

การจัดตารางทรัพยากรสำหรับระบบโลจิสติกส์ขาเข้าแบบบูรณาการของโรงงานน้ำตาล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

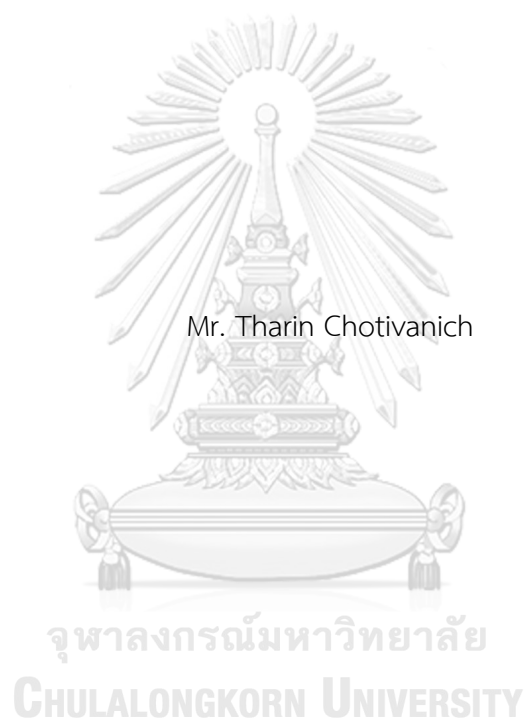
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

RESOURCE SCHEDULING FOR INTEGRATED INBOUND LOGISTICS
OF A SUGAR PRODUCER



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจัดตารางทรัพยากรสำหรับระบบโลจิสติกส์ขาเข้าแบบ บูรณาการของโรงงานน้ำตาล
โดย	นายธารินทร์ โชติวณิช
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิศิษฐ์ จารุมณีโรจน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมภรณ์พิลาศ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิศิษฐ์ จารุมณีโรจน์)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.นระเกณท์ พุ่มชูศรี)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชูเวช ชาญสง่าเวช)	

ธารินทร์ โชติวณิช : การจัดตารางทรัพยากรสำหรับระบบโลจิสติกส์ขาเข้าแบบบูรณาการ
ของโรงงานน้ำตาล . (RESOURCE SCHEDULING FOR INTEGRATED INBOUND
LOGISTICS OF A SUGAR PRODUCER) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.พิศิษฐ์ จารุณี
โรจน์

ระบบโลจิสติกส์ขาเข้าของอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลไทยประกอบไปด้วยเกษตรกรไร้อ้อยอยู่เป็นจำนวนมาก หากแต่มีทรัพยากรการเก็บเกี่ยวที่จำกัด อีกทั้งยังขาดการบริหารจัดการแบบรวมศูนย์ เกษตรกรส่วนใหญ่จึงจำเป็นต้องแย่งชิงการใช้ทรัพยากรการเก็บเกี่ยวในบางช่วงเวลา ส่งผลทำให้เกิดปัญหาการเผาอ้อยก่อนตัด ตลอดจนการสูญเสียคุณภาพน้ำตาลจากการรอเทอ้อยตามมา ผู้วิจัยได้ทำการแก้ปัญหาดังกล่าวผ่านตัวแบบจำลองการจัดตารางทรัพยากรการเก็บเกี่ยวแบบหลายวัตถุประสงค์ (MOHRSP) อีกทั้งยังได้ทำการพัฒนาวิธีการทางฮิวริสติกส์เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยอ้างอิงจากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (PSO) ในวิธีการดังกล่าว ผู้วิจัยยังได้สอดแทรกวิธีการค้นหาเฉพาะที่อีก 3 รูปแบบ เพื่อเพิ่มความรวดเร็วในการค้นหาคำตอบ ผู้วิจัยได้ทำการประเมินประสิทธิภาพของฮิวริสติกส์ที่พัฒนาขึ้น โดยทำการเปรียบเทียบคำตอบที่ได้กับคำตอบจาก CPLEX ที่มีการจำกัดระยะเวลาในการคำนวณบนปัญหาที่สุ่มสร้างขึ้นจำนวน 30 ปัญหา ทั้งนี้ ผู้วิจัยพบว่า วิธีการค้นหาคำตอบที่ออกแบบขึ้น ให้ผลการค้นหาที่ดีทั้งในปัญหาแบบวัตถุประสงค์เดียว และหลายวัตถุประสงค์ โดยคุณภาพของคำตอบที่ได้มีค่าใกล้เคียง หรือดีกว่าคำตอบของ CPLEX ในขณะที่ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่สั้นกว่ามาก อย่างไรก็ตาม ในการค้นหาคำตอบครั้งหนึ่ง ๆ ฮิวริสติกส์อาจให้กลุ่มคำตอบซึ่งไม่ถูกรอบงำเป็นจำนวนมาก ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอวิธีการในการคัดเลือกคำตอบ เพื่อช่วยให้ผู้มีอำนาจตัดสินใจสามารถเลือกตารางการทำงานที่เหมาะสมกับสถานการณ์ปัจจุบัน โดยยังสามารถสนองต่อความต้องการของผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในอุตสาหกรรมได้

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6170188621 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORD: Resource Scheduling, multi-objective, Vehicle Routing Problem,
Particle Swarm Optimization

Tharin Chotivanich : RESOURCE SCHEDULING FOR INTEGRATED INBOUND
LOGISTICS OF A SUGAR PRODUCER. Advisor: Asst. Prof. Pisit Jarumaneeroj,
Ph.D.

The inbound logistics of the Thai sugar industry is involving with many sugarcane growers but with limited harvesting resources operated in a decentralized fashion. Growers then need to compete over the resources in some periods causing subsequent problems, such as cane farm burning malpractices and quality losses from excessive waiting times. To address these issues, the multi-objective harvesting resource scheduling problem (MOHRSP) was herein developed and solved by a variant of particle swarm optimization (PSO). Three local searches were also embedded within the algorithmic framework to help enhance the computation time. In order to assess the performance of the proposed heuristic, the resulting PSO solutions were directly compared with those of the time-restricted CPLEX on 30 randomly generated instances. We found that the proposed algorithm performed quite well in both single-objective and multi-objective settings. In particular, the PSO solution quality was equal or better than CPLEX with comparatively less computational time in most cases. As the algorithm typically generated thousands of non-dominated solutions, we then proposed a selection scheme that selected a subset of solutions aligning with specific criteria so that planners would be able to select ones that best suited the situation while satisfying needs of related industrial players.

Field of Study: Industrial Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

การที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิศิษฐ์ จารุมนีโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้มอบความรู้ คำแนะนำอันมีค่า และความช่วยเหลือต่าง ๆ ตลอดการจัดทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ นายวิชฎะ ศรีตระกูล นายพรภวิชัย เนียมจ้อย นายอาทิตย์ โคตรแสนลี นางสาวอรุณรัตน์ วลีตขรพงศ์กุล นางสาวจุไรรัตน์ ฉิมระฆัง และ นางสาวณิชา กฤษณพันธ์ ที่คอยให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้ให้กำเนิด ที่คอยเป็นกำลังใจ และแรงสนับสนุนอันดีให้กับข้าพเจ้าตลอดมา



ธารินทร์ โชติวนิช

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	17
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	17
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	19
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	19
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	20
1.5 ผลงานวิจัย.....	21
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
2.1 วิธีการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดเชิงการจัดที่มีชุดของคำตอบที่เป็นไปได้แน่นอน.....	22
2.1.1 วิธีการแก้ปัญหาแบบฮิวริสติกส์ (Heuristic approach).....	23
2.1.2 วิธีการแก้ปัญหาแบบเมตาฮิวริสติกส์ (Metaheuristic approach).....	24
2.2 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization).....	27
2.2.1 ขั้นตอนการหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค.....	28
2.2.1.1 การสร้างอนุภาคเริ่มต้น.....	28
2.2.1.2 การถอดรหัส.....	29

2.2.1.3 การประเมินค่าตอบ (Fitness Evaluation).....	29
2.2.1.4 การปรับตำแหน่งที่ดีที่สุดของแต่ละอนุภาค (Personal best: <i>pbest</i>)	29
2.2.1.5 การปรับตำแหน่งที่ดีที่สุดของฝูง (Global best: <i>gbest</i>).....	30
2.2.1.6 การปรับความเร็วของอนุภาค (Velocity).....	30
2.2.1.7 การปรับตำแหน่งอนุภาค (Position).....	31
2.2.2 องค์ประกอบที่สำคัญของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค	32
2.2.2.1 จำนวนอนุภาคเริ่มต้น (Population size).....	32
2.2.2.2 ค่าคงที่ความเร่ง (Acceleration constants).....	33
2.2.2.3 เครือข่ายความเชื่อมโยงของสมาชิกในบริเวณใกล้เคียงกัน (Neighborhood topology).....	34
2.2.2.4 การวัดสมรรถนะในการค้นหาค่าตอบ (Performance measurement)	34
2.2.3 กลไกการปรับปรุงค่าตอบเพื่อหลบหนีจากค่าเหมาะสมที่สุดในระดับท้องถิ่น	35
2.2.3.1 An Improved Particle Swarm Optimization Algorithm with Repair Procedure	36
2.2.3.2 An Improved Particle Swarm Optimization Algorithm Based on Two Sub-swarms	37
2.3 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective Optimization)	37
2.3.1 หลักการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์.....	38
2.3.2 การกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับค่าตอบด้วยการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ	39
2.3.3 การวัดสมรรถนะของอัลกอริทึม.....	40
2.3.3.1 ตัวชี้วัดการลู่เข้ากลุ่มค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต.....	40
2.3.3.2 ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของค่าตอบ	41
2.3.3.3 ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านความหลากหลายของค่าตอบ.....	42
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)	44
2.4.1 ปัญหาการพยากรณ์ผลผลิต	44

2.4.1.1 การพยากรณ์โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์.....	44
2.4.1.2 การพยากรณ์โดยใช้ภาพถ่ายทางอากาศ.....	45
2.4.2 ปัญหาการเก็บเกี่ยวและขนส่ง.....	46
2.4.3 ปัญหาการกำลังการผลิต.....	51
2.5 สรุป.....	52
บทที่ 3 ระบบโลจิสติกส์ขาเข้าของสินค้าน้ำตาลในปัจจุบัน.....	57
3.1 ภาพรวมของอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลไทย.....	57
3.1.1 ระบบแบ่งปันผลประโยชน์.....	57
3.1.2 การกำหนดราคาอ้อยและน้ำตาลทราย (ก่อน - หลัง).....	58
3.1.3 ประเด็นปัญหา และแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลไทย .	61
3.2 รูปแบบการซื้อขายอ้อย – ระบบคู่สัญญา.....	62
3.2.1 การซื้อขายอ้อยในประเทศไทย.....	62
3.2.2 ความสำคัญของระบบคู่สัญญา.....	63
3.3 การเก็บเกี่ยว และการบรรทุกอ้อย.....	64
3.3.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อน้ำหนักและคุณภาพความหวานของอ้อย.....	64
3.3.2 ระบบการเก็บเกี่ยวและบรรทุกอ้อย.....	67
3.4 การจัดส่งอ้อยไปยังโรงงานน้ำตาล.....	68
3.4.1 การบรรทุกอ้อย.....	68
3.4.2 สถานีขนถ่ายอ้อย (Cane Station).....	69
3.5 ระบบคิวจัดส่งอ้อย – การจัดการหน้าลาน.....	69
3.5.1 ระบบคิวเสรี หรือระบบคิวเข้า.....	69
3.5.2 ระบบคิวล๊อค หรือระบบคิวออก.....	70
3.6 วิเคราะห์ระบบโลจิสติกส์ขาเข้า.....	70
3.7 สรุป.....	73

บทที่ 4 การออกแบบวิธีการจัดตารางทรัพยากร.....	74
4.1 แนวคิดการออกแบบวิธีการจัดตารางทรัพยากร	74
4.1.1 ประเด็นปัญหา.....	74
4.1.2 การกำหนดแนวทางแก้ไขปัญหา.....	76
4.1.3 การกำหนดขอบเขตของปัญหา	77
4.1.3.1 การจับกลุ่มให้กับพื้นที่เพาะปลูกของเกษตรกรเบื้องต้น	79
4.1.3.2 การจัดตารางการเก็บเกี่ยว และจัดส่งอ้อยโดยละเอียด	80
4.2 การออกแบบปัญหาการจัดตารางทรัพยากรโดยใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์.....	82
4.2.1 เซต และพารามิเตอร์ (Sets and Parameters).....	82
4.2.2 ตัวแปรตัดสินใจ	84
4.2.3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	85
4.2.3.1 Maximize z_1 : ผลผลิตน้ำตาลทรายของโรงงานน้ำตาล	85
4.2.3.2 Maximize z_2 : สัดส่วนกำไรจากการขายอ้อยเฉลี่ยรายคนของเกษตรกร	86
4.2.3.3 Minimize z_3 : ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรม	87
4.2.3.4 Minimize z_4 : ปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	87
4.2.4 ข้อจำกัด	88
4.2.4.1 ข้อจำกัดด้านการมอบหมายงาน	88
4.2.4.2 ข้อจำกัดด้านความสมดุลของการเคลื่อนที่	89
4.2.4.3 ข้อจำกัดด้านการเกิด Subtour	89
4.2.4.4 ข้อจำกัดในกระบวนการทำงาน	89
4.2.4.5 ข้อจำกัดของลำดับการจัดส่งอ้อย.....	90
4.2.4.6 ข้อจำกัดของตัวแปรตัดสินใจ	91
4.3 การกำหนดสมมติฐานสำหรับการออกแบบฮิวริสติกส์.....	91
4.4 การพัฒนาฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาการจัดตารางทรัพยากร	95

4.4.1 การกำหนดพารามิเตอร์ของ PSO.....	95
4.4.1.1 พารามิเตอร์ควบคุม.....	95
4.3.1.2 พารามิเตอร์ทั่วไป.....	96
4.4.2 การออกแบบการเข้ารหัสของอนุภาค	96
4.4.3 ข้อมูลนำเข้าของปัญหา.....	98
4.4.4 กระบวนการจัดเตรียมข้อมูล (Data Preprocessing).....	99
4.4.4.1 การคำนวณระยะเวลาเดินทางเฉลี่ยระหว่างแปลงเพาะปลูกอ้อย.....	100
4.4.4.2 การแบ่งแปลงเก็บเกี่ยวย่อยโดยใช้น้ำหนักบรรทุกเป็นเกณฑ์	100
4.4.4.3 การจัดกลุ่มแปลงเก็บเกี่ยวอ้อยให้กับรถตัดอ้อย.....	101
4.4.5 กระบวนการหาคำตอบของฮิวริสติกส์.....	106
4.4.5.1 การสร้างอนุภาคเริ่มต้น (Particles Generation).....	106
4.4.5.2 การหาผลเฉลยเริ่มต้นของอนุภาค (Initial Solution)	108
4.4.5.3 การแก้ไขตำแหน่งของอนุภาค	113
4.4.5.4 การค้นหาคำตอบเฉพาะที่ (Local Search)	118
4.4.5.5 การปรับปรุง และพัฒนาคำตอบ (Repair & Improvement Mechanism)จพาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	128
4.4.5.6 ภาพรวมของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาการจัดตารางทรัพยากร.....	131
4.5 สรุป	135
บทที่ 5 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	137
5.1 Instance Generation.....	137
5.1.1 การจำลองแปลงเพาะปลูกอ้อย.....	139
5.1.2 การจำลองทรัพยากรการเก็บเกี่ยว	141
5.2 โปรแกรมและอุปกรณ์การคำนวณ.....	141
5.3 ผลการทดสอบแบบวัตถุประสงค์เดียว.....	142

5.3.1 ปัญหาขนาดเล็ก.....	142
5.3.2 ปัญหาขนาดกลาง	149
5.3.3 ปัญหาขนาดใหญ่.....	154
5.4 ผลการทดสอบแบบหลายวัตถุประสงค์.....	158
5.4.1 ปัญหาขนาดเล็ก.....	159
5.4.2 ปัญหาขนาดกลาง	162
5.4.3 ปัญหาขนาดใหญ่.....	165
5.5 การคัดเลือกกลุ่มคำตอบจากขอบเขตที่เหมาะสมที่สุดเชิงพารेटโต.....	168
5.6 สรุป	175
บทที่ 6 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย.....	177
6.1 บทสรุปงานวิจัย	177
6.2 ข้อเสนอแนะ	179
บรรณานุกรม.....	181
ประวัติผู้เขียน.....	187

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2-1 ตารางเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียระหว่างวิธีแมนตรง และวิธีประมาณในการแก้ไขปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุด.....	26
ตารางที่ 2-2 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการในห่วงโซ่อุปทานขาเข้าของอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล.....	53
ตารางที่ 3-1 ตารางสรุปปัญหาที่พบในระบบโลจิสติกส์ขาเข้าของอุตสาหกรรมน้ำตาล.....	72
ตารางที่ 4-1 ตารางแสดงความสัมพันธ์เชิงส่งเสริมและขัดแย้งระหว่างประเด็นปัญหา.....	76
ตารางที่ 4-2 ตารางแสดงตัวอย่างการกำหนดช่วงของการเข้ารหัสอนุภาค.....	97
ตารางที่ 4-3 ตารางแสดงตัวอย่างการเข้ารหัส และถอดรหัสของอนุภาค.....	98
ตารางที่ 4-4 ตารางแสดงตัวอย่างข้อมูลนำเข้าพื้นฐานของพื้นที่เพาะปลูกอ้อย.....	99
ตารางที่ 4-5 ตารางแสดงตัวอย่างข้อมูลนำเข้าระยะทางระหว่างแปลงเพาะปลูกในหน่วยกิโลเมตร .	99
ตารางที่ 4-6 ตารางแสดงระยะเวลาการเดินทางระหว่างแปลงเพาะปลูกในหน่วยชั่วโมง	100
ตารางที่ 4-7 ตารางแสดงข้อมูลแปลงเก็บเกี่ยวย่อยที่ใช้พื้นที่ของรถบรรทุกเป็นเกณฑ์	101
ตารางที่ 4-8 ตารางแสดงตัวอย่างการหาผลเฉลยเริ่มต้นของอนุภาคสำหรับปัญหาขนาดเล็ก (1)...	112
ตารางที่ 4-9 ตารางแสดงตัวอย่างการหาผลเฉลยเริ่มต้นของอนุภาคสำหรับปัญหาขนาดเล็ก (2)...	112
ตารางที่ 4-10 ตารางแสดงตัวอย่างการหาผลเฉลยเริ่มต้นของอนุภาคสำหรับปัญหาขนาดเล็ก (3).	112
ตารางที่ 4-11 ตารางแสดงตัวอย่างการแก้ไขตำแหน่งของอนุภาคสำหรับปัญหาขนาดเล็ก	117
ตารางที่ 4-12 ตารางแสดงตัวอย่างของการค้นหาคำตอบเฉพาะสำหรับปัญหาขนาดเล็ก	127
ตารางที่ 5-1 ตารางแสดงพารามิเตอร์ หรือข้อมูลนำเข้าที่มีค่าคงที่.....	137
ตารางที่ 5-2 ตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาดเล็ก.....	142
ตารางที่ 5-3 ตารางแสดงสัดส่วนการมอบหมายงานให้กับทรัพยากรสำหรับปัญหาขนาดเล็ก	148
ตารางที่ 5-4 ตารางแสดงประสิทธิภาพการหาคำตอบของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาขนาดกลาง.....	150
ตารางที่ 5-5 ตารางแสดงสัดส่วนการมอบหมายงานให้กับทรัพยากรสำหรับปัญหาขนาดกลาง.....	153

