



วารสารไทยการวิจัยดำเนินงาน

Thai Journal of Operation Research

ISSN: 2822-1265 (Online)

Vol.11 No.1 (January - June 2023)



วารสารไทยการวิจัยดำเนินงาน (Thai Journal of Operations Research)

ปีที่ 11 ฉบับที่ 1 (มกราคม – มิถุนายน 2566)

เจ้าของ	คณะสถิติประยุกต์ สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์
ผู้รับผิดชอบดำเนินการ	เครือข่ายการวิจัยดำเนินงาน
ที่ปรึกษา	1. ศาสตราจารย์กิตติคุณ ดร.นราศรี ไวนิชกุล 2. คณบดีคณะสถิติประยุกต์ สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์
บรรณาธิการ	รองศาสตราจารย์ ดร.กาญจน์ภา อมรัชกุล (สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์)
กองบรรณาธิการ	1. ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.ประชุม สุวดี (สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์) 2. ศาสตราจารย์ ดร.ประภาส จงสถิตย์วัฒนา (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) 3. ศาสตราจารย์ ดร.วรทัศน์ ขจิตวิษยานุกูล (มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์) 4. รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิต หล่อจิระชุมภ์กุล (สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์) 5. รองศาสตราจารย์ ดร.พีรยุทธ์ ชาญเศรษฐิกุล (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์) 6. รองศาสตราจารย์ ดร.วลัยลักษณ์ อัครธีรวงศ์ (สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง) 7. ศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์ (มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์) 8. ศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา เศรษฐนันท์ (มหาวิทยาลัยขอนแก่น)
ผู้ประสานงาน	นายบุญชนะ เมฆโต
สำนักงาน	คณะสถิติประยุกต์ สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์ เลขที่ 148 ถ.เสรีไทย แขวงคลองจั่น เขตบางกะปิ กทม. 10240 โทร.02-7273038 Fax. 02-7274061 e-mail : orjournal.th@gmail.com website : http://www.orjournal.org
กำหนดออก	ปีละ 2 ครั้ง (มกราคม - มิถุนายน และ กรกฎาคม - ธันวาคม)
การเผยแพร่	เป็นวารสารอิเล็กทรอนิกส์ เผยแพร่ผ่านทางเว็บไซต์โดยไม่คิดค่าใช้จ่าย
การอุดหนุน	ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณรายจ่ายเงินอุดหนุนคณะสถิติประยุกต์ สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์

บรรณาธิการแถลง

วารสารไทยการวิจัยดำเนินงาน (Thai Journal of Operations Research, TJOR) เกิดขึ้นจากความร่วมมือของคณาจารย์ และนักวิจัยในเครือข่ายการวิจัยดำเนินงาน (Operations Research Network of Thailand, OR-NET) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อส่งเสริมและเผยแพร่ผลงานทางวิชาการด้านการวิจัยดำเนินงานที่มีคุณภาพในระดับชาติ วารสารไทยการวิจัยดำเนินงานเป็นวารสารอิเล็กทรอนิกส์ (E-Journal) ซึ่งมีกรอบเวลาในการออกเล่มปีละ 2 ฉบับ ฉบับแรกระหว่างเดือนมกราคม-มิถุนายนของปี และฉบับที่ 2 ระหว่าง เดือนกรกฎาคม-เดือนธันวาคมของปี ซึ่งวารสารฉบับนี้เป็นวารสารปีที่ 11 ฉบับที่ 1 (เล่มที่ 21) ของวารสารไทยการวิจัยดำเนินงาน ผู้สนใจสามารถดาวน์โหลดบทความและวารสารฉบับเต็มได้ที่เว็บไซต์ <https://tci-thaijo.org/index.php/TJOR/index> คณะผู้จัดทำและกองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้วิจัย ผู้สนใจ และผู้เกี่ยวข้องในแวดวงวิชาการต่อไป

หากคุณค่าทางความรู้ที่ผู้อ่านได้รับจากการรวบรวมบทความวิจัยและบทความวิชาการทางด้านการวิจัยดำเนินงานในวารสารเล่มนี้ บรรณาธิการขออุทิศความดีดังกล่าวแต่บรรณาธิการคนแรก คือ รองศาสตราจารย์ ดร.พัชราภรณ์ เนียมมณี ผู้ร่วมก่อตั้งเครือข่ายการวิจัยดำเนินงานและวารสารไทยการวิจัยดำเนินงาน นอกจากนี้ทางเครือข่ายการวิจัยดำเนินงานขอร่วมไว้อาลัยกับการจากไปของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริง ปรีชานนท์ ซึ่งเป็นหนึ่งในสมาชิกเริ่มต้นและเป็นกำลังสำคัญของเครือข่ายตลอดมา

วารสารไทยการวิจัยดำเนินงานได้รับการจัดกลุ่มวารสารที่ผ่านการรับรองคุณภาพของศูนย์ดัชนีอ้างอิงวารสารไทย(Thai-Journal Citation Index Centre) อยู่ในวารสารกลุ่มที่ 1 ซึ่งจะมีผลจนถึงปี 2567

กาญจันภา อมรัชกุล

บรรณาธิการ

สารบัญ

หน้า

บรรณาธิการแถลง

บทความวิจัย

Design of Experiments for Reduce Cycle Time of Plasma Cleaning on Surface of Flexible Printed Circuits	1
<i>ชนาภรณ์ อัจฉาหาญ, สุวิษภรณ์ วิชกุล และ รมิตายุ อยู่สุข</i>	
Scheduling of Veterinarians in an Animal Hospital Using Integer Linear Programming Model: A Case Study of an Animal Hospital in Nakhon Pathom	11
<i>ธีระเดช ไหลสุพรรณวงศ์</i>	
Mixed-integer linear programming-based optimization strategies for the sustainable cultivated banana production supply chain planning system	21
<i>ปิ่นฉัตร จันทะรส, พินรชา คล้ายเชย และชัยมงคล ลิ้มเพียรชอบ</i>	
Parameter Tuning of Whale Optimization Algorithm for Heterogeneous Vehicle Routing Problem with Time Windows	32
<i>กิตติพงษ์ ม้าลำพอง และ กนกพร ศรีปฐมสวัสดิ์</i>	

คำแนะนำการส่งต้นฉบับบทความ

การออกแบบการทดลองเพื่อลดรอบเวลาของ
กระบวนการทำความสะอาดพื้นผิวแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้าชนิดยืดหยุ่นโดยเครื่องพลาสมา

ชนาภรณ์ อัจหาญ^{1*}, สุวิภรณ์ วิชกุล² และ รมิตาย อยู่สุข³
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถนนงามวงศ์วาน เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

Received: 19 February 2023; Revised: 26 March 2023; Accepted: 25 April 2023

บทคัดย่อ

แผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้าชนิดยืดหยุ่นเป็นส่วนประกอบสำคัญในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งปัจจุบันความต้องการของลูกค้านำสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้บริษัทกรณีศึกษาจึงต้องเพิ่มกำลังการผลิตเพื่อตอบสนองความต้องการได้อย่างรวดเร็ว ในการผลิตจำเป็นต้องควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีความสะอาดเพื่อให้สามารถเชื่อมต่อวงจรในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผ่านกระบวนการพลาสมาแบบสุญญากาศ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการออกแบบการทดลองเพื่อเพิ่มกำลังการผลิตโดยการลดเวลาในการพลาสมาและพารามิเตอร์ในสภาวะที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ค่ามัมส์ของหยดน้ำไม่เกิน 30 องศา ตามข้อกำหนดของลูกค้า ซึ่งจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการพลาสมา ได้แก่ เวลาในการพลาสมา กำลังไฟฟ้า อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนและก๊าซอาร์กอน โดยผู้วิจัยเลือกวิธีการออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตและทำการวิเคราะห์ผลด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง จากผลพบว่าพารามิเตอร์ในสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ เวลาในการพลาสมาเท่ากับ 6.37 นาที กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 4.20 กิโลวัตต์ อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 0.10 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 0.60 ลิตรต่อนาที โดยค่าเฉลี่ยมัมส์ของหยดน้ำจะมีค่าไม่เกิน 10.357 องศา ด้วยระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และจากการลดเวลาในการพลาสมาลงจากเดิม 16.00 นาที เป็น 6.37 นาที ส่งผลให้กำลังการผลิตของกระบวนการพลาสมาเพิ่มขึ้น 52.97 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: แผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้าชนิดยืดหยุ่น, กระบวนการพลาสมาแบบสุญญากาศ, มัมส์ของหยดน้ำ

* Corresponding author. E-mail: chanaporn.arc@ku.th

¹ นิสิตปริญญาโท สาขาวิชาการจัดการวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Design of Experiments for Reduce Cycle Time of Plasma Cleaning on Surface of Flexible Printed Circuits

Chanaporn Archan^{1*}, Suwitchaporn Witchaku² and Ramidayu Yousuk³

Kasetsart University, 50 Ngamwongwan Rd., Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand

Received: 19 February 2023; Revised: 26 March 2023; Accepted: 25 April 2023

Abstract

Flexible Printed Circuits (FPC) are important components for various electronic devices. Currently, customer demand tends to increase over time. For this reason, the company must increase output capacity to meet the needs of customers. FPCs are applied low-pressure plasma process in order to control the quality to be clean and enhance connectivity in electronic devices. The objectives are to increase output capacity by reducing the cycle time and to identify the effect of low-pressure plasma cleaning parameters on the Water Contact angle (WCA). It must not exceed 30 degrees, which is in accordance with customer requirements. According to relevant researches, the factors affecting the optimizing of plasma parameters were plasma time, the power of the radio frequency, the flow rate of oxygen and the flow rate of argon. A central composite design was applied to design the experiments and response surface methodology was applied to analyze the experiments. The results revealed that the optimal parameters were a plasma time of 6.37 min, power of 4.20 kW, an oxygen flow rate of 0.10 l/min and an argon gas flow rate of 0.60 l/min. The average water contact angle does not exceed 10.357 degrees at a 95 percent confidence level. In addition, the plasma processing time was reduced from 16 minutes to 6.37 minutes, resulting in a 52.97 percent increase in plasma processing capacity.

Key words: flexible printed circuits, low-pressure plasma, water contact angle

* Corresponding author. E-mail: chanaporn.arc@ku.th

1 Engineering Management Program, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

2 Assistant Professor in Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

3 Assistant Professor in Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

1. บทนำ

แผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้าชนิดยืดหยุ่น (Flexible Printed Circuit) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ซึ่งมีขนาดบาง น้ำหนักเบา ทนทานต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าและมีความยืดหยุ่นสูง ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ผลิตภัณฑ์เป็นที่ต้องการของตลาดเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ในปัจจุบันการแข่งขันของธุรกิจอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์มีเพิ่มมากขึ้น โดยปัจจัยที่สำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งในการผลิตและการดำเนินธุรกิจในการแข่งขันที่รุนแรง คือ ต้นทุน คุณภาพ การบริการ และสามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งคุณภาพที่สำคัญของแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้าชนิดยืดหยุ่น คือ ความสะอาด จะต้องไม่มีฝุ่นผงหรือสิ่งปนเปื้อนเกาะติดอยู่บนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากจะส่งผลกระทบต่อชิ้นส่วนและวงจรทางไฟฟ้าภายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

กระบวนการพลาสมาแบบสุญญากาศเป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในการทำความสะอาดแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้าในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวในอนุภาคที่มีขนาดเล็กระดับนาโนได้ โดยกระบวนการพลาสมานั้นสามารถควบคุมได้ง่าย ราคาถูก และไม่ปล่อยสารพิษหรือสารเคมีที่เป็นอันตรายกับผลิตภัณฑ์และสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้กระบวนการพลาสมา ยังช่วยเพิ่มคุณสมบัติเปียก (Wettability) ซึ่งเป็นการเพิ่มความสามารถในยึดติดของพื้นผิวผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย [1] ซึ่งหลักการของพลาสมา คือ ก๊าซที่สภาวะอุณหภูมิต่ำและความดันต่ำ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า อนุภาคของก๊าซจะแตกตัวเป็นไอออนและอิเล็กตรอน จากนั้นไอออนจะไปทำลายหรือสร้างพันธะของสิ่งแปลกปลอมจำพวกสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เพื่อเตรียมพื้นผิวสู่กระบวนการถัดไป [2]

บริษัทกรณีศึกษาดำเนินธุรกิจการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์โดยผลิตแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้าชนิดยืดหยุ่นเป็นหลัก และผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะต้องผ่านกระบวนการพลาสมาเพื่อทำความสะอาดพื้นผิวตามข้อกำหนดของลูกค้า ซึ่งจากการสำรวจปัญหาพบว่าลูกค้ามีความต้องการผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้บริษัทกรณีศึกษาต้องวางแผนการผลิตเพิ่มมากขึ้น ทำให้กระบวนการพลาสมาจะต้องเพิ่มกำลังการผลิตตามแผนการผลิต ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องการที่

จะศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการพลาสมา และหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้กระบวนการพลาสมามีกำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้นและที่สำคัญผลิตภัณฑ์ต้องมีคุณภาพเป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้า

งานวิจัยที่ศึกษากระบวนการพลาสมาและการควบคุมคุณภาพเป็นไปอย่างต่อเนื่อง โดย Borooj et al. [3] ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการยึดเกาะของสารประกอบ Carbon Fiber/Epoxy ในกระบวนการพลาสมาแบบสุญญากาศ โดยทำการปรับพารามิเตอร์ ได้แก่ เวลาในการพลาสมา กำลังไฟฟ้า และอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน จากผลการวิจัยพบว่าทั้ง 3 ปัจจัยนั้นมีผลต่อความสามารถในการยึดเกาะ ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับ Mandolfino et al. [1] ได้ออกแบบการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความทนทานต่อแรงดึงในแนวเฉือน โดยผ่านกระบวนการพลาสมา ปัจจัยที่สนใจจะศึกษา ได้แก่ เวลาในการพลาสมา กำลังไฟฟ้า และอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่าทั้ง 3 ปัจจัยมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความทนทานต่อแรงดึงในแนวเฉือน นอกจากนี้ Pizzomi et al. [4] ยังได้ศึกษาอิทธิพลของชนิดของก๊าซในกระบวนการพลาสมา เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความทนทานของกาวต่อแรงดึงในแนวเฉือนและค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ พบว่า การใช้ก๊าซออกซิเจนและก๊าซอาร์กอนร่วมกันจะให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงในแนวเฉือนมากกว่า การใช้ก๊าซออกซิเจนเพียงอย่างเดียว และการใช้ก๊าซอาร์กอน จะทำให้ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมีค่าน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการพลาสมามีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

การวัดคุณภาพหลังกระบวนการพลาสมาในงานวิจัยนี้จะพิจารณาจากคุณสมบัติเปียก (Wettability) โดยทำการวัดค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ (Water Contact Angle) ซึ่ง Luque-Agudo et al. [5] ได้ศึกษาอิทธิพลของกระบวนการพลาสมาที่มีผลต่อความสามารถในการยึดติดของ Polylactic Acid (PLA) โดยกระบวนการพลาสมาจะใช้ก๊าซออกซิเจนและก๊าซอาร์กอน จากนั้นทำการวัดค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ จากผลพบว่าก่อนกระบวนการพลาสมาพื้นผิวของ PLA มีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำประมาณ 70 องศา ถึง 80 องศา และเมื่อผ่านกระบวนการพลาสมา พื้นผิวของ PLA มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี ทำให้ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำลดลงเกือบ 30 เปอร์เซ็นต์ กล่าวคือ กระบวนการ

พลาสติกโดยใช้ก๊าซอาร์กอนและออกซิเจนมีผลทำให้ค่ามูมสัมพัทธ์ของหยดน้ำมีค่าลดลง และ Kapica et al. [6] ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการยึดติดของรอยต่อระหว่างพื้นผิวของยางสังเคราะห์ที่มีชื่อทางการค้าคือ SBS กับ กาว Polyurethane โดยผ่านกระบวนการพลาสติก ซึ่งจะทดสอบด้วยวิธีการลอกในแนวนอน และมีความสัมพันธ์กับค่ามูมสัมพัทธ์ของหยดน้ำ โดยเมื่อค่าความหนาของกาวต่อแรงดึงมากจะทำให้ค่ามูมสัมพัทธ์ของหยดน้ำที่น้อย เนื่องจากพื้นผิวถูกปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมี ทำให้มีคุณสมบัติเปียกมากขึ้น ซึ่งจากผลพบว่าก๊าซที่มีผลต่อค่าความหนาของกาวต่อแรงดึงมากที่สุด คือ ก๊าซออกซิเจนและการใช้ก๊าซออกซิเจนจะให้ส่งผลให้มูมสัมพัทธ์ของหยดน้ำมีค่าน้อยที่สุด

จากการศึกษางานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น สรุปได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการพลาสติกแบบสูญญากาศ ได้แก่ เวลาในการพลาสติก กำลังไฟฟ้า อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน และอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำทั้ง 4 ปัจจัยมาเป็นปัจจัยในการทดลองโดยมีตัวแปรตอบสนองเป็นค่ามูมสัมพัทธ์ของหยดน้ำ ซึ่งเป็นการวัดคุณภาพของกระบวนการพลาสติกที่ใช้ในปัจจุบัน

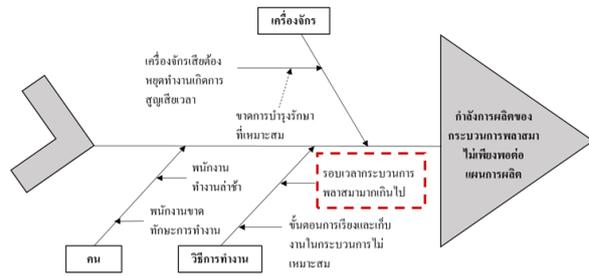
2. การศึกษาปัญหาที่พบในกระบวนการพลาสติก

ปัญหาที่พบในกระบวนการพลาสติก คือ ในปี พ.ศ. 2565 ลูกค้านี้มีความต้องการผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้บริษัทต้องวางแผนการผลิตเพิ่มมากขึ้น และจากการคำนวณกำลังการผลิตของกระบวนการพลาสติกในปัจจุบัน พบว่าไม่เพียงพอสำหรับความต้องการของลูกค้า ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องหาวิธีการเพิ่มกำลังการผลิตของกระบวนการพลาสติก เพื่อรองรับแผนการผลิตการผลิตที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหากกำลังการผลิตไม่เพียงพอจะทำให้บริษัทกรณีศึกษาส่งมอบงานให้ลูกค้าไม่ทันตามแผนการผลิตที่วางไว้ ส่งผลให้บริษัทสูญเสียนายได้กว่า 22,485,000 บาทต่อวัน

3. การวิเคราะห์หาสาเหตุและปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังการผลิตของกระบวนการพลาสติก

จากการพิจารณาโดยใช้แผนภูมิแกงปลา ร่วมกับทีมงานที่รับผิดชอบทั้งวิศวกรกระบวนการ วิศวกรคุณภาพ

และหัวหน้าฝ่ายผลิตเฉพาะส่วน ทำให้ได้สาเหตุและปัจจัยที่คาดว่าจะเป็นผลต่อกำลังการผลิตของกระบวนการพลาสติก แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภูมิแกงปลาวิเคราะห์หาสาเหตุที่ก่อกำเนิดการผลิตของกระบวนการพลาสติกไม่เพียงพอ

จากแผนภูมิแกงปลาวิเคราะห์หาสาเหตุที่ทำให้ก่อกำเนิดการผลิตของกระบวนการพลาสติกไม่เพียงพอ พบว่ามี 3 สาเหตุหลัก ได้แก่ เครื่องจักร คน และวิธีการทำงาน สาเหตุจากเครื่องจักร คือ เครื่องจักรเสียดังหยุดทำงานเนื่องจากขาดการซ่อมบำรุงที่เหมาะสม แก้ไขโดยแจ้งให้หัวหน้าฝ่ายซ่อมบำรุงกำหนดช่วงเวลาการตรวจสอบและซ่อมบำรุงเครื่องจักรให้พร้อมใช้งานอย่างสม่ำเสมอ สาเหตุจากคน คือ พนักงานขาดทักษะในการทำงาน สามารถฝึกอบรมและจัดทำเอกสารการปฏิบัติงานที่ถูกต้องเพื่อให้มีเข้าใจมากขึ้น และสาเหตุจากวิธีการทำงาน คือ ขั้นตอนการเรียงงานเข้าเครื่องจักรไม่เหมาะสม ทำให้พนักงานทำงานล่าช้า แก้ไขโดยจัดสภาพการทำงานให้เหมาะสม หรือปรับปรุงวิธีการทำงานให้เกิดการเคลื่อนไหวน้อยที่สุด ส่วนสาเหตุที่ผู้วิจัยสนใจนำมาศึกษา คือ เวลาในการพลาสติกที่มากเกินไป เนื่องจากเวลาส่งผลต่อกำลังการผลิตของกระบวนการโดยตรง

ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกวิธีการลดเวลาในการพลาสติกเพื่อเพิ่มกำลังการผลิต โดยการปรับพารามิเตอร์เวลาของเครื่องพลาสติกถือเป็นวิธีการที่ควบคุมได้ง่ายที่สุด แต่อาจจะส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากจากการศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า เวลาในการพลาสติกมีผลต่อกระบวนการพลาสติก โดยคุณภาพของผลิตภัณฑ์จะวัดจากมูมสัมพัทธ์ของหยดน้ำ และในปัจจุบันกระบวนการพลาสติกของบริษัทกรณีศึกษามีค่ามูมสัมพัทธ์ของหยดน้ำอยู่ที่ประมาณ 10-15 องศา ซึ่งน้อยกว่าข้อกำหนดของลูกค้าที่กำหนดว่าต้องมีค่าไม่เกิน 30 องศา

จากที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้ให้ผู้วิจัยต้องการศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการลดเวลาในการพลาสมาเพื่อให้ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำไม่เกินจากลูกค้ากำหนดและให้ได้ค่าใกล้เคียงกับปัจจุบัน และจากการคำนวณตามแผนการผลิตต้องลดเวลาในการพลาสมาปัจจุบันคือ 16 นาที ให้เหลือ 8 นาที กำลังการผลิตของกระบวนการพลาสมาจึงจะเพียงพอต่อแผนการผลิตที่เพิ่มขึ้น

4. การกำหนดตัวแปรตอบสนองต่อค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิวของชิ้นงาน

เนื่องจากเป็นข้อกำหนดของลูกค้าที่ต้องตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ภายหลังกระบวนการพลาสมาด้วยการวัดค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงกำหนดตัวแปรตอบสนอง (Y) คือ ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ หรือ Water Contact Angle (WCA) โดยจะวัดด้วยเครื่องวัดค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำยี่ห้อ Excimer รุ่น Slmage Entry 5 โดยมีค่าคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 0.1 องศา

5. การออกแบบการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกแผนการทดลองด้วยวิธี Central Composite Design โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ เวลาในการพลาสมา กำลังไฟฟ้า อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนและอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน ซึ่งจะพิจารณาการกำหนดระดับปัจจัยจากประสิทธิภาพที่เครื่องจักรสามารถตั้งค่าพารามิเตอร์ได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพของเครื่องจักรที่สามารถตั้งค่าพารามิเตอร์ได้

พารามิเตอร์	ช่วงของพารามิเตอร์ที่ตั้งค่าได้
เวลาในการพลาสมา	มากกว่า 0 – 60 นาที
กำลังไฟฟ้า	มากกว่า 0 – 5.0 กิโลวัตต์
อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน	มากกว่า 0 – 1.0 ลิตรต่อนาที
อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน	มากกว่า 0 – 1.0 ลิตรต่อนาที

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังพิจารณาการกำหนดระดับปัจจัยจากพารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการปัจจุบัน โดยจะแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการปัจจุบัน

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
เวลาในการพลาสมา (นาที)	16.00
กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)	3.00
อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน (ลิตรต่อนาที)	0.20
อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน (ลิตรต่อนาที)	0.80

จากตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการปัจจุบันซึ่งใช้เวลาในการพลาสมา 16 นาที ต้องการลดเวลาให้ได้ไม่เกิน 8 นาที เพื่อทำให้กำลังการผลิตเพียงพอต่อแผนการผลิตที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น จึงกำหนดปัจจัยระดับสูงเท่ากับ 8 นาทีและปัจจัยระดับต่ำเท่ากับ 6 นาที ในการกำหนดระดับปัจจัยของกำลังไฟฟ้า โดยกำลังไฟฟ้าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการพลาสมา ดังนั้น จากค่าพารามิเตอร์ที่ตั้งค่าได้สูงสุดเท่ากับ 5.00 กิโลวัตต์ จึงกำหนดให้ปัจจัยระดับสูงเท่ากับ 4.00 กิโลวัตต์ และปัจจัยระดับต่ำเท่ากับ 3.00 กิโลวัตต์ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในปัจจุบัน ในส่วนอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนกำหนดให้ปัจจัยระดับสูงเท่ากับ 0.40 ลิตรต่อนาที และปัจจัยระดับต่ำเท่ากับ 0.20 ลิตรต่อนาที ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในปัจจุบัน โดยจากการงานวิจัยของ Kapica et al. [6] พบว่า ก๊าซออกซิเจนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการพลาสมาและลดค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำได้ และ Gryta [7] ก๊าซอาร์กอนนั้นจะมีประสิทธิภาพได้จะต้องอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม กล่าวคือ เวลาและกำลังไฟฟ้าจะต้องสมดุลกับอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนและก๊าซออกซิเจนที่เข้าทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ ทำให้ไม่สามารถบอกได้ว่าอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนต้องมีค่ามากหรือน้อยลง จึงกำหนดให้ปัจจัยระดับกลางเท่ากับค่าปัจจุบัน คือ 0.80 ลิตรต่อนาที จากที่กล่าวมาข้างต้น จึงสามารถกำหนดระดับปัจจัยของแต่ละปัจจัยได้ดังตารางที่ 3

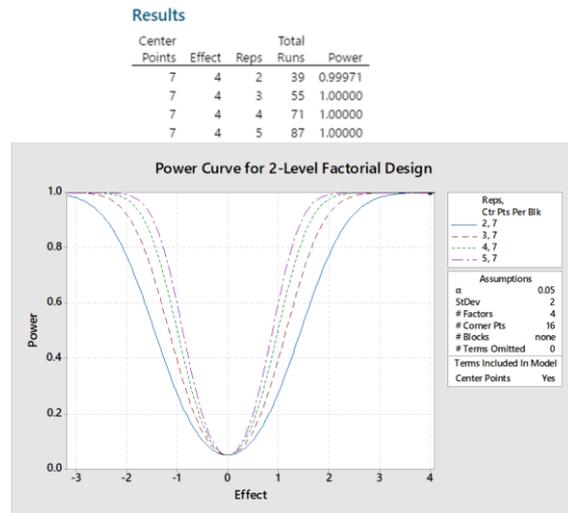
ตารางที่ 3 ปัจจัยและระดับปัจจัยของแต่ละปัจจัย

ปัจจัยตัวแปร อิสระ	ระดับ				
	$-\alpha$	-1	0	1	α
A คือ เวลาในการพลาสมา (นาทีก)	5	6	7	8	9
B คือ กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50
C คือ อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน (ลิตรต่อนาที)	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
D คือ อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน (ลิตรต่อนาที)	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00

