farms," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 163, p. 104850, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.compag.2019.06.005.
- [5] A. Triantafyllou, P. Sarigiannidis, T. Lagkas, I. D. Moscholios, and A. Sangiannidis, "Leveraging fairness in LoRaWAN: A novel scheduling scheme for collision avoidance," *Computer Networks*, vol. 186, p. 107735, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.comnet.2020.107735.
- [6] Semtech, "LoRa® and LoRaWAN®: A Technical Overview," *Semtech Technique Paper*, 2020. <https://loradevelopers.semtech.com/library/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/> (accessed Feb. 02, 2022).
- [7] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, "A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment," *ICT Express*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, 2019.
- [8] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Soonyabandara, "Low power wide area networks: an overview," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 855–873, 2017, doi: 10.1109/COMST.2017.2652320.
- [9] V.-T. Truong, A. Nayyar, and S. A. Lone, "System performance of wireless sensor network using LoRa-Zigbee hybrid communication," *Computers, Materials & Continua*, vol. 68, no. 2, pp. 1615–1635, 2021, doi: 10.32604/cmc.2021.016922.
- [10] A. Frankiewicz et al., "LP WAN gateway location selection using modified K-dominating set algorithm," in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 12527 LNCS, 2021, pp. 209–223, doi: 10.1007/978-3-030-68110-4_14.
- [11] A. Loubany, S. Lahoud, and R. El Chall, "Adaptive algorithm for spreading factor selection in LoRaWAN networks with multiple gateways," *Computer Networks*, vol. 182, p. 107491, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.comnet.2020.107491.
- [12] N. Aflab, S. A. R. Zaidi, and D. McLemon, "Scalability analysis of multiple LoRa gateways using stochastic geometry," *Internet of Things*, vol. 9, p. 100132, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.iot.2019.100132.
- [13] N. Matni, J. Moraes, H. Oliveira, D. Rosario, and E. Cerqueira, "LoRaWAN gateway placement model for dynamic internet of things scenarios," *Sensors*, vol. 20, no. 15, p. 4336, Aug. 2020, doi: 10.3390/s20154336.
- [14] N. Chinchilla-Romero, J. Navarro-Ortiz, P. Muñoz, and P. Ameigeiras, "Collision avoidance resource allocation for LoRaWAN," *Sensors*, vol. 21, no. 4, p. 1218, Feb. 2021, doi: 10.3390/s21041218.
- [15] N. Matni, J. Moraes, D. Rosario, E. Cerqueira, and A. Neto, "Optimal gateway placement based on fuzzy C-means for low power wide area networks," in *2019 IEEE Latin American Conference on Communications (LATINCOM)*, Nov. 2019, pp. 1–6, doi: 10.1109/LATINCOM48065.2019.8937899.
- [16] K. Grochla and K. Polys, "Heuristic algorithm for gateway location selection in large scale LoRa networks," in *2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, Jun. 2020, pp. 777–782, doi: 10.1109/IWCMC48107.2020.9148435.
- [17] A. Lavric and V. Popa, "Performance evaluation of LoRaWAN communication scalability in large-scale wireless sensor networks," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2018, pp. 1–9, Jun. 2018, doi: 10.1155/2018/6730719.
- [18] B. Citoni, S. Ansari, Q. H. Abbasi, M. A. Imran, and S. Hussain, "Impact of inter-gateway distance on LoRaWAN performance," *Electronics*, vol. 10, no. 18, p. 2197, Sep. 2021, doi: 10.3390/electronics10182197.
- [19] M. C. Bor, U. Roedig, T. Voigt, and J. M. Alonso, "Do LoRa low-power wide-area networks scale?," in *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, Nov. 2016, pp. 59–67, doi: 10.1145/2988287.2989163.
- [20] J. Petäjäjärvi, K. Mikhaylov, M. Pettissalo, J. Janhunen, and J. Inatti, "Performance of a low-power wide-area network based on LoRa technology: Doppler robustness, scalability, and coverage," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 13, no. 3, p. 155014771769941, Mar. 2017, doi: 10.1177/155014771771769941.
- [21] O. Georgiou and U. Raza, "Low power wide area network analysis: Can LoRa scale?," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 2, pp. 162–165, Apr. 2017, doi: 10.1109/LWC.2016.2647247.
- [22] LoRa Alliance, "LoRaWAN regional parameters," *LoRa Alliance Publication*, 2021. https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/rp_2-1.0.1.pdf (accessed Feb. 02, 2022).
- [23] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. Townsley, "A study of LoRa: long range & low power networks for the internet of things," *Sensors*, vol. 16, no. 9, p. 1466, Sep. 2016, doi: 10.3390/s16091466.
- [24] Orange, "LoRa device developer guide," *multitech.com*, 2016. <https://partner.orange.com/wp-content/uploads/2016/04/LoRa-Device-Developer-Guide-Orange.pdf> (accessed Mar. 01, 2022).
- [25] M. R. Ramlil, P. T. Daely, D.-S. Kim, and J. M. Lee, "IoT-based adaptive network mechanism for reliable smart farm system," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 170, p. 105287, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.compag.2020.105287.



BIOGRAPHIES OF AUTHORS

Chutchai Kaewta    received the B.Sc. in Computer Science from Ubon Ratchathani Rajabhat University and the M.Sc. in Information Technology from Ubon Ratchathani University, Thailand. He is currently a Ph.D candidate in Smart City Management and Digital Innovation, Mahasarakham Business School, Mahasarakham University, Thailand. He is a lecturer in Digital Innovation Program, Faculty of Computer Science, Ubon Ratchathani Rajabhat University, Thailand. His research interests include optimization, internet of things, big data analytics, machine learning, and intelligent systems. He can be contacted at email: chutchai.k@ubru.ac.th.