ตารางที่ 5-6 ตารางแสดงประสิทธิภาพการหาคำตอบของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาขนาดใหญ่	154
ตารางที่ 5-7 ตารางแสดงสัดส่วนการมอบหมายงานให้กับทรัพยากรสำหรับปัญหาขนาดใหญ่	157
ตารางที่ 5-8 ตารางแสดงค่าประสิทธิภาพและผลเฉลยแบบหลายวัตถุประสงค์ของปัญหาขนาดเล็ก	159
ตารางที่ 5-9 ตารางแสดงค่าประสิทธิภาพและผลเฉลยแบบหลายวัตถุประสงค์ของปัญหาขนาดกลาง	162
ตารางที่ 5-10 ตารางแสดงค่าประสิทธิภาพและผลเฉลยแบบหลายวัตถุประสงค์ของปัญหาขนาดใหญ่	165
ตารางที่ 5-11 ตารางแสดงกลุ่มคำตอบที่ถูกคัดเลือกโดยใช้ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุดเป็นเกณฑ์ ...	169
ตารางที่ 5-12 ตารางแสดงกลุ่มคำตอบที่ถูกคัดเลือกโดยใช้สองวัตถุประสงค์เป็นเกณฑ์	170
ตารางที่ 5-13 ตารางเปรียบเทียบผลเฉลยแบบหลายวัตถุประสงค์โดยเฉลี่ยกับผลเฉลยจากการค้นหา คำตอบแบบวัตถุประสงค์เดียวสำหรับปัญหาขนาดใหญ่	172
ตารางที่ 5-14 ตารางเปรียบเทียบผลเฉลยแบบหลายวัตถุประสงค์โดยเฉลี่ยกับผลเฉลยจากการค้นหา คำตอบแบบวัตถุประสงค์เดียวสำหรับปัญหาขนาดกลาง	173
ตารางที่ 5-15 ตารางเปรียบเทียบผลเฉลยแบบหลายวัตถุประสงค์โดยเฉลี่ยกับผลเฉลยจากการค้นหา คำตอบแบบวัตถุประสงค์เดียวสำหรับปัญหาขนาดเล็ก	173

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปภาพที่ 1.1 ภาพรวมโลจิสติกส์ขาเข้าของสินค้าน้ำตาล	20
รูปภาพที่ 2.1 แผนภาพแสดงวิธีการค้นหาคำตอบแบบ PSO	27
รูปภาพที่ 2.2 การเข้ารหัสอนุภาคแบบทางอ้อม โดยการใช้การสุ่มแบบ Uniform.....	28
รูปภาพที่ 2.3 การถอดรหัสอนุภาคไปสู่ผลเฉลย วิธีเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก.....	29
รูปภาพที่ 2.4 การหาเวกเตอร์ความเร็วของแต่ละอนุภาค.....	31
รูปภาพที่ 2.5 ขั้นตอนการหาคำตอบด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค	32
รูปภาพที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ความเร่งกับพื้นที่การค้นหาของอนุภาค.....	33
รูปภาพที่ 2.7 แผนภาพแสดงคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาราทอแบบ 2 วัตถุประสงค์.....	39
รูปภาพที่ 2.8 กราฟแสดงอัตราการลดลงของน้ำตาลซูโครสในอ้อยต่อระยะเวลาหลังการเผาและเก็บเกี่ยวในหน่วยชั่วโมง	49
รูปภาพที่ 3.1 กระบวนการประเมินราคาอ้อย	60
รูปภาพที่ 3.2 แผนภาพแสดงข้อมูล PM 2.5 เทียบกับปริมาณอ้อยไฟไหม้ในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย	66
รูปภาพที่ 3.3 รายงานการผลิตน้ำตาลทรายฉบับปิดหีบของโรงงานทั่วประเทศ ฤดูกาลผลิต 2547/48 – 2556/57	66
รูปภาพที่ 3.4 โลจิสติกส์ขาเข้าของอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทราย	71
รูปภาพที่ 4.1 แผนภาพแสดงการจัดสรรทรัพยากรรถตัดอ้อยระหว่างเกษตรกรแบบเดิม.....	79
รูปภาพที่ 4.2 แผนภาพแสดงการจัดสรรทรัพยากรรถตัดอ้อยด้วยการจัดกลุ่มแบบ k-means.....	80
รูปภาพที่ 4.3 แผนภาพแสดงการจัดสรรทรัพยากรเก็บเกี่ยวอ้อยในแปลงอ้อยที่ 8 9 และ 10	81
รูปภาพที่ 4.4 แผนภาพแสดงการจัดตารางการเก็บเกี่ยว และจัดส่งอ้อยในแปลงที่ 8 9 และ 10	82
รูปภาพที่ 4.5 แผนภาพแสดงการไหลของข้อมูลภายในห่วงโซ่อุปทานของสินค้าน้ำตาล	93

รูปภาพที่ 4.6 แผนภาพแสดงกระบวนการจัดเตรียมข้อมูล	104
รูปภาพที่ 4.7 Pseudo Code แสดงขั้นตอนการนำเข้าข้อมูล การคำนวณระยะทาง และการแบ่ง แปลงเก็บเกี่ยวอ้อย.....	105
รูปภาพที่ 4.8 Pseudo Code แสดงขั้นตอนการจัดกลุ่มแปลงอ้อยด้วย PSO โดยใช้หลักของ k- means.....	105
รูปภาพที่ 4.9 Pseudo Code แสดงขั้นตอนการหาค่าความเหมาะสมของการจัดกลุ่มด้วยระยะทาง	106
รูปภาพที่ 4.10 Pseudo Code แสดงขั้นตอนการซ่อมแซมคำตอบของการจัดกลุ่มแปลงอ้อย	106
รูปภาพที่ 4.11 Pseudo Code แสดงการทำงานของโมดูลควบคุมการสร้างอนุภาคเริ่มต้น.....	108
รูปภาพที่ 4.12 แผนภาพแสดงกระบวนการหาผลเฉลยเริ่มต้นของอนุภาค	110
รูปภาพที่ 4.13 Pseudo Code แสดงโมดูลการหาผลเฉลยเริ่มต้นของอนุภาค	111
รูปภาพที่ 4.14 แผนภาพแสดงกระบวนการแก้ไขตำแหน่งของอนุภาค	115
รูปภาพที่ 4.15 Pseudo Code แสดงโมดูลการปรับแก้ตำแหน่งบนมิติคำตอบของอนุภาคตาม <i>gbest</i>	116
รูปภาพที่ 4.16 Pseudo Code แสดงโมดูลการค้นหาเฉพาะที่-การเปลี่ยนทรัพยากรเก็บเกี่ยวของ แปลงอ้อย.....	120
รูปภาพที่ 4.17 Pseudo Code แสดงโมดูลการค้นหาเฉพาะที่-การสลับทรัพยากรเก็บเกี่ยวระหว่าง แปลงอ้อย.....	122
รูปภาพที่ 4.18 Pseudo Code แสดงโมดูลการค้นหาเฉพาะที่-การสลับตารางเวลาของทรัพยากร เก็บเกี่ยว.....	124
รูปภาพที่ 4.19 แผนภาพแสดงการทำงานของโมดูลการค้นหาคำตอบเฉพาะที่	125
รูปภาพที่ 4.20 Pseudo Code แสดงโมดูลการค้นหาเฉพาะที่-การจัดชุดของโมดูลย่อย	125
รูปภาพที่ 4.21 แผนภาพแสดงกระบวนการค้นหาเฉพาะที่.....	126
รูปภาพที่ 4.22 แผนภาพแสดงกระบวนการปรับปรุง และพัฒนาคำตอบ.....	130
รูปภาพที่ 4.23 Pseudo Code แสดงโมดูลการปรับปรุง และพัฒนาคำตอบ	131

รูปภาพที่ 4.24 Pseudo Code แสดงกระบวนการทำงานหลักของฮิวริสติกส์ (1)..... 132

รูปภาพที่ 4.25 Pseudo Code แสดงกระบวนการทำงานหลักของฮิวริสติกส์ (2)..... 134

รูปภาพที่ 4.26 แผนภาพแสดงกระบวนการทำงานของฮิวริสติกส์ของปัญหาการจัดตารางทรัพยากร
..... 136

รูปภาพที่ 5.1 กราฟแสดงลำดับการลู่เข้าหาคำตอบของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาขนาดเล็ก..... 147

รูปภาพที่ 5.2 กราฟแสดงลำดับการลู่เข้าหาคำตอบของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาขนาดกลาง 152

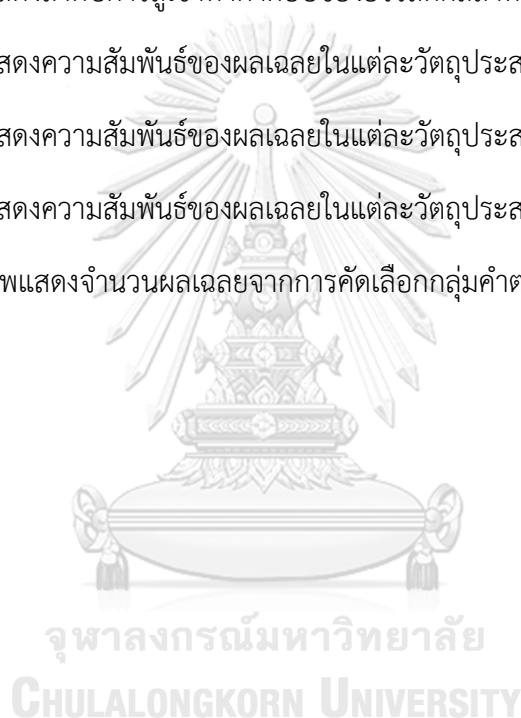
รูปภาพที่ 5.3 กราฟแสดงลำดับการลู่เข้าหาคำตอบของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาขนาดใหญ่ 156

รูปภาพที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของผลเฉลยในแต่ละวัตถุประสงค์ของปัญหาขนาดเล็ก 161

รูปภาพที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของผลเฉลยในแต่ละวัตถุประสงค์ของปัญหาขนาดกลาง... 164

รูปภาพที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของผลเฉลยในแต่ละวัตถุประสงค์ของปัญหาขนาดใหญ่.... 167

รูปภาพที่ 5.7 แผนภาพแสดงจำนวนผลเฉลยจากการคัดเลือกกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุด 170



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำตาลเป็นวัตถุดิบต้นน้ำที่มีบทบาทอย่างมากต่อชีวิตประจำวันของมนุษย์ และเป็นส่วนหนึ่งของโลกที่สำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของโลก ไม่ว่าจะเป็นในกลุ่มอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องดื่ม ยารักษาโรค หรือพลังงานทดแทน หากมองเพียงแต่การค้าขายน้ำตาลเพียงอย่างเดียว น้ำตาลนั้นทำให้เกิดการหมุนเวียนของเงินในตลาดโลกกว่า 39.52 พันล้านดอลลาร์สหรัฐในปี พ.ศ. 2560 (Chinmandi, 2018) โดยประเทศไทยจัดเป็นหนึ่งในผู้ผลิตและส่งออกน้ำตาลรายใหญ่ลำดับที่สองของโลก จากข้อมูลในปี พ.ศ. 2561 การส่งออกน้ำตาลของไทยเป็นรองเพียงประเทศบราซิล ซึ่งประเทศบราซิลมีส่วนแบ่งการตลาดอยู่ที่ 48.7% และไทยอยู่ที่ 13.8 % (เชษฐชุกดา เชื้อสุวรรณ, 2561) ทั้งนี้ความสามารถในการผลิตน้ำตาลจำนวนมากของประเทศไทยเป็นผลมาจากภูมิประเทศ และสภาพภูมิอากาศแบบเขตร้อนซึ่งเหมาะกับการเพาะปลูกอ้อยที่เป็นวัตถุดิบพื้นฐานสำคัญที่ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำตาล (ยกเว้นในพื้นที่ภาคใต้) โดยอ้อยที่ปลูกในประเทศไทยจะมีช่วงระยะเวลาการเก็บเกี่ยวที่ค่อนข้างแน่นอน คือ อยู่ระหว่างเดือน พฤศจิกายน จนถึงเดือน พฤษภาคมของทุกปี

อุตสาหกรรมน้ำตาลนับได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของไทยเป็นอย่างมาก มีบุคคล บริษัท และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องมากมาย ไม่ว่าจะเป็น เกษตรกรไร้อ้อยกว่า 427,395 ครัวเรือน (โรจน์ลักษณ์ ปรีชา et al., 2560) ที่เป็นกำลังสำคัญในการเพาะปลูก และจัดส่งอ้อยเพื่อเข้าแปรรูปเป็นน้ำตาล โรงงานน้ำตาลทั่วประเทศกว่า 57 แห่ง (ไทยชูการ์มิลเลอร์, 2561) กลุ่มสถาบันเกษตรกรไร้อ้อย หน่วยงานของรัฐที่เกี่ยวข้อง โรงงานไฟฟ้าที่รับเอากากอ้อยมาเป็นเชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้า ผู้ประกอบอาชีพการขนส่งอ้อยและน้ำตาล ร้านค้าปลีก/ส่ง ไปจนถึงกลุ่มอุตสาหกรรมข้างเคียงต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมเครื่องดื่ม หรืออุตสาหกรรมอาหารกระป๋อง ส่งผลให้เกิดการจ้างงาน และสร้างเงินทุนหมุนเวียนภายในประเทศกว่า 2.5 แสนล้านบาทต่อปี อีกทั้งยังมีส่วนสร้างรายได้เข้าประเทศผ่านทางส่งออกอีกไม่ต่ำกว่า 1.8 แสนล้านบาทต่อปีอีกด้วย (กระทรวงพาณิชย์, 2561) ทั้งนี้ในปีการผลิต พ.ศ. 2560/2561 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกอ้อยทั่วประเทศในเขตพื้นที่สำรวจจำนวนกว่า 11,542,550 ไร่ มีปริมาณอ้อยที่จัดส่งเข้าโรงงานประมาณ 134.93 ล้านตัน และสามารถผลิตน้ำตาลทรายได้กว่า 14.711 ล้านตัน (สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย

, 2561) โดยน้ำตาลจำนวนนี้จะถูกแบ่งเป็นส่วนที่บริโภคเองภายในประเทศประมาณ 25 – 30% และส่วนที่เหลืออีก 70 – 75% จะถูกแบ่งจัดเก็บ หรือส่งออกเพื่อขายต่อไป

ในช่วง 2 – 3 ปีที่ผ่านมา ราคาน้ำตาลทรายโลกลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยลดลงจากจุดสูงสุดของราคาน้ำตาลทรายดิบนิวยอร์ก no.11 เฉลี่ยที่ 22.53 เซนต์ต่อปอนด์ ในเดือนกันยายน ปี พ.ศ. 2559 เหลือเพียง 11.99 เซนต์ต่อปอนด์ ในเดือนเมษายน ปี พ.ศ. 2562 (Investing.com, 2020) ส่วนหนึ่งเป็นผลเนื่องมาจากปริมาณน้ำตาลทรายที่มากเกินไปเกินความต้องการของตลาดโลก นอกจากนี้พระราชบัญญัติภาษีสรรพสามิต พ.ศ. 2560 ในการจัดเก็บภาษีจากเครื่องดื่มไม่มีแอลกอฮอล์ตามปริมาณความหวาน ยังส่งผลให้เกิดการชะลอตัวของการซื้อขายน้ำตาลภายในประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับผู้ประกอบการผลิตเครื่องดื่ม หากแต่ต้นทุนการผลิตอ้อยของเกษตรกรกลับสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งในส่วนของราคาปุ๋ย ยาฆ่าแมลง ค่าแรงงานเพาะปลูกและดูแลรักษา ค่าแรงงานเก็บเกี่ยว น้ำมันเชื้อเพลิง รวมไปถึงค่าสาธารณูปโภคต่าง ๆ ทำให้ในขณะนี้ภาคเกษตรกรรมอ้อยของไทยอยู่ในสถานการณ์ที่น่าเป็นห่วง ทั้งจากการที่เกษตรกรบางส่วนเริ่มหันไปปลูกพืชเกษตรชนิดอื่นที่สามารถสร้างรายได้มากกว่า หรือจากสภาวะการเป็นหนี้สินต่อเนื่องของเกษตรกรที่เกิดจากการขายอ้อยได้ราคาต่ำกว่าต้นทุนซึ่งอาจนำไปสู่การสูญเสียที่ดินทำกิน โดยแนวโน้มปัญหาที่เกิดขึ้นกับส่วนต้นน้ำของอุตสาหกรรมนี้จะค่อย ๆ เติบโตขึ้นจนส่งผลกระทบต่อวงกว้างกับอุตสาหกรรมน้ำตาลของไทยทั้งระบบในที่สุด

จากการสำรวจได้แสดงให้เห็นว่า กว่าร้อยละ 60 ของต้นทุนการผลิตน้ำตาลทั้งหมดนั้นเกิดขึ้นภายในกิจกรรมโลจิสติกส์ขาเข้าของสินค้าน้ำตาล (กาญจนา เศรษฐนันท์, 2558) ซึ่งโดยส่วนมากแล้วมีสาเหตุมาจากการที่เกษตรกรร้อยละส่วนใหญ่ขาดการสื่อสาร และวางแผนในการเพาะปลูกหรือเก็บเกี่ยวอ้อย ทั้งกับเกษตรกรรายอื่น และกับโรงงานน้ำตาล ส่งผลให้เกิดการแย่งใช้งานทรัพยากรการเก็บเกี่ยวจากส่วนกลางที่ใช้งานร่วมกัน เช่น รถตัดอ้อย รถบรรทุก ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัด และเกิดความสูญเสียที่ไม่จำเป็นขึ้นในระบบมากมาย ไม่ว่าจะเป็นในส่วนของการรอคอยคิวเทอ้อยที่ยาวนานของรถบรรทุกที่หน้าโรงงานอันเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอในการจัดส่งอ้อยของเกษตรกรแต่ละรายทำให้อ้อยที่ส่งเข้าโรงงานเสื่อมสภาพจึงผลิตเป็นน้ำตาลได้น้อย และถูกรับซื้อในราคาต่ำ การสูญเสียรายได้ของเกษตรกรจากการขายอ้อยและผลิตภัณฑ์พลอยได้ หรือใบอ้อยเนื่องจากเก็บเกี่ยวด้วยวิธีการเผาตัดเพื่อลดความเร็วในการเก็บเกี่ยว ซึ่งสุดท้ายแล้วไม่มีผู้มีส่วนได้เสียคนใดในอุตสาหกรรมเลยที่ได้ประโยชน์จากการกระทำดังกล่าว ทั้งโรงงานน้ำตาลที่ได้รับอ้อยคุณภาพต่ำ เกษตรกรที่สูญเสียรายได้ อุตสาหกรรมโดยรวมสูญเสียผลผลิตน้ำตาลและผลิตภัณฑ์พลอย