เมื่อผู้วิจัยได้กำหนดแผนการทดลองและปัจจัยแล้ว จึงทำการวิเคราะห์หาจำนวนการทำซ้ำที่เหมาะสม โดยใช้ Power Curve for General Full Factorial กำหนดจำนวนปัจจัยเท่ากับ 4 ปัจจัย ปัจจัยละ 2 ระดับ โดยเพิ่มจุดศูนย์กลาง จำนวน 7 การทดลอง และแทนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 2.00 ซึ่งได้มาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มากที่สุดของค่าคุณสมบัติของหยดน้ำในกระบวนการปัจจุบัน ได้ผลดังรูปที่ 2 ซึ่งจากผลพบว่าถ้าทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 2 ซ้ำ ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 จะได้ผลการทดลองที่มีค่าอำนาจการทดสอบ ($1 - \beta$) 99.971 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 2 ซ้ำ ในงานวิจัยนี้

จากนั้นคำนวณแผนการทดลองโดยใช้โปรแกรม Minitab โดยกำหนดแผนการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Central Composite Designs แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 แบบแฟคทอเรียลเต็มรูป 4 ปัจจัย ปัจจัยละ 2 ระดับ ส่วนที่ 2 มีจุดศูนย์กลาง (Center Point) จำนวน 7 การทดลอง และส่วนที่ 3 จุดแกน (Axial Point) จำนวน 8

การทดลอง จำนวนทำซ้ำเท่ากับ 2 ครั้ง ดังนั้นจะมีจำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 62 การทดลอง



รูปที่ 2 การหาจำนวนทำซ้ำที่เหมาะสมโดย Power Curve for General Full Factorial 4 ปัจจัย ปัจจัยละ 2 ระดับ

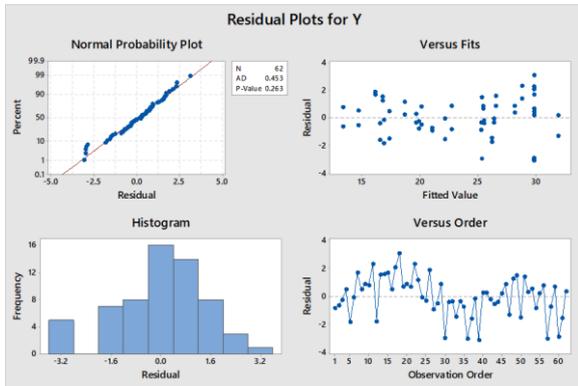
6. การทำการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล

ทำการทดลองตามแผนการทดลอง Central Composite Designs และทดลองตาม Run Order จำนวนทำซ้ำเท่ากับ 2 ครั้ง เก็บข้อมูลจำนวนทั้งหมด 62 ครั้ง โดยจะปรับพารามิเตอร์ของเครื่องพลาสมาตามลำดับแผนการทดลอง หลังจากทำการทดลองในแต่ละการทดลองแล้ว จะนำชิ้นงานไปวัดค่าคุณสมบัติของหยดน้ำที่พื้นผิวของชิ้นงานทันที โดยทำการบันทึกค่าตัวแปรตอบสนอง (Y) คือ ค่าคุณสมบัติของหยดน้ำ

7. ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

นำผลการทดลองที่ได้มาทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Minitab Version 18 เลือก Analyze Response Surface Design โดยใช้วิธีการ Stepwise เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนองที่มีผลต่อค่าคุณสมบัติของหยดน้ำ (Y) โดยเริ่มจากการทำการวิเคราะห์ความค่าความคลาดเคลื่อนตามสมมติฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยกราฟการกระจายตัวของค่าความ

คลาดเคลื่อน (Residual Plot) ของ Y ได้ผลการวิเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่ามัมสัมผัสดน้ำ (Y)

จากกราฟการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual Plot) ของ Y สามารถสรุปตามสมมติทั้ง 4 ข้อ ดังนี้

1. จากกราฟการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability Plot) มีลักษณะเป็นเส้นตรงแสดงว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ
2. จากกราฟ Residual plot VS Fitted value พบว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวอยู่รอบเส้นศูนย์ของกราฟ แสดงว่าค่าเฉลี่ยของค่าคลาดเคลื่อนเท่ากับศูนย์
3. จากกราฟ Residual vs Fitted Value พบว่าการกระจายตัวของค่าคลาดเคลื่อนไม่เป็นรูปลำโพง ความกว้างของแถบค่อนข้างคงที่ แสดงว่าความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนคงที่
4. จากกราฟ Residual vs Observation Order พบว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวที่เป็นอิสระต่อกัน ไม่มีรูปแบบ (Pattern) ที่แน่นอน แสดงว่าค่าคลาดเคลื่อนเป็นอิสระต่อกัน

หลังจากการวิเคราะห์ค่าคลาดเคลื่อน พบว่าค่าคลาดเคลื่อนเป็นไปตามสมมติฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวน ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อโดยใช้วิธีการคัดเลือกปัจจัยนำเข้าด้วยวิธี Stepwise กำหนดให้ค่า Alpha to Enter เท่ากับ 0.15 และค่า Alpha to Remove เท่ากับ 0.15 ซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นของโปรแกรม Minitab ได้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังรูปที่ 4

Response Surface Regression: Y versus A, B, C, D

Stepwise Selection of Terms

α to enter = 0.15, α to remove = 0.15

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	11	1842.47	167.497	69.15	0.000
Linear	4	1274.88	318.719	131.57	0.000
A	1	514.66	514.664	212.46	0.000
B	1	411.26	411.255	169.77	0.000
C	1	266.49	266.492	110.01	0.000
D	1	82.47	82.466	34.04	0.000
Square	4	723.54	180.886	74.67	0.000
A*A	1	280.28	280.281	115.71	0.000
B*B	1	309.49	309.492	127.76	0.000
C*C	1	249.52	249.523	103.01	0.000
D*D	1	97.77	97.774	40.36	0.000
2-Way Interaction	3	52.23	17.409	7.19	0.000
A*D	1	7.13	7.125	2.94	0.093
B*C	1	29.84	29.838	12.32	0.001
B*D	1	15.26	15.263	6.30	0.015
Error	50	121.12	2.422		
Lack-of-Fit	13	39.05	3.004	1.35	0.228
Pure Error	37	82.07	2.218		
Total	61	1963.58			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.55639	93.83%	92.47%	91.25%

รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่ามัมสัมผัสดน้ำ (Y)

ในการทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack of Fit Test) ของค่ามัมสัมผัสดน้ำ (Y) โดยกำหนดสมมติฐานทางสถิติ (Statistic Hypothesis) สำหรับการทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ ดังนี้

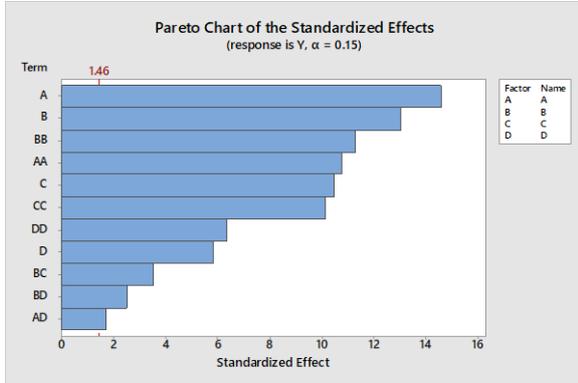
สมมติฐานหลัก (H_0) คือ สมการเหมาะสมแล้ว

สมมติฐานรอง (H_1) คือ สมการขาดความเหมาะสม

จากรูปที่ 4 ผลของการทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ โดยดูจากค่า P-Value ของ Lack of Fit เท่ากับ 0.228 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ ดังนั้นแสดงว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ (H_0) จึงสรุปได้ว่ารูปแบบของสมการเหมาะสมแล้ว

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองจากรูปที่ 4 และค่าผลกระทบมาตรฐานของปัจจัยที่มีผลต่อค่ามัมสัมผัสดน้ำจากรูปที่ 5 สรุปได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการพลาสมา ได้แก่ ปัจจัยพจน์กำลังสองของ A ปัจจัยพจน์กำลังสองของ B ปัจจัยพจน์กำลังสอง

ของ C ปัจจัยพจน์กำลังสองของ D อันตรกิริยาระหว่าง AD อันตรกิริยาระหว่าง BC และ อันตรกิริยาระหว่าง BD มีผลต่อค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ (Y) อย่างมีนัยสำคัญ

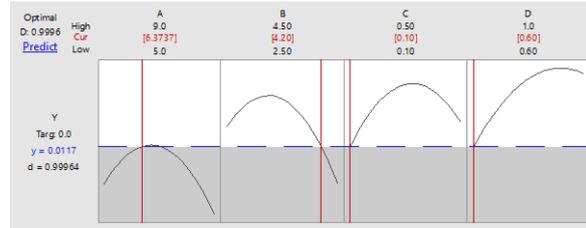


รูปที่ 5 พาเรโตของค่าผลกระทบมาตรฐานของปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง (Y)

หลังจากการวิเคราะห์หาค่าปัจจัยที่มีผลต่อค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ (Y) ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองทำให้ได้สมการถดถอย (Regression) เพื่อใช้พยากรณ์ค่าที่เป็นไปได้ของค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ (Y) โดยมีรูปแบบดังสมการที่ 1

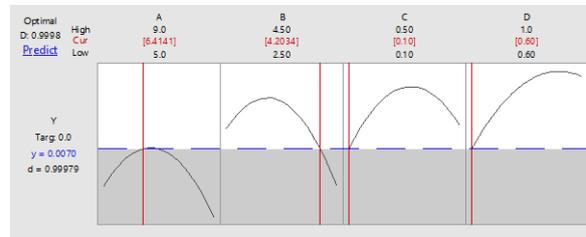
$$\hat{y} = -288.3 + 32.54A + 54.02B + 216.5C + 211.6D - 2.214A^2 - 9.305B^2 - 208.9C^2 - 130.8D^2 - 4.72AD - 19.31BC + 13.81BD \quad (1)$$

จากสมการถดถอยที่ได้ในสมการที่ 1 โดยการวิเคราะห์ผลด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) จากนั้นใช้เครื่องมือ Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดเพื่อทำให้ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำเป็นไปตามข้อกำหนดลูกค้า และเนื่องจากค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่มีค่าน้อยจะแสดงถึงประสิทธิภาพของกระบวนการพลาสมาที่ดีขึ้นและค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0 ดังนั้นจึงกำหนดค่า Y เป็นค่าเป้าหมาย (Target) มีค่าเท่ากับ 0 โดยได้ผลดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด เมื่อกำหนดให้ค่า Target = 0

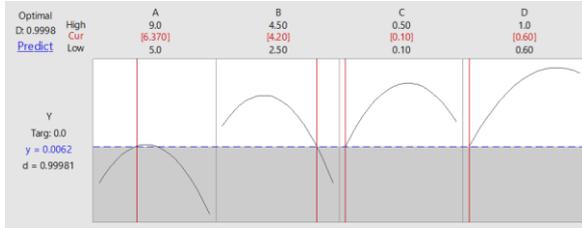
จากผลพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย คือ ปัจจัย A เวลาในการพลาสมาเท่ากับ 6.4141 นาที ปัจจัย B กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 4.2034 กิโลวัตต์ ปัจจัย C อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 0.10 ลิตรต่อนาที และปัจจัย D อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 0.60 ลิตรต่อนาที แต่เนื่องจากเครื่องพลาสมาสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ได้เพียงทศนิยม 2 ตำแหน่ง จึงกำหนดให้ระดับปัจจัย C และ D คงที่ที่เท่ากับ 0.10 และ 0.60 ลิตรต่อนาที พร้อมกับกำหนดให้ระดับปัจจัย B เท่ากับ 4.20 กิโลวัตต์ ตามลำดับ ได้ผลดังรูปที่ 7



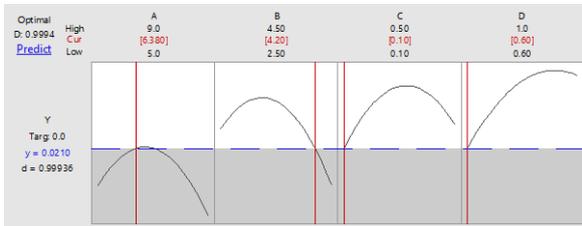
รูปที่ 7 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด เมื่อกำหนดให้ B = 4.20 C = 0.10 และ D = 0.60

จากผลที่กำหนดให้ระดับปัจจัย B เท่ากับ 4.20 กิโลวัตต์ ระดับปัจจัย C เท่ากับ 0.10 ลิตรต่อนาที และระดับปัจจัย D เท่ากับ 0.60 ลิตรต่อนาที จะได้ระดับปัจจัย A เท่ากับ 6.3737 นาที เนื่องจากการตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรสามารถตั้งค่าได้เพียงทศนิยมสองตำแหน่ง จึงต้องทำหาสภาวะที่เหมาะสมของระดับปัจจัย A ระหว่างค่าเท่ากับ 6.37 และ 6.38 นาที โดยจะเลือกจากค่าที่ทำให้ค่าพยากรณ์ของ Y มีค่าน้อยสุด ดังนั้นจากรูปที่ 8 กำหนดให้ระดับปัจจัย A เท่ากับ 6.37 นาที จะให้ค่าพยากรณ์ของ Y

เท่ากับ 0.0062 องศา ซึ่งให้ค่าพยากรณ์ของ Y ที่น้อยกว่า การกำหนดให้ระดับปัจจัย A เท่ากับ 6.38 นาที ที่ให้ค่าพยากรณ์ของ Y เท่ากับ 0.0210 องศา ดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด เมื่อกำหนดให้ A = 6.37 B = 4.20 C = 0.10 และ D = 0.60



รูปที่ 9 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด เมื่อกำหนดให้ A = 6.38 B = 4.20 C = 0.10 และ D = 0.60

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทำให้ค่ามุมสัมพัทธ์ของหยดน้ำ (Y) มีค่าน้อยที่สุด ได้แก่ เวลาในการพลาสมา (A) เท่ากับ 6.37 นาที กำลังไฟฟ้า (B) เท่ากับ 4.20 กิโลวัตต์ อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน (C) เท่ากับ 0.10 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน (D) เท่ากับ 0.60 ลิตรต่อนาที แสดงดังตารางที่ 4 และเมื่อได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดแล้ว เพื่อยืนยันผลการทดลองว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมนั้น ทำให้มุมสัมพัทธ์ของหยดน้ำมีค่าน้อยกว่า 30 องศาตามข้อกำหนดของลูกค้าหรือไม่ จึงได้ทำการทดสอบในกระบวนการผลิต จำนวน 32 ตัวอย่าง พบว่าได้ค่าเฉลี่ยมุมสัมพัทธ์ของหยดน้ำเท่ากับ 10.038 องศา และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.066 องศาและทำการวิเคราะห์ผลที่ได้โดยใช้วิธีทดสอบสมมติฐานค่าเฉลี่ยของมุมสัมพัทธ์ของหยดน้ำ ตามสมการที่ 2 และสมการที่ 3

$$H_0: \mu_y = 30 \quad (2)$$

$$H_1: \mu_y < 30 \quad (3)$$

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้ Y มีค่าน้อยที่สุด

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
A คือ เวลาในการพลาสมา (นาที)	6.37
B คือ กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)	4.20
C คือ อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน (ลิตรต่อนาที)	0.1
D คือ อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน (ลิตรต่อนาที)	0.6

เนื่องจากไม่ทราบความแปรปรวนที่แท้จริงของประชากร จึงทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบสมมติฐานของค่าเฉลี่ยมุมสัมพัทธ์ของหยดน้ำ (Y) ด้วยวิธี T-Test จะได้ผลดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบสมมติฐานค่ามุมสัมพัทธ์ของหยดน้ำ (Y) โดยวิธีการ T-Test

N	Mean	StDev	SE Mean	95% Upper Bound	T-Value	P-Value
32	10.038	1.066	0.188	10.357	-105.98	0.000

จากตารางที่ 5 พบว่าค่าเฉลี่ยมุมสัมพัทธ์ของหยดน้ำจะมีค่าไม่เกิน 10.357 องศา ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้าที่มุมสัมพัทธ์ของหยดน้ำ (Y) ต้องมีค่าไม่เกิน 30 องศา

8. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการพลาสมาโดยพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการพลาสมา มีทั้งหมด 4 ปัจจัย ได้แก่ เวลาในการพลาสมา กำลังไฟฟ้าของเครื่องพลาสมา อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน และอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน จากนั้นจึงได้ออกแบบการทดลองด้วยวิธี Central Composite Design โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนของจุด

แพคทอเรียลเต็มรูป ส่วนของจุดศูนย์กลาง และส่วนของจุดแกน และทำการวิเคราะห์ผลด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology)

จากผลการทดลองทำให้ทราบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการพลาสมาและการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทำให้ค่ามัมส์ของหยดน้ำ (Y) มีค่าน้อยที่สุด ได้แก่ เวลาในการพลาสมา (A) เท่ากับ 6.37 นาที กำลังไฟฟ้า (B) เท่ากับ 4.20 กิโลวัตต์ อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน (C) เท่ากับ 0.10 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน (D) เท่ากับ 0.60 ลิตรต่อนาที ซึ่งจากการยืนยันผลการทดลองของค่ามัมส์ของหยดน้ำได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 10.038 องศา และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.066 องศา ผลการวิเคราะห์การทดสอบสมมติฐานของค่าเฉลี่ย พบว่าค่าเฉลี่ยมัมส์ของหยดน้ำจะมีค่าไม่เกิน 10.357 องศา ด้วยระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้าที่มัมส์ของหยดน้ำ (Y) ต้องมีค่าไม่เกิน 30 องศา

จากการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการพลาสมาที่ทำให้ค่ามัมส์ของหยดน้ำไม่เกิน 30 องศา ส่งผลให้ได้เวลาในการพลาสมาเท่ากับ 6.37 นาที ซึ่งลดลงจากกระบวนการปัจจุบันที่มีเวลาในการพลาสมาเท่ากับ 16 นาทีต่อรอบ ทำให้มีกำลังการผลิตเพิ่มขึ้น 52.97 เปอร์เซ็นต์ หรือเพิ่มขึ้นจาก 1,141,088 ชิ้นต่อวัน เป็น 3,000,150 ชิ้นต่อวัน

9. กิตติกรรมประกาศ

ในงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณบริษัท ทรนศึกษาที่เอื้อเพื่อข้อมูล วัตถุดิบและเครื่องมือในการทดลอง เพื่อให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] C. Mandolino, L. Cassettari, M. Pizzorni, S. Saccaroand and E. Lertora, “A design-of experiments approach to estimate the effect of plasma treatment parameters on the mechanical resistance of adhesive-bonded

joints,” *Journal of Manufacturing Processes.*, vol. 67, pp. 177-194, 2021.

- [2] อัจฉราภรณ์ บุญมา, “อิทธิพลของพลาสมาจากก๊าซต่อการดัดแปรคุณสมบัติพื้นผิวของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด,” วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 2556.
- [3] M. B. Borooj, M. A. Shoushtari, A. Haji and E. N. Sabet, “Optimization of plasma treatment variables for the improvement of carbon fibers/epoxy composite performance by response surface methodology,” *Composites Science and Technology.*, vol. 128, pp. 215-221, 2016.
- [4] M. Pizzorni, C. Gambaro, E. Lertora and C. Mandolino, “Effect of process gases in vacuum plasma treatment on adhesion properties of titanium alloy substrates,” *International Journal of Adhesion and Adhesives.*, vol. 86, pp. 113-122, 2018.
- [5] V. Luque-Agudo, M. Hierro-Oliva, A. M. Gallardo-Moreno and M. L. González-Martín, “Effect of plasma treatment on the surface properties of polylactic acid films,” *Polymer Testing.*, vol. 96, 2021.
- [6] R. Kapica, J. Tyczkowski, J. Balcerzak, M. Makowski, J. Sielski and E. Worwa, “Enhancing adhesive joints between commercial rubber (SBS) and polyurethane by low-pressure plasma surface modification,” *International Journal of Adhesion and Adhesives.*, vol. 95, 2019.
- [7] M. Gryta, “Application of polypropylene membranes hydrophilized by plasma for water desalination by membrane distillation,” *Desalination.*, vol. 515, 2021.

การจัดตารางงานของสัตวแพทย์ในโรงพยาบาลสัตว์ด้วยวิธีแบบจำลองกำหนดการเชิง
จำนวนเต็ม: กรณีศึกษา โรงพยาบาลสัตว์แห่งหนึ่งในจังหวัดนครปฐม

ธีระเดช ไหลสุพรรณวงศ์^{1,*}

ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร อ.เมือง จ.นครปฐม 73000

Received: 20 February 2023; Revised: 18 March 2023; Accepted: 25 April 2023

บทคัดย่อ

โรงพยาบาลสัตว์เป็นสถานที่สำหรับรักษาสัตว์เลี้ยงซึ่งดำเนินการรักษาโดยสัตวแพทย์ โดยทั่วไปโรงพยาบาลสัตว์จะมีสัตวแพทย์ประจำอยู่หลายคน ทางโรงพยาบาลจะต้องมีการจัดตารางการทำงานของสัตวแพทย์ว่าสัตวแพทย์แต่ละคนจะต้องปฏิบัติงานในช่วงเวลาใด การจัดตารางงานที่เหมาะสมให้กับสัตวแพทย์มีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะตารางงานที่เหมาะสมจะช่วยให้สัตวแพทย์ทำการรักษาสัตว์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มสำหรับจัดตารางงานของสัตวแพทย์ใน 1 สัปดาห์โดยใช้ข้อมูลจากโรงพยาบาลสัตว์แห่งหนึ่งในจังหวัดนครปฐมวัตถุประสงค์ของแบบจำลองที่นำเสนอคือ ต้องการให้ผลรวมของจำนวนวันหยุดของสัตวแพทย์ทั้งหมดมีค่ามากที่สุด แบบจำลองที่นำเสนอนี้จะให้ผลเฉลยเป็นตารางการปฏิบัติงานของสัตวแพทย์ทั้งหมดใน 1 สัปดาห์ ซึ่งให้ข้อมูลว่าสัตวแพทย์คนใดต้องเข้าปฏิบัติงานในช่วงเวลาใด ในงานวิจัยนี้ แบบจำลองที่นำเสนอกันด้วยโปรแกรม ILOG OPL CPLEX 12.6 ผลการทดลองพบว่า จากข้อมูลของโรงพยาบาลกรณีศึกษาซึ่งมีจำนวนสัตวแพทย์ทั้งหมด 9 คน เมื่อจัดตารางงานโดยใช้แบบจำลองที่นำเสนอ จะได้ผลรวมของจำนวนวันหยุดที่มากที่สุดภายใต้เงื่อนไขการปฏิบัติงานที่โรงพยาบาลกำหนดคือ 28 วัน โดยใน 1 สัปดาห์ สัตวแพทย์แต่ละคนจะมีวันปฏิบัติงาน 3 ถึง 4 วัน แบบจำลองที่นำเสนอนี้สามารถใช้เป็นทางเลือกในการหาตารางการทำงานที่เหมาะสมของสัตวแพทย์ในโรงพยาบาลกรณีศึกษา หรือสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการจัดตารางการทำงานในโรงพยาบาลสัตว์อื่น ๆ ได้

คำสำคัญ: กำหนดการเชิงจำนวนเต็ม, การจัดตารางงาน, โรงพยาบาลสัตว์

* Corresponding author. E-mail: teeradech.lai@gmail.com

1 อาจารย์ ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

Scheduling of Veterinarians in an Animal Hospital Using Integer Linear Programming Model: A Case Study of an Animal Hospital in Nakhon Pathom

Teeradech Laisupannawong^{1,*}

Department of Mathematics, Faculty of Science, Silpakorn University, Muang,
Nakhon Pathom 73000

Received: 20 February 2023; Revised: 18 March 2023; Accepted: 25 April 2023

Abstract

An animal hospital is a place where pets are treated by veterinarians. Normally, there are many veterinarians in an animal hospital. The hospital must have a task schedule for the veterinarians in order to assign a time period for each veterinarian to work. An optimal schedule for the veterinarians is very important because it can help the veterinarians treat pets more effectively. This paper presents an integer linear programming model for scheduling the tasks of veterinarians in a week using the data from an animal hospital in Nakhon Pathom. The objective of this model is to maximize the total number of days off for the veterinarians. The proposed model provides an optimal solution, which is an optimal schedule for the veterinarians in a week. The solution tells which veterinarian will work during each time period. The proposed model was solved using ILOG OPL CPLEX 12.6. The results showed that the maximum number of days off for all 9 veterinarians in the case study was 28, where each veterinarian had to work 3 to 4 days a week. The proposed model can be used as an option to find an optimal schedule for the veterinarians in the case study or can be applied to schedule the tasks of veterinarians in any animal hospital.