Asst. Prof. Dr. Charuay Savithi    is a lecturer at Mahasarakham Business School, Mahasarakham University, Thailand. He received the B.Ed. in Computer Education from Chandrakasem Teachers College, Thailand, the M.Sc. in Computer Science from Rangsit University, Thailand, the Advance Diploma in Software Engineering, National Institute of Computer Technology, Bangalore, India, and the Ph.D. in Computer Science from Magadh University, India. He is also the Director of Computer Center in Mahasarakham University. He is currently a lecturer in Smart City Management and Digital Innovation Program, Mahasarakham Business School, Mahasarakham University, Thailand. His research interests include computer networks and communications, network security, network architecture, and smart city platform. He can be contacted at email: charuay.s@msu.ac.th.



Dr. Ekkachai Naenudorn    received the B.B.A. in Business Computer from Mahasarakham Business School, Mahasarakham University, Thailand, the M.Sc. in Information Technology from Khon Kaen University, Thailand, and the D.I.S. in Information Technology from Suranaree University of Technology, Thailand. He is currently a lecturer in Smart City Management and Digital Innovation Program, Mahasarakham Business School, Mahasarakham University, Thailand. His research interests include smart city platform, internet of things and big data analytics. He can be contacted at email: ekkachai.n@mbs.msu.ac.th.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายชัชชัย แก้วตา
วันเกิด	25 พฤศจิกายน 2525
สถานที่เกิด	23 หมู่ 7 ต.หนองมะแซว อ.เมือง จ.อำนาจเจริญ 37000
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	101 หมู่ 10 ต.ธาตุ อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	คณะวิทยาการคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2543 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนปลาค้าววิทยานุสรณ์ พ.ศ. 2548 วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วท.บ.) สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี พ.ศ. 2553 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม.) สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี พ.ศ. 2566 ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) สาขาวิชาการจัดการสมาร์ตซิตี้และ นวัตกรรมดิจิทัล มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผลงานวิจัย	Kaewta, C., Savithi, C., & Naenudorn, E. (2023). An optimization of multiple gateway location selection in long range wide area network networks. <i>Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science</i> , 30(2), 1011-1020. Prasitpuriprecha, C., Jantama, S. S., Preeprem, T., Pitakaso, R., Srichok, T., Khonjun, S., Weerayuth, N., Gonwirat, S., Enkvetchakul, P., Kaewta, C., & Nanthasamroeng, N. (2022). Drug-Resistant Tuberculosis Treatment Recommendation, and Multi-Class Tuberculosis Detection and Classification Using Ensemble Deep Learning-Based System. <i>Pharmaceuticals</i> , 16(1), 13. https://doi.org/10.3390/ph16010013 Prasitpuriprecha, C., Pitakaso, R., Gonwirat, S., Enkvetchakul, P., Preeprem, T., Jantama, S. S., Kaewta, C., Weerayuth, N., Srichok, T., Khonjun, S., & Nanthasamroeng, N. (2022). Embedded AMIS-

Deep Learning with Dialog-Based Object Query System for Multi-Class Tuberculosis Drug Response Classification. *Diagnostics*, 12(12), 2980. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12122980>

Ngeoywijit, S., Kruasom, T., Ugsornwongand, K., Pitakaso, R., Sirirak, W., Nanthasamroeng, N., Kotmongkol, T., Srichok, T., Khonjun, S., & Kaewta, C. (2022). Open Innovations for Tourism Logistics Design: A Case Study of a Smart Bus Route Design for the Medical Tourist in the City of Greater Mekong Subregion. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 8(4), 173. <https://doi.org/10.3390/joitmc8040173>

Sangkaphet, P., Pitakaso, R., Sethanan, K., Nanthasamroeng, N., Prant, K., Khonjun, S., Srichok, T., Kaewman, S., & Kaewta, C. (2022). A Multiobjective Variable Neighborhood Strategy Adaptive Search to Optimize the Dynamic EMS Location-Allocation Problem. *Computation*, 10(6), 103. <https://doi.org/10.3390/computation10060103>

Khonjun, S., Pitakaso, R., Sethanan, K., Nanthasamroeng, N., Prant, K., Kaewta, C., & Sangkaphet, P. (2022). Differential Evolution Algorithm for Optimizing the Energy Usage of Vertical Transportation in an Elevator (VTE), Taking into Consideration Rush Hour Management and COVID-19 Prevention. *Sustainability*, 14(5), 2581. <https://doi.org/10.3390/su14052581>

Kaewta, C., & Saengprasan, C. (2021). The Selection of Economic Horticulture for Suitable Planting in Ubon Ratchathani Province by Data Mining Techniques. *Burapha Science Journal*, 26(1), 593-609.

ชัชชัย แก้วตา และคณะ. (2563). การพัฒนาหลักสูตรอบรมเรื่อง การประยุกต์ใช้แพลตฟอร์ม IoT เพื่อสร้างนวัตกรรมดิจิทัลของผู้เรียน. วารสารมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์, 22(2), 39-52.

ชัชชัย แก้วตา ชัชวาล ชันติคเสนชาติ และยุทธศักดิ์ ทองแสน. (2561). การพัฒนาระบบสมองกลฝังตัวเพื่อตรวจวัดคุณภาพน้ำผ่านระบบเครือข่ายระยะไกลแบบอัตโนมัติ. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 20(3), 73-89.