ได้ที่ควรมีไปโดยเปล่าประโยชน์ และประชาชนที่อยู่อาศัยในพื้นที่เพาะปลูกอ้อยได้รับผลกระทบจากมลภาวะทางอากาศ การหาแนวทางเพื่อแก้ไขปัญหาข้างต้นในส่วนโลจิสติกส์ขาเข้าของสินค้าน้ำตาลจึงเป็นหนทางที่น่าจะเห็นผลได้รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพสูงสุดในการช่วยเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกรไร้อ้อย ให้สามารถดำรงชีพอยู่ได้อย่างยั่งยืน

ทั้งนี้จึงเป็นที่มาของความต้องการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ที่ต้องการออกแบบวิธีการจัดตารางทรัพยากรในระบบโลจิสติกส์ขาเข้าของสินค้าน้ำตาลโดยอาศัยการวางแผนการทำงานร่วมกันระหว่างเกษตรกรไร้อ้อยและโรงงานน้ำตาลอย่างเป็นระบบ ที่สามารถนำไปสู่การลดความสูญเสียที่ไม่จำเป็นซึ่งเกิดขึ้นกับผู้มีส่วนได้ส่วนเสียทุกฝ่ายในอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล ผู้วิจัยมีความคาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสามารถช่วยเป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันของอุตสาหกรรมน้ำตาลทรายไทยกับต่างชาติได้ไม่มากนักน้อย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

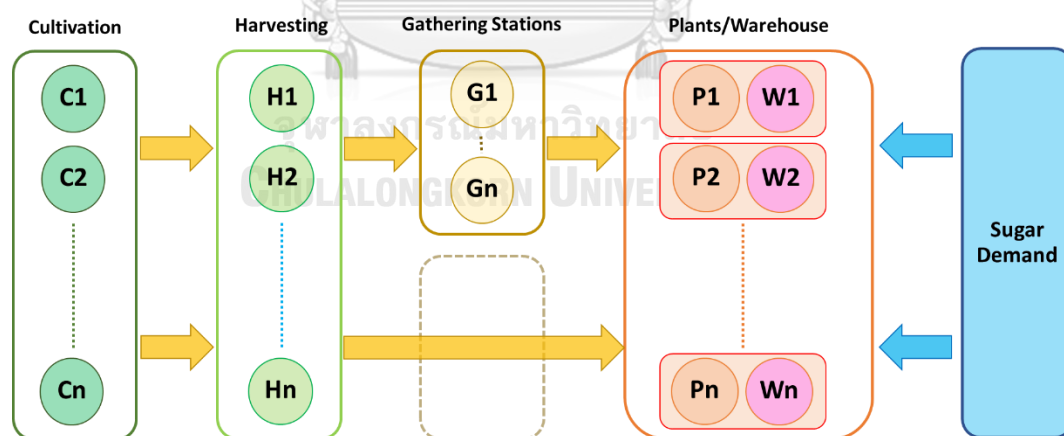
ออกแบบวิธีการจัดตารางทรัพยากรสำหรับระบบโลจิสติกส์ขาเข้าของโรงงานน้ำตาล เพื่อให้ผลผลิตน้ำตาลทรายของโรงงานน้ำตาล ผลกำไรเฉลี่ยจากการขายอ้อยและผลิตภัณฑ์พลอยได้ของเกษตรกร ค่าเสียโอกาสที่เกิดจากการเก็บเกี่ยวด้วยวิธีที่ไม่เหมาะสมและเวลาการรอคอยที่ไม่จำเป็น และปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยที่ถูกลบออกสู่สิ่งแวดล้อม ของระบบที่สนใจมีค่าเหมาะสมที่สุดตามหลักผลเฉลยพาเรโต

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- ศึกษารูปแบบของกิจกรรมโลจิสติกส์ขาเข้าของสินค้าน้ำตาล ในส่วนของกระบวนการเก็บเกี่ยวอ้อย กระบวนการขนส่งอ้อยจากไร่ไปยังโรงงานน้ำตาลโดยรถบรรทุก และกระบวนการตรวจรับอ้อยที่หน้าโรงงานน้ำตาล
- ออกแบบวิธีการจัดตารางทรัพยากรรายวันสำหรับระบบโลจิสติกส์ขาเข้าของโรงงานน้ำตาลจำนวน 1 โรง บนพื้นฐานของการบริหารจัดการจากส่วนกลาง (Centralization) โดยพิจารณาแปลงเพาะปลูกอ้อยเฉพาะที่ทำสัญญาซื้อขายอ้อยในพื้นที่โดยรอบโรงงาน ซึ่งจะมีการใช้ทรัพยากรทั้งหมดในระบบอันประกอบไปด้วย แรงงานตัดอ้อยสด แรงงานตัดอ้อยไฟไหม้ รถตัดอ้อย และรถบรรทุกอ้อยร่วมกัน
- ทดสอบผลของการจัดตารางทรัพยากรที่มีต่อ
 - ผลผลิตน้ำตาลทรายของโรงงานน้ำตาลในหน่วย ต้น-ซีซีเอส

- ผลกำไรเฉลี่ยจากการขายอ้อยและผลิตภัณฑ์พลอยได้ของเกษตรกรในหน่วย บาท
 - ค่าเสียโอกาสที่เกิดจากการเก็บเกี่ยวด้วยวิธีที่ไม่เหมาะสมและเวลาการรอคอยที่ไม่จำเป็นในหน่วย บาท
 - ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยที่ถูกละปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมในหน่วย kgCO_2
- เปรียบเทียบผลของวิธีจัดการทรัพยากรที่ออกแบบขึ้นกับ
- วิธีการจัดการทรัพยากรด้วยวิธีการหาคำตอบแบบแมนตรงโดยใช้วัตถุประสงค์เดียวเป็นเกณฑ์
- พิจารณาวิธีการคัดกรองผลเฉลี่ยที่เหมาะสมในมุมมองของผู้ตัดสินใจ หรือโรงงานน้ำตาลจากกลุ่มผลเฉลี่ยที่ได้จากวิธีจัดการทรัพยากรที่ออกแบบขึ้น

โดยกิจกรรมโลจิสติกส์ขาเข้าของสินค้าน้ำตาลที่สนใจศึกษาในช่วงต้นมีกิจกรรมข้างเคียงที่สำคัญคือ กระบวนการเพาะปลูกอ้อยของเกษตรกร และการพยากรณ์ความต้องการน้ำตาลของตลาดโลก ซึ่งโดยทั่วไปแล้วโรงงานน้ำตาลจะเป็นผู้รวบรวมข้อมูลดังกล่าวเพื่อนำมาวางแผนการเก็บเกี่ยว รวมถึงจัดตั้งสถานีรวบรวมอ้อยในพื้นที่ที่จำเป็นสำหรับการผลิต ทั้งนี้เราสามารถสร้างแผนภาพแสดงภาพรวมของโลจิสติกส์ขาเข้าของสินค้าน้ำตาลของทั้งอุตสาหกรรมแบบพอสังเขปได้ดังรูปภาพที่ 1.1



รูปภาพที่ 1.1 ภาพรวมโลจิสติกส์ขาเข้าของสินค้าน้ำตาล

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

- วิธีการจัดการทรัพยากรที่ออกแบบขึ้น สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางให้กับโรงงานน้ำตาลในการตัดสินใจวางแผน และประยุกต์ใช้กับการปฏิบัติงานจริง เพื่อเพิ่มความสามารถในการแข่งขันในธุรกิจได้

- วิธีการจัดตารางทรัพยากรที่ออกแบบขึ้น สามารถนำไปใช้เป็นพื้นฐานในการต่อยอดศึกษาผลกระทบของการจัดสัดส่วนทรัพยากรการเก็บเกี่ยวที่มีต่อระบบโลจิสติกส์ขาเข้าของอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลได้
- วิธีการจัดตารางทรัพยากรที่ออกแบบขึ้น สามารถใช้เป็นแบบอย่างของการเลือกปฏิบัติงานในกระบวนการโลจิสติกส์ขาเข้าของอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล ที่คำนึงถึงภาพรวมของอุตสาหกรรม และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้

1.5 ผลงานวิจัย

- วิธีการจัดตารางทรัพยากรที่ออกแบบขึ้น สามารถให้ผลลัพธ์เป็นตารางการเก็บเกี่ยวอ้อยภายในรอบเวลาวางแผนที่สนใจอันประกอบไปด้วย
 - เก็บเกี่ยวอ้อยในแปลงเพาะปลูกด้วยทรัพยากรการเก็บเกี่ยว และรถบรรทุกคันใด
 - เก็บเกี่ยวอ้อยในแปลงเพาะปลูกเมื่อไร
 - จัดส่งอ้อยที่ถูกเก็บเกี่ยวจากแปลงเพาะปลูกไปยังโรงงานน้ำตาลเมื่อไร
- วิธีการจัดตารางทรัพยากรที่ออกแบบขึ้น มีประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบแบบวัตถุประสงค์เดียวที่ดีกว่าวิธีการหาคำตอบแบบแมนตรง ทั้งในแง่ของระยะเวลาการค้นหาคำตอบ หรือคุณภาพของคำตอบ ในทุกขนาดปัญหา
- วิธีการจัดตารางทรัพยากรที่ออกแบบขึ้น มีประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์ที่ค่อนข้างดีในส่วนของดัชนีการลู่เข้าหากลุ่มคำตอบที่แท้จริงโดยประมาณสำหรับทุกขนาดปัญหา ในขณะที่ดัชนีการชี้วัดการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบให้ค่าที่ดีปานกลาง และค่อย ๆ มีค่าแย่งตามขนาดของปัญหาที่ใหญ่ขึ้น
- วิธีการจัดตารางทรัพยากรที่ออกแบบขึ้น ให้ผลลัพธ์การค้นหาคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์ที่มีความครอบคลุมทุกกลุ่มคำตอบจากการค้นหาคำตอบแบบวัตถุประสงค์เดียว โดยเมื่อคัดกรองผลเฉลยแล้วพบว่า มีความเป็นไปได้ในการจัดตารางทรัพยากรให้ผู้มีผู้มีอำนาจตัดสินใจหรือโรงงานน้ำตาลได้รับประโยชน์ หรือเสียประโยชน์เพียงเล็กน้อย ในขณะที่ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียรายอื่นในระบบ คือ เกษตรกร อุตสาหกรรมโดยภาพรวม และสิ่งแวดล้อม สามารถได้รับประโยชน์ที่มากขึ้นไปพร้อมกันได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบไปด้วย ทฤษฎีการหาผลเฉลยที่ดีที่สุดเชิงการจัดที่มีชุดของคำตอบที่เป็นไปได้แน่นอน ทฤษฎีการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มประสิทธิภาพของการเพาะปลูก เก็บเกี่ยว และจัดส่งอ้อย เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบวิธีการจัดตารางทรัพยากรสำหรับกิจกรรมโลจิสติกส์ขาเข้าของสินค้าน้ำตาล

2.1 วิธีการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงการจัดที่มีชุดของคำตอบที่เป็นไปได้แน่นอน (Approaches for Discrete Combinatorial Optimization Problem) (กาญจนา เศรษฐนันท์, 2558: 11-20)

การหาค่าเหมาะที่สุดเชิงการจัดที่มีชุดของคำตอบที่เป็นไปได้แน่นอน เป็นการหาค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดจากชุดของคำตอบที่สามารถเป็นไปได้ทั้งหมด (Set of feasible solutions) เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่ต้องการไม่ว่าจะเป็นในแง่ของการหาค่ามากที่สุด หรือค่าน้อยที่สุด ตัวอย่างของปัญหาข้างต้น เช่น ปัญหาการหาทำเลที่ตั้งที่เหมาะสม (Location & Allocation Problem: LAP) ปัญหาการจัดเส้นทางรถขนส่ง (Vehicle Routing Problem: VRP) และปัญหาการวางแผนและจัดตารางการผลิต (Production planning and scheduling) โดย (Blum and Roli, 2003) ได้อธิบายคุณสมบัติของปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงการจัดที่มีชุดของคำตอบที่เป็นไปได้แน่นอนโดยใช้หลักการทางคณิตศาสตร์ไว้ดังนี้ คือ ถ้าให้ $P = (S, f)$ แทนปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงการจัดที่มีชุดของคำตอบที่เป็นไปได้แน่นอนใด ๆ ปัญหาดังกล่าวจะสามารถถูกจำกัดความได้โดย

$$\begin{aligned}
 X &= \text{เซตของตัวแปร} \\
 &= \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \\
 D_i &= \text{ตัวแปรโดเมนที่ } i^{\text{th}} \\
 &= D_1, D_2, \dots, D_n \\
 f &= \text{ฟังก์ชันเป้าหมาย} \\
 &= f: D_1 \times D_2 \times \dots \times D_n \rightarrow IR^+
 \end{aligned}$$

S = เซตของคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด หรือปริภูมิการค้นหา

เมื่อ $S = \{(x_1, v_1), \dots, (x_n, v_n)\} | v_i \in D_i$ โดย s จะต้องทำให้ทุก ๆ เงื่อนไขเป็นจริง (Satisfy all constraints) ดังนั้น $s \in S$

เพื่อที่จะแก้ไขปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดเชิงการจัด (โดยในที่นี้จะยกตัวอย่างกรณีการหาค่าต่ำสุด) เราจะต้องหาค่า $s^* \in S$ ที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าต่ำที่สุด หรือ $f(s^*) \leq f(s); \forall s \in S$ โดย s^* คือ คำตอบที่เหมาะสมที่สุดของ (S, f) และเซต $s^* \subseteq S$ เรียกว่า เป็นเซตคำตอบที่ให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าต่ำสุด (Globally optimal solutions)

แนวทางการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดเชิงการจัดนั้นขึ้นอยู่กับจำเป็นต้องเลือกใช้ อัลกอริทึมที่เหมาะสมเพื่อให้แก้ปัญหาดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้อัลกอริทึมที่ใช้ในการหาผลเฉลยของปัญหาดังกล่าวสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท คือ การหาผลเฉลยด้วยวิธีแม่นยำตรง หรือแบบสมบูรณ์ (Exact/ Complete Algorithm) และการหาผลเฉลยด้วยวิธีการแบบประมาณ (Approximate Algorithm) อย่างไรก็ตามการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimal solution) ของปัญหาดังกล่าว เป็นไปได้อย่างยาก หรืออาจจะต้องใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่ยาวนาน เนื่องจากขนาดของปัญหาที่ใหญ่และมีความซับซ้อน ดังนั้นวิธีการหาผลเฉลยแบบประมาณซึ่งใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่น้อยกว่า หากแต่ได้ผลเฉลยที่ยอมรับได้จึงเป็นที่นิยมในการใช้งานมากกว่า ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทางผู้วิจัยเองก็ได้เลือกใช้วิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีแบบประมาณเช่นเดียวกัน

2.1.1 วิธีการแก้ปัญหาลักษณะฮิวริสติกส์ (Heuristic approach)

วิธีการแก้ปัญหาลักษณะฮิวริสติกส์ หมายถึง วิธีการแก้ปัญหาลักษณะฮิวริสติกส์ที่ออกแบบมาเพื่อใช้หาผลเฉลยสำหรับปัญหาใดปัญหาหนึ่งโดยเฉพาะ (Problem-dependent technique) ซึ่งต้องการข้อมูลที่เฉพาะเจาะจงเกี่ยวกับปัญหานั้น ๆ ไม่สามารถนำไปใช้เพื่อแก้ปัญหาลักษณะอื่นได้ และไม่สามารถรับประกันได้ว่าคำตอบที่ได้จะเป็นคำตอบที่ดีที่สุด หรือคำตอบที่เท่ากันทุกครั้ง วิธีการแก้ปัญหาลักษณะฮิวริสติกส์นี้ถูกนำมาใช้งานเนื่องจากการประหยัดทั้งเวลาในการคำนวณหาคำตอบและการสร้างตัวแบบ (Model) รวมไปถึงความง่ายในการทำความเข้าใจ และอธิบายถึงลักษณะวิธีการแก้ปัญหาลักษณะฮิวริสติกส์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามลักษณะวิธีการสร้างคำตอบ ดังนี้

- **วิธีการสร้างผลเฉลย (Constructive method)** เป็นวิธีที่อาศัยข้อมูลของปัญหาในการสร้างขั้นตอนวิธีการหาผลเฉลย โดยวิธีนี้แบ่งออกได้เป็น 2 ระยะ คือ ระยะแรก: การสร้างคำตอบเริ่มต้น (Phase 1: Initial solution development) และระยะที่ 2: การปรับปรุงคุณภาพคำตอบ (Phase 2: Solution improvement) ตัวอย่างของการหาคำตอบด้วยวิธีนี้ เช่น Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP)
- **วิธีฮิวริสติกส์แบบค้นหาคำตอบใกล้เคียง (Neighborhood search heuristic)** เป็นวิธีการสร้างคำตอบหนึ่งที่ไม่ขัดแย้งกับเงื่อนไขที่กำหนด แล้วทำการสลับตำแหน่งเพื่อหาคำตอบที่ดีขึ้นตามจำนวนรอบที่กำหนด ตัวอย่างของการหาคำตอบด้วยวิธีนี้ เช่น Simulated Annealing (SA)

2.1.2 วิธีการแก้ปัญหาแบบเมตาฮิวริสติกส์ (Metaheuristic approach)

วิธีการแก้ปัญหาแบบเมตาฮิวริสติกส์ เป็นวิธีที่ถูกพัฒนามาขึ้นจากวิธีการแก้ปัญหาแบบฮิวริสติกส์ ซึ่งมีความยืดหยุ่นสามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่ขึ้นกับปัญหา (Problem-independent techniques) และสามารถหาผลเฉลยของปัญหาที่ซับซ้อนและมีตัวแปรตัดสินใจจำนวนมากได้อย่างรวดเร็ว หากแต่ยังไม่สามารถรับประกันได้ว่าจะได้คำตอบที่ดีที่สุด หรือควบคุมคุณภาพของคำตอบให้ออกมาดีทุกครั้งได้ โดยวิธีการแก้ปัญหาแบบเมตาฮิวริสติกส์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

- **วิธีการหาผลเฉลยแบบเฉพาะที่ (Local search)** ใช้วิธีการกำหนดผลเฉลยเริ่มต้น s ซึ่งเป็นผลเฉลยหนึ่งในเซตของผลเฉลยที่เป็นไปได้ทั้งหมดบน S (Sample space) แล้วทำการค้นหาผลเฉลยที่ดีขึ้นไปเรื่อย ๆ โดยการหาผลเฉลยแบบเฉพาะที่นั้นแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ
 - การหาค่าผลลัพธ์เริ่มต้น (Initial solution) s เพื่อใช้เป็นจุดเริ่มต้นของการค้นหา
 - การพัฒนาผลเฉลยโดยเปรียบเทียบผลเฉลยเพื่อนบ้านกับ s (Neighborhood: $N(s)$) หรือ s' ซึ่งปกติจะเป็นจุดที่อยู่ไม่ห่างกันมาก โดยถ้าผลเฉลย s' ดีกว่า s ก็แทนที่ s ด้วย s'
 - การทำงานจะวนซ้ำขั้นตอนที่ 2 ไปจนกว่าจะได้คำตอบที่น่าพอใจ โดยใช้ฟังก์ชัน $f(s)$ เป็นเกณฑ์ในการชี้วัดความเหมาะสม
 - ในระหว่างกระบวนการหาผลเฉลย มีโอกาสที่คำตอบที่ได้จะลู่เข้าหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ (Local Optimum) ซึ่งไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุดโดยรวม

(Global Optimum) ดังนั้น จึงต้องมีวิธีการเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว โดยวิธีการทั่วไปที่นิยมกัน ได้แก่

- การเริ่มต้นใหม่: ทำการหาค่าผลลัพธ์เริ่มต้นใหม่ทุกครั้งที่ได้คำตอบผู้เข้าหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ แล้วจึงทำตามขั้นตอนข้างต้นซ้ำหลาย ๆ ครั้งเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด
- การเปลี่ยนวิธีการเลือกคำตอบ: เมื่อคำตอบผู้เข้าหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ จะทำการอนุญาตให้ยอมรับคำตอบจากผลเฉลยอื่น ๆ ซึ่งเป็นทางเลือก (Candidate solutions) ที่มีค่าคำตอบเท่าเดิม หรือแย่ลงได้ โดยวิธีนี้มีโอกาสที่จะทำให้ได้คำตอบที่หลุดออกจากผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ได้

โดยตัวอย่างของวิธีการหาผลเฉลยแบบเฉพาะที่ เช่น กลวิธีการค้นหาแบบปีนเขา (Hill climbing) กลวิธีการค้นหาแบบสปีดชันอย่างสูงชัน (Steepest descent) และวิธีการค้นหาต้องห้าม (Tabu search)

- **วิธีการค้นหาคำตอบโดยอาศัยกลุ่มประชากร (Population-based search)** อาศัยการสืบค้นคำตอบในปริภูมิการค้นหา (Search space) ด้วยการทำงานร่วมกันของประชากรที่คัดสรรขึ้นมา แล้วหาคำตอบที่ดีที่สุด ปัจจุบันวิธีการค้นหาคำตอบโดยอาศัยกลุ่มประชากรที่นิยมใช้งาน คือ

- **กระบวนการวิวัฒนาการตามธรรมชาติ (Evolutionary algorithm)** เป็นวิธีการหาคำตอบที่เลียนแบบกระบวนการวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตซึ่งมีทฤษฎีวิวัฒนาการของ Darwin เป็นพื้นฐาน โดยเทคนิคการคำนวณที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm: GA) และวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (Differential Evolution: DE) ซึ่งอาศัยการหาคำตอบแบบสุ่ม (Random sampling) จากปริภูมิการค้นหา แล้วเลือกคำตอบที่ดีที่สุดโดยหวังว่าคำตอบนั้นจะสามารถพัฒนาไปเป็นประชากรรุ่นใหม่ที่ดียิ่งขึ้นและนำไปสู่คำตอบสุดท้ายที่ดีที่สุดได้ โดยทั้ง 2 เทคนิคนี้แตกต่างกันที่วิธี GA จะทำการดัดแปลงตัวแปรตัดสินใจให้เป็นรหัสเลขฐานสอง (Binary Code) หากแต่วิธี DE จะใช้ค่าจริง (Floating point number)

- **กระบวนการเขาวนปัญญาเชิงการเคลื่อนที่กลุ่ม (Swarm Intelligence)** เป็นวิธีการที่เลียนแบบพฤติกรรมของฝูงสัตว์ ซึ่งเป็นระบบแบบกระจายศูนย์ที่ประกอบด้วยสมาชิกจำนวนหนึ่ง (หรือเรียกว่า เอเจนต์) ซึ่งสมาชิกทุกตัวนี้จะปฏิบัติตามชุดคำสั่งหนึ่ง ๆ เช่น การเคลื่อนที่ด้วยทิศทาง และความเร็วที่อ้างอิงจาก “จ่าฝูง” โดยสมาชิกแต่ละตัวจะมีปฏิสัมพันธ์กันเองหรือกับสิ่งแวดล้อม ทำการแลกเปลี่ยนข้อมูลความจำแล้วก่อให้เกิดเขาวนปัญญาในภาพรวมขึ้นมา ตัวอย่างเทคนิคที่อยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยระบบอาณาจักรมด (Ant Colony Optimization) และวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization)

ทั้งนี้เราสามารถสรุปลักษณะ ข้อดี ข้อเสีย ของแนวทางในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่สอดคล้องการจัดแบบต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 2-1

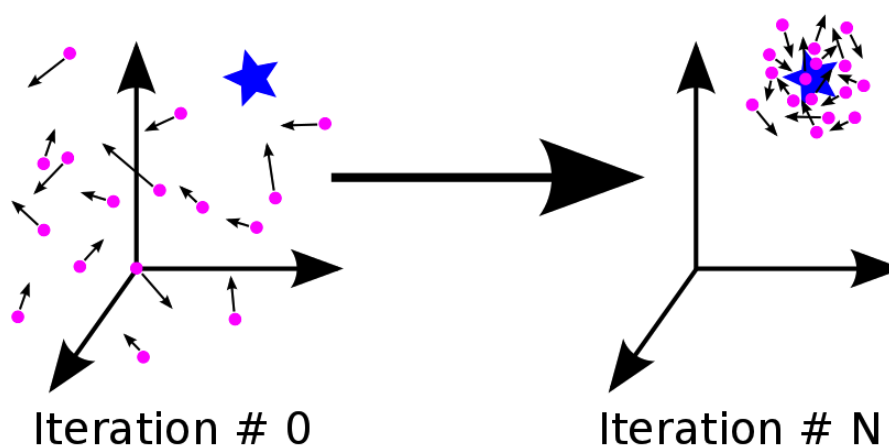
ตารางที่ 2-1 ตารางเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียระหว่างวิธีแมนตรง และวิธีประมาณในการแก้ไขปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด

ชนิด	ลักษณะ	ข้อดี	ข้อเสีย	
วิธีแมนตรง	สร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์โดยพิจารณาเงื่อนไข (Constraints) ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ได้ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด	ได้คำตอบที่ดีที่สุด (Optimal solution)	ใช้เวลาในการคำนวณผลที่นาน โดยเฉพาะปัญหาเอ็นพีแบบยากหรือปัญหาเอ็นพีบริบูรณ์	
วิธีประมาณ	วิธีฮิวริสติกส์	แก้ปัญหาเพื่อให้ได้ผลแบบประมาณ โดยวิธีแก้ปัญหาหนึ่งอาจจะไม่สามารถนำไปใช้แก้ปัญหาอื่นได้	ใช้เวลาในการคำนวณสั้นเหมาะกับปัญหาที่ไม่ซับซ้อนมาก	อาจไม่ได้คำตอบที่ดีที่สุด และอาจจะมีประสิทธิภาพต่ำเมื่อใช้กับปัญหาขนาดกลางหรือขนาดใหญ่
	เมตะฮิวริสติกส์	แก้ปัญหาเพื่อให้ได้ผลแบบประมาณ โดยวิธีแก้ปัญหาหนึ่งสามารถนำไปใช้แก้ปัญหาอื่นได้ มีรูปแบบหลัก ๆ คือ การค้นหาเฉพาะที่ และ การค้นหาโดยอาศัยกลุ่มประชากร	ใช้เวลาในการคำนวณสั้น	อาจไม่ได้คำตอบที่ดีที่สุด

2.2 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) (กาญจนา เศรษฐนันท์, 2558: 109-120)

(Kennedy and Eberhart, 1995) ได้นำเสนอวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคขึ้น โดยเป็นวิธีการหาค่าตอบที่เลียนแบบพฤติกรรมตามธรรมชาติในการหาอาหารเป็นกลุ่มของฝูงสัตว์ เช่น นก ปลา หรือฝูง ซึ่งสมาชิกแต่ละตัว (Individuals) จะมีกลไกในการเรียนรู้ และค้นหาค่าตอบโดยอาศัยทั้งประสบการณ์ส่วนตัว (Cognitive learning) และการแลกเปลี่ยนความรู้ระหว่างสมาชิกในกลุ่ม (Social learning)

โดยทั่วไปแล้วคำตอบที่เป็นไปได้ของกระบวนการหาค่าตอบแบบ PSO จะถูกเรียกว่า “อนุภาค” (Particle) ซึ่งแต่ละอนุภาคจะถูกนำเสนอในลักษณะของเวกเตอร์ หรือเมทริกซ์ที่มีขนาด n มิติ (Dimension) และเมื่อนำทุกอนุภาคมารวมเข้าไว้ด้วยกันจะเรียกได้ว่าเป็น “ฝูง” (Swarm) โดยกระบวนการหาค่าตอบแบบ PSO จะให้อนุภาคเริ่มต้นที่เกิดจากการสุ่มตำแหน่ง ทำการเคลื่อนที่ หรือ “บิน” (Flown) ไปตามพื้นที่ค้นหาค่าตอบที่มีหลายมิติ (Hyperdimensional search space) ซึ่งเมื่อให้ $x_i(t)$ แสดงถึงตำแหน่งของอนุภาค i ณ รอบการคำนวณ (Iteration) ที่ t ตำแหน่งของอนุภาค i ที่อยู่ภายในพื้นที่ค้นหาค่าตอบ หรือปริภูมิคำตอบ (Solution space) จะถูกปรับโดยพิจารณาจากผลรวมกับเวกเตอร์ความเร็ว $v_i(t)$ ของอนุภาคนั้น ๆ ซึ่งหลังจากทำการอ้างอิงตามประสบการณ์ของตน และพฤติกรรมของอนุภาคสมาชิกในบริเวณเดียวกันแล้ว ตำแหน่งของอนุภาคจะค่อย ๆ ลู่เข้าหาค่าคำตอบที่บริเวณเดียวกันในรอบการคำนวณที่มากขึ้น เช่น จากตำแหน่งเริ่มต้นที่รอบการคำนวณ 0 อนุภาคมีการกระจายตัวอยู่ทั่วพื้นที่ค้นหาค่าตอบ แต่เมื่อรอบการคำนวณเพิ่มขึ้น อนุภาคจะเคลื่อนตัวลู่เข้าไปยังตำแหน่งสุดท้าย ในรอบการคำนวณที่ N ดังแสดงในรูปภาพที่ 2.1



รูปภาพที่ 2.1 แผนภาพแสดงวิธีการค้นหาค่าตอบแบบ PSO

(Jonathan Becker, 2013)

2.2.1 ขั้นตอนการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค

เราสามารถสรุปอัลกอริทึมกระบวนการค้นหาคำตอบแบบ PSO อย่างง่ายได้ทั้งหมด 7 ขั้นตอน คือ การสร้างอนุภาคเริ่มต้น การถอดรหัส การประเมินคำตอบ การปรับตำแหน่งที่ดีที่สุดของแต่ละอนุภาค การปรับตำแหน่งที่ดีที่สุดของฝูง การปรับความเร็วของอนุภาค และการปรับตำแหน่งอนุภาค โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.1.1 การสร้างอนุภาคเริ่มต้น

วิธีการ PSO จะเริ่มจากการสุ่มค่าคำตอบ หรือตำแหน่งเริ่มต้นของแต่ละอนุภาคภายในขอบเขตของปริภูมิคำตอบ (Solution space) เพื่อให้สามารถเริ่มต้นทำการหาผลเฉลยได้จากตำแหน่งที่แตกต่างกัน โดยแต่ละอนุภาคจะประกอบด้วยคุณสมบัติในหลายมิติเพื่อใช้เป็นตัวแทนของตัวแปรตัดสินใจที่แตกต่างกันในแต่ละปัญหา และคำตอบของอนุภาคเหล่านี้จะถูกเข้ารหัสซึ่งแยกย่อยได้เป็น 2 แบบ คือ

- การแทนคำตอบของปัญหาโดยตรง (Directly) เช่น การใช้ชุดตัวเลขไบนารี 1 แทนการเลือกใช้งาน และ 0 แทนการไม่เลือก
- การเข้ารหัสแบบทางอ้อม (Indirectly) เช่น ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Travelling Salesman Problem) ที่ต้องการให้พนักงานเดินทางไปยังเมือง 5 เมือง โดยต้องเดินทางไปให้ครบทุกเมือง และมีระยะเดินทางรวมสั้นที่สุด สามารถเลือกใช้วิธีการการสุ่มตัวเลขระหว่าง 0 – 1 (Uniform random number) ให้กับแต่ละมิติของอนุภาค ซึ่งจะใช้แต่ละมิติแทนเมืองแต่ละเมือง ดังแสดงในรูปภาพที่ 2.2 ก่อนจะนำผลการสุ่มตัวเลขนั้นมาถอดรหัส ด้วยวิธีการจัดลำดับความสำคัญของผลเฉลย (Rank of value: ROV)

	มิติที่ 1	มิติที่ 2	มิติที่ 3	มิติที่ 4	มิติที่ 5
อนุภาคที่ n	0.765	0.998	0.993	0.316	0.568

รูปภาพที่ 2.2 การเข้ารหัสอนุภาคแบบทางอ้อม โดยใช้การสุ่มแบบ Uniform

(กาญจนา เศรษฐนันท์, 2558)

2.2.1.2 การถอดรหัส

หากการสร้างอนุภาคเริ่มต้นที่มีการเข้ารหัสด้วยการแทนค่าตอบของปัญหาโดยตรง จะสามารถหาผลเฉลยและประเมินค่าคำตอบได้เลย แต่ในกรณีการเข้ารหัสแบบทางอ้อม เช่น การใช้วิธีจัดลำดับความสำคัญของผลเฉลยจากรูปภาพที่ 2.2 การถอดรหัสอนุภาคด้วยวิธีการจัดลำดับความสำคัญจากน้อยไปหามากไปสู่ผลเฉลย จะต้องนำข้อมูลของแต่ละมิติมาเรียงลำดับใหม่ก่อน จึงจะสามารถหาคำตอบที่ต้องการได้ ดังแสดงในรูปภาพที่ 2.3

	มิติที่ 4	มิติที่ 5	มิติที่ 1	มิติที่ 3	มิติที่ 2
อนุภาคที่ n	0.316	0.568	0.765	0.993	0.998

รูปภาพที่ 2.3 การถอดรหัสอนุภาคไปสู่ผลเฉลย วิธีเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก
(กาญจนา เศรษฐนันท์, 2558)

2.2.1.3 การประเมินคำตอบ (Fitness Evaluation)

การประเมินคำตอบทำได้ด้วยวิธีการแทนค่าคำตอบของแต่ละอนุภาคที่ผ่านการถอดรหัสแล้ว ลงไปยังฟังก์ชันเป้าหมาย เพื่อทราบว่าในตำแหน่งของอนุภาคหนึ่ง ๆ ภายในพื้นที่ปริภูมิการค้นหานั้น ให้ค่าผลเฉลยอย่างไร เช่น จากปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย ในหัวข้อ 2.3.1.1 จะใช้วิธีการนำลำดับเมืองที่ถูกนำมาเรียงใหม่ (หรือถอดรหัส) แล้ว มาเพื่อคำนวณหาระยะทางรวม โดยในที่นี้ จากรูปภาพที่ 2.3 จะได้ลำดับการเดินทางของพนักงาน คือ เมืองที่ 4 → เมืองที่ 5 → เมืองที่ 1 → เมืองที่ 3 → เมืองที่ 2

2.2.1.4 การปรับตำแหน่งที่ดีที่สุดของแต่ละอนุภาค (Personal best: $pbest$)

หนึ่งในคุณสมบัติที่สำคัญของกระบวนการหาคำตอบแบบ PSO คือ ความสามารถในการจดจำ โดยแต่ละอนุภาคจะจดจำตำแหน่งที่ให้ค่าผลเฉลยที่ดีที่สุดที่ตนเองเคยพบเจอมา แล้วจึงทำการปรับเปลี่ยนค่าเมื่อพบผลเฉลยที่ดีกว่าในรอบคำนวณถัดไป เช่น $f(x_i(t+1)) \leq f(x_{pbest_i}(t))$ ในกรณีหาค่าต่ำสุด (Minimization) หรือ $f(x_i(t+1)) \geq f(x_{pbest_i}(t))$ ในกรณีหาค่าสูงสุด (Maximization) อนุภาคจะทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้โดยสามารถเขียนการจดจำค่าใหม่ของอนุภาคเป็นสมการได้ดัง (2.1)

$$x_{pbest_i}(t+1) = x_{pbest_i}(t) \quad (2.1)$$

2.2.1.5 การปรับตำแหน่งที่ดีที่สุดของฝูง (Global best: g_{best})

อีกคุณสมบัติหนึ่งที่สำคัญของกระบวนการหาคำตอบแบบ PSO คือ การแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างสมาชิกภายในกลุ่มหรือฝูง เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการปรับตำแหน่งของอนุภาค โดยข้อมูลที่แลกเปลี่ยนกัน คือ ตำแหน่งของอนุภาคที่ให้ผลเฉลยที่ดีที่สุดในรอบการคำนวณที่ผ่านมา ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดัง (2.2)

$$x_{g_{best}}(t) = \operatorname{argmin}_i f(x_{p_{best}_i}(t)) \quad (2.2)$$

2.2.1.6 การปรับความเร็วของอนุภาค (Velocity)

การค้นหาคำตอบจะเกิดขึ้นได้โดยการปรับเปลี่ยนตำแหน่งใหม่ของอนุภาคในทุก ๆ รอบคำนวณ โดยมีเวกเตอร์ความเร็วเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ใช้ในการบอกทิศทางและปรับค่าตำแหน่งของอนุภาคในรอบคำนวณถัดไป ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.3) นี้

$$\vec{v}_i(t+1) = \underbrace{\vec{v}_i(t)}_{\text{Inertia}} + \underbrace{c_p r_1 (\vec{x}_{p_{best}_i} - \vec{x}_i(t))}_{\text{Cognitive Learning}} + \underbrace{c_g r_2 (\vec{x}_{g_{best}_i} - \vec{x}_i(t))}_{\text{Social Learning}} \quad (2.3)$$

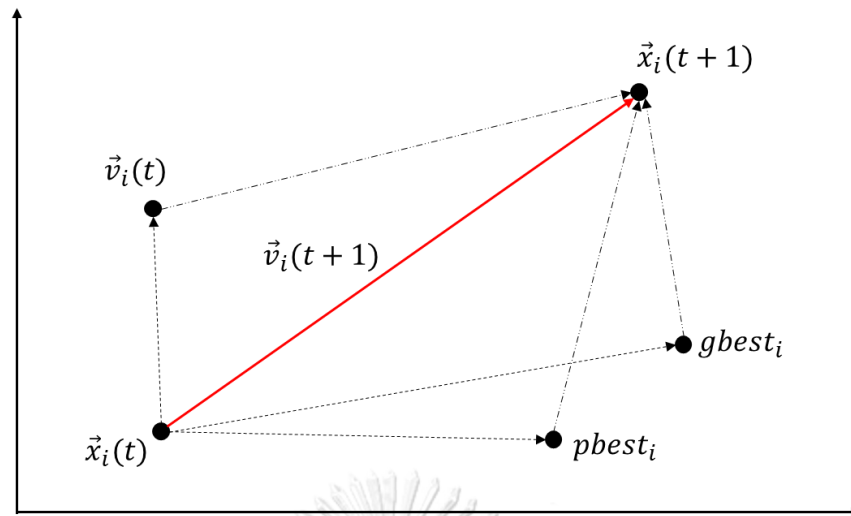
เมื่อ c_p, c_g = ค่าคงที่ความเร่งของ p_{best} และ g_{best}

r_1, r_2 = เวกเตอร์ที่ได้จากการสุ่มตัวเลขระหว่าง 0 – 1 (Uniform) ในแต่ละมิติของอนุภาค

โดยจากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อเวกเตอร์ความเร็วนั้นมีอยู่ 3 ปัจจัย คือ