Keywords: integer linear programming, scheduling, animal hospital

* Corresponding author. E-mail: teeradech.lai@gmail.com

¹ Lecturer in Department of Mathematics, Faculty of Science, Silpakorn University

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ปัญหาการจัดตารางการทำงานเป็นปัญหาที่สำคัญและพบเจอได้ในทุกหน่วยงาน เช่น ปัญหาการจัดตารางเรียนในมหาวิทยาลัย ปัญหาการจัดตารางสอบในมหาวิทยาลัย ปัญหาการจัดตารางการทำงานของพยาบาลในโรงพยาบาล ปัญหาการจัดตารางการทำงานของแพทย์ในโรงพยาบาล หรือปัญหาการจัดตารางการทำงานของเภสัชกรในโรงพยาบาล เป็นต้น

สำหรับในโรงพยาบาลสัตว์ ลักษณะการทำงานโดยทั่วไปจะแบ่งเวลาการทำงานออกเป็นช่วง โดยใน 1 วันอาจประกอบด้วยช่วงเวลาการทำงานหลายช่วงตามที่โรงพยาบาลกำหนด และโรงพยาบาลสัตว์จะมีสัตวแพทย์ประจำอยู่หลายคน ทางโรงพยาบาลจะมีการจัดตารางเวลาว่าจะให้สัตวแพทย์แต่ละคนเข้ามาปฏิบัติงานในช่วงเวลาใด การจัดตารางการทำงานให้แก่สัตวแพทย์นี้มีความสำคัญมากเพราะตารางงานที่ดีและเหมาะสมจะสามารถช่วยให้สัตวแพทย์ทำการรักษาสัตว์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และไม่เกิดความเหนื่อยล้าจากการปฏิบัติงานติดต่อกันนานเกินความจำเป็น

โดยทั่วไปหัวหน้าสัตวแพทย์จะเป็นผู้จัดตารางการทำงานของสัตวแพทย์ แต่การจัดตารางงานด้วยมืออาจจะไม่ได้ตารางงานที่เหมาะสมที่สุด งานวิจัยนี้จึงทำการสร้างแบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มเพื่อหาตารางการทำงานที่เหมาะสมที่สุดให้แก่สัตวแพทย์ในโรงพยาบาล โดยใช้ข้อมูลของโรงพยาบาลสัตว์แห่งหนึ่งในจังหวัดนครปฐมเป็นกรณีศึกษา

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัญหาการจัดตารางการทำงานที่เกี่ยวข้องกับบุคลากรทางการแพทย์หรือโรงพยาบาลมีหลายปัญหา เช่น ปัญหาการจัดตารางการทำงานของพยาบาลในโรงพยาบาล [1–7] ปัญหาการจัดตารางการทำงานของแพทย์ในโรงพยาบาล [8–10] และ ปัญหาการจัดตารางการทำงานของเภสัชกรในโรงพยาบาล [11] เป็นต้น

โยธิญา และรติ [1] ได้ศึกษาการจัดตารางการทำงานของพยาบาลในโรงพยาบาลค่ายสรรพสิทธิประสงค์ จังหวัดอุบลราชธานี โดยได้สร้างแบบจำลองกำหนดการเชิง

จำนวนเต็มเพื่อจัดตารางการทำงานของพยาบาลให้สอดคล้องกับเงื่อนไขการปฏิบัติงานของโรงพยาบาล โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 แบบ คือ ทำให้ผลรวมของจำนวนวันหยุดของพยาบาลทั้งหมดมีค่ามากที่สุด และทำให้ภาระงานของพยาบาลทั้งหมดมีค่าน้อยที่สุด

กัญฐาภรณ์ และอุดม [2] ได้นำข้อมูลการทำงาน of พยาบาลในโรงพยาบาลแห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานครมาทำการจัดตาราง โดยได้นำเสนอแบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มแบบผสมเพื่อจัดตารางการทำงาน of พยาบาลให้สอดคล้องตามความต้องการของทางโรงพยาบาล โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อสร้างสมดุลระหว่างภาระงานของพยาบาลให้มากที่สุด

Widyastiti และคณะ [3] ได้ศึกษาการจัดตารางการทำงาน of พยาบาลโดยใช้ข้อมูลจากโรงพยาบาลแห่งหนึ่งในประเทศอินโดนีเซีย โดยได้สร้างแบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มเพื่อจัดตารางการทำงาน of พยาบาลที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ ทำให้ผลรวมของจำนวนวันหยุดของพยาบาลทั้งหมดมีค่ามากที่สุด

Agyei และคณะ [4] ได้ศึกษาการจัดตารางการทำงาน of พยาบาลโดยใช้ข้อมูลจากโรงพยาบาลแห่งหนึ่งในประเทศกานา โดยได้สร้างแบบจำลองการโปรแกรมเป้าหมายเพื่อจัดตารางการทำงาน of พยาบาลที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อสร้างสมดุลระหว่างภาระงาน of พยาบาล และตอบสนองความต้องการ of พยาบาลให้ได้มากที่สุด

Jenal และคณะ [5] ได้ศึกษาการจัดตารางการทำงาน of พยาบาล โดยสร้างแบบจำลองการโปรแกรมเป้าหมาย โดยให้ความต้องการของทางโรงพยาบาลเป็นเงื่อนไขที่ไม่สามารถยืดหยุ่น (hard constraints) และให้ความต้องการ of พยาบาลเป็นเงื่อนไขที่สามารถยืดหยุ่นได้ (soft constraints) วัตถุประสงค์ของแบบจำลองคือ ต้องการให้การฝ่าฝืน soft constraints มีค่าน้อยที่สุด

Dumrongsiri และ Chongphaisal [6] ได้นำข้อมูลการทำงาน of พยาบาลในแผนกฉุกเฉินของโรงพยาบาลของมหาวิทยาลัยแห่งหนึ่งในประเทศไทยมาจัดตารางการทำงาน โดยได้นำเสนอแบบจำลองการโปรแกรมเป้าหมายแบบผสมเพื่อหาตารางงานที่เหมาะสมที่สุดให้แก่พยาบาลในแผนกฉุกเฉิน ซึ่งมีฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์ ได้แก่ 1). ตารางการทำงานต้องสอดคล้องกับวันลาที่

พยาบาลต้องการ 2). ทำให้จำนวนวันทำงานที่สูงที่สุดของพยาบาลทั้งหมดมีค่าน้อยที่สุด 3). ทำให้จำนวนกะที่สูงที่สุด (ที่ต้องทำงาน) ของพยาบาลทั้งหมดมีค่าน้อยที่สุด และ 4). ทำให้จำนวนกะกลางคืนที่สูงที่สุด (ที่ต้องทำงาน) ของพยาบาลทั้งหมดมีค่าน้อยที่สุด

El Adoly และคณะ [7] ได้ศึกษาการจัดตารางการทำงานของพยาบาลโดยใช้ข้อมูลของโรงพยาบาลแห่งหนึ่งในประเทศอียิปต์ โดยได้สร้างแบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มเพื่อหาตารางการทำงานที่เหมาะสมที่สุดภายใต้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ ทำให้ค่าใช้จ่ายในการจ้างพยาบาลทั้งหมดมีค่าน้อยที่สุด

Mansini และ Zanotti [8] ได้ศึกษาการจัดตารางการทำงานของแพทย์ในตึกผู้ป่วยศัลยกรรม โดยได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีฮิวริสติกเพื่อหาตารางการทำงานที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ ทำให้เวลาการทำงานรวมของแพทย์ทั้งหมดมีค่าน้อยที่สุด

Lo และ Lin [9] ได้ศึกษาการจัดตารางการทำงานของแพทย์ในห้องฉุกเฉินโดยใช้ข้อมูลจากโรงพยาบาลแห่งหนึ่งในประเทศไต้หวัน โดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดให้กับแพทย์ที่ทำงานในห้องฉุกเฉิน

Bruni และ Detti [10] ได้ศึกษาการจัดตารางการทำงานของแพทย์ในแผนกบริการสุขภาพโดยใช้ข้อมูลของโรงพยาบาลแห่งหนึ่งในประเทศอิตาลี โดยได้สร้างแบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มแบบผสมเพื่อหาตารางการทำงานที่เหมาะสมที่สุดภายใต้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ สร้างสมดุลระหว่างภาระงานของแพทย์และตอบสนองความพึงพอใจของแพทย์ให้ได้มากที่สุด

ปรีวัฒน์ และคณะ [11] ได้ศึกษาการจัดตารางเวรของเภสัชกรโดยใช้ข้อมูลจากโรงพยาบาลแห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร โดยได้สร้างแบบจำลองการตัดสินใจสำหรับจัดตารางการปฏิบัติงานนอกเวลาราชการที่มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เภสัชกรแต่ละคนมีจำนวนงานและประเภทของงานใกล้เคียงกันมากที่สุด

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า การจัดตารางการทำงานที่เกี่ยวข้องกับบุคลากรทางการแพทย์หรือโรงพยาบาลเพื่อให้ได้ตารางงานที่เหมาะสมมีหลายวิธี เช่น

วิธีกำหนดการเชิงจำนวนเต็ม วิธีการโปรแกรมเป้าหมายหรือวิธีฮิวริสติก เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้ จะศึกษาการจัดตารางการทำงานที่เกี่ยวข้องกับบุคลากรทางการแพทย์คือ สัตวแพทย์ในโรงพยาบาลสัตว์ และจะใช้วิธีกำหนดการเชิงจำนวนเต็มในการหาตารางการทำงานที่เหมาะสมที่สุด

สำหรับแนวทางในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลการจัดตารางการทำงานของสัตวแพทย์ในโรงพยาบาลสัตว์แห่งหนึ่งในจังหวัดนครปฐม ซึ่งทางโรงพยาบาลแห่งนี้มีการจัดตารางการทำงานของสัตวแพทย์เป็นรายสัปดาห์ โดยทางโรงพยาบาลต้องการหาตารางการทำงานที่เหมาะสมในแต่ละสัปดาห์ให้แก่สัตวแพทย์ในโรงพยาบาล ซึ่งต้องสอดคล้องกับระเบียบการปฏิบัติงานที่โรงพยาบาลกำหนด โดยงานวิจัยนี้จะนำข้อมูลและเงื่อนไขของการจัดตารางการทำงานของทางโรงพยาบาลมาสร้างเป็นแบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็ม และขอบเขตของงานวิจัยคือ เวลาการจัดตารางการทำงานของสัตวแพทย์เท่ากับ 7 วัน ตามพฤติกรรมการจัดตารางการทำงานเป็นรายสัปดาห์ของโรงพยาบาลในกรณีศึกษา

3. ปัญหาการจัดตารางการทำงานของสัตวแพทย์ในกรณีศึกษา

จากการสอบถามข้อมูลการจัดตารางการทำงานในโรงพยาบาลสัตว์ที่เป็นกรณีศึกษา พบว่าในโรงพยาบาลแห่งนี้มีสัตวแพทย์ทั้งหมด 9 คน และมีข้อปฏิบัติในการจัดตารางการทำงานดังนี้

1. โรงพยาบาลสัตว์แห่งนี้เปิดทำการตลอด 24 ชั่วโมง โดยทางโรงพยาบาลแบ่งช่วงเวลาการทำงานเป็น 4 ช่วง ได้แก่ 8.30 – 20.30 น., 9.15 – 21.15 น., 10.00 – 22.00 น., และ 22.00 – 8.30 น.
เพื่อความสะดวก ในที่นี้จะเรียกช่วงเวลา 8.30 – 20.30 น., 9.15 – 21.15 น., และ 10.00 – 22.00 น. ว่าช่วงกลางวัน ส่วนช่วงเวลา 22.00 – 8.30 น. เรียกว่า ช่วงกลางคืน
2. จากสัตวแพทย์ทั้งหมด 9 คน มีสัตวแพทย์อยู่ 3 คนที่เป็นผู้เชี่ยวชาญ และสามารถทำหน้าที่เป็นแพทย์พี่เลี้ยงให้กับสัตวแพทย์อีก 6 คนที่เหลือ

3. สัตวแพทย์แต่ละคนจะเข้าทำงานเพียงช่วงเวลาเดียวเท่านั้นในแต่ละวัน
4. ในแต่ละวัน ในช่วงเวลา 8.30 – 20.30 น. จะมีสัตวแพทย์มาเข้าปฏิบัติงาน 1 คน และในช่วงเวลา 9.15 – 21.15 น. จะมีสัตวแพทย์มาเข้าปฏิบัติงานอีก 1 คน ส่วนในช่วงเวลา 10.00 – 22.00 น. จะมีสัตวแพทย์มาเข้าปฏิบัติงานอีกอย่างน้อย 2 คน
5. ในช่วงเวลา 10.00 – 22.00 น. ของแต่ละวัน สัตวแพทย์ที่เข้ามาปฏิบัติงานในช่วงเวลานี้จะต้องเป็นแพทย์ที่เลี้ยงอย่างน้อย 1 คน
6. ในช่วงเวลา 22.00 – 8.30 น. หรือช่วงกลางคืน จะมีสัตวแพทย์มาเข้าปฏิบัติงานเพียง 1 คน
7. สัตวแพทย์ที่เข้าทำงานในช่วง 22.00 – 8.30 น. ของวันนี้ จะไม่สามารถทำงานในช่วงเวลากลางวันในวันถัดไปได้ นั่นคือ จะไม่สามารถทำงานในช่วงเวลา 8.30 – 20.30 น., 9.15 – 21.15 น., และ 10.00 – 22.00 น. ของวันถัดไปได้
8. ใน 1 สัปดาห์ สัตวแพทย์แต่ละคน ต้องทำงานในช่วงกลางวันไม่ต่ำกว่า 3 วัน
9. สัตวแพทย์แต่ละคน จะต้องเข้าทำงานในช่วงเวลา กลางคืนไม่เกิน 1 ครั้งใน 1 สัปดาห์

สำหรับการจัดตารางการทำงานของสัตวแพทย์ในโรงพยาบาลกรณีศึกษา ปกติจะถูกจัดด้วยมือโดยหัวหน้าสัตวแพทย์ของโรงพยาบาล ซึ่งการจัดตารางงานของหัวหน้าสัตวแพทย์พบว่าในบางครั้งมีปัญหาเกิดขึ้น เช่น ตารางงานที่ได้ไม่สอดคล้องกับบางเงื่อนไขในการจัดตารางของทางโรงพยาบาล ตัวอย่างเช่น สัตวแพทย์บางคนมีการทำงานในช่วงกลางวันเป็นจำนวน 4 วันใน 1 สัปดาห์ แต่สัตวแพทย์บางคนถูกจัดให้ทำงานในช่วงกลางวันเพียง 2 วัน ใน 1 สัปดาห์ ซึ่งจะไม่สามารถสอดคล้องกับข้อปฏิบัติของทางโรงพยาบาลในข้อที่ 8 ข้างต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการจัดตารางงานของสัตวแพทย์ในโรงพยาบาลแห่งนี้ด้วยการสร้างแบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็ม ซึ่งผลลัพธ์หรือตารางงานที่ได้จะสอดคล้องกับทุกข้อปฏิบัติในการจัดตารางการทำงานข้างต้น

- นอกจากนี้ งานวิจัยนี้มีสมมติฐานดังต่อไปนี้
1. สัตวแพทย์แต่ละคนไม่มีภาระงานค้างและไม่มีการขอกำหนดการทำงานใด ๆ ที่มาจากภาระงานของ

สัปดาห์ก่อนหน้า นั่นคือ สัตวแพทย์ทุกคนพร้อมถูกจัดตารางเพื่อทำงานได้ในทันที

2. งานวิจัยนี้ไม่พิจารณาถึงการลาของสัตวแพทย์ นั่นคือ สัตวแพทย์แต่ละคนถือว่าไม่มีวันลา และสามารถเข้าปฏิบัติงานได้ตามตารางงานที่กำหนด

4. แบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มที่นำเสนอ

4.1 พารามิเตอร์ ดัชนี และตัวแปรตัดสินใจ

พารามิเตอร์

D แทน จำนวนวันที่จัดตารางงาน ในที่นี้ $D=7$

V แทน จำนวนสัตวแพทย์ในโรงพยาบาล ในที่นี้ $V=9$

M แทน จำนวนบวกขนาดใหญ่

ดัชนี

i แทน วันที่ $i \in \hat{D} = \{1, 2, \dots, 7\}$

j แทน สัตวแพทย์คนที่ $j \in \hat{V} = \{1, 2, \dots, 9\}$

ในที่นี้กำหนดให้สัตวแพทย์ผู้เชี่ยวชาญที่สามารถทำหน้าที่เป็นแพทย์ที่เลี้ยงได้ คือ สัตวแพทย์คนที่ $j = 7, 8$ และ 9

ตัวแปรตัดสินใจ

A_{ij} เป็นตัวแปรไบนารี จะมีค่าเป็น 1 ถ้าสัตวแพทย์คนที่ j ทำงานในช่วงเวลา 8.30 – 20.30 น. ของวันที่ i และเป็น 0 ถ้าไม่ใช่

B_{ij} เป็นตัวแปรไบนารี จะมีค่าเป็น 1 ถ้าสัตวแพทย์คนที่ j ทำงานในช่วงเวลา 9.15 – 21.15 น. ของวันที่ i และเป็น 0 ถ้าไม่ใช่

C_{ij} เป็นตัวแปรไบนารี จะมีค่าเป็น 1 ถ้าสัตวแพทย์คนที่ j ทำงานในช่วงเวลา 10.00 – 22.00 น. ของวันที่ i และเป็น 0 ถ้าไม่ใช่

N_{ij} เป็นตัวแปรไบนารี จะมีค่าเป็น 1 ถ้าสัตวแพทย์คนที่ j ทำงานในช่วงเวลา 22.00 – 8.30 น. ของวันที่ i และเป็น 0 ถ้าไม่ใช่

x_{ij} เป็นตัวแปรไบนารี จะมีค่าเป็น 1 ถ้าสัตวแพทย์คนที่ j ได้หยุดงานในวันที่ i และเป็น 0 ถ้าไม่ใช่

4.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ในแบบจำลองที่นำเสนอคือ ต้องการให้ผลรวมของจำนวนวันหยุดของสัตว์แพทย์ทั้งหมด มีค่ามากที่สุด

$$\text{Max} \sum_{j=1}^9 \sum_{i=1}^7 x_{ij} \quad (1)$$

4.3 ข้อจำกัด

1. ในแต่ละวัน สัตวแพทย์แต่ละคนต้องทำงานหรือหยุดงานเพียงอย่างใดอย่างหนึ่ง และถ้าทำงานจะเข้าทำงานได้เพียงช่วงเวลาเดียว

$$(A_{ij} + B_{ij} + C_{ij} + N_{ij}) + x_{ij} = 1 \quad \forall i \in \hat{D}, \forall j \in \hat{V} \quad (2)$$

2. ในช่วงเวลา 8.30 – 20.30 น. และ 9.15 – 21.15 น. ของแต่ละวัน ต้องมีสัตวแพทย์มาเข้าปฏิบัติงาน ช่วงเวลาละ 1 คน ส่วนในช่วงเวลา 10.00 – 22.00 น. ของแต่ละวัน ต้องมีสัตวแพทย์มาเข้าปฏิบัติงาน อย่างน้อย 2 คน

$$\sum_{j=1}^9 A_{ij} = 1 \quad \forall i \in \hat{D} \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^9 B_{ij} = 1 \quad \forall i \in \hat{D} \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^9 C_{ij} \geq 2 \quad \forall i \in \hat{D} \quad (5)$$

3. สัตวแพทย์ที่เข้ามาปฏิบัติงานในช่วงเวลา 10.00 – 22.00 น. ของแต่ละวัน จะต้องเป็นแพทย์ที่เลี้ยงอย่างน้อย 1 คน

$$\sum_{j=7}^9 C_{ij} \geq 1 \quad \forall i \in \hat{D} \quad (6)$$

4. ในช่วงเวลา 22.00 – 8.30 น. ของแต่ละวัน จะมีสัตวแพทย์มาเข้าปฏิบัติงาน 1 คน

$$\sum_{j=1}^9 N_{ij} = 1 \quad \forall i \in \hat{D} \quad (7)$$

5. สัตวแพทย์ที่เข้าทำงานในช่วง 22.00 – 8.30 น. ของวันนี้ จะไม่สามารถทำงานในช่วงเวลากลางวันในวันถัดไปได้

$$A_{i+1,j} + B_{i+1,j} + C_{i+1,j} \leq (1 - N_{i,j})M \quad \forall i \in \hat{D} - \{D\}, \forall j \in \hat{V} \quad (8)$$

จากข้อจำกัด (8) จะได้ว่า ถ้า $N_{i,j} = 1$ หรือ สัตวแพทย์คนที่ j ทำงานในช่วงเวลา 22.00 – 8.30 น. ของวันที่ i แล้ว ตัวแปร $A_{i+1,j}$, $B_{i+1,j}$, และ $C_{i+1,j}$ จะมีค่าเป็น 0 ทั้งหมด เพราะค่าทางขวามือของข้อจำกัด (8) เป็น 0 ดังนั้น สัตวแพทย์คนที่ j จะไม่สามารถทำงานในช่วงเวลา 8.30 – 20.30 น., 9.15 – 21.15 น., และ 10.00 – 22.00 น. ของวันที่ $i+1$ ได้นั่นเอง นอกจากนี้ ข้อจำกัดนี้ไม่จำเป็นต้องรวมกรณีที่ $i=7$ เนื่องจากถ้า $i=7$ พจน์ทางซ้ายมือของข้อจำกัดนี้จะประกอบด้วยตัวแปร $A_{8,j}$, $B_{8,j}$, และ $C_{8,j}$ ซึ่งเป็นตัวแปรตัดสินใจของวันที่ 8 (หรือเป็นตัวแปรตัดสินใจของการจัดตารางการทำงานของสัปดาห์ถัดไป) ซึ่งจากพฤติกรรมการจัดตารางการทำงานเป็นรายสัปดาห์ของโรงพยาบาลในกรณีศึกษาแห่งนี้ ทำให้ตัวแปร $A_{8,j}$, $B_{8,j}$, และ $C_{8,j}$ เทียบเท่ากับตัวแปร $A_{1,j}$, $B_{1,j}$, และ $C_{1,j}$ ตามลำดับของสัปดาห์ถัดไปนั่นเอง นอกจากนี้ ถึงแม้ว่าตัวแปร $N_{7,j} = 1$ ซึ่งจะทำให้ตัวแปร $A_{8,j} = B_{8,j} = C_{8,j} = 0$ (สัตวแพทย์คนที่ j ไม่สามารถทำงานในช่วงกลางวันของวันที่ 1 ของสัปดาห์ถัดไปได้) แต่เงื่อนไขตรงนี้ซึ่งเป็นข้อจำกัดการทำงานที่มาจากภาระงานของสัปดาห์ก่อนหน้า จะถือว่าไม่ถูกนำมาพิจารณาอีกในการจัดตารางของสัปดาห์ถัดไป ตามสมมติฐานข้อที่ 1 ของงานวิจัยนี้

6. สัตวแพทย์แต่ละคน ต้องทำงานในช่วงกลางวันไม่ต่ำกว่า 3 วันใน 1 สัปดาห์

$$\sum_{i=1}^7 (A_{ij} + B_{ij} + C_{ij}) \geq 3 \quad \forall j \in \hat{V} \quad (9)$$

7. สัตวแพทย์แต่ละคน สามารถเข้าทำงานในช่วงกลางคืนไม่เกิน 1 ครั้งใน 1 สัปดาห์

$$\sum_{i=1}^7 N_{ij} \leq 1 \quad \forall j \in \hat{V} \quad (10)$$

5. ผลการวิจัย

ในหัวข้อนี้ แบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มที่นำเสนอถูกแก้ด้วยโปรแกรม ILOG OPL CPLEX 12.6 ในคอมพิวเตอร์ CPU core i7 2.20 GHz และ RAM 8 GB โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองคือ เวลาจัดตารางการทำงานเป็น 7 วัน และจำนวนสัตวแพทย์เป็น 9 คน ตามข้อมูลจากโรงพยาบาลในกรณีศึกษา สำหรับขนาดของแบบจำลองด้วย

ข้อมูลจากกรณีศึกษา แสดงในตารางที่ 1 หลังจากแก้ปัญหาด้วยโปรแกรม ILOG OPL CPLEX 12.6 พบว่า เวลาที่ใช้ประมวลผลคือ 0.56 วินาที โดยผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองแสดงในตารางที่ 2 และ 3

ตารางที่ 1 จำนวนตัวแปรและจำนวนข้อจำกัดของปัญหา

ชนิด	จำนวน
ตัวแปรไบนารี	315
ข้อจำกัด	170

ตารางที่ 2 ตารางการทำงานของสัตว์แพทย์ทั้งหมดของโรงพยาบาลใน 1 สัปดาห์ที่จัดเรียงตามวัน

วันที่ (i)	สัตว์แพทย์คนที่ (j)			
	8.30 - 20.30 น.	9.15 - 21.15 น.	10.00 - 22.00 น.	22.00 - 8.30 น.
1	5	3	2 7	6
2	9	5	4 8	1
3	6	8	4 9	5
4	1	2	3 7	9
5	4	5	1 8	3
6	1	2	6 7	4
7	9	3	6 8	2

ตารางที่ 2 แสดงผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองที่นำเสนอในรูปแบบของตารางการทำงานของสัตว์แพทย์ทั้งหมดของโรงพยาบาลใน 1 สัปดาห์แบบจัดเรียงตามวัน จากตารางที่ 2 ได้ว่า ในวันที่ 1 สัตว์แพทย์คนที่ 5 จะมาเข้าปฏิบัติงานในช่วงเวลา 8.30 - 20.30 น. ($A_{15} = 1$) ส่วนสัตว์แพทย์คนที่ 3 จะมาเข้าปฏิบัติงานในช่วงเวลา 9.15 - 21.15 น. ($B_{13} = 1$) ส่วนในช่วงเวลา 10.00 - 22.00 น. จะมีสัตว์แพทย์คนที่ 2 และ 7 มาเข้าปฏิบัติงาน ($C_{12} = C_{17} = 1$) ซึ่งสัตว์แพทย์คนที่ 7 นี้เป็นแพทย์ที่เลี้ยง ส่วนในช่วงเวลา 22.00 - 8.30 น. ของวันที่ 1 สัตว์แพทย์ที่มาเข้าปฏิบัติงาน

ตารางที่ 3 ตารางการทำงานของสัตว์แพทย์ทั้งหมดของโรงพยาบาลใน 1 สัปดาห์ที่จัดเรียงตามสัตว์แพทย์

สัตว์แพทย์ คนที่ (j)	วันทำงาน		วันหยุด งาน
	วันที่ (i)	ช่วงเวลา	
1	2	22.00 - 8.30 น.	1, 3, 7
	4	8.30 - 20.30 น.	
	5	10.00 - 22.00 น.	
	6	8.30 - 20.30 น.	
2	1	10.00 - 22.00 น.	2, 3, 5
	4	9.15 - 21.15 น.	
	6	9.15 - 21.15 น.	
	7	22.00 - 8.30 น.	
3	1	9.15 - 21.15 น.	2, 3, 6
	4	10.00 - 22.00 น.	
	5	22.00 - 8.30 น.	
	7	9.15 - 21.15 น.	
4	2	10.00 - 22.00 น.	1, 4, 7
	3	10.00 - 22.00 น.	
	5	8.30 - 20.30 น.	
	6	22.00 - 8.30 น.	
5	1	8.30 - 20.30 น.	4, 6, 7
	2	9.15 - 21.15 น.	
	3	22.00 - 8.30 น.	
	5	9.15 - 21.15 น.	
6	1	22.00 - 8.30 น.	2, 4, 5
	3	8.30 - 20.30 น.	
	6	10.00 - 22.00 น.	
	7	10.00 - 22.00 น.	
7	1	10.00 - 22.00 น.	2, 3, 5, 7
	4	10.00 - 22.00 น.	
	6	10.00 - 22.00 น.	
8	2	10.00 - 22.00 น.	1, 4, 6
	3	9.15 - 21.15 น.	
	5	10.00 - 22.00 น.	
	7	10.00 - 22.00 น.	
9	2	8.30 - 20.30 น.	1, 5, 6
	3	10.00 - 22.00 น.	
	4	22.00 - 8.30 น.	
	7	8.30 - 20.30 น.	