- ความเร็วหรือทิศทางเคลื่อนที่ในปัจจุบันของอนุภาค จะส่งผลให้อนุภาคหนึ่ง ๆ เคลื่อนที่หรือปรับตำแหน่งต่อไปในทิศทางเดิมอย่างต่อเนื่อง หากไม่มีอิทธิพลจากปัจจัยอื่นเข้ามาเกี่ยวข้อง
- การเรียนรู้จากประสบการณ์ (Cognitive Learning) เกิดจากผลต่างระหว่างตำแหน่ง p_{best} ของอนุภาคหนึ่ง ๆ กับตำแหน่งในรอบการคำนวณปัจจุบัน
- การแลกเปลี่ยนข้อมูลในกลุ่ม (Social Learning) เกิดจากผลต่างระหว่างตำแหน่ง g_{best} ของฝูง กับตำแหน่งของอนุภาคในรอบการคำนวณปัจจุบัน

ทั้งนี้การคำนวณหาเวกเตอร์ความเร็วของแต่ละอนุภาคสามารถแสดงได้ดังรูปภาพที่ 2.4



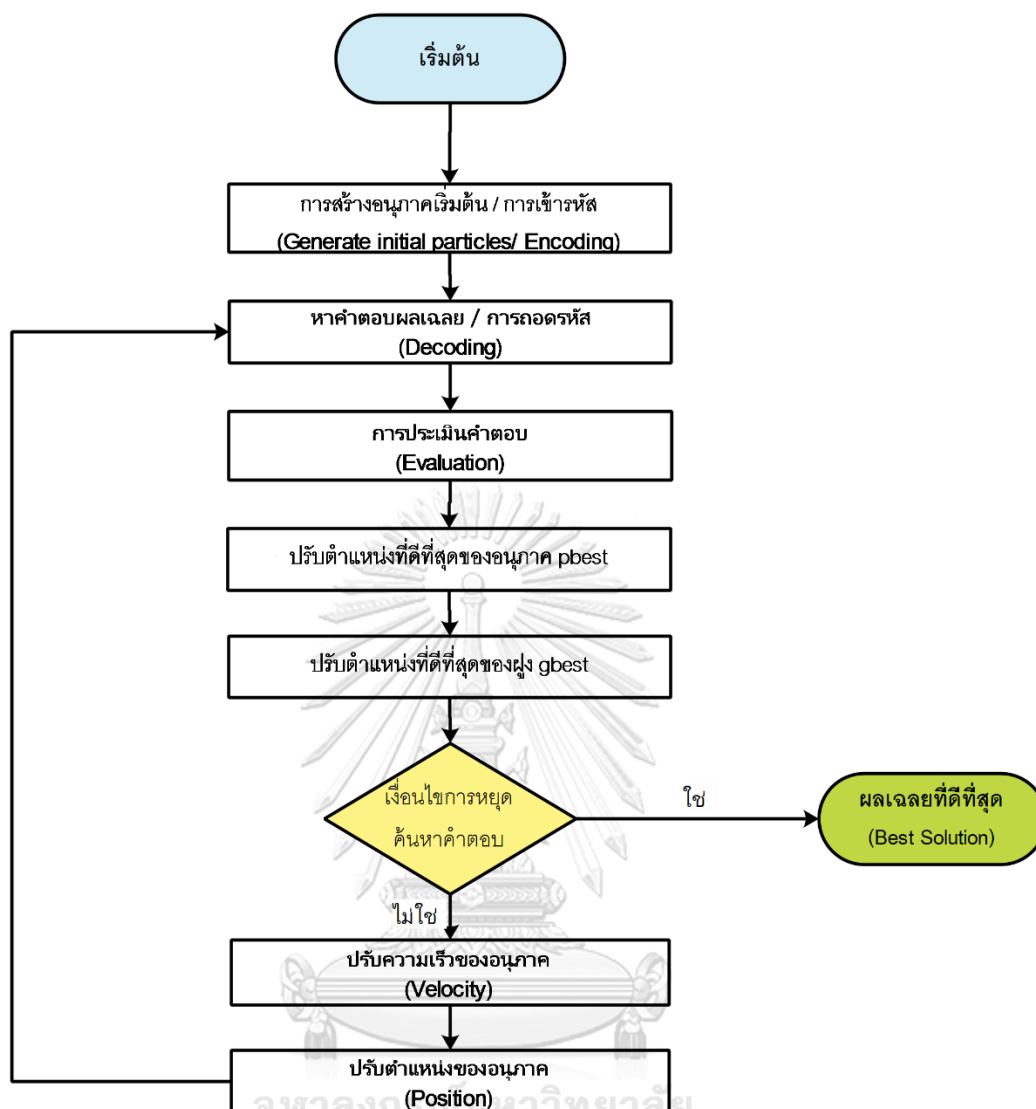
รูปภาพที่ 2.4 การหาเวกเตอร์ความเร็วของแต่ละอนุภาค

2.2.1.7 การปรับตำแหน่งอนุภาค (Position)

เมื่อได้เวกเตอร์ความเร็วของแต่ละอนุภาคแล้ว PSO จะทำการปรับตำแหน่งของอนุภาคเพื่อใช้ในรอบการคำนวณถัดไปได้ดังสมการ (2.4)

$$\vec{x}_i(t+1) = \vec{x}_i(t) + \vec{v}_i(t+1) \quad (2.4)$$

โดยขั้นตอนที่ 2 – 7 จะถูกทำซ้ำไปจนกว่าจะครบรอบการคำนวณที่กำหนด หรือจนกว่าจะได้คำตอบในเงื่อนไขที่ต้องการ โดยสามารถแสดงแผนภาพขั้นตอนการหาคำตอบแบบ PSO อย่างง่ายได้ดังรูปภาพที่ 2.5



รูปภาพที่ 2.5 ขั้นตอนการหาคำตอบด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค

2.2.2 องค์ประกอบที่สำคัญของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค

จากขั้นตอนการหาคำตอบแบบ PSO ในหัวข้อ 2.2.1 เราสามารถระบุองค์ประกอบสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของ PSO ได้ 4 ประการ คือ จำนวนอนุภาคเริ่มต้น ค่าคงที่ความเร็ว เครื่องหมายความเชื่อมโยงของสมาชิกในบริเวณเดียวกัน และการวัดสมรรถนะในการค้นหาคำตอบ โดยมีแต่ละองค์ประกอบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

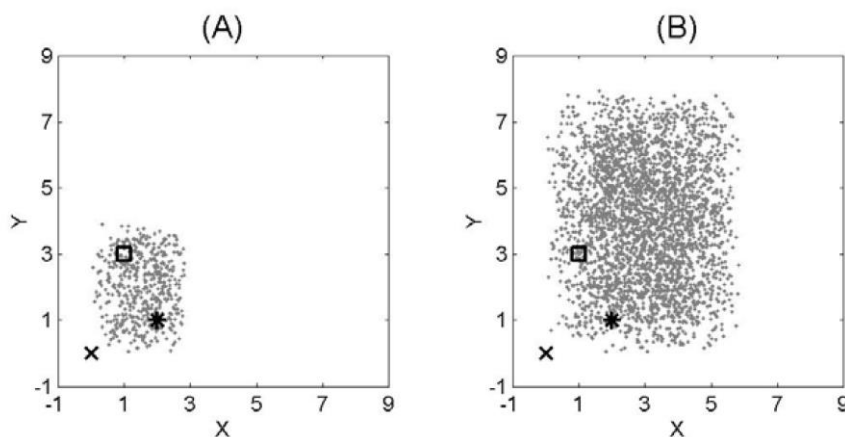
2.2.2.1 จำนวนอนุภาคเริ่มต้น (Population size)

จำนวนอนุภาคเริ่มต้นเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการค้นหา เนื่องจากจำนวนอนุภาคที่มากขึ้นจะทำให้ฝูงมีโอกาสค้นหาคำตอบได้ทั่วปริภูมิการค้นหา และนำไปสู่การค้นพบ

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (Global solution) ได้ง่ายกว่าฝูงที่มีจำนวนอนุภาคน้อย แต่จำนวนอนุภาคที่มากขึ้นจะส่งผลกับเวลาการในประมวลผลที่นานขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้นการทดลองเพื่อพิจารณาหาจำนวนอนุภาคที่เหมาะสมในแต่ละปัญหาจึงเป็นสิ่งจำเป็น ซึ่งโดยส่วนมากแล้วจะดำเนินการโดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลเฉลย (Fitness value) กับจำนวนรอบของการคำนวณ (Iteration) แล้วสังเกตลักษณะพฤติกรรมการลู่เข้าของคำตอบ โดยจำนวนอนุภาคเริ่มต้นที่เหมาะสมจะต้องไม่น้อยเกินไปเพื่อป้องกันการลู่เข้าของคำตอบที่เร็วเกินไป (Premature convergence)

2.2.2.2 ค่าคงที่ความเร่ง (Acceleration constants)

จากหัวข้อ 2.2.1.6 ในการปรับความเร็วของอนุภาค ค่าคงที่ความเร่ง c_p และ c_g ถูกนำมาใช้ในการกำหนดระยะทางสูงสุดที่อนุภาคแต่ละตัวจะมีแนวโน้มการเคลื่อนที่ไปยังทิศทางตำแหน่งของ $pbest$ และ $gbest$ ซึ่งหากค่าคงที่ความเร่งเพิ่มสูงขึ้นอนุภาคก็จะมีแนวโน้มการเคลื่อนที่จากตำแหน่งปัจจุบันไปยังตำแหน่งที่เข้าใกล้ $pbest$ หรือ $gbest$ มากขึ้น ค่าคงที่ความเร่งนี้จึงส่งผลโดยตรงกับความสามารถในการค้นหาของอนุภาค โดยอาจกล่าวง่าย ๆ ได้ว่า หาก c_p และ c_g มีค่ามากจะทำให้อนุภาคสามารถเคลื่อนที่ไปยังทิศทางต่าง ๆ ได้กว้างขึ้น หาก c_p และ c_g มีค่าน้อยพื้นที่ในการค้นหาก็จะแคบลง โดยการกำหนดค่าคงที่ความเร่งนี้ขึ้นอยู่กับความต้องการค้นหาของผู้วิจัย ซึ่งสามารถยกตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่การค้นหา และค่าคงที่ความเร่งซึ่งมีตำแหน่งปัจจุบันของอนุภาคที่ i เป็น $x_i = (0,0)^T$ และ $x_{pbest_i} = (2,1)^T$, $x_{gbest_i} = (1,3)^T$ ได้ดังรูปภาพที่ 2.6 โดยรูปภาพที่ 2.6 (A) $c_p = c_g = 1.0$ ในขณะที่รูปภาพที่ 2.6 (B) มีค่า $c_p = c_g = 2.0$



รูปภาพที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ความเร่งกับพื้นที่การค้นหาของอนุภาค

(Parsopoulos and Vrahatis, 2010)

2.2.2.3 เครือข่ายความเชื่อมโยงของสมาชิกในบริเวณใกล้เคียงกัน (Neighborhood topology)

ตามปกติแล้วกระบวนการหาคำตอบแบบ PSO อนุภาคจะมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลกันภายในฝูง โดยมี *gbest* เป็นผลเฉลยที่ดีที่สุดที่ทำหน้าที่เชื่อมโยงอนุภาคทุกตัวเข้าด้วยกัน อย่างไรก็ตาม Kennedy and Mendes (2002) ได้นำเสนอถึงการสร้างตัวแปร Local best (*lbest*) ขึ้นมาเพื่อเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างอนุภาคภายในระแวกพื้นที่การค้นหาใกล้เคียงกัน ซึ่งความหลากหลาย (Diversity) ของโครงสร้างพฤติกรรมทางสังคมในรูปแบบต่าง ๆ (Multiple social structures) จะช่วยให้โอกาสในการพัฒนาหรือค้นหาคำตอบเพิ่มมากขึ้น โดยเครือข่ายความเชื่อมโยงของสมาชิกในบริเวณใกล้เคียงกันที่นิยมใช้ เช่น การเชื่อมโยงอนุภาคหนึ่ง ๆ กับสมาชิกฝูงในบริเวณใกล้เคียงจำนวน k อนุภาค ที่จะมีการเชื่อมโยงในลักษณะของวงแหวน ($k = 2$) หรือในลักษณะปริภูมิแบบ von Neumann ($k = 4$) การเชื่อมโยงอนุภาคในรูปแบบดาวกระจาย และการเชื่อมโยงอนุภาคในรูปแบบเครือข่ายต้นไม้

2.2.2.4 การวัดสมรรถนะในการค้นหาคำตอบ (Performance measurement)

การติดตามพฤติกรรมของฝูงแบบพลวัต (Dynamic behavior) ในแต่ละรอบของการคำนวณ มีดัชนีการวัดสมรรถนะในการค้นหาคำตอบของ PSO ที่เป็นที่ยอมรับอยู่ 2 ดัชนี คือ

- **ดัชนีในการแพร่กระจาย (Dispersion index)** บ่งบอกถึงการกระจายตัวของตำแหน่งอนุภาครอบ ๆ ค่าผลเฉลยที่ดีที่สุดของฝูง (*gbest*) ซึ่งค่าดัชนีนี้จะแสดงถึงการครอบคลุมของอนุภาครอบพื้นที่การค้นหาคำตอบ โดยจะคำนวณได้ด้วยสมการที่ (2.5)

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^H |\bar{x}_{ij} - \bar{x}_{gbest_{ij}}|}{L \times H} \quad (2.5)$$

เมื่อ	\bar{x}_{ij}	= ตำแหน่งปัจจุบันของอนุภาค
	$\bar{x}_{gbest_{ij}}$	= ตำแหน่งของผลเฉลยที่ดีที่สุดของฝูง
	L	= จำนวนอนุภาคทั้งหมด
	H	= ขนาดมิติของปัญหา

จากสมการข้างต้น หาก δ มีค่ามากจะแสดงถึงการครอบคลุมของอนุภาครอบพื้นที่คำตอบได้ดีกว่า หรือกว้างกว่าในกรณีที่มีค่าน้อย

- **ดัชนีความเร็ว (Velocity index)** บ่งบอกถึงระยะการก้าว หรือเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค โดยเมื่ออ้างอิงจากรูปภาพที่ 2.4 หากค่าดัชนีความเร็วมีค่ามากจะแสดงถึงความสามารถในการค้นหาในวงกว้าง แต่อาจจะข้ามผลเฉลยที่เหมาะสมได้ ในทางกลับกันหากค่าดัชนีความเร็วมีค่าน้อยจะแสดงว่าอนุภาคทำการค้นหาในวงแคบ ซึ่งจะมีโอกาสพบผลเฉลยที่เหมาะสมมากกว่าแต่ก็จะใช้เวลาค้นหามากขึ้นตามไปด้วย โดยสามารถคำนวณดัชนีความเร็วได้จากสมการ (2.6)

$$\bar{w} = \frac{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^H |\bar{v}_{ij}|}{L \times H} \quad (2.6)$$

เมื่อ	\bar{v}_{ij}	= ความเร็วปัจจุบันของอนุภาค
	L	= จำนวนอนุภาคทั้งหมด
	H	= ขนาดมิติของปัญหา

2.2.3 กลไกการปรับปรุงคำตอบเพื่อหลบหนีจากค่าเหมาะสมที่สุดในระดับท้องถิ่น

กระบวนการหาคำตอบด้วย PSO แม้จะมีจุดเด่นที่ความง่ายต่อการเข้าใจ การใช้ทรัพยากรในการคำนวณที่ต่ำ และความสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาที่หลากหลาย แต่กลับมีจุดอ่อน คือ หากโจทย์ปัญหามีจำนวนมิติของแต่ละอนุภาคที่สูง ก็มีแนวโน้มที่จะมีค่าผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะที่เป็นจำนวนมากตามไปด้วย ส่งผลให้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคแบบมาตรฐาน (Standard Particle Swarm Optimization) มีโอกาสพบเจอกับอุปสรรคในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยรวม อันมีสาเหตุมาจากการปรับเปลี่ยนความเร็วเวกเตอร์ของอนุภาคที่เข้าเกินไปจนสูญเสียรอบการคำนวณไปโดยเปล่าประโยชน์ หรือการลู่เข้าหาคำตอบที่เร็วเกินไปของกลุ่มอนุภาค (Premature Convergence) ที่จุดเหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ หนึ่ง ๆ บนปริภูมิการค้นหาแล้วไม่สามารถหลบหนีออกมาจากพื้นที่นั้นได้ แต่อย่างไรก็ตาม มีงานวิจัยมากมายที่ได้หาทางปรับปรุงประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของ PSO เช่น

- การปรับค่าพารามิเตอร์ควบคุม เช่น ค่าคงที่ความเร่ง (c_p, c_g) ค่าถ่วงน้ำหนักความเฉื่อย
- การปรับปรุงสมการคำนวณเวกเตอร์ความเร็ว
- การแบ่งประชากรอนุภาคออกเป็นกลุ่มย่อย (Sub-swarms)
- การรวมเครื่องมือ PSO เข้ากับเครื่องมือการค้นหาอื่น เช่น GA หรือ SA
- การประยุกต์ใช้ ฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic) เข้ากับ PSO

ทั้งนี้ทางผู้วิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะยกตัวอย่างงานวิจัยที่ได้เสนอวิธีการปรับปรุงคำตอบซึ่งเห็นแล้วว่า มีความน่าสนใจ และสามารถนำมาประยุกต์ใช้กระบวนการออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อแก้ไขปัญหาในบทความนี้ได้ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.3.1 An Improved Particle Swarm Optimization Algorithm with Repair Procedure

(Božena, 2017) ได้เสนอแนวคิดของการคัดเลือกอนุภาคจำนวน p อนุภาคซึ่งให้ผลประเมินคำตอบ (Fitness Value) แย่ที่สุดในแต่ละรอบการคำนวณ เพื่อนำมาคำนวณหาเวกเตอร์ความเร็วใหม่จากเวกเตอร์ความเร็วปัจจุบัน และเวกเตอร์ความเร็วในรอบการคำนวณก่อนหน้า โดยมีวิธีการคำนวณดังสมการที่ (2.7) และ (2.8)

$$\vec{v}_i^1(t) = \frac{\vec{v}_i(t)}{\vec{v}_i(t) - \vec{v}_i(t-1)} \quad (2.7)$$

$$\vec{v}_i^2(t) = \frac{\vec{v}_i(t-1) - \vec{v}_i(t)}{\vec{v}_i(t-1)} \quad (2.8)$$

ทั้งนี้หากทำการทดลองแทนค่าเวกเตอร์ความเร็วใหม่แล้วพบว่าตำแหน่งของอนุภาคในปริภูมิการค้นหาเข้าใกล้ตำแหน่งของ $gbest$ มากยิ่งขึ้น เวกเตอร์ความเร็วและตำแหน่งใหม่ของอนุภาคที่คำนวณได้นี้จะถูกเก็บไว้ใช้ในรอบการคำนวณถัดไป ในขณะที่อนุภาคอื่น ๆ ที่ไม่ถูกเลือก หรือตำแหน่งของอนุภาคจากเวกเตอร์ความเร็วใหม่ไม่ดีขึ้น จะถูกนำมาคำนวณหาตำแหน่งและเวกเตอร์ความเร็วตามขั้นตอนของ PSO ปกติ ก่อนจะนำอนุภาคทั้งหมดมารวมกันแล้วพิจารณาหา $pbest$ และ $gbest$ ใหม่ตามขั้นตอนต่อไป ซึ่งผลจากงานวิจัยในข้างต้นได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการปรับปรุงผลเฉลยของ PSO โดยยังคงไว้ซึ่งการใช้ทรัพยากรการคำนวณที่น้อย และความสามารถในการปรับใช้แนวคิดกับโจทย์ปัญหาที่มีมิติของอนุภาคจำนวนมาก แต่อย่างไรก็ตาม จำนวนอนุภาคที่น้อยเกินไปของแบบจำลองอาจทำให้ความแตกต่างระหว่างผลเฉลยที่มากที่สุด และน้อยที่สุดมีช่วงกว้างได้

2.2.3.2 An Improved Particle Swarm Optimization Algorithm Based on Two Sub-swarms

การแลกเปลี่ยนข้อมูลกันระหว่างอนุภาคภายในฝูง และความสามารถในการจดจำเป็นจุดเด่นของการหาคำตอบด้วย PSO แต่อิทธิพลของค่า *gbest* ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงเวกเตอร์ความเร็วของอนุภาค ทำให้ความหลากหลายของอนุภาคลดลงและเพิ่มโอกาสในการได้ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยฉบับนี้ Yu et al. (2012) ได้นำเสนอการแบ่งประชากรภายในฝูงออกเป็น 2 กลุ่มที่มีขนาดเท่ากัน โดยกลุ่มหนึ่งจะใช้วิธีการปรับเวกเตอร์ความเร็ว และตำแหน่งของอนุภาคตาม PSO แบบปกติ ในขณะที่อีกกลุ่มหนึ่งจะใช้สมการที่ (2.9) ในการปรับเวกเตอร์ความเร็ว

$$\vec{v}_{id}(t+1) = \omega \vec{v}_{id}(t) + c_p r_1 (\vec{x}_{pbest_i} - \vec{x}_i(t)) \quad (2.9)$$

จากการเปรียบเทียบสมการที่ (2.3) กับสมการที่ (2.9) เราจะสังเกตเห็นได้ว่า พจน์ของสมการที่เป็นส่วนของ social learning หรืออิทธิพลจากค่า *gbest* จะหายไป ทำให้การปรับเวกเตอร์ความเร็ว และตำแหน่งของอนุภาคในกลุ่มที่สองนี้ใช้ประสบการณ์การเรียนรู้ด้วยตนเองเพียงอย่างเดียว ซึ่งค่าตำแหน่ง และเวกเตอร์ความเร็วของอนุภาคใน 2 กลุ่มนี้จะถูกนำมาแลกเปลี่ยนกันในทุกรอบการคำนวณ โดยอนุภาคในกลุ่มแรกที่ให้ผลเฉลยที่ดีที่สุด จะถูกแลกเปลี่ยนกับอนุภาคในกลุ่มที่สองที่ให้ผลเฉลยที่ดีที่สุด จากผลการทดลองพบว่า ด้วยวิธีการนี้ทำให้อนุภาคในกลุ่มที่หนึ่งยังสามารถคงความหลากหลายเอาไว้ได้ในระดับหนึ่ง ส่งผลให้อัตราการลู่เข้าหาค่าผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ ลดลงรวมถึงค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยรวมได้ดีมากยิ่งขึ้น แต่ทั้งนี้การปรับค่า ω หรือค่าคงที่ความเฉื่อยให้เหมาะสมตามรอบการคำนวณก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ได้ค่าผลเฉลยที่ดี

2.3 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective Optimization)

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ หรือการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ต้องการตอบสนองฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากกว่าหนึ่งวัตถุประสงค์ไปพร้อม ๆ กัน ซึ่งวัตถุประสงค์เหล่านี้มักมีความขัดแย้งกันในส่วน ทำให้วัตถุประสงค์หนึ่ง ๆ ที่สนใจไม่สามารถให้คำตอบที่ดีที่สุดไปพร้อมกันได้ โดยกลุ่มของคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ที่ให้ค่าที่ดีที่สุดที่เป็นไปได้สำหรับทุกวัตถุประสงค์ในเวลาเดียวกันนั้นเราเรียกว่า คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Pareto-optimal solution)

2.3.1 หลักการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์

คำตอบที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งเป็นคำตอบที่ไม่มีคำตอบใดให้ค่าที่ดีกว่าในวัตถุประสงค์หนึ่ง ๆ (ไม่ถูกรอบงำ) บนช่วงปริภูมิคำตอบ มีหลักการคิด เช่น ในกรณีที่ต้องการหาค่าที่น้อยที่สุดของทุกวัตถุประสงค์ (Minimization) ในปัญหาจำนวน k วัตถุประสงค์ เราสามารถเขียนอธิบายได้ดังสมการที่ (2.10)

$$\text{Minimize } f(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)\} \quad (2.10)$$

เมื่อ x = เวกเตอร์คำตอบของปัญหาค่าน้อยที่สุดที่พิจารณา $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$
ซึ่งมีจำนวนของตัวแปรตัดสินใจเท่ากับ n

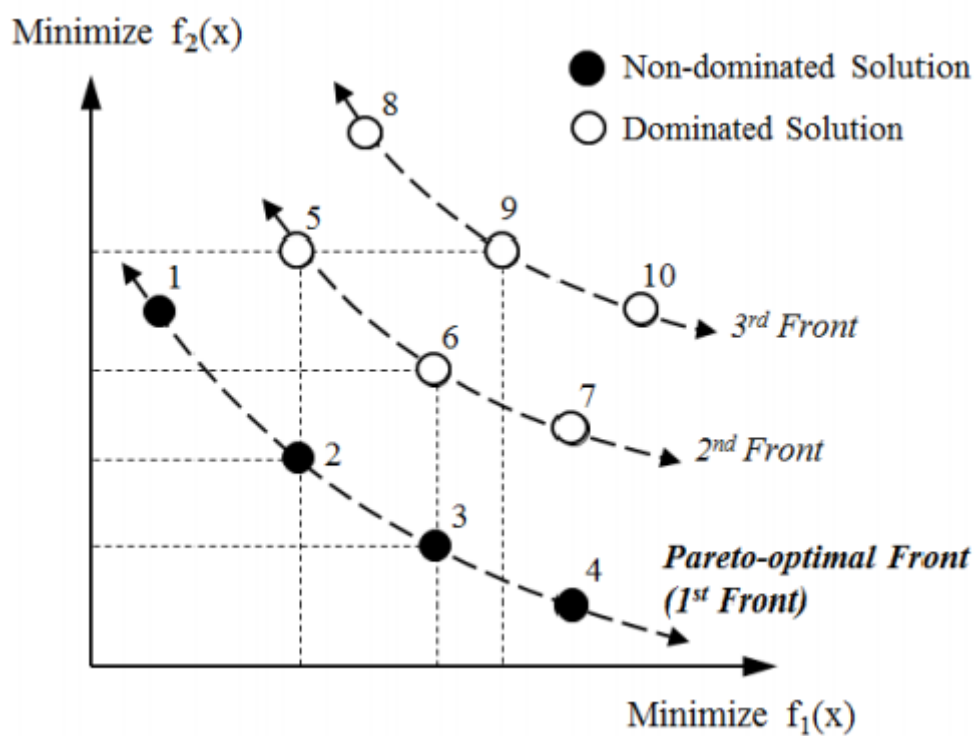
$$f_i(x) = \text{ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ } i = \{1, 2, \dots, k\}$$

โดยมีเป้าหมายคือการหาคำตอบ x^* ที่สามารถทำให้ค่าวัตถุประสงค์ $f_i(x)$ มีค่าน้อยที่สุดไปพร้อม ๆ กัน ซึ่งการที่จะระบุว่าคำตอบ x หนึ่ง ๆ มีค่าดีที่สุด หรือ น้อยที่สุดตามสมการที่ (2.10) สำหรับทุกวัตถุประสงค์ได้นั้น จะต้องทำการตรวจสอบก่อนว่าคำตอบ x ถูกรอบงำโดยคำตอบ y ใด ๆ หรือไม่ ซึ่งมีเงื่อนไขในการไม่ถูกรอบงำในกรณีหาค่าน้อยที่สุด คือ

$$f_i(x) \leq f_i(y) \text{ สำหรับทุกค่าวัตถุประสงค์ } i \in \{1, 2, \dots, k\}$$

$$f_i(x) < f_i(y) \text{ อย่างน้อยหนึ่งค่าวัตถุประสงค์ } i \in \{1, 2, \dots, k\}$$

เราจะเรียกกลุ่มของคำตอบ x^* ที่ไม่ถูกรอบงำโดยคำตอบอื่น ๆ และเป็นคำตอบที่มีค่าดีเท่า ๆ กันว่า อยู่ในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal) และเรียกเซตที่รวมสมาชิกของคำตอบในกลุ่มนี้ไว้ด้วยกันว่า เซตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Set) ซึ่งเซตดังกล่าวจะทำการเป็นตัวกำหนดพื้นที่ขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด หรือ ขอบเขตที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Pareto Optimal Frontier) โดยขอบเขตนี้จะสามารถอธิบายได้ด้วยแนวเส้นโค้งที่ลากผ่านจุดของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตบนปริภูมิวัตถุประสงค์ ซึ่งตำแหน่งบนเส้นนี้ทั้งหมดจะข่มจุดคำตอบที่เหลือ ดังแสดงในรูปภาพที่ 2.7



รูปภาพที่ 2.7 แผนภาพแสดงคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตแบบ 2 วัตถุประสงค์
(Goldberg, 1989)

รูปภาพที่ 2.7 แสดงจุดของคำตอบบนปริภูมิวัตถุประสงค์ของปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบ 2 วัตถุประสงค์ โดยเราจะเห็นว่าคำตอบที่ 1 – 4 ในรูปเป็นคำตอบที่ไม่มีการข่มซึ่งกันและกัน และไม่ถูกข่มจากคำตอบอื่นใด ดังนั้นคำตอบที่ 1 – 4 จึงถูกจัดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต ซึ่งตั้งอยู่บนเส้นขอบเขตที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (1st Front)

2.3.2 การกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับคำตอบด้วยการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ

การกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) หรือการชี้วัดคุณภาพคำตอบ ทำเพื่อพิจารณาว่าคำตอบที่สนใจเป็นคำตอบที่ดี หรือแย่เพียงใดเมื่อเทียบกับคำตอบอื่น ๆ ซึ่งค่าความแข็งแรงนี้จะถูกใช้ในการพิจารณาจัดเก็บเป็นคำตอบที่ดีที่สุดจากการค้นหาคำตอบรอบหนึ่ง ๆ โดยหนึ่งในวิธีการกำหนดความแข็งแรงที่เป็นที่นิยม คือการจัดอันดับแบบพาเรโต (Pareto Ranking Approach) ที่ทำการจัดอันดับภายใต้หลักการครอบงำเชิงพาเรโต และความแข็งแรงของคำตอบจะถูกกำหนดด้วยอันดับที่ได้ โดยวิธีการกำหนดความแข็งแรงที่ใช้ คือ การจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated Sorting) หรือวิธีการจัดอันดับของโกลด์เบิร์ก (Goldberg's Ranking)

การจัดอันดับของโกลด์เบิร์กจะทำการพิจารณากราฟค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของคำตอบทั้งหมด คำตอบที่ไม่ถูกรอรับโดยคำตอบใด ๆ เลย หรือคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตจะถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มคำตอบอันดับที่ 1 (1st Front) จากนั้นทำการตัดคำตอบอันดับที่ 1 ออก แล้วพิจารณาคำตอบที่เหลืออยู่ หากคำตอบที่ไม่ถูกรอรับเพื่อจัดเป็นกลุ่มคำตอบอันดับที่ 2 (2nd Front) โดยจะดำเนินการเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนครบทุกคำตอบ และสุดท้ายจะกำหนดค่าความแข็งแกร่งให้กับคำตอบตามหมายเลขกลุ่ม (Front) ที่คำตอบนั้นตั้งอยู่ ตามตัวอย่างในรูปภาพที่ 2.7 แต่อย่างไรก็ดี ความแข็งแกร่งที่ได้นี้ไม่ได้ถูกประเมินจากค่าวัตถุประสงค์ของแต่ละคำตอบโดยตรง หากแต่ถูกประเมินจากอันดับ จึงอาจเรียกได้ว่าความแข็งแกร่งนี้เป็น “ความแข็งแกร่งไม่แท้จริง” (Dummy Fitness)

2.3.3 การวัดสมรรถนะของอัลกอริทึม

การที่เราจะบอกว่าคำตอบที่ได้มาจากการแก้ปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ หรือขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด เป็นขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีจริง ๆ ได้นั้น จะต้องผ่านการวัดสมรรถนะของคำตอบว่าใกล้เคียงกับขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง (True Pareto Optimal) หรือขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดโดยประมาณ (ซึ่งหาได้จากกลุ่มคำตอบที่อยู่บน 1st Front บนวิธีการจัดลำดับของ Goldberg ในกรณีที่ไม่สามารถหากลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงได้) เสียก่อน โดยการวัดสมรรถนะสามารถแบ่งเป็นด้านต่าง ๆ เช่น การวัดการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence Measure) การวัดการกระจายของกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Spread Measure) เป็นต้น (เพ็ญพักตร์ ปิ่นภูมิกร, 2551) โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้ตัวชี้วัดเพื่อประเมินสมรรถนะของอัลกอริทึมทั้งหมด 3 ตัวชี้วัด ได้แก่

2.3.3.1 ตัวชี้วัดการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต

ตัวชี้วัดการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต ใช้ในการประมาณระยะห่าง (Generational Distance: GD) ของคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหามาได้ (Pareto Front) กับคำตอบที่แท้จริง (True Pareto Front) ซึ่งหากค่าระยะห่าง GD นี้มีค่าเท่ากับศูนย์ หมายความว่าทุกจุดคำตอบที่หาได้อยู่ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริงทั้งหมด (Coello and Cortés, 2005) โดยเราสามารถเขียนแสดงวิธีการคำนวณค่าของตัวชี้วัด GD สำหรับปัญหาที่มีจำนวน k วัตถุประสงค์ได้ดังสมการที่ (2.11) และ (2.12)

$$GD(S_j, S^*) = \frac{\sum_{x=1}^{|S_j|} \min\{d_{xy} | y \in S^*\}}{|S_j|} \quad (2.11)$$

$$d_{xy} = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{f_i(x) - f_i(y)}{f_i^{max} - f_i^{min}} \right)^2} \quad (2.12)$$

- โดย GD = ระยะห่างของคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้กับคำตอบที่แท้จริง
- S_j = กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (1st Front) ที่อัลกอริทึม j หาได้
- S^* = กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง
- $|S_j|$ = จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (1st Front) ที่อัลกอริทึม j หาได้
- $|S^*|$ = จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง
- d_{xy} = ระยะห่างยูคลิดีเนียนระหว่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (1st Front) ที่อัลกอริทึม j หาได้ กับคำตอบที่แท้จริง
- x = สมาชิกของกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (1st Front) ที่อัลกอริทึม j หาได้ โดย $x \in S_j$
- y = สมาชิกของกลุ่มคำตอบที่แท้จริง โดย $y \in S^*$
- $f_i(x)$ = ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $i \in k$ ของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดตัวที่ x ซึ่งอยู่ในกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้
- $f_i(y)$ = ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ $i \in k$ ของคำตอบที่แท้จริงตัวที่ y
- f_i^{max} = ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $i \in k$ ที่มากที่สุด ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริง และกลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึม
- f_i^{min} = ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $i \in k$ ที่น้อยที่สุด ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริง และกลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึม

2.3.3.2 ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการรู้เข้าและความหลากหลายของคำตอบ

ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการรู้เข้าและความหลากหลายของคำตอบ ใช้ในการหาค่าระยะห่างจากคำตอบที่อยู่ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริง ไปยังกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้ (Inverted Generational Distance: IGD) ซึ่งถ้าค่า IGD มีค่าน้อยจะแสดงว่ากลุ่มคำตอบที่หาได้อยู่ใกล้กับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงมาก และเกือบจะครอบคลุมขอบเขตทั้งหมดบนกลุ่มคำตอบที่แท้จริง โดยเรา

สามารถเขียนแสดงวิธีการคำนวณหาค่าของตัวชี้วัด IGD สำหรับปัญหาที่มีจำนวน k วัตถุประสงค์ได้ ดังสมการที่ (2.13) และ (2.14)

$$IGD(S^*, S_j) = \frac{\sum_{y=1}^{|S^*|} \min\{d_{xy} | x \in S_j\}}{|S^*|} \quad (2.13)$$

$$d_{xy} = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{f_i(x) - f_i(y)}{f_i^{max} - f_i^{min}} \right)^2} \quad (2.14)$$

- โดย
- IGD = ระยะห่างของคำตอบที่แท้จริงไปยังกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่หาได้
 - S_j = กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (1st Front) ที่อัลกอริทึม j หาได้
 - S^* = กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง
 - $|S_j|$ = จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (1st Front) ที่อัลกอริทึม j หาได้
 - $|S^*|$ = จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง
 - d_{xy} = ระยะห่างยูคลิเดียนระหว่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (1st Front) ที่อัลกอริทึม j หาได้ กับคำตอบที่แท้จริง
 - x = สมาชิกของกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (1st Front) ที่อัลกอริทึม j หาได้ โดย $x \in S_j$
 - y = สมาชิกของกลุ่มคำตอบที่แท้จริง โดย $y \in S^*$
 - $f_i(x)$ = ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $i \in k$ ของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดตัวที่ x ซึ่งอยู่ในกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้
 - $f_i(y)$ = ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ $i \in k$ ของคำตอบที่แท้จริงตัวที่ y
 - f_i^{max} = ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $i \in k$ ที่มากที่สุด ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริง และกลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึม
 - f_i^{min} = ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $i \in k$ ที่น้อยที่สุด ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริง และกลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึม

2.3.3.3 ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านความหลากหลายของคำตอบ

ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านความหลากหลายของคำตอบ มีไว้เพื่อประเมินการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่อัลกอริทึมหาได้ (Spread) โดยถ้าค่า Spread เท่ากับ 0 หมายความว่ากลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่หาได้มีคำตอบปลายสุด (Extreme Solution) อยู่บนตำแหน่งเดียวกันกับคำตอบปลายสุดของกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง หรือมีขอบเขต

ครอบคลุมขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง รวมถึงมีระยะห่างระหว่างคู่คำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกันเท่ากันในทุก ๆ คู่ หรือสามารถกล่าวได้ว่าการกระจายตัวของคำตอบอยู่ในรูปแบบยูนิฟอร์ม (Uniform) นั่นเอง แต่ถ้าหากค่า Spread สูงกว่า 1 อาจหมายความว่ากลุ่มคำตอบมีการกระจายตัวที่แย่ ทั้งนี้ เราสามารถเขียนสมการเพื่อคำนวณหาการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์ สำหรับปัญหาที่มีจำนวน k วัตถุประสงค์ได้ ดังสมการที่ (2.15) ถึง (2.17)

$$Spread_j = \frac{\sum_{m=1}^k d(e_m, S_j) + \sum_{x=1}^{|S_j|} |d_x - \bar{d}|}{\sum_{m=1}^k d(e_m, S_j) + |S_j| \bar{d}} \quad (2.15)$$

$$d(e_m, S_j) = \min_{s \in S_j} \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{f_i(e_m) - f_i(s)}{f_i^{max} - f_i^{min}} \right)^2} \quad (2.16)$$

$$d_x = \min_{x_2 \in S_j, x_2 \neq x} \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{f_i(x) - f_i(x_2)}{f_i^{max} - f_i^{min}} \right)^2} \quad (2.17)$$