ในช่วงเวลานี้คือ สัตวแพทย์คนที่ 6 ($N_{16} = 1$) และในวันอื่น ๆ ก็สามารถตีความจากตารางที่ 2 ได้ในทำนองเดียวกัน

นอกจากนี้ จากตารางที่ 2 พบว่า ในช่วงเวลา 10.00 – 22.00 น. ของแต่ละวัน จะมีสัตวแพทย์ที่ทำหน้าที่เป็นแพทย์ที่เลี้ยงมาเข้าปฏิบัติงานในช่วงเวลานี้น้อย 1 คน คือ สัตวแพทย์คนที่ 7, 8, 9, 7, 8, 7, และ 8 มาเข้าปฏิบัติงานในวันที่ 1 ถึง 7 ในช่วงเวลาดังกล่าวตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับข้อจำกัด (6) ของแบบจำลอง ในทางปฏิบัติสัตวแพทย์ที่เป็นแพทย์ที่เลี้ยงนี้จะทำหน้าที่ดูแลและฝึกสอนสัตวแพทย์คนอื่น ๆ ที่มาเข้าปฏิบัติงานในวันเดียวกัน

ตารางที่ 3 แสดงผลเฉลยจากแบบจำลองที่นำเสนอ เช่นเดียวกับตารางที่ 2 แต่แสดงในรูปของภาระงานที่จัดเรียงตามลำดับที่ของสัตวแพทย์ เช่น สัตวแพทย์คนที่ 1 จะต้องเข้าปฏิบัติงาน 4 วันใน 1 สัปดาห์ ได้แก่ ในช่วงเวลา 22.00 – 8.30 น. ของวันที่ 2 ($N_{21} = 1$), ในช่วงเวลา 8.30 – 20.30 น. ของวันที่ 4 ($A_{41} = 1$), ในช่วงเวลา 10.00 – 22.00 น. ของวันที่ 5 ($C_{51} = 1$), และในช่วงเวลา 8.30 – 20.30 น. ของวันที่ 6 ($A_{61} = 1$) โดยสัตวแพทย์คนที่ 1 มีวันหยุดทั้งสิ้น 3 วัน ได้แก่ วันที่ 1, 3, และ 7 ($x_{11} = x_{31} = x_{71} = 1$) ส่วนภาระงานของสัตวแพทย์คนอื่น ๆ ก็สามารถตีความจากตารางที่ 3 ได้ในทำนองเดียวกัน

สำหรับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากแบบจำลอง หรือผลรวมของจำนวนวันหยุดของสัตวแพทย์ทั้งหมดที่มากที่สุดคือ 28 วัน ซึ่งสัตวแพทย์คนที่ 1 ถึง 6 และ 8 ถึง 9 จะมีวันหยุดจำนวน 3 วัน (หรือมีวันทำงาน 4 วันใน 1 สัปดาห์) ดังแสดงในตารางที่ 3 ส่วนสัตวแพทย์คนที่ 7 จะมีจำนวนวันหยุด 4 วัน (หรือมีวันทำงาน 3 วันใน 1 สัปดาห์) ดังแสดงในตารางที่ 3 เช่นกัน

6. อภิปรายผลการวิจัย

จากตารางที่ 2 พบว่า ในแต่ละวัน มีสัตวแพทย์ที่มาเข้าปฏิบัติงานในช่วงเวลา 10.00 – 22.00 น. จำนวน 2 คนเท่ากันทุกวัน ซึ่งสอดคล้องกับข้อจำกัด (5) ของแบบจำลอง คือ ต้องการให้มีสัตวแพทย์ในช่วงเวลาดังกล่าวอย่างน้อย 2 คน (ซึ่งสามารถเป็น 2 คนพอดีได้) อย่างไรก็ตาม จากข้อจำกัด (5) จำนวนสัตวแพทย์ในช่วงเวลา 10.00 – 22.00 น. ของแต่ละวันสามารถมีมากกว่า 2 คนได้ เพราะ

เครื่องหมายของข้อจำกัด (5) ในแบบจำลองเป็นเครื่องหมายมากกว่าหรือเท่ากับ (อันเนื่องมาจากความต้องการของโรงพยาบาลว่าอาจให้มีจำนวนสัตวแพทย์มากกว่า 2 คนเพื่อรองรับการให้บริการแก่ลูกค้าในช่วงเวลา 10.00 – 22.00 น. เพราะเป็นช่วงเวลาที่น่าจะมีลูกค้ามาใช้บริการมากที่สุด) แต่แบบจำลองที่นำเสนอให้ผลเฉลยในช่วงเวลา 10.00 – 22.00 น. ของแต่ละวัน มีจำนวนสัตวแพทย์มาเข้าทำงานเพียง 2 คน ที่เป็นเช่นนี้เพราะธรรมชาติของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการทำให้ผลรวมของจำนวนวันหยุดของสัตวแพทย์ทั้งหมดมีค่ามากที่สุด ผลเฉลยจากแบบจำลองจึงไม่มีการมอบหมายให้มีจำนวนสัตวแพทย์ในช่วงเวลา 10.00 – 22.00 น. มีจำนวนเกิน 2 คน เพราะจะทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ลดลง แต่ในเชิงปฏิบัติ ทางโรงพยาบาลสัตว์สามารถนำแบบจำลองที่นำเสนอไปใช้งาน โดยสามารถใช้ผลเฉลยจากแบบจำลองมาปรับให้เข้ากับความต้องการของทางโรงพยาบาล เช่น จากในตารางที่ 3 ทางโรงพยาบาลอาจจะลดวันหยุดของสัตวแพทย์บางคนให้น้อยลง แล้วมอบหมายให้สัตวแพทย์คนนั้นปฏิบัติงานเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 10.00 – 22.00 น. ของวันที่คาดว่าจะมีลูกค้ามาใช้บริการมาก เป็นต้น

นอกจากนี้ จากที่ตารางที่ 3 พบว่า สัตวแพทย์ทุกคนต้องปฏิบัติงาน 4 วันใน 1 สัปดาห์ ยกเว้นสัตวแพทย์คนที่ 7 ที่ปฏิบัติงานเพียง 3 วันใน 1 สัปดาห์ ในทางปฏิบัติ ถ้าทางโรงพยาบาลอยากให้สัตวแพทย์ทุกคนมีภาระงานเท่าเทียมกัน ทางโรงพยาบาลอาจเปลี่ยนวันหยุดของสัตวแพทย์คนที่ 7 ให้เป็นวันทำงานได้ 1 วัน นั่นคือ ให้สัตวแพทย์คนที่ 7 มาทำงานในช่วงกลางวันของวันที่ 2, 3, 5, หรือ 7 เพิ่มอีก 1 วัน โดยเลือกวันที่คาดว่าจะมีลูกค้ามาใช้บริการมากที่สุด เพื่อจะได้มีจำนวนสัตวแพทย์เพิ่มขึ้นเพื่อรองรับการให้บริการแก่ลูกค้า และสัตวแพทย์ทุกคนจะได้มีภาระงานจำนวน 4 วันเท่ากัน

สำหรับเวลาที่ใช้ในการแก้แบบจำลองที่นำเสนอ โดยใช้ข้อมูลจากกรณีศึกษา แบบจำลองที่นำเสนอสามารถหาคำตอบด้วยโปรแกรม ILOG OPL CPLEX 12.6 โดยใช้เวลาเพียงไม่ถึง 1 วินาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มที่นำเสนอมีความเหมาะสมกับปัญหาการจัดตารางงานของสัตวแพทย์ในกรณีศึกษา และสามารถขยายขอบเขตการศึกษากับปัญหาที่มีจำนวนตัวแปรและข้อจำกัดมากขึ้นได้

นอกจากนี้ แบบจำลองที่นำเสนอยังสามารถปรับให้เข้ากับสถานการณ์จริงต่าง ๆ ได้ เช่น จากสมมติฐานข้อแรกของงานวิจัยนี้ที่ว่าต้องไม่มีข้อจำกัดการทำงานใด ๆ ที่มาจากภาระงานของสัปดาห์ก่อนหน้า หากเราเปลี่ยนเงื่อนไขใหม่ว่าการจัดตารางงานของสัตวแพทย์สามารถมีข้อจำกัดการทำงานที่มาจากภาระงานของสัปดาห์ก่อนหน้าได้ เช่น สมมติว่าสัตวแพทย์คนที่ 2 เข้าปฏิบัติงานในช่วงกลางคืนของวันที่ 7 ($N_{72} = 1$) จากข้อจำกัดที่ (8) ถ้าพิจารณา $i = 7$ จะได้ว่า $A_{82} = B_{82} = C_{82} = 0$ หรือสัตวแพทย์คนที่ 2 นี้จะไม่สามารถปฏิบัติงานในช่วงกลางวันของวันที่ 1 ของสัปดาห์ถัดไปได้ เมื่อเราจะทำการจัดตารางใหม่ของสัปดาห์ถัดไป เราสามารถเพิ่มข้อจำกัด $A_{12} = B_{12} = C_{12} = 0$ เข้าไปในแบบจำลองที่นำเสนอ แล้วหาผลเฉลยใหม่เพื่อให้ได้ตารางงานสอดคล้องกับข้อปฏิบัติในการจัดตารางของทางโรงพยาบาลสำหรับสัปดาห์ถัดไปได้ เป็นต้น

7. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการจัดตารางการทำงานของสัตวแพทย์: กรณีศึกษา โรงพยาบาลสัตว์แห่งหนึ่งในจังหวัดนครปฐม วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ ต้องการนำเสนอแบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มสำหรับจัดตารางการทำงานใน 1 สัปดาห์ของสัตวแพทย์ให้ได้ตารางการทำงานที่เหมาะสมที่สุด และสอดคล้องกับเงื่อนไขการปฏิบัติงานที่โรงพยาบาลกำหนด ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแบบจำลองที่นำเสนอคือ ต้องการให้ผลรวมของจำนวนวันหยุดของสัตวแพทย์ทั้งหมดมีค่ามากที่สุด แบบจำลองที่นำเสนอนี้แสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ของกำหนดการเชิงจำนวนเต็มในการแก้ปัญหาที่มาจากสถานการณ์จริง ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่นำเสนอสามารถนำไปใช้จัดตารางการทำงานของสัตวแพทย์ในโรงพยาบาลสัตว์ที่เป็นกรณีศึกษาได้ ในงานวิจัยนี้ แบบจำลองที่นำเสนอถูกแก้ด้วยตัวโปรแกรม ILOG OPL CPLEX 12.6 โดยใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่า 1 วินาที ซึ่งมีความเหมาะสมมากในการนำไปใช้ในสถานการณ์จริง นอกจากนี้ แบบจำลองที่เสนอนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโรงพยาบาลสัตว์ที่มีจำนวนสัตวแพทย์หรือจำนวนวันที่จัดตารางงานมากขึ้น หรือสามารถนำเทคนิคการสร้างแบบจำลองที่นำเสนอไปประยุกต์

กับเงื่อนไขการจัดตารางการทำงานของสัตวแพทย์ในโรงพยาบาลสัตว์อื่น ๆ ได้

สำหรับข้อจำกัดของงานวิจัยนี้คือ แบบจำลองที่เสนอนั้นไม่ได้พิจารณาข้อจำกัดในการให้วันหยุดของสัตวแพทย์อยู่ติดกัน เพราะในสถานการณ์จริง สัตวแพทย์อาจจะต้องการวันหยุดให้อยู่ติดกันหากมีวันหยุดมากกว่า 1 วัน และแบบจำลองที่เสนอนั้นไม่ได้พิจารณาว่าสัตวแพทย์สามารถมีวันลางานได้ ดังนั้น งานวิจัยที่สามารถทำต่อได้ในอนาคตคือ อาจจะพิจารณาเพิ่มข้อจำกัดดังกล่าว และพิจารณาขยายแบบจำลองเป็นการจัดตารางการทำงานใน 1 เดือน เป็นต้น

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสัตวแพทย์ประจำโรงพยาบาลสัตว์จังหวัดนครปฐม ที่ได้ให้ข้อมูลการจัดตารางงานของทางโรงพยาบาลเพื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] โยธิญา โยธี และ รติ โบจรัส, “การสร้างแบบจำลองตารางงานของพยาบาลด้วยกำหนดการเชิงจำนวนเต็มกรณีศึกษา: โรงพยาบาลค่ายสรรพสิทธิประสงค์,” *วารสารไทยการวิจัยดำเนินงาน*, ปีที่ 7, ฉบับที่ 2, น. 20-29, 2562.
- [2] กัญฐาภรณ์ ทองโสภิต และ อุดม จันทร์จรัสสุข, “การหาค่าเหมาะสมที่สุดของปัญหาการจัดตารางงานพยาบาล โรงพยาบาลกรณีศึกษาแห่งหนึ่ง,” *วารสารวิศวกรรมลาดกระบัง*, ปีที่ 38, ฉบับที่ 4, น. 23-32, 2564.
- [3] M. Widyastiti, A. Aman and T. Bakhtiar, “Nurses scheduling by considering the qualification using integer linear programming,” *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 14, no. 3, pp. 933-940, 2016.
- [4] W. Agyei, W. Obeng-Denteh and E. A. Andaam, “Modeling nurse scheduling problem using 0-1 goal programming: A case study of Tafo Government Hospital, Kumasi-Ghana,” *International Journal of*

- Scientific & Technology Research.*, vol. 4, no. 3, pp. 5-10, 2015.
- [5] R. Jenal, W. R. Ismail, L. C. Yeun and A. Oughalime, "A cyclical nurse schedule using goal programming," *Journal of Mathematical and Fundamental Sciences.*, vol. 43, no. 3, pp. 151-164, 2011.
- [6] A. Dumrongsiri and P. Chongphaisal, "Nurse scheduling in a hospital emergency department: A case study at a Thai university hospital," *Songklanakarin Journal of Science and Technology.*, vol. 40, no. 1, 2018.
- [7] A. A. El Adoly, M. Gheith and M. N. Fors, "A new formulation and solution for the nurse scheduling problem: A case study in Egypt," *Alexandria engineering journal.*, vol. 57, no. 4, pp. 2289-2298, 2018.
- [8] R. Mansini and R. Zanotti, "Optimizing the physician scheduling problem in a large hospital ward," *Journal of Scheduling.*, vol. 23, no. 3, pp. 337-361, 2020.
- [9] C. C. Lo, and T. H. Lin, "A particle swarm optimization approach for physician scheduling in a hospital emergency department," in *2011 Seventh International Conference on Natural Computation (ICNC 2011) Shanghai, China*, vol. 4, pp. 1929-1933, 2011.
- [10] R. Bruni and P. Detti, "A flexible discrete optimization approach to the physician scheduling problem," *Operations Research for Health Care.*, vol. 3, no. 4, pp. 191-199, 2014.
- [11] ปรีวัฒน์ อารีชาติ, สราวุธ จันทร์สุวรรณ, ศีวิภา ดุษฎีโหนด และ อัครนันท์ พงศธรวิวัฒน์, "ตัวแบบการจัดตารางเวรของเภสัชกรเพื่อลดความเหลื่อมล้ำของภาระงาน," *วารสารไทยการวิจัยดำเนินงาน.*, ปีที่ 10, ฉบับที่ 1, น. 103-112, 2565.

การเพิ่มประสิทธิภาพระบบการวางแผนโซ่อุปทานอย่างยั่งยืน สำหรับการผลิตกล้วยน้ำว้าด้วยแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม

ปิ่นฉัตร จันทรส¹, นินรชา คล้ายเขย² และ ชัยมงคล ลิ้มเพียรชอบ^{3*}
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

Received: 11 February 2023; Revised: 20 March 2023; Accepted: 25 April 2023

บทคัดย่อ

กล้วยน้ำว้าจัดเป็นกล้วยพันธุ์หนึ่งที่พบได้ทั่วไปในทุกภูมิภาคของประเทศไทยและนิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นกล้วยที่ให้พลังงานและมีแร่ธาตุรวมถึงวิตามินที่จำเป็นต่อร่างกายในปริมาณมาก อีกทั้งยังสามารถนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้อย่างหลากหลาย จากการศึกษาการเพาะปลูกกล้วยน้ำว้าในปัจจุบันพบว่ากลุ่มเกษตรกรยังคงประสบปัญหาในการขาดการวางแผนการผลิตที่มีประสิทธิภาพตลอดทั้งโซ่อุปทาน ตั้งแต่ก่อนการเพาะปลูกไปจนถึงการเก็บเกี่ยว ผลผลิตส่งให้กับลูกค้า ทำให้กล้วยน้ำว้าที่เกษตรกรผลิตได้นั้นมีผลผลิตที่ไม่ได้คุณภาพ ขายได้ในราคาต่ำ เกษตรกรสูญเสียรายได้ไป ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวข้างต้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีการประยุกต์ใช้แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม เพื่อใช้ในการวางแผนโซ่อุปทานการเพาะปลูกกล้วยน้ำว้าได้อย่างยั่งยืนตั้งแต่การวางแผนปรับปรุงคุณภาพดิน การเลือกซื้อหน่อพันธุ์กล้วยน้ำว้าในการเพาะปลูก ช่วงเวลาในการใส่ปุ๋ย รวมถึงช่วงเวลาในการเก็บเกี่ยวให้สอดคล้องกันเพื่อให้เกษตรกรมีผลกำไรในการปลูกกล้วยน้ำว้าเหมาะสมที่สุด ซึ่งผลลัพธ์ของแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมานั้นสามารถเพิ่มผลกำไรสุทธิให้แก่เกษตรกรได้ถึงร้อยละ 10.52 เมื่อเทียบกับก่อนการใช้แบบจำลอง

คำสำคัญ: กล้วยน้ำว้า, การวางแผนการผลิต, โซ่อุปทาน, แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม

* Corresponding author. E-mail: fengckl@ku.ac.th

¹ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

² ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ หน่วยวิจัยวิศวกรรมระบบโซ่อุปทานขนาดใหญ่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Optimization of a Sustainable Supply Chain Planning System for Cultivated Banana Production with a Mixed-integer Linear Programming Approach

Pinchat Chantaros¹, Rinracha Klaychey² and Chaimongkol Limpianchob^{3,*}

Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus
Kamphaeng Saen District, Nakhon Pathom 73140, Thailand

Received: 11 February 2023; Revised: 20 March 2023; Accepted: 25 April 2023

Abstract

Cultivated bananas are one of the most common types of bananas found in all regions of Thailand. They are widely consumed because cultivated bananas contain helpful nutrients that energize the body. Moreover, they can be processed into a variety of other products. But from the study of the cultivation of bananas at present, it is found that the farmers still face the problems of lack of effective production planning. The problems are found in cultivating, harvesting, and delivering to customers. This causes the farmers to produce poor quality banana yield, sell at a low price, and lose their income. To solve this problem, therefore, a mixed-integer linear programming model was developed for planning all activities in the supply chain, including soil quality improvement planning, banana shoot ordering, and setting the interval time of fertilization and harvesting. In order to meet consistency and maximum total profit surplus. The results showed that the proposed mixed-integer linear programming model could be used as a decision support tool with a 10.52% increase in profit compared to manual planning.

Keywords: cultivated banana, production planning, supply chain management, mixed-integer linear programming

* Corresponding author. E-mail: fengckl@ku.ac.th

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University.

² Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University.

³ Assistant Professor in Large Scale Supply Chain Systems Engineering Research Unit, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University.

1. บทนำ

กล้วยน้ำว้า (Cultivated banana) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Musa sapientum* Linn. โดยเป็นกล้วยที่เกิดจากการผสมข้ามพันธุ์ของกล้วยป่า 2 ชนิด คือ *Musa acuminata* และ *Musa balbisiana* ซึ่งในประเทศไทยกล้วยน้ำว้า จัดเป็นกล้วยพื้นเมืองที่พบได้ทั่วไปในทุกภาค นิยมปลูกไว้ในทุกระยะเพื่อรับประทานผลและแปรรูปไปทำอาหารชนิดอื่นๆ ได้อย่างหลากหลาย รวมถึงการนำส่วนต่างๆ มาใช้ประโยชน์ [1]

จากการศึกษาระบบการผลิตกล้วยน้ำว้าในพื้นที่ตำบลกุยบุรี อำเภอกุยบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ จากกลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกกล้วยน้ำว้า พบว่าปัญหาในการเพาะปลูกกล้วยน้ำว้าประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ปัญหาคุณภาพดินที่เกษตรกรในพื้นที่ส่วนใหญ่ไม่ได้ให้ความสนใจ เพราะยังไม่ได้ตระหนักถึงการปรับปรุงคุณภาพดินก่อนการลงหน่อพันธุ์กล้วย ทำให้ผลผลิตที่ได้ไม่มีคุณภาพ น้ำหนักผลกล้วยน้อย และขายได้ในราคาต่ำ และปัญหาอีกส่วน คือ เกษตรกรยังขาดระบบการวางแผนการเพาะปลูกที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลผลิตตรงตามเวลาที่ราคาของกล้วยน้ำว้ามีมูลค่าสูงที่สุด ซึ่งปัญหาดังกล่าวเกิดจากการที่เกษตรกรที่เพาะปลูกกล้วยน้ำว้ายังไม่มียุทธศาสตร์การวางแผนการจัดการที่เหมาะสม จึงทำให้ผลผลิตที่ได้ไม่มีคุณภาพ และยังทำให้เกิดต้นทุนโดยรวมที่สูงขึ้นตามไปด้วย

ระบบการวางแผนโซ่อุปทานการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพ และมีประสิทธิผลจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว เนื่องจากทุกกระบวนการภายในองค์กร รวมถึงภายนอกองค์กรมีความเกี่ยวข้องเชื่อมโยง และมีผลกระทบซึ่งกันและกัน [2] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำระบบการวางแผนการจัดการโซ่อุปทานมาประยุกต์ใช้ โดยนำเสนอในรูปแบบของแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นตรงผสมจำนวนเต็ม (Mixed-integer linear programming model) เพื่อให้เกษตรกรสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการวางแผนระบบโซ่อุปทานการเพาะปลูกกล้วยน้ำว้าได้อย่างยั่งยืน ซึ่งแบบจำลองจะครอบคลุมตั้งแต่การปรับปรุงคุณภาพดินในพื้นที่การเพาะปลูก การเลือกซื้อหน่อพันธุ์กล้วยน้ำว้า การดูแลพื้นที่ปลูกกล้วยน้ำว้า ไปจนถึงการเก็บเกี่ยวกล้วยน้ำว้า ซึ่งมีสมการเป้าหมายของแบบจำลอง คือ เพื่อให้เกษตรกรมีกำไรในการปลูกกล้วยน้ำว้าเหมาะสมที่สุด (Maximize total profit surplus) โดยที่ผลลัพธ์ของแบบจำลองนั้นจะต้องไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพและความพึงพอใจของลูกค้า

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทุกวันนี้ระบบการวางแผนโซ่อุปทานการผลิต (Supply chain production planning system) มีความท้าทายอย่างมากในตลาดโลกที่มีการแข่งขันกันค่อนข้างสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสินค้าเกษตร (Agricultural products) [3] เนื่องจากระบบการผลิตแบบดั้งเดิมนั้นไม่สามารถตอบสนองกับอุปสงค์ที่มีความผันผวนและมีการดำเนินการที่มีความซับซ้อนได้ [4] นอกจากนี้การวางแผนโซ่อุปทานการผลิตของสินค้าเกษตรก็ยังคงได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่ช่วยให้เกษตรกรสามารถกำหนดกลยุทธ์และวางแผนการผลิตตลอดทั้งโซ่อุปทานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [5] ดังนั้นการทบทวนงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องอย่างครอบคลุมในส่วนนี้จึงถูกนำเสนอ เพื่อสร้างความเข้าใจถึงวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในระบบการวางแผนโซ่อุปทานการผลิตของสินค้าเกษตร ซึ่งปรากฏในงานวิจัยในต่างประเทศมากมาย ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Mula et al. [6] ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการทบทวนวรรณกรรมจำนวนทั้งสิ้น 127 ชิ้นที่เกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อช่วยในการวางแผนโซ่อุปทานการผลิตสินค้าเกษตร โดยมีวัตถุประสงค์หลักในการวิจัย คือ เพื่อเตรียมนักวิจัยที่สนใจจะเริ่มต้นศึกษาการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อช่วยในการแก้ปัญหาในระบบการวางแผนโซ่อุปทานการผลิตสินค้าเกษตร นอกจากนี้ Huang et al. [7] ได้อธิบายถึงระบบที่ใช้ในการวางแผนในแต่ละช่วงของโซ่อุปทานการผลิต ซึ่งประกอบด้วย โครงสร้างโซ่อุปทาน (Supply chain structure) ระดับการตัดสินใจ (Decision level) วิธีการประยุกต์ใช้แบบจำลองโซ่อุปทาน (Supply chain analytical modelling approach) และการแบ่งปันข้อมูล (Shared information)

สำหรับงานวิจัยที่มีการนำแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาในระบบการวางแผนการเพาะปลูก รวมถึงการเก็บเกี่ยวสินค้าทางการเกษตรประเภทต่างๆ นั้น มีอยู่ด้วยกันหลายงานวิจัย ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Sriramee and Routray [8] ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองเชิงเส้นตรงสำหรับโซ่อุปทานผลไม้ในประเทศไทยตั้งแต่เกษตรกรจนถึงผู้บริโภค เพื่อให้มีเส้นทางการขนส่งผลไม้ที่สั้นที่สุด Limpianchob [9,10] ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มสำหรับการวางแผนการเก็บเกี่ยวส้มเขียวหวานในภาคเหนือและมะพร้าว น้ำหอมส่งเข้าโรงงานผลิตก่อนส่งมอบให้ลูกค้า โดยได้รวมระบบการวางแผนการเก็บเกี่ยวและการผลิตไว้ในแบบจำลองเดียวกัน Kazancoglu et al. [11] ได้สร้าง

แบบจำลองโซ่อุปทานการผลิต รวมถึงขนส่งน้ำนมจากฟาร์มปศุสัตว์ไปยังโรงงานแปรรูปน้ำนมดิบ เพื่อลดความสูญเสียส่วนในงานวิจัยของ Soto-Silva et al. [12] ได้สร้างแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มในการวางแผนการขนส่งผลแอปเปิลสดจากสวนไปยังโรงงานผลิต ซึ่งแบบจำลองมีความคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Sanjay and Marcus [13] ที่ได้สร้างแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มในการวางแผนการตัดอ้อยเข้าโรงงานผลิตน้ำตาล เพื่อให้อ้อยมีค่าดัชนีความหวานมากที่สุด และ Hu et al. [14] สร้างแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มเพื่อใช้ในการวางแผนการปลูกและเก็บเกี่ยวข้าวสาลีจากไร่ไปที่โรงสีข้าว เป็นต้น

จากความสำเร็จของการนำแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มมาประยุกต์ใช้ในสินค้าทางการเกษตรดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มมาประยุกต์ใช้สำหรับระบบการวางแผนโซ่อุปทานการผลิตกล้วยน้ำว้า เพื่อให้การผลิตกล้วยน้ำว้ามีการวางแผนอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยสามารถนำแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มนี้ไปเป็นเครื่องมือช่วยในการตัดสินใจสำหรับเกษตรกรในการวางแผนการผลิตกล้วยน้ำว้าตลอดทั้งโซ่อุปทาน นอกจากนี้ยังเป็นเครื่องมือช่วยในการจัดตารางการทำงานในแต่ละกระบวนการ เพื่อให้มีกำไรจากการดำเนินการรวมเหมาะสมที่สุด

3. โครงสร้างโซ่อุปทานการผลิตกล้วยน้ำว้า

ผู้โครงสร้างโซ่อุปทานการผลิตกล้วยน้ำว้าจากกลุ่มเกษตรกรกรณีศึกษา ซึ่งจากการศึกษาโครงสร้างภายในโซ่อุปทานดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วย

1) เกษตรกรผู้ปลูกกล้วยน้ำว้าจะทำการสั่งซื้อหน่อพันธุ์กล้วย (Sho_j^t) จากผู้จำหน่ายทั้งในพื้นที่และนอกพื้นที่ตำบลกุยบุรี ซึ่งมีให้เลือกถึง 15 ราย โดยแต่ละรายจะมีราคาของหน่อพันธุ์และปริมาณการสั่งซื้อได้มากที่สุดแตกต่างกันไป เมื่อหน่อพันธุ์มาถึงแปลงปลูกเกษตรกรจะทำการแจกจ่ายหน่อพันธุ์ไปยังแปลงปลูกต่างๆ ซึ่งมีทั้งแปลงปลูกของเกษตรกรเองและแปลงปลูกของเกษตรกรในเครือข่าย

2) เกษตรกรจะทำการหว่านปุ๋ยเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินก่อนการลงหน่อกล้วย ซึ่งเกษตรกรจะสั่งซื้อปุ๋ยที่ใช้ในการปรับปรุงดินโดยเฉพาะ (QoF_{ik}^t) จากบริษัทผู้จำหน่ายโดยตรงที่มีอยู่ด้วยกัน 3 ราย เมื่อเกษตรกรได้รับปุ๋ยแล้ว เกษตรกรจะทำการหว่านปุ๋ยลงในแปลงปลูกและไถกลบจนครบทุกแปลงปลูก