- โดย S_j = กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (1st Front) ที่อัลกอริทึม j หาได้
 $|S_j|$ = จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (1st Front) ที่อัลกอริทึม j หาได้
 d_x = ระยะห่างยูคลีเดียนที่น้อยที่สุดระหว่างคำตอบในตำแหน่งที่ x กับคำตอบในตำแหน่งที่ x_2
 x = สมาชิกของกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (1st Front) ที่อัลกอริทึม j หาได้ โดย $x \in S_j$
 \bar{d} = ค่าเฉลี่ยของระยะทาง d_x
 $d(e_m, S_j)$ = ระยะห่างระหว่างคำตอบที่ตำแหน่ง e_m กับกลุ่มคำตอบที่ตำแหน่ง S_j
 e_m = กลุ่มคำตอบที่อยู่ปลายสุดในแต่ละวัตถุประสงค์ $m \in k$ ของคำตอบที่แท้จริง
 $f_i(x)$ = ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $i \in k$ ของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดตัวที่ x ซึ่งอยู่ในกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้
 f_i^{max} = ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $i \in k$ ที่มากที่สุด ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริง และกลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึม
 f_i^{min} = ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $i \in k$ ที่น้อยที่สุด ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริง และกลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึม

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)

ปัจจุบันมีประมาณกว่า 130 ประเทศทั่วโลกที่ปลูกพืชเพื่อผลิตน้ำตาล ซึ่งพืชที่ถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำคัญในกระบวนการผลิตและแปรรูปน้ำตาลทรายมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ อ้อย (Sugar Cane) และผักกาดฝรั่ง (Sugar Beet) แต่โดยเฉลี่ยแล้วน้ำตาลทรายที่ผลิตโดยประเทศผู้ผลิตรายใหญ่อันดับต้น ๆ ของโลก เช่น บราซิล อินเดีย และไทย เป็นน้ำตาลทรายที่มาจากอ้อย หรือคิดเป็นสัดส่วนประมาณ 80% ของน้ำตาลทรายทั่วโลก (International Sugar Organization, 2016) ด้วยเหตุดังกล่าว ปัญหาที่พบในระบบโลจิสติกส์ขาเข้าของโรงงานน้ำตาลในแต่ละประเทศจึงมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้จากงานวิจัยจำนวนมากที่ทางผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้า โดยในที่นี้ทางผู้วิจัยจะแบ่งปัญหาที่มีร่วมกันในระบบโลจิสติกส์ขาเข้าของโรงงานน้ำตาล และงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ไว้เป็นกลุ่มตามกระบวนการทำงานในระบบโลจิสติกส์ขาเข้าทั้งหมด 3 กลุ่ม คือ ปัญหาการพยากรณ์ผลผลิต ปัญหาการเก็บเกี่ยวและขนส่ง และปัญหากลังการผลิต

2.4.1 ปัญหาการพยากรณ์ผลผลิต

เนื่องจากราคาอ้อยที่ส่งเข้าโรงงานซึ่งเกษตรกรได้รับคิติดจากน้ำหนัก และความหวานของอ้อย การประมาณผลผลิตอ้อยจึงมีส่วนสำคัญในการตัดสินใจของเกษตรกรที่จะเลือกเวลาตัด และจัดส่งอ้อยของตนไปยังโรงงานน้ำตาลที่ต้องการ โดยทางโรงงานน้ำตาลเองก็มีระยะเวลาเปิด และปิดหีบ รวมถึงกำลังการผลิตที่จำกัดซึ่งถูกกำหนดไว้โดยสำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย (สอน.) หากอ้อยจากแปลงหนึ่ง ๆ ถูกตัด และนำมาส่งที่โรงงานในช่วงเวลาที่ไม่เหมาะสม เมื่อนำมาเข้าเครื่องหีบก็จะทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลที่ต่ำ ส่งผลให้ผลผลิตน้ำตาลโดยรวมของระบบไม่ดีเท่าที่ควร การพยากรณ์ผลผลิตภายในพื้นที่ที่แม่นยำจะช่วยให้ทางโรงงานน้ำตาลให้สามารถจัดสรรกำลังการผลิต และคิวรถอย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงยังช่วยให้เกษตรกรมีรายได้จากการขายอ้อยมากยิ่งขึ้น โดยการพยากรณ์ผลผลิตอ้อยในปัจจุบัน สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การพยากรณ์โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ และการพยากรณ์โดยใช้ภาพถ่ายทางอากาศ

2.4.1.1 การพยากรณ์โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์

ผู้วิจัยจำนวนมากมีความพยายามที่จะอธิบายถึงพฤติกรรมการเจริญเติบโตของอ้อยด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งหนึ่งในนั้น คือ การใช้สมการเชิงอนุพันธ์ในการจำลองการเจริญเติบโต และสะสมน้ำตาลของอ้อยพันธุ์สุพรรณบุรี 60 จากข้อมูลในไร่อ้อยที่อำเภอบ้านบึง จังหวัดชลบุรี (Buaphuan, 2010) โดยใช้ข้อมูลขาเข้า คือ จำนวนวันหลังจากปลูก ความสูงของต้นอ้อย (ซม.) และ

ค่าความเข้มข้นของน้ำตาลเฉลี่ย (%brix) โดยผลลัพ์ที่ได้เป็นที่น่าพึงพอใจ มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพันธ์ประมาณ 3% สำหรับแบบจำลองการเจริญเติบโต และ 0.5% สำหรับแบบจำลองการสะสมน้ำตาล อย่างไรก็ตามการเจริญเติบโตของพืชผลทางการเกษตรนั้น นอกจากพื้นที่ปลูกแล้ว สภาพอากาศในแต่ละพื้นที่ก็มีผลกระทบอย่างมากเช่นเดียวกัน โดยในปี พ.ศ. 2560 ได้มีการพัฒนาระบบพยากรณ์ผลผลิตอ้อยในประเทศบราซิล ด้วย Multiple linear regression ที่มีข้อมูลขาเข้าบางส่วนมาจาก Agro-climatic indicators และ Canegro simulation model ซึ่งเป็นสองแบบจำลองที่นำเอาสภาพอากาศมาช่วยในการคำนวณการเจริญเติบโตของผลผลิตทางการเกษตร (Pagani et al., 2017) ซึ่งผลจากการรวมแบบจำลองทั้งสองเข้าด้วยกันนี้ ตัวระบบได้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการพยากรณ์และอธิบายความแปรปรวนของผลผลิตระหว่างฤดูเก็บเกี่ยวได้ที่ 63% ในช่วงระหว่างการเจริญเติบโตของอ้อย และที่ 90% ในช่วงกลางฤดูเก็บเกี่ยว ซึ่งเป็นค่าที่แม่นยำมากกว่าการใช้แบบจำลองใดแบบจำลองหนึ่งเพียงอย่างเดียว โดยความสามารถในการพยากรณ์ช่วงต้น และกลางฤดูเก็บเกี่ยวนี้ มีความสำคัญอย่างยิ่งกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งส่วนงานการตลาดและส่วนงานปฏิบัติการ

2.4.1.2 การพยากรณ์โดยใช้ภาพถ่ายทางอากาศ

ภาพถ่ายทางอากาศมีจุดเด่นที่ความกว้าง และครอบคลุม ทำให้มีความได้เปรียบในการสำรวจพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่และเข้าถึงได้ยาก ซึ่งพื้นที่ในการเพาะปลูกอ้อยเองก็ถูกจัดอยู่ในกลุ่มนี้เช่นกัน เนื่องจากอ้อยเป็นพืชเกษตรที่มีความสูงจากพื้นดินมากกว่า 2 เมตร ทำให้ยากต่อการสำรวจอย่างแม่นยำด้วยการเดินเท้าเข้าไปภายในแปลงเพาะปลูก ด้วยเหตุนี้เองจึงมีผู้ทำวิจัยจำนวนไม่น้อยที่สนใจนำภาพถ่ายทางอากาศมาใช้ในการช่วยในการพยากรณ์ผลผลิต ตัวอย่างเช่น ความต้องการตรวจสอบการเจริญเติบโต และพยากรณ์ผลผลิตอ้อยในพื้นที่เพาะปลูกอ้อยในประเทศบราซิล ที่ทำการพัฒนาแบบจำลองซึ่งใช้ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียมแบบ time-series (Neale et al., 2016) ตัวแบบจำลองนี้ได้วิเคราะห์ช่วงคลื่นสีที่ได้จากภาพถ่ายทางอากาศ ก่อนนำมาแปลงเป็นค่าดัชนีความแตกต่างของพืชพรรณ (NDVI) และดัชนีความแตกต่างของความชื้น (NDWI) เพื่อใช้พยากรณ์ปริมาณน้ำตาล Sucrose ในอ้อย และได้ผลลัพ์ที่มีความแม่นยำประมาณ 90.4% นอกจากนี้แบบจำลองดังกล่าวยังสามารถนำมาปรับใช้ได้กับภาพถ่ายที่มีความละเอียดต่ำโดยแลกกับความแม่นยำที่ลดลงเล็กน้อยได้อีกด้วย ผลจากการทดลองในช่วงต้นได้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในอนาคตที่จะนำแบบจำลองไปปรับใช้จริงในอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลเนื่องจากความสามารถในการประหยัดต้นทุนที่เกิดจากความต้องการภาพถ่ายความละเอียดสูงในการวิเคราะห์แบบเดิมไปได้

อย่างไรก็ตามลักษณะการเพาะปลูกอ้อยของเกษตรกรไทยมีความแตกต่างจากประเทศบราซิล เนื่องจากในประเทศไทยมีเกษตรกรรายย่อยซึ่งถือครองที่ดินเพาะปลูกขนาดเล็กที่คิดเป็นสัดส่วนมากถึง 80% ของเกษตรกรทั้งหมด ทำให้พันธุ์อ้อยที่ใช้ปลูกแม้ในพื้นที่ที่ใกล้เคียงกันมีความแตกต่างกันไป โดยปริยาย นอกจากนี้สภาพภูมิประเทศ และดินที่ใช้อยังมีความหลากหลายก่อให้เกิดเป็นความท้าทายในการแยกแยะผลผลิตที่เกิดจากพันธุ์อ้อยและประเภทของดินที่แตกต่างกัน ซึ่งประเด็นนี้ได้ถูกแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนในงานวิจัยของ (Gunnula et al., 2012) ที่ทำการทดลองโดยใช้พันธุ์อ้อย K84-200 K88-92 และ LK92-11 ปลูกบนดิน 2 ประเภท คือ ดินทราย และดินร่วน แล้วใช้ภาพถ่ายความละเอียดสูง (SPOT) และความละเอียดปานกลาง (MODIS) เพื่อพยากรณ์ผลผลิตของอ้อยในพื้นที่ จากการทดลองพบว่า ผลการประเมินโดยภาพถ่ายทั้ง 2 ประเภทไม่สามารถตรวจจับความแตกต่างของผลผลิตอ้อยที่เกิดจากดิน และพันธุ์อ้อยที่แตกต่างกันได้ แต่ในทางกลับกัน เมื่อใช้วิธีการพื้นฐานอย่างการลงพื้นที่นับจำนวนอ้อยต้นต่อพื้นที่ควบคู่ไปกับการวัดค่า brix ที่บริเวณปล้องล่างสุดของอ้อย กลับให้ผลการพยากรณ์ที่สามารถนำไปใช้งานจริงได้มากกว่าโดยมีค่า $r^2 = 0.82$ ต่อมาในปี พ.ศ. 2561 ได้มีความพยายามในการรวมข้อมูลภาพถ่ายสีจากอากาศยานไร้คนขับ (UAV) และข้อมูลจากการสุ่มตัวอย่างภาคพื้นดิน อันประกอบไปด้วย จำนวนลำ ความสูงเฉลี่ย และน้ำหนัก เพื่อนำมาใช้ในการพยากรณ์ผลผลิต สำหรับอ้อยพันธุ์ KK3 และ UT12 ซึ่งปลูกในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย (Som-ard et al., 2018) จากทดสอบพบว่า วิธีที่เหมาะสมที่สุดในการแยกพิชเชลของต้นอ้อยจากในภาพถ่าย คือ วิธี Object-based image analysis (OBIS) ที่มีความแม่นยำ 92% และ 96% สำหรับอ้อยทั้ง 2 พันธุ์ตามลำดับ และเมื่อนำข้อมูลข้างต้นมาใช้ในการพยากรณ์ผลผลิตอ้อยแล้ว จะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำมากกว่า 90% ซึ่งดีกว่าวิธีการสุ่มเก็บตัวอย่างเฉลี่ยภาคพื้นดินแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ผลการวิจัยยังแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการประยุกต์ใช้ภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับเพื่อติดตามคุณภาพของอ้อยที่ปลูกอีกด้วย

2.4.2 ปัญหาการเก็บเกี่ยวและขนส่ง

ปัญหาในส่วนของ การเก็บเกี่ยว และการขนส่งอ้อยนับได้ว่าเป็นปัญหาที่มีความเกี่ยวเนื่องกัน เนื่องจากราคาอ้อยที่เกษตรกรขายได้จะขึ้นอยู่กับคุณภาพ และน้ำหนักของอ้อย ณ เวลาที่ถูกหลงเครื่องหีบอ้อย โดยค่าทั้งสองนี้จะค่อย ๆ ลดลงไปตามระยะเวลาที่รอคอยที่เกิดขึ้นหลังเก็บเกี่ยวอ้อย เกษตรกรเจ้าของไร่ส่วนใหญ่จึงจำเป็นต้องวางแผนสำหรับกระบวนการทั้งสองไปพร้อม ๆ กัน เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียรายได้โดยไม่จำเป็น อย่างไรก็ตาม ปัญหาการเก็บเกี่ยว และการขนส่งเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อน และมีปัจจัยความไม่แน่นอนเข้ามาเกี่ยวข้องอยู่ค่อนข้างมาก ไม่ว่าจะเป็นขนาดของ

ตัวปัญหาที่ใหญ่ เส้นทางการขนส่งที่เป็นไปได้ จำนวนของคนงานหรือเครื่องจักรที่มีอยู่อย่างจำกัด ตลอดจนความเร็วในการจัดการคิวรถของโรงงานน้ำตาล การบริหารทรัพยากรต่าง ๆ จึงมีความยุ่งยาก และมีความจำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือช่วยในการตัดสินใจที่มีประสิทธิภาพเข้าช่วย โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดค่าใช้จ่าย และมุ่งเน้นไปที่ผลกำไรจากการขายอ้อยเป็นหลักสำคัญ

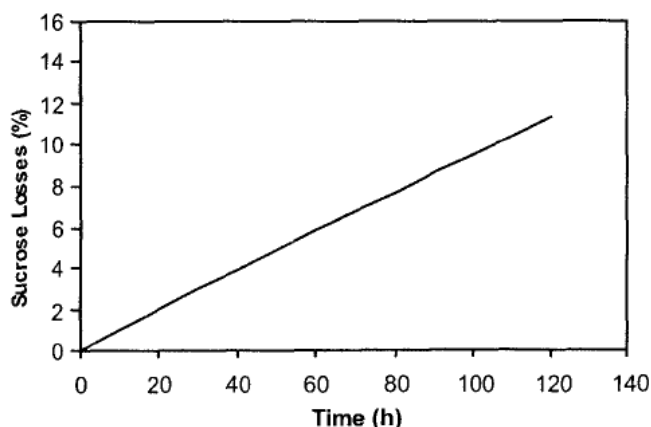
ข้อจำกัดหนึ่งของการเก็บเกี่ยวอ้อยในประเทศไทย คือ การที่ยังใช้แรงงานคนอยู่เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากรถตัดอ้อยมีราคาสูง และจำนวนรถที่มีอยู่ในปัจจุบันก็ไม่เพียงพอต่อความต้องการของเกษตรกรไร่อ้อยซึ่งมีเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ในบ่อยครั้งที่เกษตรกรไม่สามารถเก็บเกี่ยวอ้อยได้ทันเวลาในช่วงที่อ้อยมีความหวานสูงสุด หรือในช่วงเวลาที่ยังสามารถขายอ้อยให้กับโรงงานน้ำตาลได้ในราคาที่คุ้มค่า อันเป็นที่มาของการเผาอ้อยก่อนการเก็บเกี่ยวด้วยแรงงานคนเพื่อให้ทำการเก็บเกี่ยวอ้อยได้เร็วขึ้น อย่างไรก็ตามทิศทางในอนาคตของอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลของไทยมีแนวโน้มที่จะหันไปใช้รถตัดอ้อยในการเก็บเกี่ยวมากขึ้น ไม่ว่าจะด้วยมาตรการที่เกิดจากความร่วมมือกันของสำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย กับโรงงานน้ำตาลเพื่อลดจำนวนอ้อยไฟไหม้ในระบบลง หรือปัญหาการขาดแคลนแรงงานคนเนื่องจากแรงงานสูงวัยที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งหากห้ามมิให้ทำการเผาอ้อย การใช้แค่แรงงานคนแบบดั้งเดิมก็อาจจะส่งผลทำให้ตัดอ้อยได้ไม่ทันในช่วงเวลาเก็บเกี่ยว (ภัทริยา นวลโย, 2562) ส่งผลทำให้เกษตรกรจำเป็นต้องรวมกลุ่มกันเพื่อใช้รถตัดอ้อยในที่สุด ทั้งนี้จากการศึกษารูปแบบต้นทุน และผลตอบแทนระหว่างการผลิตอ้อยส่งโรงงานน้ำตาล พบว่าเกษตรกรควรจัดจ้างรถตัดอ้อยมากกว่าการลงทุนซื้อรถตัดเป็นของตัวเอง เนื่องจากสามารถแก้ปัญหาหลายประการได้ ปัญหาดินเสื่อมจากการใช้ไฟเผาอ้อย และปัญหาการขาดแคลนแรงงานในระยะยาวได้ แม้วิธีนี้จะมีต้นทุนที่สูงกว่าการเก็บเกี่ยวด้วยแรงงานคนไร่ละ 638.18 บาท ก็ตาม (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร , 2557) อย่างไรก็ตาม สิ่งที่ต้องพิจารณาเป็นลำดับต้น ๆ ในส่วนของ การเก็บเกี่ยวด้วยรถตัดอ้อย คือ ต้นทุนในการใช้รถตัดอ้อย หรือค่าน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งการคำนวณเพื่อหาระยะทางที่น้อยที่สุดในการใช้รถตัดอ้อยจึงเป็นหนึ่งในวิธีที่สามารถช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายได้ แต่ความท้าทายที่ผู้ตัดสินใจต้องเผชิญ คือ ความขัดแย้งกันระหว่างเป้าหมายที่ต้องการให้ระยะทางที่รถตัดอ้อยใช้ในการเก็บเกี่ยวที่น้อยที่สุด กับความต้องการให้ได้รับผลผลิตรวมสูงที่สุด ทั้งนี้ Sethanan and Neungmattha (2016) ได้นำเสนอ Multi-objective particle swarm optimization ที่รวมเอาค่า global best, local best และ neighbor best เข้ามาใช้ (MO-GLNPSO) เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาการวางแผนเส้นทางการตัดของรถตัดอ้อย โดยยังสามารถรองรับข้อจำกัดในการเข้าถึงพื้นที่บางส่วน และการแยกเก็บเกี่ยวได้ ซึ่งจากการทดสอบพบว่า วิธีการดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการคำนวณมากกว่าการใช้ Particle Swarm Optimization แบบปกติ และ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II) โดยผลลัพธ์ที่ได้จะช่วยให้ผู้ตัดสินใจเห็นตัวเลือกแบบต่าง ๆ และสามารถบริหารจัดการตารางการทำงาน