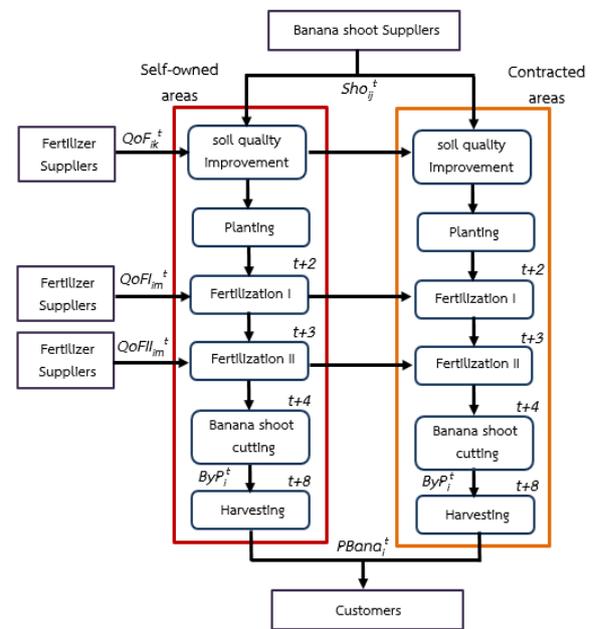
3) หลังจากนั้นเกษตรกรจะทำการลงหน่อพันธุ์กล้วยในแต่ละแปลงปลูก โดยชุดหลุมปลูกขนาด $50 \times 50 \times 50$ เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างหลุม 3×3 เมตร เพื่อช่วยในเรื่องของระบบรากของต้นกล้วยน้ำว้า

4) ในเดือนที่ 3 หลังจากเกษตรกรลงหน่อกล้วย เกษตรกรจะทำการหว่านปุ๋ยสูตร 15-15-15 (QoF_{im}^t) เพื่อบำรุงต้น ใบ และดอก โดยเกษตรกรจะสั่งซื้อปุ๋ยจากผู้ค้าปุ๋ยในตัวอำเภอ ซึ่งมีให้เลือกถึง 3 ร้านและในระหว่างนี้เกษตรกรจะทำการดูแล ให้น้ำ และกำจัดวัชพืชด้วย

5) ในเดือนที่ 4 หลังจากเกษตรกรลงหน่อกล้วย เกษตรกรจะทำการหว่านปุ๋ยสูตร 16-16-16 (QoF_{im}^t) เพื่อกระตุ้นการเจริญเติบโตของต้นกล้วยน้ำว้า

6) ในเดือนที่ 5 ต้นกล้วยน้ำว้าจะมีหน่อกล้วยส่วนเกินเกิดขึ้น เกษตรกรจำเป็นต้องตัดหน่อกล้วย (ByP_i^t) ส่วนเกินนี้ออก เพื่อไม่ให้แย่งอาหารและการเจริญเติบโตของต้นกล้วยน้ำว้า

7) หลังจากนั้นเกษตรกรจะปล่อยให้ต้นกล้วยน้ำว้าเจริญเติบโตต่อไป โดยในระหว่างนี้เกษตรกรจะทำการดูแล ให้น้ำ และกำจัดวัชพืช จนเมื่อครบ 9 เดือน ต้นกล้วยน้ำว้าจะเจริญเติบโตพร้อมเก็บเกี่ยว ($PBana_i^t$) เกษตรกรจะตัดเครือกล้วยน้ำว้าใส่ตะกร้ารอส่งขายให้กับลูกค้า



รูปที่ 1 โครงสร้างโซ่อุปทานการผลิตกล้วยน้ำว้า

4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model)

ในงานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลจริงจากกลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกกล้วยน้ำว้าในตำบลกุยบุรี อำเภอกุยบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์เป็นกรณีศึกษา โดยมีข้อสมมติ (Assumptions) ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

1) ทุกแปลงปลูกมีความพร้อมในการลงหน่อพันธุ์กล้วยน้ำว้าทุกช่วงเวลาตลอดช่วงในการเพาะปลูก

2) ต้นทุนค่าขนส่งหน่อพันธุ์กล้วย รวมถึงปัจจัยการผลิตอื่นๆ รวมอยู่ในราคาขายของผู้จำหน่ายแต่ละราย

3) สภาพภูมิอากาศ และศัตรูพืชไม่นำมาพิจารณาในการกำหนดค่าของตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในส่วนถัดไปจะกล่าวถึงกลุ่มของตัวแปร (Sets of Variables) ต่อจากนั้นจะเป็นข้อจำกัด (Constraints) และสมการเป้าหมาย (Objective Function) ตามลำดับ

4.1 ดัชนี (Indices and sets)

CT	กลุ่มเวลาที่ใช้สำหรับการเพาะปลูก (Cultivating periods)
I_B	กลุ่มแปลงปลูกของเกษตรกรเอง (Self-owned areas)
I_{BC}	กลุ่มแปลงปลูกของเกษตรกรในเครือข่าย (Contracted areas)
SFA	กลุ่มผู้จำหน่ายปุ๋ยปรับปรุงคุณภาพดิน
SFI	กลุ่มผู้จำหน่ายปุ๋ยสูตร 15-15-15 และสูตร 16-16-16
SUP	กลุ่มผู้จำหน่ายหน่อพันธุ์กล้วยน้ำว้า

4.2 ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables)

สำหรับการกำหนดตัวแปรตัดสินใจ เพื่อเป็นตัวแทนในการสั่งซื้อหน่อพันธุ์กล้วยน้ำว้าและปุ๋ยจากผู้ค้ารายต่างๆ ปริมาณการหว่านปุ๋ยที่เกษตรกรจะต้องหว่าน แรงงานที่ใช้ในกระบวนการ รวมไปถึงปริมาณกล้วยน้ำว้าที่ควรเก็บเกี่ยวในแต่ละช่วงเวลา $\forall t \in CT$ ดังนี้

ByP_i^t	ปริมาณหน่อกล้วยน้ำว้าที่ถูกตัด แล้วนำไปจำหน่าย จากแปลงปลูก i เมื่อเวลา t (กิโลกรัม)
Lab^t	จำนวนแรงงานทั้งหมดที่ต้องใช้ในการลงหน่อพันธุ์กล้วยน้ำว้าเมื่อเวลา t (คน)
$Lab1^t$	จำนวนแรงงานทั้งหมดที่ต้องใช้ในการหว่านปุ๋ยสูตร 15-15-15 เมื่อเวลา t (คน)
$Lab16^t$	จำนวนแรงงานทั้งหมดที่ต้องใช้ในการหว่านปุ๋ยสูตร 16-16-16 เมื่อเวลา t (คน)
$Lab111^t$	จำนวนแรงงานทั้งหมดที่ต้องใช้ในการตัดหน่อกล้วยน้ำว้าเมื่อเวลา t (คน)

$LabV^t$ จำนวนแรงงานทั้งหมดที่ต้องใช้ในการเก็บเกี่ยวกล้วยน้ำว้าเมื่อเวลา t (คน)

$PBana_i^t$ ปริมาณผลผลิตกล้วยน้ำว้าของแปลงปลูก i เมื่อเวลา t (กิโลกรัม)

QoF_{ik}^t ปริมาณปุ๋ยที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดินที่เกษตรกรหว่านในแปลงปลูก i โดยสั่งซื้อจากผู้จำหน่าย k เมื่อเวลา t (กิโลกรัม)

QoF_{lim}^t ปริมาณปุ๋ยสูตร 15-15-15 ที่หว่านในแปลงปลูก i โดยสั่งซื้อจากผู้จำหน่าย m เมื่อเวลา t (กิโลกรัม)

QoF_{16im}^t ปริมาณปุ๋ยสูตร 16-16-16 ที่หว่านในแปลงปลูก i โดยสั่งซื้อจากผู้จำหน่าย m เมื่อเวลา t (กิโลกรัม)

Sho_{ij}^t ปริมาณหน่อพันธุ์กล้วยน้ำว้าที่ปลูกในแปลงปลูก i โดยสั่งซื้อจากผู้จำหน่าย j เมื่อเวลา t (หน่อกล้วย)

นอกจากนี้คณะผู้วิจัยยังได้กำหนดตัวแปรตัดสินใจฐานสอง (Binary variables) ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ เพื่อกำหนดแปลงปลูกที่เกษตรกรจะต้องใช้ในการลงหน่อพันธุ์กล้วยน้ำว้าในแต่ละช่วงเวลาทั้งแปลงปลูกของเกษตรกรเอง และแปลงปลูกของเกษตรกรในเครือข่าย $\forall i \in I_B \cup I_{BC}$ และส่วนอีกตัวแปรหนึ่งกำหนดมาเพื่อให้เกษตรกรสามารถเลือกผู้จำหน่ายหน่อพันธุ์กล้วยน้ำว้าที่จะต้องสั่งซื้อในแต่ละช่วงเวลา ดังต่อไปนี้

$Ban_i^t = \begin{cases} 1, & \text{แปลงปลูก } i \text{ ถูกใช้ในการลงหน่อพันธุ์ใน} \\ & \text{ช่วงเวลา } t \\ 0, & \text{อื่นๆ} \end{cases}$
$SupS_j^t = \begin{cases} 1, & \text{เกษตรกรสั่งซื้อหน่อพันธุ์กล้วยน้ำว้าจาก} \\ & \text{ผู้จำหน่าย } j \text{ ในช่วงเวลา } t \\ 0, & \text{อื่นๆ} \end{cases}$

4.3 ข้อมูลค่าคงที่ (Parameters)

ในส่วนนี้ผู้วิจัยจะอธิบายการกำหนดค่าคงที่ต่างๆ เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ประกอบด้วยข้อมูลต่างๆ ดังนี้

$CapF_i$	ปริมาณปุ๋ยที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดินที่เกษตรกรสามารถหว่านได้มากที่สุดในแปลงปลูก i (กิโลกรัม/แปลง)
$CapF_{1i}$	ปริมาณปุ๋ยสูตร 15-15-15 ที่เกษตรกรสามารถหว่านได้มากที่สุดในแปลงปลูก i (กิโลกรัม/แปลง)
$CapF_{16i}$	ปริมาณปุ๋ยสูตร 16-16-16 ที่เกษตรกรสามารถหว่านได้มากที่สุดในแปลงปลูก i (กิโลกรัม/แปลง)
$CapFS_k$	ปริมาณการสั่งซื้อปุ๋ยปรับปรุงคุณภาพดินที่เกษตรกรสามารถสั่งซื้อได้มากที่สุดจากผู้จำหน่าย k (กิโลกรัม)

- $CapFSI_m$ ปริมาณการสั่งซื้อปุ๋ยสูตร 15-15-15 ที่เกษตรกรสามารถสั่งซื้อได้มากที่สุดจากผู้จำหน่าย m (กิโลกรัม)
- $CapFSII_m$ ปริมาณการสั่งซื้อปุ๋ยสูตร 16-16-16 ที่เกษตรกรสามารถสั่งซื้อได้มากที่สุดจากผู้จำหน่าย m (กิโลกรัม)
- $CapP$ ปริมาณหน่อกล้วยที่เกษตรกรต้องตัดทิ้ง (กิโลกรัม)
- $CapS_j$ ปริมาณการสั่งซื้อหน่อพันธุ์กล้วยน้ำว้าที่เกษตรกรสามารถสั่งซื้อได้มากที่สุดจากผู้จำหน่าย j (หน่อกล้วย)
- $CapSH_i$ ปริมาณหน่อพันธุ์กล้วยน้ำว้าที่เกษตรกรสามารถปลูกได้มากที่สุดในแต่ละแปลงปลูก i (หน่อกล้วย)
- CoF_k ต้นทุนค่าปุ๋ยที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินที่เกษตรกรสั่งซื้อจากผู้จำหน่าย k (บาท/กิโลกรัม)
- $CoFI_m$ ต้นทุนค่าปุ๋ยที่สูตร 15-15-15 ที่เกษตรกรสั่งซื้อจากผู้จำหน่าย m (บาท/กิโลกรัม)
- $CoFII_m$ ต้นทุนค่าปุ๋ยที่สูตร 16-16-16 ที่เกษตรกรสั่งซื้อจากผู้จำหน่าย m (บาท/กิโลกรัม)
- CoL ต้นทุนค่าจ้างแรงงานในการลงหน่อกล้วยน้ำว้า (บาท/คน)
- $CoLI$ ต้นทุนค่าจ้างแรงงานในการหว่านปุ๋ยสูตร 15-15-15 (บาท/คน)
- $CoLII$ ต้นทุนค่าจ้างแรงงานในการหว่านปุ๋ยสูตร 16-16-16 (บาท/คน)
- $CoLIII$ ต้นทุนค่าจ้างแรงงานในการตัดหน่อกล้วยน้ำว้า (บาท/คน)
- $CoLIV$ ต้นทุนค่าจ้างแรงงานในการตัดกล้วยน้ำว้าส่งขาย (บาท/คน)
- CoP_i ต้นทุนในการจัดการเพาะปลูกในแปลงปลูก i (บาท/แปลง)
- CoS_j ต้นทุนค่าหน่อกล้วยน้ำว้าที่เกษตรกรสั่งซื้อจากผู้จำหน่าย j (บาท/หน่อ)
- RoB_i อัตราการจ้างแรงงานที่ต้องใช้ในการตัดหน่อกล้วยน้ำว้าในแปลงปลูก i
- RoG อัตราการเจริญเติบโตของกล้วยน้ำว้าต่อหน่อกล้วย 1 หน่อ
- RoL_i อัตราการจ้างแรงงานที่ต้องใช้ในการลงหน่อกล้วยน้ำว้าในแปลงปลูก i
- $RoLI_i$ อัตราการจ้างแรงงานที่ต้องใช้ในการหว่านปุ๋ยสูตร 15-15-15 ในแปลงปลูก i
- $RoLII_i$ อัตราการจ้างแรงงานที่ต้องใช้ในการหว่านปุ๋ยสูตร 16-16-16 ในแปลงปลูก i

- RoP_i อัตราการจ้างแรงงานที่ต้องใช้ในการเก็บเกี่ยวกล้วยน้ำว้าในแปลงปลูก i
- RvB^t ราคาขายหน่อกล้วยน้ำว้าในช่วงเวลา t (บาท/กิโลกรัม)
- RvP^t ราคาขายกล้วยน้ำว้าในช่วงเวลา t (บาท/กิโลกรัม)

4.4 ข้อจำกัด (Constraints)

ข้อจำกัดหรือข้อกำหนดสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในระบบการวางแผนโซ่อุปทานการผลิตกล้วยน้ำว้าให้สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสร้างผลกำไรที่เหมาะสมที่สุดให้กับเกษตรกรผู้ปลูกกล้วยน้ำว้า ประกอบด้วย

ในส่วนแรก คณะผู้วิจัยจะอธิบายถึงข้อจำกัดที่เกิดขึ้นในการเลือกใช้แปลงปลูกลงหน่อพันธุ์กล้วยน้ำว้าทั้งแปลงปลูกของเกษตรกรเองและแปลงปลูกของเกษตรกรในเครือข่าย ดังแสดงในข้อจำกัด (1) และ (2)

$$\sum_{i \in CT} Ban_i^t = 1; \forall i \in I_B \quad (1)$$

และ

$$\sum_{i \in CT} Ban_i^t \leq 1; \forall i \in I_{BC} \quad (2)$$

ข้อจำกัด (1) เป็นข้อจำกัดที่กำหนดให้เกษตรกรจะต้องทำการลงหน่อพันธุ์กล้วยน้ำว้าในแปลงปลูกของเกษตรกรเองก่อนเป็นลำดับแรก ส่วนข้อจำกัด (2) นั้นเป็นการระบุว่าหากแปลงปลูกของเกษตรกรไม่เพียงพอในการลงหน่อพันธุ์กล้วยน้ำว้า เกษตรกรสามารถใช้แปลงปลูกของเกษตรกรในเครือข่ายลงหน่อพันธุ์กล้วยน้ำว้าได้ตลอดช่วงระยะเวลาในการเพาะปลูก เพื่อให้มีผลผลิตกล้วยน้ำว้าเพียงพอต่อความต้องการของลูกค้า

ในส่วนถัดไปจะเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในการผลิตกล้วยน้ำว้า โดยเริ่มตั้งแต่เมื่อเกษตรกรเลือกแปลงที่จะลงหน่อพันธุ์กล้วยน้ำว้าแล้ว จะต้องมีการปรับปรุงคุณภาพดินก่อนเสมอ ซึ่งเกษตรกรจะสั่งซื้อปุ๋ยจากผู้จำหน่ายปุ๋ยปรับปรุงคุณภาพดินโดยเฉพาะ โดยการกำหนดปริมาณปุ๋ยที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน รวมถึงการเลือกซื้อปุ๋ยจากผู้จำหน่าย ดังแสดงในข้อจำกัด (3) และ (4)

$$\sum_{k \in SFA} QoF_{ik}^t = CapF_i \cdot Ban_i^t; \quad \forall i \in I_B \cup I_{BC}, \forall t \in CT \quad (3)$$

และ

$$\sum_{i \in I_B \cup I_{BC}} QoF_{ik}^t \leq CapFS_k; \quad \forall k \in SFA, \forall t \in CT \quad (4)$$

ในข้อจำกัด (5) และ (6) เป็นการกำหนดปริมาณหน่วย พันธุ์กล้วยน้ำว่าทั้งหมดที่เกษตรกรจะต้องซื้อจากผู้จำหน่าย หน่วยพันธุ์ในแต่ละช่วงเวลา และจะต้องสั่งซื้อไม่เกินปริมาณ หน่วยพันธุ์ที่ผู้จำหน่ายแต่ละรายสามารถสั่งซื้อได้ หาก ปริมาณหน่วยพันธุ์จากผู้จำหน่าย j ไม่เพียงพอ เกษตรกร สามารถสั่งซื้อได้จากผู้จำหน่ายรายอื่นได้จนกว่าจะได้ปริมาณ ที่เพียงพอในการลงหน่วยพันธุ์กล้วยในแต่ละช่วงเวลา

$$\sum_{i \in I_B \cup I_{BC}} Sho_{ij}^t \leq CapS_j \cdot SupS_j^t; \quad \forall j \in SUP, \forall t \in CT \quad (5)$$

และ

$$\sum_{j \in SUP} Sho_{ij}^t \leq CapSH_i \cdot Ban_i^t; \quad \forall i \in I_B \cup I_{BC}, \forall t \in CT \quad (6)$$

จำนวนแรงงานที่เกษตรกรต้องจ้าง เพื่อลงหน่วยพันธุ์ กล้วยในแต่ละช่วงเวลา แสดงในข้อจำกัด (7)

$$Lab^t = \sum_{i \in I_B \cup I_{BC}} (RoL_i \cdot Ban_i^t); \quad \forall t \in CT \quad (7)$$

เมื่อผ่านไป 2 เดือนหลังจากที่เกษตรกรลงหน่วยพันธุ์ กล้วยแล้ว เกษตรกรจะต้องหว่านปุ๋ยสูตร 15-15-15 เพื่อ บำรุงต้น ใบ และดอก โดยปริมาณปุ๋ยที่เกษตรกรต้องหว่าน ในแต่ละแปลงปลูก รวมถึงการเลือกซื้อปุ๋ยจากผู้จำหน่าย แสดงในข้อจำกัด (8) และ (9)

$$\sum_{m \in SFI} QoFI_{im}^{t+2} = CapFI_i \cdot Ban_i^t; \quad \forall i \in I_B \cup I_{BC}, \forall t \in CT \quad (8)$$

และ

$$\sum_{i \in I_B \cup I_{BC}} QoFI_{im}^t \leq CapFSI_m; \quad \forall m \in SFI, \forall t \in CT \quad (9)$$

จำนวนแรงงานที่เกษตรกรต้องจ้าง เพื่อหว่านปุ๋ยใน แต่ละช่วงเวลา แสดงในข้อจำกัด (10)

$$LabI^t = \sum_{i \in I_B \cup I_{BC}} (RoLI_i \cdot Ban_i^t); \quad \forall t \in CT \quad (10)$$

หลังจากเกษตรกรหว่านปุ๋ยสูตร 15-15-15 ในเดือนที่ 3 ไปแล้วนั้น เมื่อครบเดือนที่ 4 หลังจากลงหน่วยพันธุ์กล้วย น้ำว่า เกษตรกรจะต้องหว่านปุ๋ยสูตร 16-16-16 เพื่อกระตุ้น การเจริญเติบโตของต้นกล้วยให้มีความสมบูรณ์พร้อมออกผล โดยในข้อจำกัด (11) และ (12) เป็นระบุปริมาณปุ๋ยที่ เกษตรกรจะต้องหว่านในแต่ละแปลงปลูก เพื่อสร้างความ มั่นใจว่าปริมาณปุ๋ยที่เกษตรกรหว่านนั่นจะไม่เกินความ

ต้องการของต้นกล้วยน้ำว่า ส่วนข้อจำกัด (13) แสดงจำนวน แรงงานที่ใช้ในการหว่านปุ๋ยในแต่ละช่วงเวลา

$$\sum_{m \in SFI} QoFII_{im}^{t+3} = CapFII_i \cdot Ban_i^t; \quad \forall i \in I_B \cup I_{BC}, \forall t \in CT \quad (11)$$

$$\sum_{i \in I_B \cup I_{BC}} QoFII_{im}^t \leq CapFSII_m; \quad \forall m \in SFI, \forall t \in CT \quad (12)$$

และ

$$LabII^t = \sum_{i \in I_B \cup I_{BC}} (RoLII_i \cdot Ban_i^t); \quad \forall t \in CT \quad (13)$$

เมื่อต้นกล้วยมีอายุ 5 เดือนหลังจากลงหน่วยกล้วยแล้ว ต้นกล้วยน้ำว่าจะมีหน่วยกล้วยส่วนเกินเกิดขึ้น เกษตรกร จำเป็นต้องตัดหน่วยกล้วยนี้ออก แต่หน่วยกล้วยที่ตัดออก (ByP_i^t) นี้เกษตรกรสามารถนำไปจำหน่ายเป็นรายได้อีกทาง หนึ่ง โดยข้อจำกัด (14) และ (15) เป็นการระบุอัตราการตัด หน่วยกล้วยส่วนเกิน รวมถึงจำนวนแรงงานที่ต้องใช้ในการตัด หน่วยกล้วย ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$ByP_i^{t+4} = \sum_{j \in SUP} (CapP \cdot Sho_{ij}^t); \quad \forall i \in I_B \cup I_{BC}, \forall t \in CT \quad (14)$$

และ

$$LabIII^t = \sum_{i \in I_B \cup I_{BC}} (RoBI_i \cdot Ban_i^t); \quad \forall t \in CT \quad (15)$$

หลังจากที่เกษตรกรลงหน่วยพันธุ์กล้วยไปแล้ว 9 เดือน กล้วยน้ำว่าก็พร้อมจะเก็บเกี่ยวส่งขายให้กับลูกค้า แสดงใน ข้อจำกัด (16)

$$\sum_{j \in SUP} RoG \cdot Sho_{ij}^t = PBand_t^{t+8}; \quad \forall i \in I_B \cup I_{BC}, \forall t \in CT \quad (16)$$

สุดท้ายเป็นจำนวนแรงงานที่เกษตรกรต้องจ้างใน การเก็บเกี่ยวกล้วยน้ำว่า ซึ่งแสดงในข้อจำกัด (17)

$$LabIV^t = \sum_{i \in I_B \cup I_{BC}} (RoPI_i \cdot Ban_i^t); \quad \forall t \in CT \quad (17)$$

$$\begin{aligned} & Ban_i^t, SupS_j^t \in \{0,1\}; \forall i, \forall j, \forall t \\ & ByP_i^t, PBand_t, QoF_{ik}^t \geq 0; \forall i, \forall k, \forall t \\ & QoFI_{im}^t, QoFII_{im}^t \geq 0; \forall i, \forall m, \forall t \\ & Lab^t, LabI^t \geq 0 \text{ and integer}; \forall t \\ & LabII^t, LabIII^t \geq 0 \text{ and integer}; \forall t \\ & LabIV^t, Sho_{ij}^t \geq 0 \text{ and integer}; \forall i, \forall j, \forall t \end{aligned}$$

4.5 สมการเป้าหมาย (Objective functions)

ในงานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยได้ตั้งสมการเป้าหมายสำหรับเกษตรกรใช้เป็นระบบการวางแผนโซ่อุปทานการผลิตกล้วยน้ำว้า คือ เพื่อให้มีกำไรในการปลูกกล้วยน้ำว้าเหมาะสมที่สุด (Maximize total profit surplus) ตั้งแต่การวางแผนการจัดหาหน่อพันธุ์กล้วย การเลือกใช้แปลงปลูก การเลือกซื้อปุ๋ย รวมไปถึงการเก็บเกี่ยวกล้วยน้ำว้าให้มีรายได้จากการขายเหมาะสมที่สุด ซึ่งต้องไม่กระทบต่อความพึงพอใจของลูกค้าโดยสมการเป้าหมายประกอบด้วย

$$Max z = \text{Total revenue} - \text{Total cost} \quad (18)$$

จากสมการเป้าหมายกำหนดให้ Total revenue คือ รายได้รวมทั้งหมดจากการขายกล้วยน้ำว้า ($PBana_i^t$) และหน่อกล้วยน้ำว้า (ByP_i^t) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Total revenue} &= \sum_{i \in I_B \cup I_{BC}} \sum_{t \in CT} (RvP^t \cdot PBand_i^t) \\ &+ \sum_{i \in I_B \cup I_{BC}} \sum_{t \in CT} (RvB^t \cdot ByP_i^t) \end{aligned}$$

ในส่วนของเทอมที่สองนั้น กำหนดให้ Total cost คือ ต้นทุนรวมทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการปลูกกล้วยน้ำว้า ซึ่งประกอบด้วยต้นทุน 4 ประเภท คือ ต้นทุนในการดำเนินการเพาะปลูก (c^{Ope}) ต้นทุนในการสั่งซื้อหน่อพันธุ์กล้วยน้ำว้า (c^{Sho}) ต้นทุนค่าปุ๋ยที่ใช้ในกระบวนการ (c^{Fer}) และต้นทุนค่าแรงงาน (c^{Lab}) ดังนี้

$$\text{Total cost} = c^{Ope} + c^{Sho} + c^{Fer} + c^{Lab}$$

ต้นทุนในการดำเนินการเพาะปลูก (c^{Ope})

เป็นต้นทุนที่เกิดขึ้นเมื่อเกษตรกรมีการเลือกใช้แปลงปลูกในการลงหน่อกล้วยน้ำว้าตลอดช่วงเวลาในการเพาะปลูก ประกอบด้วย ต้นทุนการเตรียมดิน การดูแลและบำรุงรักษา และค่าใช้จ่ายที่จำเป็นอื่นๆ เป็นต้น โดยต้นทุนจะแตกต่างกันไปในแต่ละแปลง และระหว่างแปลงของเกษตรกรเองหรือแปลงของเกษตรกรในเครือข่าย ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$\begin{aligned} c^{Ope} &= \sum_{i \in I_B} \sum_{t \in CT} (CoP_i \cdot Ban_i^t) \\ &+ \sum_{i \in I_{BC}} \sum_{t \in CT} (CoP_i \cdot Ban_i^t) \end{aligned}$$

ต้นทุนในการสั่งซื้อหน่อพันธุ์กล้วยน้ำว้า (c^{Sho})

เป็นต้นทุนที่เกิดขึ้นเมื่อเกษตรกรมีการสั่งซื้อหน่อพันธุ์กล้วยน้ำว้าจากผู้จำหน่ายหน่อพันธุ์ตลอดช่วงเวลาในการเพาะปลูก ดังนี้

$$c^{Sho} = \sum_{i \in I_B \cup I_{BC}} \sum_{j \in SUP} \sum_{t \in CT} (CoS_j \cdot Sho_{ij}^t)$$

ต้นทุนค่าปุ๋ยที่ใช้ในกระบวนการ (c^{Fer})

เป็นต้นทุนค่าปุ๋ยทั้งหมดที่เกิดขึ้นตลอดช่วงการเพาะปลูก ซึ่งในการปลูกกล้วยน้ำว้าเกษตรกรจะหว่านปุ๋ยทั้งหมด 3 ครั้ง โดยเริ่มตั้งแต่การหว่านปุ๋ยเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินก่อนการลงหน่อพันธุ์กล้วย จนไปถึงการหว่านปุ๋ยเพื่อบำรุงต้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$\begin{aligned} c^{Fer} &= \sum_{i \in I_B \cup I_{BC}} \sum_{k \in SFA} \sum_{t \in CT} (CoF_k \cdot QoF_{ik}^t) \\ &+ \sum_{i \in I_B \cup I_{BC}} \sum_{m \in SFI} \sum_{t \in CT} (CoFI_m \cdot QoFI_{im}^t) \\ &+ \sum_{i \in I_B \cup I_{BC}} \sum_{m \in SFI} \sum_{t \in CT} (CoFH_m \cdot QoFH_{im}^t) \end{aligned}$$

ต้นทุนค่าแรงงาน (c^{Lab})

เป็นต้นทุนค่าจ้างแรงงานที่เกษตรกรจะต้องว่าจ้างตลอดช่วงการเพาะปลูก ดังนี้

$$\begin{aligned} c^{Lab} &= \sum_{t \in CT} (CoL \cdot Lab^t) \\ &+ \sum_{t \in CT} (CoLI \cdot LabI^t) + \sum_{t \in CT} (CoLII \cdot LabII^t) \\ &+ \sum_{t \in CT} (CoLIII \cdot LabIII^t) \\ &+ \sum_{t \in CT} (CoLIV \cdot LabIV^t) \end{aligned}$$

5. ผลลัพธ์การคำนวณ (Numerical results)

จากแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มในหัวข้อที่ผ่านมา นั้น คณะผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม CPLEX Solver โดยใช้ภาษา GAMS Studio (Version 27.3.0) ในการเขียนแบบจำลองระบบการวางแผนโซ่อุปทานการผลิตกล้วยน้ำว้า เพื่อใช้ในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด สำหรับข้อมูลขนาดของปัญหา (The size of the test problem) แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดของปัญหา

ขนาดของปัญหา	
1) กลุ่มเวลาที่ใช้สำหรับการเพาะปลูก	12 เดือน
2) กลุ่มแปลงปลูกของเกษตรกรเอง	123 แปลง
3) กลุ่มแปลงปลูกเกษตรกรในเครือข่าย	106 แปลง
4) กลุ่มผู้จำหน่ายปุ๋ยปรับปรุงคุณภาพดิน	3 ราย
5) กลุ่มผู้จำหน่ายปุ๋ยสูตร 15-15-15 และสูตร 16-16-16	3 ราย
6) กลุ่มผู้จำหน่ายหน่อพันธุ์กล้วยน้ำว้า	15 ราย

5.1 ผลลัพธ์จากกรณีศึกษา (Basic case study result)

ในส่วนนี้คณะผู้วิจัยจะนำเสนอผลลัพธ์ที่ได้จากข้อมูลจริงของกลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกกล้วยน้ำว้ากรณีศึกษาในจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ซึ่งผลลัพธ์ของแบบจำลองเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มเพื่อใช้สำหรับระบบการวางแผนการผลิตตั้งแต่การปรับปรุงคุณภาพดินในพื้นที่การเพาะปลูก การเลือกซื้อหน่อพันธุ์กล้วยน้ำว้า การเลือกพื้นที่ปลูกกล้วยน้ำว้า ไปจนถึงการเก็บเกี่ยวกล้วยน้ำว้า โดยจะต้องสามารถตอบสนองต่ออุปสงค์ของลูกค้าให้เป็นที่พึงพอใจได้ ซึ่งผลลัพธ์ของแบบจำลองนั้นแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลลัพธ์การคำนวณ

ผลลัพธ์การคำนวณ	
1) ผลกำไรสุทธิรวม	34,046 บาท
2) จำนวนตัวแปรทั้งหมด	3,938
2.1) ตัวแปรตัดสินใจฐานสอง (Binary variables)	641
2.2) ตัวแปรจำนวนเต็ม (Integer variables)	2,240
2.3) ตัวแปรอื่นๆ (Linear variables)	1,057
3) จำนวนข้อจำกัด (Constraints)	1,198
4) เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (วินาที)	126.32
5) ค่าความเผื่อ (Gap tolerance)	0.1 %

จากตารางที่ 2 ผลลัพธ์ของแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มเพื่อใช้สำหรับระบบการวางแผนใช้อุทยานการผลิตกล้วยน้ำว้า ตั้งแต่การวางแผนการจัดหาหน่อพันธุ์กล้วย การเลือกใช้แปลงปลูก การเลือกซื้อปุ๋ย รวมไปถึงการเก็บเกี่ยวกล้วยน้ำว้าให้มีรายได้จากการขายเหมาะสมที่สุด โดยสามารถตอบสนองต่ออุปสงค์ของลูกค้าให้เป็นที่พึงพอใจได้ ซึ่งผลกำไรสุทธิของการดำเนินการที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 34,046 บาท มีค่าความเผื่อ (Gap Tolerance) อยู่ที่ 0.1% และใช้เวลาในการคำนวณเพียง 126.32 วินาที แสดงให้เห็นถึงคุณภาพของผลลัพธ์จำนวนเต็มที่ได้จากการคำนวณสูงมาก ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์กำไรสุทธิการดำเนินการทั้งหมดจากการคำนวณของแบบจำลองที่คณะผู้วิจัยสร้างขึ้นกับกำไรจากการดำเนินการก่อนการใช้แบบจำลอง (Manual Planning) ซึ่งมีกำไรสุทธิอยู่ที่ 30,822 บาท จากผลลัพธ์ของแบบจำลองสามารถเพิ่มผลกำไรสุทธิจากการดำเนินการรวมได้ถึง 3,242 บาท หรือสามารถเพิ่มผลกำไรสุทธิได้ถึงร้อยละ 10.52 ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยผลลัพธ์ของคำตอบสามารถวางแผนระบบการผลิตกล้วยน้ำว้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถเลือกซื้อ

ปัจจัยการผลิตได้อย่างเหมาะสม โดยสามารถตอบสนองอุปสงค์ของลูกค้าให้เป็นที่พึงพอใจได้

5.2 การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity analysis)

สำหรับการตรวจสอบผลกระทบของค่าคงที่ต่างๆ (Parameters) ต่อแบบจำลองในกรณีศึกษา คณะผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ความไว โดยพิจารณาความแปรผันต่างๆ ของแบบจำลองในขอบเขตของค่าคงที่ที่กำหนด [15]

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความไว

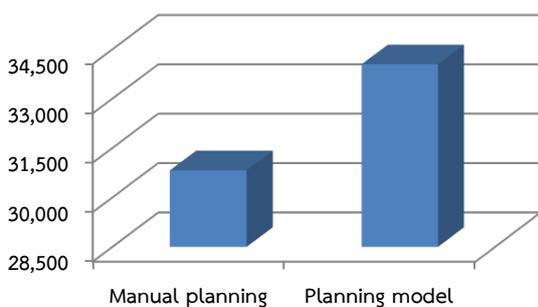
เปอร์เซ็นต์เปลี่ยนแปลง	ต้นทุนในการดำเนินการเพาะปลูก	
	ผลกำไรสุทธิ	เปลี่ยนแปลง (%)
10	30,535.52	10.311
20	27,977.64	17.824
30	25,798.02	24.226
40	23,305.17	31.548
50	20,282.56	40.426
เปอร์เซ็นต์เปลี่ยนแปลง	ต้นทุนในการสั่งซื้อหน่อพันธุ์กล้วยน้ำว้า	
	ผลกำไรสุทธิ	เปลี่ยนแปลง (%)
10	33,584.68	1.355
20	33,123.02	2.711
30	32,661.68	4.066
40	32,190.49	5.450
50	31,738.70	6.777
เปอร์เซ็นต์เปลี่ยนแปลง	ต้นทุนค่าปุ๋ยที่ใช้ในกระบวนการ	
	ผลกำไรสุทธิ	เปลี่ยนแปลง (%)
10	28,041.99	17.635
20	23,780.45	30.152
30	19,518.91	42.669
40	15,257.03	55.187
50	10,995.50	67.704
เปอร์เซ็นต์เปลี่ยนแปลง	ต้นทุนค่าแรงงาน	
	ผลกำไรสุทธิ	เปลี่ยนแปลง (%)
10	32,202.07	5.416
20	30,738.43	9.715
30	28,934.33	15.014
40	27,470.70	19.313
50	25,666.94	24.611

การวิเคราะห์ความไวเพื่อดูเงื่อนไขความเปลี่ยนแปลงของต้นทุนที่มีต่อผลกำไรรวมสุทธิ ซึ่งต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับระบบการวางแผนการผลิตกล้วยน้ำว้าประกอบด้วยต้นทุน 4 ประเภท คือ ต้นทุนในการดำเนินการเพาะปลูก ต้นทุนใน

การสั่งซื้อหน่วยพันธุ์กล้วยน้ำว้า ต้นทุนค่าปุ๋ยที่ใช้ในกระบวนการ และต้นทุนค่าแรงงาน โดยคณะผู้วิจัยจะเพิ่มต้นทุนแต่ละประเภทครั้งละ 10% จนถึง 50% [16] โดยผลลัพธ์ของผลกำไรรวมสุทธิ และเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของผลกำไรรวมแสดงในตารางที่ 3

จากตารางที่ 3 พบว่าเมื่อต้นทุนค่าปุ๋ยที่ใช้ในกระบวนการเพิ่มขึ้น 10% จะส่งผลให้ผลกำไรเปลี่ยนแปลงถึง 17.635% ในขณะที่หากเพิ่มต้นทุนในการซื้อหน่วยพันธุ์กล้วยน้ำว้า 10% จะส่งผลให้ผลกำไรเปลี่ยนแปลงเพียง 1.355% เนื่องจากต้นทุนค่าปุ๋ยมีการซื้อตามช่วงเวลาที่ใช้ต่างกัน และมีการใช้ปุ๋ยถึงสามช่วงในรอบฤดูกาลปลูก จึงส่งผลต่อความไวต่อการเปลี่ยนแปลงผลกำไรมากกว่าต้นทุนอื่นๆ ดังนั้นต้นทุนค่าปุ๋ยที่ใช้ในกระบวนการเป็นต้นทุนที่มีความสำคัญต่อโครงสร้างผลกำไรรวมสุทธิทั้งหมดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่คณะผู้วิจัยสร้างขึ้น

ในขณะที่ต้นทุนในการซื้อหน่วยพันธุ์กล้วยน้ำว้าเกษตรกรสามารถใช้หน่วยพันธุ์จากการปลูกรอบแรกมาใช้เป็นหน่วยพันธุ์ในรอบการปลูกถัดไปได้ ซึ่งจะทำให้เกษตรกรสามารถลดต้นทุนการซื้อหน่วยพันธุ์กล้วยลงได้ จึงทำให้ต้นทุนในการซื้อหน่วยพันธุ์กล้วยความไวมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดหากต้นทุนประเภทนี้มีต้นทุนเพิ่มขึ้น ดังนั้นหากเกษตรกรมีระบบการวางแผนการผลิตกล้วยน้ำว้าที่มีประสิทธิภาพจะสามารถช่วยลดต้นทุน และเพิ่มผลกำไรให้กับเกษตรกรได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 2 เปรียบเทียบผลลัพธ์ผลกำไรรวมสุทธิทั้งหมดก่อนและหลังการใช้แบบจำลอง

6. สรุป

ในงานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบการวางแผนโซ่อุปทานการผลิตกล้วยน้ำว้าของกลุ่มเกษตรกรกรณีศึกษาในพื้นที่ตำบลกุยบุรี อำเภอกุยบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ซึ่งจากการเก็บรวบรวมข้อมูลพบว่าเกษตรกรประสบปัญหาอยู่ 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ปัญหา

คุณภาพดินที่เกษตรกรในพื้นที่ส่วนใหญ่ไม่ได้ให้ความสนใจทำให้ผลผลิตที่ได้ไม่มีคุณภาพ น้ำหนักผลกล้วยน้อย และขายได้ในราคาต่ำ และปัญหากระบวนการวางแผนการเพาะปลูกที่เหมาะสมเพื่อให้เกษตรกรสามารถขายผลผลิตได้ในเวลาที่ราคากล้วยน้ำว้ามีมูลค่าสูงสุด

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มมาใช้สำหรับระบบการวางแผนโซ่อุปทานการผลิตกล้วยน้ำว้า ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์มาจากข้อมูลจริงของเกษตรกร โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่คณะผู้วิจัยได้สร้างขึ้นนั้นเป็นไปตามข้อจำกัดต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการปลูกกล้วยน้ำว้า เพื่อให้สามารถทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองและสามารถนำแบบจำลองไปใช้ได้จริง ซึ่งโปรแกรม CPLEX Solver โดยใช้ภาษา GAMS Studio (Version 27.3.0) ถูกนำมาใช้ในการหาผลลัพธ์ของแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด โดยผลลัพธ์มีค่าความเผื่อจากค่าที่เหมาะสมที่สุดเพียง 0.1% เท่านั้น และสามารถออกแบบระบบการวางแผนโซ่อุปทานการผลิตกล้วยน้ำว้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีผลกำไรสุทธิรวมมากกว่าก่อนการใช้แบบจำลองถึงร้อยละ 10.52

นอกจากนี้เพื่อให้ระบบการวางแผนโซ่อุปทานการผลิตกล้วยน้ำว้าสามารถครอบคลุมการตัดสินใจและตรงกับสถานการณ์ปัจจุบันมากยิ่งขึ้น สำหรับงานวิจัยในอนาคตที่คณะผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาต่อ คือ การวางแผนการผลิตหลังการเก็บเกี่ยว (Post-harvest planning) โดยศึกษาระบบตั้งแต่หลังจากการเก็บเกี่ยวกล้วยน้ำว้าในแต่ละพื้นที่ ขนส่งไปยังศูนย์รวบรวมผลผลิตของหมู่บ้าน จนถึงขนส่งไปยังศูนย์รับซื้อผลไม้ในตัวจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ เนื่องจากการขนส่งจากแปลงปลูกจนถึงศูนย์รับซื้อมีรูปแบบยานพาหนะในการขนส่งอยู่หลายรูปแบบที่สามารถใช้ได้ เช่น รถสามล้อ รถกระบะ รถกระบะแบบมีที่กั้นด้านข้าง และรถบรรทุกเล็ก เป็นต้น

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกลุ่มเกษตรกรพื้นบ้านกลุ่มเพาะปลูกกล้วยน้ำว้าในพื้นที่ตำบลกุยบุรี อำเภอกุยบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ สำหรับสถานที่เก็บข้อมูลเพื่อนำมาใช้งานวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] ธวัชชัย ศรีภักดี, กล้วยน้ำว้า สรรพคุณ และ การปลูกกล้วยน้ำว้า, กรุงเทพมหานคร: อักษรโสภณ, 2557.
- [2] B. M. Beamon, "Supply chain design and analysis: models and methods," *International*

- Journal of Production Economics.*, vol. 55, pp. 281-294, 1998.
- [3] S. S. Erenguc, N. C. Simpson and A. J. Vakharia, "Integrated production/ distribution planning in supply chains: An invited review," *European Journal of Operational Research.*, vol. 115, pp. 219-236, 1999.
- [4] N. K. Tsolakis, C. A. Keramydas, A. K. Toka, D. A. Aidonis and E. T. Lakovou, "Agi-food supply chain management: a comprehensive hierarchical decision-making framework and critical taxonomy," *Biosystems Engineering.*, vol. 120, no. 1, pp. 46-64, 2014.
- [5] O. Ahumad and J. R. Villalobos, "Application of planning models in the agri-food supply chain: a review," *European Journal of Operational Research.*, vol. 195, no. 1, pp. 1-20, 2009.
- [6] J. Mula, D. Peodro, M. Diaz-Madronero and E. Vicens, "Mathematical programming models for supply chain production and transport planning," *European Journal of Operational Research.*, vol. 204, pp. 377-390, 2010.
- [7] G. O. Huang, J. S. K. Lau and K. L. Mak, "The impacts of sharing production information on supply chain dynamics: a review of the literature," *International Journal of Production Research.*, vol. 41, pp. 1483-1517, 2003.
- [8] Y. Srimanee and J. K. Routray, "The fruit and vegetable marketing chains in Thailand: policy impacts and implications," *International Journal of Retail & Distribution Management.*, vol. 40, pp. 656-675, 2012.
- [9] C. Limpianchob, "A mixed integer linear programming model for optimal production planning in tangerine supply chain," *Kasetsart Journal (Natural Science).*, vol.49, pp. 1001-1011, 2015.
- [10] C. Limpianchob, "Integrated of harvesting and production planning in aromatic coconut supply chain using mixed-integer linear programming," *International Journal of Operational Research.*, vol.30, No.3, pp. 360-374, 2017.
- [11] Y. Kazancoglu, D. O. Yesim and M. Ozbiltekin, "Minimizing losses in milk supply chain with sustainability: an example from emerging economy," *Resources, Conservation and Recycling.*, vol. 139, no. 3, pp. 270-279, 2018.
- [12] W. E. Soto-Silva, M. Gonzalez-Araya, M. A. Oliva-Fernandez and L.M. Pla-Aragones, "Optimizing fresh food logistics for processing: application for large Chilean apple supply chain," *Computers and Electronics in Agriculture.*, vol. 136, no. 1, pp. 42-57, 2017.
- [13] D. J. Sanjay and P. Marcus, "Harvest planning in the Brazilian sugar cane industry via mixed integer programming," *European Journal of Operational Research.*, vol. 230, no.2, pp. 374-384, 2013.
- [14] Y. Hu, Y. Liu, Z. Wang, J. Wen, J. Li and J. Lu, "A two-stage dynamics capacity planning approach for agricultural machinery maintenance service with demand uncertainty," *Biosystems Engineering.*, vol. 190, pp. 201-217. 2020.
- [15] B. A. Yousefi, M. A. Tavakkoli, A. A. Bozorgi and S. Seifi, "Designing a reliable multi-objective queuing model of a petrochemical supply chain network under uncertainty: a case study," *Computers and Chemical Engineering.*, vol. 100, pp. 177-197, 2017.
- [16] B. Bilgen and I. Ozkarahan, "A mixed-integer linear programming model for bulk grain blending and shipping," *International Journal of Production Economics.*, vol. 107, pp. 555-571, 2007.

การประยุกต์ใช้วิธีหาค่าที่เหมาะสมแบบวาฬสำหรับปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ หลายประเภทภายใต้เงื่อนไขด้านกรอบเวลาแบบยืดหยุ่น

กิตติพงษ์ ม้าลำพอง^{1*} และ กนกพร ศรีปฐมสวัสดิ์²

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 1518 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ
กรุงเทพฯ 10800

Received: 20 February 2023; Revised: 28 March 2023; Accepted: 28 April 2023

บทคัดย่อ

วิธีหาค่าที่เหมาะสมแบบวาฬ (Whale optimization algorithm: WOA) เป็นวิธีเมตาฮิวริสติกส์ที่เลียนแบบมาจากพฤติกรรมการล่าเหยื่อของวาฬที่ประกอบไปด้วย การค้นหาเหยื่อ บินวงล้อม และโจมตีเหยื่อ ขั้นตอนการค้นหาคำตอบประกอบไปด้วยการหาค่าตอบแบบสุ่มกระจาย (Exploration) และการหาค่าตอบในพื้นที่ใกล้เคียง (Exploitation) ซึ่งทำให้ผลของคำตอบที่ได้มีคุณภาพที่ดี งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธี WOA ร่วมกับวิธีค้นหาเฉพาะที่ (Local search: LS) มาใช้ในการปรับปรุงคำตอบ เรียกว่าวิธี WOA-LS สำหรับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะหลายประเภทภายใต้เงื่อนไขด้านกรอบเวลา (Heterogeneous vehicle routing problem with time windows: HVRPTW) ที่มีกรอบเวลาแบบยืดหยุ่น (Soft time windows) โดยมีขั้นตอนการแก้ปัญหาประกอบด้วย การปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของวิธี WOA-LS ที่ประกอบด้วย จำนวนวาฬ (Number of populations) และจำนวนรอบการค้นหาคำตอบ (Number of iterations) โดยใช้วิธีทากูชิ (Taguchi orthogonal arrays) ในการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) นำผลค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาทดสอบการหาค่าตอบกับปัญหาเทียบเคียงที่มีตำแหน่งของลูกค้าแตกต่างกันจำนวนทั้งหมด 56 ปัญหา และนำคำตอบที่ได้ไปเปรียบเทียบกับวิธีค้นหาแบบต้องห้าม (Tabu Search: TS) ผลการหาค่าตอบพบว่าวิธี WOA-LS สามารถหาค่าตอบได้ดีกว่าวิธี TS จำนวน 9 ปัญหาจาก 56 ปัญหา และสามารถหาค่าตอบได้เท่ากับวิธี TS จำนวน 4 ปัญหา จากทั้งหมด 56 ปัญหา โดยมีค่าเฉลี่ยของคำตอบทั้งหมดทุกปัญหามากกว่าค่าเฉลี่ยคำตอบของวิธี TS 3.29% ผลการหาค่าตอบแสดงให้เห็นว่าวิธีที่นำเสนอมีประสิทธิภาพที่ดีในการแก้ปัญหา

คำสำคัญ: การจัดเส้นทางยานพาหนะ, เงื่อนไขด้านกรอบเวลา, วิธีหาค่าที่เหมาะสมแบบวาฬ, พารามิเตอร์ที่เหมาะสม, การออกแบบการทดลอง

* Corresponding author. E-mail: kittipong.m@cit.kmutnb.ac.th

¹ นักศึกษาปริญญาโท สาขาการจัดการเทคโนโลยีวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

An Application of Whale Optimization Algorithm for Heterogeneous Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows

Kittipong Malampong^{1,*} and Kanokporn Sripathomswat²

Department of Industrial Engineering Technology, College of Industrial Technology
King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 1518 Pracharat 1 Road. Wongsawang
Bangsue Bangkok 10800

Received: 20 February 2023; Revised: 28 March 2023; Accepted: 28 April 2023

Abstract

The Whale Optimization Algorithm (WOA) is a metaheuristic algorithm inspired by the hunting behavior of whales, which involves searching for search for prey, encircling prey, and bubble-net attacking. The WOA consists of exploration phase and exploitation phase, aimed at achieving high-quality solutions. This study proposes the application of the WOA method, combined with Local Search (LS) method, named WOA-LS, to solve the Heterogeneous Vehicle Routing Problem with Time Windows (HVRPTW) under soft time window constraints. The problem-solving process includes adjusting the appropriate parameters of the WOA-LS method, such as the number of populations and the number of iterations, using Taguchi orthogonal arrays and analysis of variance (ANOVA). The parameter results are then used to solve the problem and compare the solutions with those obtained by the Tabu Search (TS) method for 56 benchmark problems with different customer locations. The results show that the WOA-LS method outperforms the TS method for 9 of the 56 problems and achieves the same results for 4 problems. The average solution quality of the WOA-LS method is 3.29% higher than that of the TS method, indicating that the proposed method is effective in solving the problem.

Keywords: vehicle routing problem, time windows, whale optimization algorithm, appropriate parameters, design of experiment

* Corresponding author. E-mail: kittipong.m@cit.kmutnb.ac.th

¹ Master's degree in College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

² Assistant Professor in College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

1. บทนำ

ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ (Vehicle routing problem: VRP) เป็นปัญหาหนึ่งที่สำคัญในการจัดการต้นทุนโลจิสติกส์ซึ่งได้รับความสนใจในการศึกษาวิจัยมาอย่างต่อเนื่อง รูปแบบของปัญหาเริ่มต้นนำเสนอโดย Dantzing and Ramzer [1] ได้ทำการศึกษาปัญหา VRP ที่มีการขนส่งสินค้าตามปริมาณความต้องการสินค้าที่แตกต่างกัน มีวัตถุประสงค์เพื่อหาคำตอบของเส้นทางยานพาหนะรวมทั้งหมดที่มีระยะทางน้อยที่สุด โดยมีข้อจำกัดหลักอยู่ 3 ข้อ คือ ยานพาหนะต้องเดินทางออกจากคลังสินค้าและกลับมาที่คลังสินค้า ลูกค้านั่งต้องได้รับสินค้าทั้งหมดจากยานพาหนะเพียงคันเดียว และปริมาณความต้องการสินค้าในแต่ละเส้นทางต้องไม่เกินปริมาณความจุของยานพาหนะ ต่อมารูปแบบของปัญหาได้มีการขยายขอบเขตการศึกษาในหลายด้าน รวมทั้งมีการเพิ่มเงื่อนไขและข้อจำกัดที่สอดคล้องกับสภาพปัญหาจริง เช่น การจัดเส้นทางยานพาหนะที่มีคลังสินค้ามากกว่า 1 แห่ง (Multi-depot vehicle routing problem) การจัดเส้นทางยานพาหนะที่มีการส่งมอบและรับสินค้าได้ (Vehicle routing problem with pickup and deliveries) การจัดเส้นทางยานพาหนะที่มีการขนส่งสินค้ากลับมายังคลังสินค้า (Vehicle routing problem with backhauls) เป็นต้น

ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะหลายประเภท (Heterogeneous vehicle routing problem: HVRP) เป็นปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่มีการใช้ยานพาหนะหลายประเภทและความจุในการจัดเส้นทางให้บริการลูกค้า รูปแบบของปัญหาแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะหลายประเภทโดยมีการกำหนดจำนวนและความจุของยานพาหนะในแต่ละประเภท (Heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem: HFVRP) นำเสนอโดย Taillard [2] และปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะหลายประเภทโดยมีการกำหนดความจุแต่ไม่กำหนดจำนวนยานพาหนะในแต่ละประเภท (Fleet size and mix vehicle routing problem: FSMVRP) นำเสนอโดย Golden et al. [3] ต่อมาได้มีการเพิ่มเติมเงื่อนไขเรื่องต้นทุนคงที่ (Fixed cost) สำหรับยานพาหนะและต้นทุนแปรผันตามระยะทางการขนส่ง (Variable cost) โดย Ferland and Michelon [4] นำเสนอปัญหา FSMVRP ที่

พิจารณาต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผัน เช่นเดียวกับ Li, Golden and Wasil [5] นำเสนอปัญหา HFVRP ที่พิจารณาต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผันเช่นกัน

เงื่อนไขด้านกรอบเวลา (Time windows: TW) เป็นการเพิ่มเงื่อนไขให้กับปัญหา VRP โดยเงื่อนไขด้านกรอบเวลานี้คำนึงถึงกรอบเวลาที่ลูกค้าต้องการรับบริการโดยลูกค้าแต่ละรายมีการกำหนดกรอบเวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดการรับบริการ แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ กรอบเวลาแบบเคร่งครัด (Hard time windows) เป็นข้อจำกัดที่ยานพาหนะต้องเดินทางมาถึงและให้บริการภายในกรอบเวลาที่กำหนดเท่านั้น และกรอบเวลาแบบยืดหยุ่น (Soft time windows) เป็นข้อจำกัดที่ยานพาหนะสามารถเดินทางมาถึงก่อนกรอบเวลาเริ่มต้นได้แต่จะต้องรอจนถึงกรอบเวลาเริ่มต้นจึงจะเริ่มให้บริการได้โดยไม่เสียค่าปรับ

ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะหลายประเภทภายใต้เงื่อนไขด้านกรอบเวลา (Heterogeneous vehicle routing problem with time windows: HVRPTW) เป็นการเพิ่มเงื่อนไขที่สอดคล้องกับสถานการณ์ในปัจจุบันที่การขนส่งสินค้าประกอบไปด้วยยานพาหนะหลายประเภทที่มีความจุโดยมีการกำหนดจำนวนยานพาหนะไว้ล่วงหน้าก่อนการจัดเส้นทาง ซึ่งลูกค้ามีการกำหนดช่วงเวลาในการรับสินค้า โดย Jiang et al. [6] ได้นำปัญหาเทียบเคียง VRPTW ของ Solomon [7] มาทำการเพิ่มเงื่อนไขโดยกำหนดจำนวนความจุ ต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผันของยานพาหนะแต่ละประเภท โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาต้นทุนรวมที่น้อยที่สุด

ปัญหา HVRPTW เป็นปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมเชิงการจัด (Combinatorial optimization problem) ซึ่งอยู่ในกลุ่มปัญหาแบบยาก (NP-hard problem) การหาคำตอบที่ดีที่สุดสามารถทำได้เมื่อปัญหามีขนาดเล็กและมีข้อจำกัดไม่มาก แต่เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่และมีข้อจำกัดที่ซับซ้อนมากขึ้น การหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีแม่นยำตรง (Exact method) อาจไม่สามารถหาได้หรือใช้เวลาในการหาคำตอบที่นาน วิธีการแก้ปัญหาก็เพื่อให้ได้ผลคำตอบแบบประมาณ (Approximate method) จึงได้รับความนิยมนำมาใช้แก้ปัญหา โดยผลคำตอบที่ได้อาจไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด แต่เป็นคำตอบที่ยอมรับได้และมีค่าใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุดซึ่งสามารถหาได้ภายในระยะเวลาที่เหมาะสม

การแก้ปัญหา HVRPTW มีการนำวิธีการแก้ปัญหาที่หลากหลายมาใช้ โดยวิธีที่นิยมนำมาใช้คือ วิธีฮิวริสติกส์ และวิธีเมตาฮิวริสติกส์ซึ่งเป็นวิธีการหาคำตอบแบบประมาณ ซึ่งสามารถหาคำตอบที่ดีได้ภายในระยะเวลาที่เหมาะสม โดย Jiang et al. [6] นำวิธีค้นหาแบบต้องห้าม (Tabu search: TS) มาใช้แก้ปัญหา Paraskvopoulos et al. [8] แก้ปัญหาด้วยวิธีค้นหาคำตอบย่านใกล้เคียงแบบแปรผัน (Variable neighborhood) ร่วมกับวิธี TS Molina et al. [9] ใช้วิธีหาคำตอบแบบอนานิคมมด (Ant colony system: ACS) ร่วมกับวิธีค้นหาเฉพาะที่ (Local search: LS) Jain et al. [10] แก้ปัญหา HVRPTW ที่มีสินค้าหลายชนิดด้วยวิธี ACS แบบปรับฟีโรโมนสองทาง (Two-pheromone trail ant colony system) ร่วมกับวิธี TS

วิธีการหาคำตอบด้วยวิธีหาค่าที่เหมาะสมแบบวาฬ (Whale optimization algorithm: WOA) นำเสนอโดย Mirjalili and Lewis [11] เป็นวิธีเมตาฮิวริสติกส์ที่จัดอยู่ในกลุ่มวิธีที่ได้รับแรงบันดาลใจมาจากธรรมชาติ (Naturally inspired) ซึ่งเป็นวิธีการค้นหาคำตอบโดยอาศัยกลุ่มประชากร (Population-based search) เลียนแบบมาจากพฤติกรรมกรล่าเหยื่อของวาฬที่ประกอบไปด้วย การค้นหาเหยื่อ การปีนวงล้อม และการโจมตีเหยื่อ ขั้นตอนการค้นหาคำตอบประกอบไปด้วย ขั้นตอนการหาคำตอบแบบสุ่มกระจาย (Exploration) และขั้นตอนการหาคำตอบในพื้นที่ใกล้เคียง (Exploitation) ซึ่งทำให้ผลคำตอบที่ได้มีคุณภาพที่ดี เป็นวิธีเมตาฮิวริสติกส์ใหม่ที่ยังไม่ถูกนำไปใช้ในการแก้ปัญหาที่แพร่หลายมากนัก โดย Dewi and Utama [12] ได้นำวิธี WOA ร่วมกับวิธี TS มาใช้ในการแก้ปัญหา GVRP และปรับปรุงคำตอบด้วยวิธี LS Elmousel et al. [13] แก้ปัญหา CVRP โดยปรับวิธี WOA ให้เหมาะสมกับปัญหาแบบไม่ต่อเนื่อง Zhang et al. [14] ได้นำวิธี WOA มาใช้ในการแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Traveling salesman problem) Yodwangjai and Malampong [15] ได้นำวิธี WOA ร่วมกับวิธี LS มาใช้ในการแก้ปัญหา VRPTW

จากปัญหา HVRPTW และวิธีการแก้ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการนำวิธี WOA มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา HVRPTW ซึ่งเป็นวิธีที่ยังไม่เคยถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหานี้ การกำหนดค่าพารามิเตอร์

สำหรับการหาคำตอบของแต่ละปัญหาจะมีค่าที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพและระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของวิธี WOA สำหรับการแก้ปัญหา HVRPTW และได้นำวิธี LS มาใช้ในการปรับปรุงคำตอบเพื่อป้องกันการติดคำตอบเฉพาะที่ (Local optimal) เรียกว่าวิธี WOA-LS การออกแบบการทดลองใช้วิธีทากูชิ (Taguchi orthogonal arrays) นำมาทดสอบกับปัญหาเทียบเคียงของ Jiang et al. [6] การทดลองจะนำตัวแทนปัญหาในแต่ละกลุ่มมาทดลองหาค่าพารามิเตอร์และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และนำผลค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองไปทดสอบกับโจทย์ปัญหาเทียบเคียงจำนวนทั้งหมด 56 ปัญหา เพื่อหาคำตอบและเปรียบเทียบคำตอบกับวิธี TS ในงานวิจัยของ Jiang et al. [6]

2. กระบวนการหาคำตอบ

2.1 วิธีหาค่าที่เหมาะสมแบบวาฬ

กระบวนการหาคำตอบด้วยวิธีหาค่าที่เหมาะสมแบบวาฬ มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การล้อมเหยื่อ (Encircling prey) เป็นขั้นตอนการล่าเหยื่อ โดยวาฬจะจดจำตำแหน่งเหยื่อและทำการล้อมเหยื่อไว้ ตำแหน่งเหยื่อจะถูกกำหนดด้วย \bar{X} และตำแหน่งเหยื่อที่เป็นค่าคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการค้นหานั้นแทนด้วย \bar{X}^* ซึ่ง \bar{D} เป็นตำแหน่งระหว่างวาฬกับเหยื่อ โดยวาฬแต่ละตัวจะพยายามปรับปรุงตำแหน่งของตัวเองเข้าหาตำแหน่งคำตอบที่ดีที่สุด สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\bar{D} = |\bar{C} \cdot \bar{X}^*(t) - \bar{X}(t)| \quad (1)$$

$$\bar{X}(t+1) = \bar{X}^*(t) - \bar{A} \cdot \bar{D} \quad (2)$$

เมื่อ \bar{X}^* คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุด ในรอบการค้นหาปัจจุบัน

\bar{X} คือ เวกเตอร์ตำแหน่งปัจจุบัน

t คือ รอบการค้นหาปัจจุบัน

\bar{A} คือ เวกเตอร์ของค่าสัมประสิทธิ์การค้นหา คำนวณได้จากสมการที่ (3)

\bar{C} คือ เวกเตอร์ของค่าสัมประสิทธิ์การค้นหา คำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \quad (3)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r} \quad (4)$$

เมื่อ \vec{r} คือ ค่าเวกเตอร์สุ่มระหว่าง 0 ถึง 1
 \vec{a} คือ ค่าเวกเตอร์ที่ลดลงระหว่าง 2 ถึง 0
 เป็นเส้นตรงทุกรอบการค้นหา คำนวณได้จากสมการที่ (5)

$$\vec{a} = 2 - \frac{2t}{T_{max}} \quad (5)$$

เมื่อ T_{max} คือ จำนวนรอบการค้นหาสูงสุด
 ขั้นตอนที่ 2 วิธีการโจมตีด้วยฟองอากาศ (Bubble-net attacking method: exploitation phase) เลียนแบบจากพฤติกรรมกรล่าเหยื่อของวาฬ โดยการพ่นฟองอากาศล้อมเหยื่อไว้ ซึ่งลักษณะการพ่นฟองอากาศมี 2 รูปแบบ คือ วิธีการล้อมแบบหดตัวและวิธีการเคลื่อนที่แบบเกลียว

รูปแบบที่ 1 วิธีการล้อมแบบหดตัว (Shrinking encircling mechanism) เป็นพฤติกรรมของการโจมตีด้วยฟองอากาศโดยการลดค่า \vec{a} ในสมการที่ (3) ทำให้ช่วงความผันผวนของเวกเตอร์สัมประสิทธิ์การค้นหา \vec{A} มีค่าลดลงด้วย โดย \vec{a} จะมีค่าลดลงจาก 2 ถึง 0 เป็นเส้นตรงในทุกรอบการค้นหา ตำแหน่งใหม่ของการค้นหาคำตอบสามารถกำหนดได้ทุกตำแหน่งระหว่างตำแหน่งเดิมกับตำแหน่งที่ดีที่สุดในรอบการค้นหาคำตอบปัจจุบัน

รูปแบบที่ 2 วิธีการเคลื่อนที่แบบเกลียว (Spiral update position) เป็นพฤติกรรมในการล่าเหยื่อของวาฬที่จะว่ายน้ำเคลื่อนที่เป็นวงกลมล้อมเหยื่อและหดตัวในเวลาเดียวกันเป็นลักษณะเกลียวดังสมการที่ (6)

$$\vec{X}(t+1) = \vec{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) \quad (6)$$

$$\vec{D}' = |\vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (7)$$

เมื่อ \vec{D}' คือ ระยะห่างระหว่างตำแหน่งปัจจุบันและตำแหน่งที่ดีที่สุด

b คือ ค่าคงที่สมการเกลียวลอการิทึม

l คือ ค่าสุ่มระหว่าง [-1,1]

รูปแบบของการโจมตีด้วยฟองอากาศด้วยวิธีการล้อมแบบหดตัวและวิธีการเคลื่อนที่แบบเกลียวมีความเป็นไปได้ที่วาฬจะการเลือกวิธีการโจมตีวิธีใดวิธีหนึ่งจากความเป็นไปเป็นที่ได้จากการสุ่มดังสมการที่ (8)

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} & \text{if } p \leq 0.5 \\ \vec{D} \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) & \text{if } p \geq 0.5 \end{cases} \quad (8)$$

เมื่อ p คือ ค่าสุ่มระหว่าง 0 ถึง 1

ขั้นตอนที่ 3 การค้นหาเหยื่อ (Search for prey: exploration phase) นอกจากการโจมตีด้วยฟองอากาศแล้ว วาฬจะค้นหาเหยื่อในตำแหน่งอื่นด้วยวิธีการสุ่ม ซึ่งค่า \vec{A} ที่ได้จากการสุ่มจะมีค่ามากกว่า 1 หรือน้อยกว่า -1 เพื่อให้ตำแหน่งในการค้นหาเหยื่อไกลจากตำแหน่งเดิม เป็นขั้นตอนการค้นหาแบบสุ่มกระจาย (Exploration mechanism) โดยจะปรับปรุงตำแหน่งใหม่ที่ได้จากการสุ่ม \vec{X}_{rand} แทนตำแหน่งที่ดีที่สุด การค้นหาแบบสุ่มกระจายจะทำเมื่อ $|\vec{A}| > 1$ ตามสมการที่ (9) และ (10) และเมื่อค่า $|\vec{A}| \leq 1$ จะทำการปรับปรุงตำแหน่งใหม่ตามสมการที่ (1) และ (2)

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_{rand} - \vec{X}| \quad (9)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_{rand} - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (10)$$

2.2 วิธีการค้นหาเฉพาะที่

วิธีการค้นหาเฉพาะที่ (Local search: LS) เป็นการปรับปรุงคำตอบโดยการนำตัวแทนคำตอบเบื้องต้นของการจัดเส้นทางยานพาหนะมาหาคำตอบในย่านใกล้เคียง (Neighborhood) เพื่อให้ได้ตัวแทนคำตอบที่หลากหลายและมีคุณภาพดีขึ้น ซึ่งบางครั้งอาจไม่ได้คำตอบที่ดีขึ้นกว่าเดิม แต่เป็นวิธีช่วยป้องกันไม่ให้คำตอบที่ได้ติดอยู่กับคำตอบเฉพาะที่ โดยวิธี LS ที่นำมาใช้ปรับปรุงคำตอบของปัญหา VRP ประกอบไปด้วยการปรับปรุงคำตอบภายในเส้นทาง (Intra route) และการปรับปรุงคำตอบระหว่างเส้นทาง (Inter route) ในงานวิจัยนี้ได้นำวิธี LS มาใช้ร่วมกับวิธี WOA ในขั้นตอนการค้นหาเหยื่อเพื่อช่วยป้องกันการติดกับคำตอบเฉพาะที่ โดยวิธี LS ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยวิธี Single insertion และวิธี 2-Opt สำหรับการปรับปรุงคำตอบภายในเส้นทาง และวิธี Shift 1-0 และวิธี Swap 1-1 สำหรับการปรับปรุงคำตอบระหว่างเส้นทาง

3. ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

ปัญหาที่นำมาทดลองในงานวิจัยนี้ เป็นโจทย์ปัญหาเทียบเคียงของ Solomon [7] ที่ประกอบไปด้วยชุดข้อมูลที่มีตำแหน่งที่ตั้งลูกค้า 3 ลักษณะ คือ แบบสุ่ม (Random: R) แบบกลุ่ม (Cluster: C) และแบบผสมสุ่มกับกลุ่ม (Random and Cluster: RC) ในแต่ละชุดข้อมูลมีการกำหนดข้อจำกัด

ของยานพาหนะที่มีกรอบเวลาแคบยานพาหนะมีความจุน้อย แทนด้วยเลข 1 และกรอบเวลากว้างยานพาหนะมีความจุมากแทนด้วยเลข 2 ซึ่งปัญหา HVRPTW ของ Jiang et al. [6] ได้มีการกำหนดประเภทยานพาหนะที่แตกต่างกันในแต่ละชุดข้อมูลแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ ความจุน้อยแทนด้วย A ความจุปานกลางแทนด้วย B และความจุมากแทนด้วย C ในแต่ละชุดข้อมูลมีการกำหนดจำนวนยานพาหนะเวลากลับคลังสินค้า ต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผันที่แตกต่างกัน มีรายละเอียดของชุดข้อมูลปัญหา ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลปัญหา HVRPTW ที่นำมาทดสอบ

VT	NV	Cap.	LRT	FC	VC
HC1 (9 cases)					
A	20	100	1,000	30	1.0
B	5	200	1,236	80	1.2
HC2 (8 cases)					
A	20	400	3,000	100	1.0
B	5	500	3,390	140	1.2
HR1 (12 cases)					
A	10	50	180	80	1.0
B	15	80	200	140	1.2
C	10	120	230	250	1.4
HR2 (11 cases)					
A	10	300	800	45	1.0
B	5	400	1,000	75	1.2
HRC1 (8 cases)					
A	10	40	200	60	1.0
B	20	80	220	150	1.2
C	10	150	240	300	1.4
HRC2 (8 cases)					
A	10	100	900	150	1.0
B	5	200	960	350	1.2

วิธี WOA-LS ที่นำมาใช้แก้ปัญหาในงานวิจัยนี้มีพารามิเตอร์ประกอบด้วย จำนวนรอบการค้นหาคำตอบ (Number of iterations: NI) และจำนวนวาทที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (Number of populations: NP) โดยที่แต่ละพารามิเตอร์มีค่าพารามิเตอร์ 5 ระดับ ดังตารางที่ 2 วิธีการออกแบบการทดลองใช้วิธีทาคุชิ ตามตารางการออกแบบการ

ทดลอง Taguchi L25 ทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง อัลกอริทึมสำหรับการแก้ปัญหาเขียนด้วยโปรแกรมภาษาไพทอน (Python programming language)

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์วิธี WOA-LS ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ระดับพารามิเตอร์				
	1	2	3	4	5
จำนวนรอบการค้นหาคำตอบ	1,000	2,500	5,000	7,500	10,000
จำนวนวาท	2	4	6	8	10

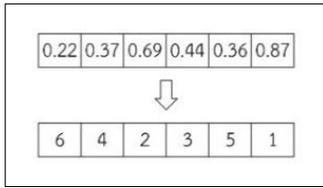
4. ขั้นตอนการค้นหาคำตอบวิธี WOA-LS

ขั้นตอนที่ 1 การสร้างตัวแทนคำตอบเริ่มต้นของวิธี WOA-LS ทำได้โดยการสร้างประชากรวาทเริ่มต้นที่มีจำนวนตามค่าพารามิเตอร์จำนวนวาทที่กำหนดในแต่ละการทดลอง โดยมีการระบุตำแหน่งของวาทด้วยเวกเตอร์ที่มีขนาดความยาวเวกเตอร์เท่ากับจำนวนลูกค้าในเส้นทางนั้น ตำแหน่งเวกเตอร์ถูกกำหนดด้วยเลขสุ่มที่มีค่าระหว่าง 0-1 ที่ไม่ซ้ำกัน ตัวอย่างการสร้างเวกเตอร์ตำแหน่งของวาทดังรูปที่ 1

วาทตัวที่ 1	0.22	0.37	0.69	0.44	0.36	0.87
วาทตัวที่ 2	0.23	0.79	0.29	0.46	0.75	0.55
วาทตัวที่ 3	0.02	0.68	0.32	0.99	0.47	0.77
วาทตัวที่ 4	0.16	0.73	0.58	0.13	0.44	0.93

รูปที่ 1 ตัวอย่างการสร้างเวกเตอร์ตำแหน่งของวาท

ขั้นตอนที่ 2 หลังจากการสร้างเวกเตอร์ตำแหน่งของวาทแล้วจะทำการแปลงค่าตำแหน่งเวกเตอร์ให้เป็นตัวแทนคำตอบสำหรับปัญหา HVRPTW โดยในงานวิจัยนี้ได้นำวิธีการเรียงลำดับค่ามาก (Large Rank Value: LRV) มาใช้ในการเรียงลำดับตำแหน่งของเวกเตอร์จากค่ามากที่สุดไปค่าน้อยสุด ตัวอย่างการแปลงตำแหน่งเวกเตอร์ของวาทตัวที่ 1 ดังรูปที่ 2 โดยเมื่อมีการเรียงลำดับจากค่ามากที่สุดไปค่าน้อยสุดตามวิธี LRV ค่าที่มากที่สุดจะแทนตำแหน่งของลูกค้าลำดับที่ 1



รูปที่ 2 ตัวอย่างการแปลงตำแหน่งเวกเตอร์วาทตัวที่ 1

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่าวัตถุประสงคจากตำแหน่งของวาทแต่ละตัว \bar{X}_i โดยตำแหน่งวาทที่ให้ค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดเท่ากับ \bar{X}^*

ขั้นตอนที่ 4 ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ a, A, C, l และ p

- สุ่มค่า p ระหว่าง 0 ถึง 1 ถ้า $p \geq 0.05$ ข้ามไปขั้นตอนที่ 9

- คำนวณค่า $|\bar{A}|$ ถ้าค่า $|\bar{A}| \geq 1$ ข้ามไปขั้นตอนที่ 7

ขั้นตอนที่ 5 ปรับปรุงตำแหน่งใหม่ของตำแหน่งวาทปัจจุบัน \bar{X} ด้วยสมการที่ (1) และสมการที่ (2)

ขั้นตอนที่ 6 ปรับปรุงตำแหน่งใหม่ของวาท \bar{X} ด้วยวิธี LS

ขั้นตอนที่ 7 สร้างตำแหน่งใหม่ของวาท \bar{X} ด้วยวิธีการสุ่ม \bar{X}_{rand}

ขั้นตอนที่ 8 ปรับปรุงตำแหน่งใหม่ของตำแหน่งวาทปัจจุบัน \bar{X} ด้วยสมการที่ (9) และสมการที่ (10)

ขั้นตอนที่ 9 ปรับปรุงตำแหน่งของวาทปัจจุบัน \bar{X} ด้วยสมการที่ (6) และสมการที่ (7)

ขั้นตอนที่ 10 เมื่อครบจำนวนรอบค้นหาคำตอบแล้วให้หยุดการค้นหาคำตอบและแสดงผลคำตอบที่ดีที่สุด

5. ผลการดำเนินงานวิจัย

5.1 ผลการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

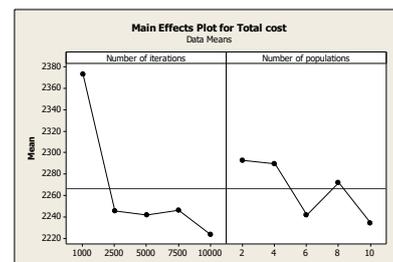
ผลการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากการทดลองกับตัวอย่างโจทย์ปัญหาทั้ง 6 กลุ่ม คือ HC1, HC2, HR1, HR2, HRC1 และ HRC2 เมื่อนำผลมาวิเคราะห์ความแปรปรวน วิเคราะห์ปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม ได้ผลดังนี้

กลุ่มปัญหา HC1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากตารางที่ 3 พบว่าปัจจัยหลักทั้งสองมีค่า P -value < 0.05

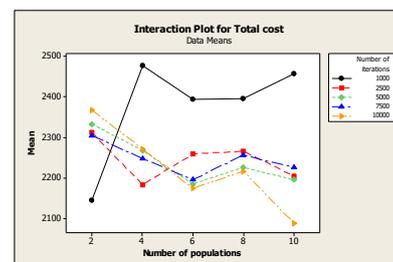
แสดงว่าปัจจัยหลักทั้งสองส่งผลต่อค่าคำตอบ แต่ปัจจัย NP มีค่า P -value ที่ใกล้เคียง 0.05 ซึ่งอาจส่งผลต่อคำตอบไม่มาก จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่า การกำหนดค่า NI เท่ากับ 10,000 และ NP เท่ากับ 6 และ 10 ให้ค่าคำตอบที่ดีมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาปัจจัยร่วมพบว่า มีค่า P -value < 0.05 แสดงว่าปัจจัยร่วมส่งผลต่อค่าคำตอบอย่างมีนัยสำคัญ จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่า การกำหนดค่าปัจจัยในแต่ละระดับส่งผลต่อค่าคำตอบไปในทิศทางเดียวกัน โดยการกำหนดค่า NI เท่ากับ 10,000 และ NP เท่ากับ 10 จะให้ค่าคำตอบที่ดีที่สุด

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของกลุ่มปัญหา HC1

Source	DF	SS	MS	F	P
NI	4	221074	55268.5	13.17	0.000
NP	4	43495	10873.7	2.59	0.048
Interaction	16	397120	24820.0	5.91	0.00
Error	50	209885	4197.7		
Total	74	871574			



รูปที่ 3 การวิเคราะห์ปัจจัยหลักกลุ่มปัญหา HC1



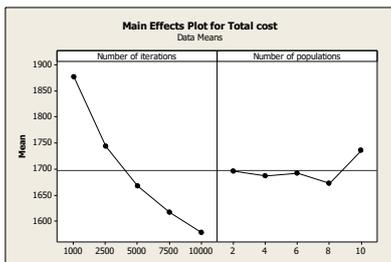
รูปที่ 4 การวิเคราะห์ปัจจัยร่วมกลุ่มปัญหา HC1

กลุ่มปัญหา HC2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากตารางที่ 4 พบว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าคำตอบ คือ NI

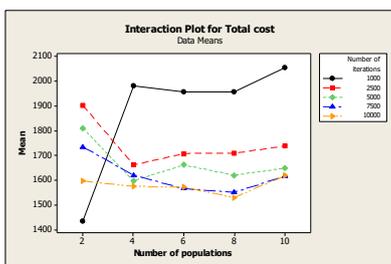
ซึ่งมีค่า $P\text{-value} < 0.05$ ส่วน NP มีค่า $P\text{-value} > 0.05$ แสดงว่าไม่ส่งผลต่อคำตอบ จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่า การกำหนดค่า NI เท่ากับ 10,000 ให้ค่าคำตอบที่ดีที่สุด และการกำหนดค่า NP เท่ากับ 2, 4, 6 และ 8 ให้ค่าคำตอบที่ใกล้เคียงกันและเมื่อพิจารณาปัจจัยร่วม พบว่ามีค่า $P\text{-value} < 0.05$ แสดงว่าปัจจัยร่วมส่งผลต่อค่าคำตอบอย่างมีนัยสำคัญ จากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่า การกำหนดปัจจัยในแต่ละระดับส่งผลต่อค่าคำตอบไปในทิศทางเดียวกัน โดยการกำหนดค่า NI เท่ากับ 10,000 และ NP เท่ากับ 8 จะให้ค่าคำตอบที่ดีที่สุด

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนกลุ่มปัญหา HC2

Source	DF	SS	MS	F	P
NI	4	834930	208733	27.97	0.000
NP	4	33016	8254	1.11	0.364
Interaction	16	986263	61641	8.26	0.000
Error	50	373172	7463		
Total	74	2227381			



รูปที่ 5 การวิเคราะห์ปัจจัยหลักกลุ่มปัญหา HC2



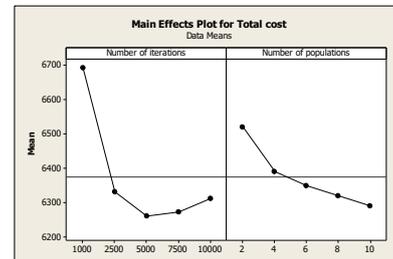
รูปที่ 6 การวิเคราะห์ปัจจัยร่วมกลุ่มปัญหา HC2

กลุ่มปัญหา HR1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน จากตารางที่ 5 พบว่าปัจจัยหลักทั้งสองมีค่า $P\text{-value} < 0.05$

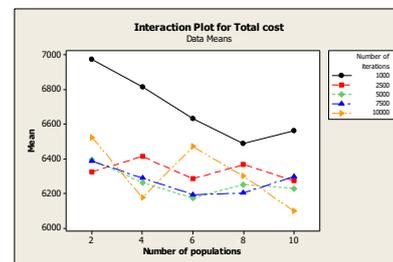
แสดงว่าปัจจัยหลักทั้งสองส่งผลต่อค่าคำตอบ จากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่า การกำหนดค่า NI เท่ากับ 5,000 และ NP เท่ากับ 10 ให้ค่าคำตอบที่ดีที่สุด และเมื่อพิจารณาปัจจัยร่วม พบว่ามีค่า $P\text{-value}$ ใกล้เคียงกับ 0.05 แสดงว่าปัจจัยร่วมส่งผลต่อค่าคำตอบค่อนข้างน้อยหรืออาจไม่ส่งผล จากรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าการกำหนดค่า NI เท่ากับ 5,000 และ NP เท่ากับ 10 จะให้ค่าคำตอบที่ดีที่สุด

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนกลุ่มปัญหา HR1

Source	DF	SS	MS	F	P
NI	4	1941696	485424	24.71	0.000
NP	4	473788	118447	6.03	0.000
Interaction	16	590100	36881	1.88	0.046
Error	50	982406	19648		
Total	74	3987990			



รูปที่ 7 การวิเคราะห์ปัจจัยหลักกลุ่มปัญหา HR1



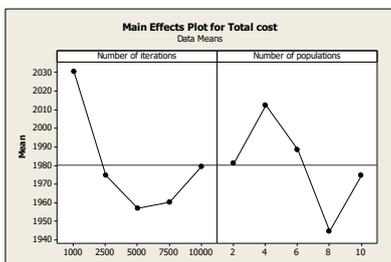
รูปที่ 8 การวิเคราะห์ปัจจัยร่วมกลุ่มปัญหา HR1

กลุ่มปัญหา HR2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน จากตารางที่ 6 พบว่าปัจจัยหลักทั้งสองมีค่า $P\text{-value} < 0.05$ แสดงว่าปัจจัยหลักทั้งสองส่งผลต่อคำตอบ แต่ปัจจัย NP มีค่า $P\text{-value}$ ที่ใกล้เคียง 0.05 ซึ่งอาจส่งผลต่อคำตอบไม่มากนัก

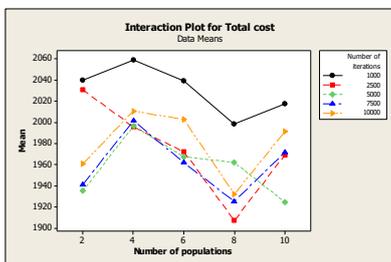
จากรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่า การกำหนดค่า NI เท่ากับ 5,000 และ NP เท่ากับ 8 ให้ค่าคำตอบที่ดีที่สุด และเมื่อพิจารณาปัจจัยร่วม พบว่ามีค่า $P\text{-value} > 0.05$ แสดงว่าปัจจัยร่วมไม่ส่งผลต่อค่าคำตอบ จากรูปที่ 10 จะเห็นได้ว่า การกำหนดค่า NI และ NP ในแต่ละระดับไม่ส่งผลต่อค่าคำตอบ โดยการกำหนดค่า NI เท่ากับ 5,000 และ NP เท่ากับ 8 จะให้ค่าคำตอบที่ดีที่สุด

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนกลุ่มปัญหา HR2

Source	DF	SS	MS	F	P
NI	4	52381	13095.1	3.93	0.008
NP	4	35836	8959.0	2.69	0.042
Interaction	16	27767	1735.4	0.52	0.924
Error	50	166589	3331.8		
Total	74	282572			



รูปที่ 9 การวิเคราะห์ปัจจัยหลักกลุ่มปัญหา HR2



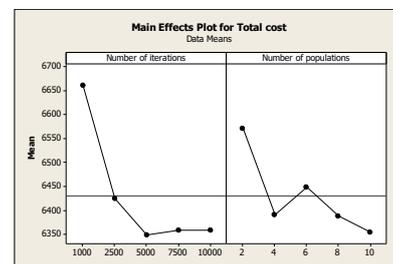
รูปที่ 10 การวิเคราะห์ปัจจัยร่วมกลุ่มปัญหา HR2

กลุ่มปัญหา HRC1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน จากตารางที่ 7 พบว่าปัจจัยหลักทั้งสองมีค่า $P\text{-value} < 0.05$ แสดงว่าปัจจัยหลักทั้งสองส่งผลต่อค่าคำตอบ จากรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่า การกำหนดค่า NI เท่ากับ 5,000 และ NP

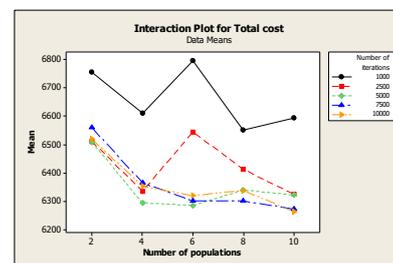
เท่ากับ 10 ให้ค่าคำตอบที่ดีที่สุด และเมื่อพิจารณาปัจจัยร่วม พบว่ามีค่า $P\text{-value} > 0.05$ แสดงว่าปัจจัยร่วมไม่ส่งผลต่อค่าคำตอบ จากรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่า การกำหนด NI และ NP ในแต่ละระดับไม่ส่งผลต่อค่าคำตอบ โดยการกำหนดค่า NI เท่ากับ 5,000 และ NP เท่ากับ 10 จะให้ค่าคำตอบที่ดีที่สุด

ตารางที่ 7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนกลุ่มปัญหา HRC1

Source	DF	SS	MS	F	P
NI	4	1047830	261958	13.01	0.000
NP	4	434591	108648	5.40	0.001
Interaction	16	196512	12282	0.61	0.861
Error	50	1006458	20129		
Total	74	2685391			



รูปที่ 11 การวิเคราะห์ปัจจัยหลักกลุ่มปัญหา HRC1

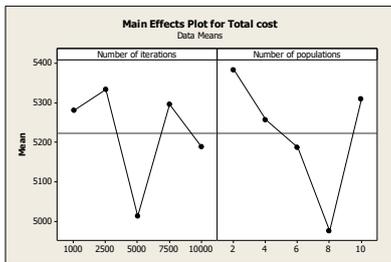


รูปที่ 12 การวิเคราะห์ปัจจัยร่วมกลุ่มปัญหา HRC1

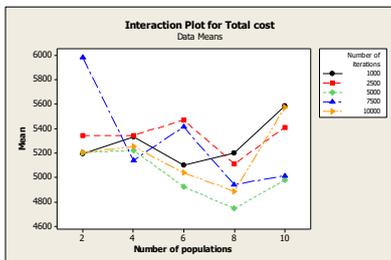
ตารางที่ 8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนกลุ่มปัญหา HRC2

Source	DF	SS	MS	F	P
NI	4	331245	82811	1.53	0.241
NP	4	482431	120608	2.22	0.112
Error	16	867327	54208		
Total	24	1681003			

กลุ่มปัญหา HRC2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากตารางที่ 8 พบว่าปัจจัยหลักทั้งสองมีค่า $P\text{-value} > 0.05$ แสดงว่าปัจจัยหลักทั้งสองไม่ส่งผลต่อค่าคำตอบ จากรูปที่ 13 จะเห็นได้ว่า การกำหนดค่า NI เท่ากับ 5,000 และ NP เท่ากับ 8 ให้ค่าคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 14 การวิเคราะห์ปัจจัยร่วมที่การกำหนดค่า NI เท่ากับ 5,000 และ NP เท่ากับ 8 ให้ค่าคำตอบที่ดีที่สุด



รูปที่ 13 การวิเคราะห์ปัจจัยหลักกลุ่มปัญหา HRC2



รูปที่ 14 การวิเคราะห์ปัจจัยร่วมกลุ่มปัญหา HRC2

ตารางที่ 9 ผลการทดลองการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

กลุ่มปัญหา	พารามิเตอร์	
	NI	NP
HC1	10,000	10
HC2	10,000	8
HR1	5,000	10
HR2	5,000	8
HRC1	5,000	10
HRC2	5,000	8

จากผลการทดลองการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของวิธี WOA-LS โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนการวิเคราะห์ปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมของตัวแทนปัญหา

HVRPTW ทั้ง 6 กลุ่ม พบว่าการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในแต่ละระดับส่งผลต่อค่าคำตอบที่ได้มีความแตกต่างกัน โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของปัญหาในกลุ่ม HC มีการกำหนดค่า NI มากกว่าปัญหาในกลุ่ม HR และ HRC ส่วนการกำหนดค่า NP ของปัญหาในกลุ่ม 1 มีการกำหนดค่ามากกว่าปัญหาในกลุ่ม 2 โดยมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของปัญหาแต่ละกลุ่มดังตารางที่ 9

5.2 การเปรียบเทียบคำตอบของวิธี WOA-LS กับวิธี TS

จากผลการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ได้นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาทดสอบกับปัญหา HVRPTW จำนวน 56 ปัญหา โดยทำการทดลองซ้ำจำนวน 10 ครั้ง ได้ผลคำตอบและผลการเปรียบเทียบคำตอบกับวิธี TS ดังตารางที่ 10

ผลคำตอบของวิธี WOA-LS เปรียบเทียบกับวิธี TS พบว่าในกลุ่มปัญหา HC ได้ผลคำตอบที่ดีกว่าวิธี TS จำนวน 3 ปัญหา คือ ปัญหา HC204 ผลคำตอบดีกว่า 0.93% ปัญหา HC207 ผลคำตอบดีกว่า 1.25% และปัญหา HC208 ผลคำตอบดีกว่า 0.36% ได้ผลคำตอบเท่ากับวิธี TS จำนวน 2 ปัญหา คือ ปัญหา HC103 และปัญหา HC105 โดยมีค่าเฉลี่ยของผลคำตอบในกลุ่มปัญหา HC1 มากกว่าวิธี TS 3.19% กลุ่มปัญหา HC2 มากกว่าวิธี TS 1.28% และค่าเฉลี่ยของผลคำตอบในกลุ่มปัญหา HC มากกว่าวิธี TS 2.14%

กลุ่มปัญหา HR ได้ผลคำตอบที่ดีกว่าวิธี TS จำนวน 3 ปัญหา คือ ปัญหา HR104 ผลคำตอบดีกว่า 1.46% ปัญหา HR111 ผลคำตอบดีกว่า 2.48% และปัญหา HR112 ผลคำตอบดีกว่า 0.52% ได้ผลคำตอบเท่ากับวิธี TS จำนวน 2 ปัญหา คือ ปัญหา HR207 ผล และปัญหา HR210 โดยมีค่าเฉลี่ยของผลคำตอบในกลุ่มปัญหา HR1 มากกว่าวิธี TS 3.18% กลุ่มปัญหา HR2 มากกว่าวิธี TS 4.74% และค่าเฉลี่ยของผลคำตอบในกลุ่มปัญหา HR มากกว่าวิธี TS 3.92%

กลุ่มปัญหา HRC ได้ผลคำตอบที่ดีกว่าวิธี TS จำนวน 3 ปัญหา คือ ปัญหา HRC102 ผลคำตอบดีกว่า 0.83% ปัญหา HRC106 ผลคำตอบดีกว่า 1.33% และปัญหา HRC207 ผลคำตอบดีกว่า 2.64% โดยมีค่าเฉลี่ยของผลคำตอบในกลุ่มปัญหา HRC1 มากกว่าวิธี TS 4.32% กลุ่มปัญหา HRC2 มากกว่าวิธี TS 2.86% และค่าเฉลี่ยของผลคำตอบในกลุ่มปัญหา HRC มากกว่าวิธี TS 3.59%

ตารางที่ 10 ผลคำตอบวิธี WOA-LS เปรียบเทียบกับคำตอบที่ดีที่สุด

Problem	TS	WOA-LS	%Dev.	Problem	TS	WOA-LS	%Dev.
HC101	1885.33	1905.10	1.04%	HR112	4252.71	4230.55	-0.52%
HC102	1890.66	1965.58	3.81%	HR201	1765.74	1875.28	5.84%
HC103	1908.04	1908.01	0.00%	HR202	1536.81	1634.95	6.00%
HC104	1809.78	1932.25	6.34%	HR203	1337.39	1389.44	3.75%
HC105	1854.73	1854.80	0.00%	HR204	1114.94	1189.78	6.29%
HC106	1880.64	1962.63	4.18%	HR205	1263.91	1384.42	8.70%
HC107	1839.52	1954.18	5.87%	HR206	1180.44	1282.43	7.95%
HC108	1826.49	1894.05	3.57%	HR207	1102.06	1102.06	0.00%
HC109	1799.22	1872.72	3.92%	HR208	1007.00	1049.61	4.06%
HC201	1313.28	1365.48	3.82%	HR209	1119.04	1185.29	5.59%
HC202	1283.58	1308.99	1.94%	HR210	1307.53	1307.53	0.00%
HC203	1259.97	1261.90	0.15%	HR211	1010.22	1051.68	3.94%
HC204	1256.09	1244.56	-0.93%	HRC101	5703.97	6185.18	7.78%
HC205	1325.84	1343.69	1.33%	HRC102	5556.02	5510.42	-0.83%
HC206	1263.63	1303.45	3.05%	HRC103	5438.89	5864.44	7.26%
HC207	1307.35	1291.21	-1.25%	HRC104	5331.41	5673.85	6.04%
HC208	1190.81	1186.52	-0.36%	HRC105	5705.79	6051.46	5.71%
HR101	5125.52	5482.40	6.51%	HRC106	5528.42	5455.74	-1.33%
HR102	4982.39	5193.44	4.06%	HRC107	5451.31	5759.74	5.35%
HR103	4661.22	4935.85	5.56%	HRC108	5322.31	5576.11	4.55%
HR104	4530.55	4465.43	-1.46%	HRC201	4501.65	4643.88	3.06%
HR105	4570.39	4809.18	4.97%	HRC202	4408.53	4706.02	6.32%
HR106	4431.31	4639.99	4.50%	HRC203	4321.87	4423.16	2.29%
HR107	4391.14	4571.16	3.94%	HRC204	4306.65	4580.84	5.99%
HR108	4280.05	4445.70	3.73%	HRC205	4452.88	4611.99	3.45%
HR109	4339.86	4566.24	4.96%	HRC206	4419.09	4584.10	3.60%
HR110	4272.25	4453.28	4.07%	HRC207	4343.55	4231.90	-2.64%
HR111	4366.32	4273.14	-2.18%	HRC208	4276.15	4312.06	0.83%

6. สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

ผลการวิจัยการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของวิธี WOA-LS ในการแก้ปัญหา HVRPTW ได้นำโจทย์ปัญหาเทียบเคียงมาออกแบบการทดลองด้วยวิธีทฤษฎี นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน วิเคราะห์ปัจจัยหลัก และปัจจัยร่วม พบว่าการปรับค่าพารามิเตอร์ส่งผลต่อคำตอบที่ได้แตกต่างกัน จากนั้นจึงนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาหาคำตอบกับโจทย์ปัญหาเทียบเคียงจำนวน 56 ปัญหา พบว่า

สามารถหาคำตอบที่ดีกว่าคำตอบของวิธี TS ได้จำนวน 9 ปัญหา และมีคำตอบเท่ากับวิธี TS จำนวน 4 ปัญหา โดยมีค่าเฉลี่ยของคำตอบทั้งหมดมากกว่าคำตอบของวิธี TS 3.29% จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าวิธี WOA-LS มีประสิทธิภาพในการหาคำตอบที่ดี งานวิจัยในอนาคตสามารถนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปใช้ในการแก้ปัญหา HVRPTW อื่น โดยการพิจารณาลักษณะตำแหน่งที่ตั้งของลูกค้า ระยะเวลา และความจุของยานพาหนะ เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการหาคำตอบได้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] G. B. Dantzig and J. H. Ramser, "The truck dispatching problem," *Management Science.*, vol. 6, no. 1, pp. 80-91, 1959.
- [2] É. D. Taillard, "A heuristic column generation method for the heterogeneous fleet VRP," *RAIRO - Operations Research.*, vol. 33, pp. 1-14, 1999.
- [3] B. Golden, A. Assad, L. Levy and F. Gheysens, "The fleet size and mix vehicle routing problem," *Computers and Operations Research.*, vol. 11, pp. 49-66, 1984.
- [4] J. Ferland and P. Michelon, "The vehicle scheduling problem with multiple vehicle types," *Journal of the Operational Research Society.*, vol. 39, pp. 577-583, 1988.
- [5] F. Li, B. Golden and E. Wasil, "A record-to-record travel algorithm for solving the heterogeneous fleet vehicle routing problem," *Computers and Operations Research.*, vol. 34, no. 9, pp. 2734-2742, 2007.
- [6] J. Jiang, K. M. Ng, K. L. Poh, and K. M. Teo, "Vehicle routing problem with a heterogeneous fleet and time windows," *Expert Systems with Applications.*, vol. 41, no. 8, pp. 3748-3760, 2014.
- [7] M. M. Solomon, "Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints," *Operations Research.*, vol. 35, no. 2, pp. 254-265, 1987.
- [8] D. C. Paraskevopoulos, P. P. Repoussis, C. D. Tarantilis, G. Ioannou, and G. P. Prastacos, "A reactive variable neighborhood tabu search for the heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows," *Journal of Heuristics.*, vol. 14, no. 5, pp. 425-455, 2008.
- [9] J. C. Molina, J. L. Salmeron and I. Eguia, "An ACS-based memetic algorithm for the heterogeneous vehicle routing problem with time windows," *Expert Systems with Applications.*, vol. 157, p. 113379, 2020.
- [10] J. J. De La Cruz, C. D. Paternina-Arboleda, V. Cantillo, and J. R. Montoya-Torres, "A two-phomone trail ant colony system - Tabu search approach for the heterogeneous vehicle routing problem with time windows and multiple products," *Journal of Heuristics.*, vol. 19, no. 2, pp. 233-252, 2013.
- [11] S. Mirjalili and A. Lewis, "The whale optimization algorithm," *Advances in Engineering Software.*, vol. 95, pp. 51-67, 2016.
- [12] S. K. Dewi and D. M. Utama, "A new hybrid whale optimization algorithm for green vehicle routing problem," *Systems Science and Control Engineering.*, vol. 9, pp. 61-72, 2021.
- [13] A. S. Elmousel, O. M. Khairy, O. M. Shehata, and E. I. Morgan, "A Novel Discrete Whale Optimization Algorithm for Solving the Capacitated Vehicle Routing Problem," in *2021 7th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE)*, pp. 169-173, 2021.
- [14] J. Zhang, L. Hong, and Q. Liu, "An improved whale optimization algorithm for the traveling salesman problem," *Symmetry.*, vol. 13, no. 1, pp. 1-13, 2021.
- [15] S. Yodwangjai and K. Malampong, "An improved Whale Optimization Algorithm for vehicle routing problem with time windows," *The Journal of Industrial Technology.*, vol. 18, no. 1, pp. 104-122, 2022.

คำแนะนำการส่งต้นฉบับบทความ

คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความ

วารสารไทยการวิจัยดำเนินงาน (Thai Journal of Operations Research, TJOR) เป็นวารสารทางวิชาการ มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่งานวิจัยและบทความทางวิชาการทางเว็บไซต์ โดยได้รับการจัดกลุ่มวารสารที่ผ่านการรับรองคุณภาพของศูนย์ดัชนีอ้างอิงวารสารไทย TCI อยู่ในวารสารกลุ่มที่ 1 โดยวารสารไทยการวิจัยดำเนินงาน มีกำหนดออกปีละ 2 ฉบับ คือ ประมาณเดือนมิถุนายน และเดือนธันวาคมของทุกปี ซึ่งบทความที่ตีพิมพ์ในวารสารไทยการวิจัยดำเนินงานมี 3 ลักษณะ

1. บทวิเคราะห์หรือบทวิจารณ์ (Review Paper) เพื่ออธิบายการพัฒนาในหัวข้อการวิจัยดำเนินงานในช่วงที่ผ่านมา
2. บทความที่เน้นการประยุกต์ใช้ความรู้หรือวิธีการด้านการวิจัยดำเนินงาน เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในภาครัฐและเอกชน หรือองค์กรที่ไม่แสวงผลกำไร
3. บทความที่เน้นทฤษฎีหรือวิธีการด้านวิจัยดำเนินงานที่พัฒนาขึ้นจากแนวคิดของผู้วิจัย หรือเพิ่มเติมนองค์ความรู้เดิม

ขอบเขตเนื้อหาบทความ

ทฤษฎี (Theory) และระเบียบวิธี (Methodology) ของบทความที่สามารถส่งตีพิมพ์ในวารสารไทยการวิจัยดำเนินงานแบ่งเป็น 9 กลุ่มคือ

- Continuous Optimization
- Discrete Optimization
- Stochastic Processes and Statistics
- Simulation
- Heuristics and Meta-heuristics
- Production, Manufacturing and Logistics
- Decision Support in Manufacturing and Logistics
- Computational Intelligence in Manufacturing
- Data Analytics

หลักเกณฑ์ในการลงตีพิมพ์ต้นฉบับของวารสารไทยการวิจัยดำเนินงาน

1. ต้นฉบับที่ผู้เขียนส่งมาเพื่อการพิจารณาจะต้องไม่เคยตีพิมพ์ในวารสารใดวารสารหนึ่งมาก่อน
2. ต้นฉบับที่ผู้เขียนส่งมาเพื่อการพิจารณาต้องไม่อยู่ระหว่างเสนอขอตีพิมพ์ในวารสารอื่น
3. เนื้อหาในต้นฉบับควรเกิดจากการสังเคราะห์ความคิดขึ้นโดยผู้เขียนเองไม่ได้ลอกเลียน หรือตัดทอนมาจากผลงานวิจัยของผู้อื่น หรือจากบทความอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต หรือปราศจากการอ้างอิงที่เหมาะสม
4. ผู้เขียนต้องเขียนต้นฉบับตามรูปแบบที่กำหนดเท่านั้น
5. ผู้เขียนต้องแก้ไขบทความที่ส่งมาตีพิมพ์ตามข้อเสนอแนะของคณะผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Review) จนกว่าผู้ทรงคุณวุฒิหรือบรรณาธิการจะยอมรับบทความของท่าน โดยผู้ทรงคุณวุฒิมีสิทธิ์ปฏิเสธบทความได้ หากบทความไม่มีคุณภาพเพียงพอ
6. หลังจากผู้เขียนได้แก้ไขบทความแล้ว กองบรรณาธิการจะทำการตรวจสอบความถูกต้องอีกครั้งหนึ่ง ก่อนการตีพิมพ์

ขั้นตอนการส่งต้นฉบับบทความ

1. ต้นฉบับที่ผู้เขียนส่งมาเพื่อการพิจารณาจะต้องไม่เคยตีพิมพ์ในวารสารใดวารสารหนึ่งมาก่อน
2. ต้นฉบับที่ผู้เขียนส่งมาเพื่อการพิจารณาต้องไม่อยู่ระหว่างเสนอขอตีพิมพ์ในวารสารอื่น
3. กรณียังไม่ได้เป็นสมาชิกของระบบ Thai Journals Online (ThaiJO) ให้ลงทะเบียนผ่านเว็บไซต์ <http://www.tci-thaijo.org/index.php/TJOR/index> โดยเลือกเมนู register กรอกข้อมูลให้ครบถ้วนแล้วส่งข้อมูล ให้จำชื่อผู้ใช้งานและรหัสผ่านไว้ สำหรับเข้าระบบครั้งต่อไป
4. กรณีเป็นสมาชิกของระบบ Thai Journals Online (ThaiJO) แล้ว ให้เข้าสู่เว็บไซต์ <http://www.tci-thaijo.org/index.php/TJOR/index> เลือกเมนู Log in เพื่อเข้าสู่ระบบ และเริ่มต้นการส่งบทความโดย สามารถดาวโหลดคู่มือการส่งบทความผ่านระบบ Thai Journals Online ที่ <https://tci-thaijo.org/index.php/TJOR/index> โดยให้ส่งบทความต้นฉบับเป็นไฟล์นามสกุล .doc และ .pdf
5. กองบรรณาธิการวารสารรับต้นฉบับบทความ ผ่านทางระบบการส่งต้นฉบับในเว็บไซต์ หรือผ่านทางอีเมล orjournal.th@gmail.com
6. กองบรรณาธิการวารสารพิจารณาบทความขั้นต้น แล้วแจ้งผลการพิจารณาแก่ผู้นิพนธ์ หากบทความนั้น ผ่านการพิจารณาขั้นต้น กองบรรณาธิการจะส่งบทความนั้น ให้ผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้องพิจารณาบทความ และกองบรรณาธิการจะแจ้งผลการพิจารณาแก่ผู้นิพนธ์ภายใน 30 วัน หากมีการ

แก้ไขให้ผู้พิมพ์แก้ไขบทความตามที่ผู้ทรงคุณวุฒิประเมิน และนำผลงานที่แก้ไขปรับปรุงแล้วส่งให้แก่บรรณาธิการ/ผู้ประสานงานวารสาร ภายในระยะเวลาที่กำหนดหลังได้รับแจ้งผลการพิจารณา

7. สำหรับบทความที่ผ่านการประเมินจากผู้ทรงคุณวุฒิโดยไม่มีการแก้ไข นำส่งกองบรรณาธิการดำเนินการเผยแพร่ในวารสารตามช่วงเวลาที่เหมาะสม ทั้งนี้กองบรรณาธิการจะทำหนังสือตอบรับการตีพิมพ์ของท่านเป็นลายลักษณ์อักษร

****หมายเหตุ** ต้นฉบับบทความที่ไม่สมบูรณ์ หรือรูปแบบไม่ถูกต้อง จะถูกส่งคืนผู้เขียนบทความเพื่อแก้ไข ก่อนส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาต่อไป

รูปแบบและการจัดพิมพ์

1. บทความต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ แต่ละภาษาควรมีเพียงย่อหน้าเดียว และความยาวไม่เกิน 25 บรรทัด หรือไม่เกิน 1 หน้ากระดาษขนาด A4 (8.27 นิ้ว * 11.69 นิ้ว)
2. บทความทั้งหมดควรมีความยาวไม่เกิน 10 หน้ากระดาษ (รวมบทความย่อภาษาไทย บทความย่อภาษาอังกฤษและบรรณานุกรม)
3. พิมพ์ด้วยโปรแกรม Microsoft Word for Windows รูปแบบตัวอักษร TH Sarabun PSK ขนาดตัวอักษร ขนาด 14 แบบธรรมดา โดยจัดหน้าเป็นแบบ 2 คอลัมน์
4. รายละเอียดรูปแบบการจัดพิมพ์และการตั้งค่าต่างๆ นั้นสามารถดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์ <https://tci-thaijo.org/index.php/TJOR/index> เข้าเมนู Submission ► Click >>>> Article Template

สอบถามรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่ผู้ประสานงานวารสารฯ

นายบุญชนะ เมฆโต โทรศัพท์: 02-727-3038 โทรสาร 02-3744061

E-mail: orjournal.th@gmail.com

คณะสถิติประยุกต์ สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์

เลขที่ 148 ถ.เสรีไทย แขวงคลองจั่น เขตบางกะปิ กทม.10240

ISSN: 2822-1265 (Online)



วารสารไทยการวิจัยดำเนินงาน
Thai Journal of Operation Research