ของรถตัดอ้อย โดยเลือกเส้นทาง และลำดับการเก็บเกี่ยวตามลำดับความสำคัญของเป้าหมายที่ต้องการได้ อย่างไรก็ตาม ได้มีผลการวิจัยที่แสดงให้เห็นว่า การใช้ระยะทางที่น้อยที่สุดของรถตัดอ้อยอาจไม่ใช่คำตอบที่เหมาะสมของการแก้ปัญหาการเก็บเกี่ยว โดยผลงานวิจัยของ Kaewtrakulpong (2008) ที่ศึกษา Multi-objective optimization ที่มุ่งเน้นไปที่การแบ่งปันผลประโยชน์สูงสุดระหว่างเกษตรกรเจ้าของไร่อ้อย เจ้าของรถตัดอ้อย และโรงงานน้ำตาล ซึ่งผู้วิจัยพบว่า การที่รถตัดอ้อยสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แลวงของอ้อยในไร่ที่ถูกตัดควรมีระยะทางในแนวยาวต่อกันอย่างน้อยที่สุด 160 เมตร นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้เสนอถึงโอกาสที่จะเกิดขึ้นจากการรวมกลุ่มระหว่างเกษตรกรรายย่อยภายในพื้นที่เดียวกันเพื่อลดค่าใช้จ่ายรวมในการใช้รถตัดอ้อยอีกด้วย

หลังจากอ้อยถูกตัดไปแล้ว น้ำตาลซูโครสในอ้อยที่ใช้ในการผลิตน้ำตาลทรายจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีแล้วถูกเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทส (หรือน้ำตาลอินเวิร์ต) ส่งผลทำให้คุณภาพของน้ำตาลลดลง นอกจากนี้น้ำตาลซูโครสยังสามารถถูกเปลี่ยนไปเป็นเด็กซ์แทรนซึ่งมีลักษณะเป็นเมือกเหนียว ส่งผลทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการทำใส/ การกรอง/ การตกผลึก/ การผลิตน้ำตาลทรายโดยรวมของโรงงานเพิ่มขึ้น สิ่งปนเปื้อนที่ติดมาจากกระบวนการตัดอ้อยเองก็มีผลทำให้ปริมาณน้ำตาลซูโครสลดลง และเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาลอินเวิร์ตได้เช่นกัน Larrahondo et al. (2006) ได้มีการค้นพบว่าทุก ๆ 1% ของสิ่งปนเปื้อนในอ้อยที่ถูกนำเข้ากระบวนการแปรรูปจะส่งผลทำให้มีการสูญเสียน้ำตาลซูโครสไปโดยเฉลี่ย 2 กิโลกรัม/ตันอ้อย และจากการศึกษาเพิ่มเติมในกระบวนการเก็บเกี่ยว และขนส่งอ้อยในประเทศโคลอมเบียพบว่า เราสามารถใช้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายอัตราการสูญเสียน้ำตาลของอ้อยหลังการเผาเพื่อเก็บเกี่ยวได้ดังแสดงในสมการที่ (2.18)

$$\% \text{Sucrose losses} = 100 - 100^{-0.001t} \quad (2.18)$$

เมื่อ t = จำนวนเวลาหลังเก็บเกี่ยวในหน่วยชั่วโมง



รูปภาพที่ 2.8 กราฟแสดงอัตราการลดลงของน้ำตาลซูโครสในอ้อยต่อระยะเวลาหลังการเผาและเก็บเกี่ยวในหน่วยชั่วโมง

(Larrahondo et al., 2006)

กราฟแสดงอัตราการลดลงของน้ำตาลซูโครสในอ้อยต่อระยะเวลาหลังการเผาเพื่อเก็บเกี่ยวในหน่วยชั่วโมงดังรูปภาพที่ 2.7 มีความสอดคล้องกับการศึกษาอัตราการสูญเสียน้ำตาลซูโครสในอ้อยของประเทศอินเดียโดย Sharath Kumar Reddy et al. (2015) ที่พบว่า โดยเฉลี่ยแล้วน้ำตาลซูโครสจะสูญเสียไปประมาณ 20 – 30% ระหว่างที่วัตถุดิบผ่านกระบวนการขนส่ง และกระบวนการแปรรูปของโรงงานน้ำตาล ซึ่งความสูญเสียนี้อาจเห็นได้อย่างชัดเจนมากขึ้นหากอ้อยที่ถูกเก็บเกี่ยวแล้ว ต้องรอคอยเพื่อเข้าเครื่องหีบเป็นเวลาเกินกว่า 24 ชั่วโมง เนื่องจากจะมีการสูญเสียความชื้น และการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลอินเวิร์ต ด้วยเหตุนี้การบริหารจัดการการขนส่งอ้อยไปยังโรงงานน้ำตาลอย่างมีประสิทธิภาพจึงนับได้ว่ามีผลโดยตรงต่อทั้งราคาอ้อยที่เกษตรกรได้รับ และปริมาณน้ำตาลทรายที่โรงงานน้ำตาลจะสามารถผลิตได้ หากแต่การดำเนินการดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยการติดต่อสื่อสารและประสานงานระหว่างโรงงานน้ำตาล กับเกษตรกรแต่ละราย เพื่อให้ได้ข้อมูลสำคัญที่ใช้ในการตัดสินใจ เช่น กำลังการผลิต โคเวตาอ้อย หรือจำนวนคิวรถปัจจุบัน อันจะนำไปสู่การลดเวลารอคอยที่สูญเปล่าในกระบวนการขนส่งได้ สำหรับประเทศไทยเองได้มีงานวิจัยที่เสนอเกี่ยวกับการใช้ระบบปฏิบัติการแบบใหม่เพื่อลดเวลารอคอยเฉลี่ยที่เกิดจากความไม่สม่ำเสมอของการเข้ามายังโรงงานของรถบรรทุกอ้อยโดย Satidnuwat and Prichanont (2005) โดยตัวงานวิจัยได้เสนอระบบปฏิบัติการเพื่อจัดการคิวรถไว้ทั้งหมด 3 ระบบ ได้แก่ ระบบการจองเวลาการจัดส่งล่วงหน้า ระบบการแบ่งช่วงเวลาการจัดส่งของชาวไร่ และระบบผสมระหว่างระบบการจัดส่งแบบคิวล๊อคและคิวเสรีเข้าด้วยกัน ซึ่งผลการทดสอบพบว่าทั้ง 3 ระบบสามารถกระจายการเข้ามาของรถบรรทุกอ้อย

ให้มีความสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้นได้ และหากสามารถทำการกำหนดสัดส่วนที่เหมาะสมของจำนวนคิว ล้อคจะทำให้เวลาเฉลี่ยที่รถบรรทุกอ้อยทั้งหมดใช้ในโรงงานน้ำตาลลดต่ำลงได้โดยไม่กระทบต่อ ระยะเวลาเฉลี่ยของรถบรรทุกอ้อยที่เป็นคิวเสร็จแต่อย่างใด หากมองในมุมมองของโรงงานน้ำตาลและ เกษตรกรที่อยู่ในโควตาอ้อยแล้ว ระบบปฏิบัติการข้างต้นสามารถนำมาปรับใช้ได้ทันที แต่กับ เกษตรกรรายย่อยที่มีอยู่จำนวนมากและยังไม่สามารถตัดสินใจได้ว่าจะส่งอ้อยให้กับโรงงานน้ำตาลโรง ไตอาจะต้องอาศัยเครื่องมือบางอย่างเข้ามาช่วยในการตัดสินใจเสียก่อน นอกจากนี้ยังมีความ พยายามในการพัฒนาเครื่องมือที่ประยุกต์ใช้ Network Analysis กับ Linear Programming ใน รูปแบบของ Multi-Objectives Decision Analysis เพื่อการบริหารจัดการระบบขนส่งอ้อยในพื้นที่ ภาคอีสานของไทย ที่สนใจพิจารณาทั้งปัจจัยค่าใช้จ่ายในการขนส่งและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ต่ำ ที่สุด (Sarapirome et al., 2013) ด้วยความที่ในพื้นที่ภาคอีสานของไทยมีพื้นที่ไร่ปลูกอ้อยอยู่ จำนวนมาก ทางกลุ่มผู้วิจัยจึงได้แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ระดับ คือ การกำหนดว่าแต่ละเขตพื้นที่ ควรต้องส่งอ้อยให้กับโรงงานน้ำตาลโรงใด เป็นจำนวนเท่าไร แล้วจึงเป็นการกำหนดเส้นทางขนส่งอ้อย จากไร่ในเขตพื้นที่ไปยังโรงงานที่กำหนด โดยงานวิจัยนี้เองเป็นตัวอย่างที่แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึง ความสนใจในด้านผลกระทบของกิจกรรมการขนส่งวัสดุทางการเกษตรกับสิ่งแวดล้อมที่เพิ่มมากขึ้น

แม้ว่าแนวโน้มของการบริหารจัดการระบบการขนส่งอ้อยเข้าสู่โรงงานที่ดีขึ้น แต่ด้วยการที่ อุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลมีเกษตรกรไร้อ้อยอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้เกษตรกรบางส่วนมีปัญหา การเสียโอกาสในการเก็บเกี่ยวอ้อยในช่วงเวลาที่มีปริมาณน้ำตาลสูงสุด เนื่องจากข้อจำกัดด้านกำลัง การผลิตของโรงงานน้ำตาลและการกำหนดคิวจัดส่งอ้อย ปัญหานี้ได้ส่งผลกระทบโดยตรงต่อรายได้ ของเกษตรกร และปริมาณน้ำตาลโดยรวมของทั้งอุตสาหกรรม จึงได้เกิดเป็นแนวคิดการกระจาย ตารางการเก็บเกี่ยวอ้อยของเกษตรกรแต่ละราย โดยมีเป้าหมายที่การกระจายผลประโยชน์ระหว่าง เกษตรกรแต่ละรายอย่างเท่าเทียมกัน และผลผลิตน้ำตาลโดยรวมสูงที่สุด (Thuankaewsing et al., 2015) ซึ่งในกรณีศึกษาดังกล่าวได้ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network) ใน การประมาณผลผลิตโดยรวมของอ้อยในพื้นที่ แล้วจึงใช้ Optimization model และ heuristic algorithm เพื่อจัดตารางการเก็บเกี่ยวอ้อย โดยจากผลการทดลองพบว่า มีโอกาสที่กลุ่มเกษตรกรจะ นำแบบจำลองการกระจายผลประโยชน์นี้ไปใช้ได้จริงแต่ก็ยังมีข้อจำกัด คือ แนวโน้มผลผลิตของ เกษตรแต่ละรายในกลุ่มควรมีความแตกต่างกันเพื่อให้ทุกคนได้รับประโยชน์สูงสุด ซึ่งทางผู้วิจัยเองก็ เล็งเห็นถึงความสำคัญของการกระจายรายได้เช่นนี้เช่นกัน เพราะอาจจะเป็นหนทางที่มีแนวโน้มในการ รักษาจำนวนของเกษตรกรไร้อ้อยรายย่อยไว้ในระบบ และช่วยให้เกษตรกรไร้อ้อยจำนวนมากพ้นจาก ภาวะหนี้สินได้

2.4.3 ปัญหาการกำกับการผลิต

การเก็บเกี่ยวและขนส่งอ้อยเข้ามายังโรงงานน้ำตาลได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น โรงงานน้ำตาลต้องมีการบริหารกำกับการผลิตอย่างเหมาะสมเพื่อให้สามารถรับมือกับอ้อยที่ถูกส่งเข้ามาได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งการบริหารกำกับการผลิตนี้ยังนับรวมไปถึงการจัดสรรโควตาอ้อยที่พอเหมาะให้กับเกษตรกร แต่ในสภาพแวดล้อมการทำงานจริง ความไม่แน่นอนในกระบวนการผลิตน้ำตาลของโรงงานน้ำตาลเองกลับเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ทำให้การปฏิบัติงานตามแผนเป็นไปได้ยากลำบาก โดยในประเด็นนี้ทาง (Kadwa and Bezuidenhout, 2015) ได้พัฒนาแบบจำลองเพื่อพิจารณาถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการหยุดสายการผลิตของโรงงานน้ำตาลในประเทศแอฟริกาใต้ และได้พบว่าประมาณ 64% ของปัญหาที่เกิดขึ้น และส่งผลกับกำกับการผลิตน้ำตาลนั้นมีสาเหตุมาจากปัจจัย การหยุดซ่อมบำรุงเครื่องจักรหรือเครื่องจักรหยุดทำงาน ฝนตก ปัญหาระหว่างขั้นตอนการเทอ้อย และการขาดแคลนทรัพยากรคน แต่ว่าปัจจัยที่ไม่แน่นอนเหล่านี้กลับมีเพียงบางส่วนเท่านั้นที่สามารถจะถูกป้องกัน หรือแก้ไขได้ด้วยการปฏิบัติงานอย่างรัดกุมมากยิ่งขึ้นของโรงงานน้ำตาล ในขณะที่ส่วนอื่น ๆ นั้นไม่สามารถทำได้ ซึ่งในประเด็นนี้ (da Silva and Marins, 2014) ได้นำเสนอแนวคิดที่น่าสนใจของการใช้ Fuzzy Goal Programming Model เข้ามาช่วยในการวางแผนการผลิตรวมตลอดทั้งฤดูการผลิตของโรงงานน้ำตาล และเอทานอลในประเทศบราซิล ในขณะที่ยังคำนึงถึงความไม่แน่นอนต่าง ๆ ภายในกระบวนการผลิตของโรงงาน โดยตัวแบบจำลองพิจารณาวางแผนตั้งแต่กระบวนการการเก็บเกี่ยว ขนส่ง แปรรูป ไปจนถึงจัดส่งให้กับลูกค้า ซึ่งผลการทดลองได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการปรับใช้แบบจำลองดังกล่าวร่วมกับวิธีการวางแผนแบบหมุนเวียน (Rolling strategy) รายสัปดาห์ตลอดทั้งฤดูตั้งแต่การเพาะปลูก ผลิต และเก็บเกี่ยว รวม 52 สัปดาห์ ในด้านผลผลิตน้ำตาลโดยรวมที่มากขึ้น เนื่องจากการปรับปรุงข้อมูลทุกสัปดาห์จะทำให้ผลกระทบที่เกิดจากความไม่แน่นอนของข้อมูลในระยะยาวถูกลดทอนลงได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตาม ด้วยข้อจำกัดด้านระยะเวลาการเก็บเกี่ยวอ้อยของประเทศไทยที่แตกต่างจากประเทศบราซิล และเกษตรกรรายย่อยซึ่งไม่ขึ้นตรงกับโรงงานน้ำตาลที่มีจำนวนมาก ทำให้แม้ว่าจะมีการวางแผนการผลิตที่ดีเพียงใด ด้วยระยะเวลาการเก็บเกี่ยวที่จำกัด ในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ ของฤดูการผลิตที่อ้อยในแปลงของเกษตรกรพร้อมเก็บเกี่ยวในช่วงเวลาที่ใกล้เคียงกัน โรงงานน้ำตาลจะยังคงประสบกับปัญหาการกำกับการผลิตที่ไม่เพียงพออย่างหลีกเลี่ยงได้ยาก หากต้องการจะแก้ปัญหาผลผลิตอ้อยส่วนเกินในข้างต้น การวางแผนเพาะปลูกอ้อยในระยะยาวเพื่อกระจายการสุกของผลผลิตไปยังช่วงเวลาที่แตกต่างกันภายในฤดูการเก็บเกี่ยวเป็นสิ่งจำเป็น โดยแนวทางในการแก้ไขปัญหานี้มีความสอดคล้องกับแนวคิดของ Piewthonggam et al.

(2009) ที่นำเอา crop growth model ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วยในการกำหนด วันเวลาเพาะปลูก พันธุ์อ้อย และประมาณช่วงระยะเวลาการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมของเกษตรกรแต่ละราย โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ได้ผลผลิตน้ำตาลโดยรวมของระบบสูงที่สุด ซึ่งจากการทดลองพบว่า แบบจำลองดังกล่าวมีศักยภาพที่จะเพิ่มผลผลิตน้ำตาลได้มากกว่าวิธีการทำงานเดิมที่ต่างคนต่างปลูก ถึง 23% หากแต่วิธีการนี้จะสำเร็จได้ก็ต่อเมื่อเกษตรกรบางส่วนยอมเสียสละผลกำไรส่วนตัวโดยเก็บเกี่ยวอ้อยก่อน หรือหลังช่วงที่มีการสะสมน้ำตาลสูงสุดไปแล้วเนื่องจากในกระบวนการทำงานจริง อาจจะไม่สามารถเก็บเกี่ยวอ้อยทุกแปลงได้ตามเวลาที่กำหนดไว้ นอกจากนี้การเก็บเกี่ยวอ้อยในหลาย ๆ ครั้งจะไม่ได้จับลงที่ฤดูการผลิตเดียว การพิจารณาวางแผนระยะยาวโดยคำนึงถึง “อ้อยต่อ” หรืออ้อยต้นเดิมที่เคยถูกเก็บเกี่ยวไปแล้วเมื่อฤดูก่อนหน้าซึ่งจะให้ผลผลิตน้ำตาลที่น้อยลงก็เป็นสิ่งที่สำคัญเช่นเดียวกัน Kittilertpaisan and Pathumnakul (2017) เองก็ได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของประเด็นนี้ และเลือกพัฒนาแบบจำลองที่มี Heuristic dynamic programming algorithm (HDP) เป็นพื้นฐาน โดยต้องการวางแผนลำดับการตัดอ้อย เส้นทาง การตัด เวลาที่เริ่มตัด และจำนวนแรงงานที่ใช้ล่วงหน้าสำหรับ 3 ฤดูการเก็บเกี่ยวเพื่อให้เกษตรกรมีผลกำไรจากการขายอ้อยสูงสุด ผลลัพธ์จากแบบจำลองข้างต้นได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ HDP ในการคำนวณ ที่มากกว่าการใช้ Heuristic based Vehicle Routing Problem with Time Windows แบบเดิมอย่างมากโดยแลกมากับค่าผลกำไรเฉลี่ยของเกษตรกรที่ลดลงเพียง 0.28% เท่านั้น และมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปปรับใช้กับกระบวนการทำงานจริง แต่ทั้งนี้ตัวแบบจำลองก็ยังมีข้อจำกัดในแง่ที่อัตราการเจริญเติบโตของอ้อยทุกแปลงในเส้นทางเก็บเกี่ยวจะมีความใกล้เคียงกัน รวมไปถึงความจำเป็นในการควบคุมวิธีการเพาะปลูกของเกษตรกร ซึ่งอาจจะเป็นไปได้ยากในหลายพื้นที่ และต้องมีการให้ความรู้รวมถึงปรับความเข้าใจกับเกษตรกรก่อนจะสามารถขยายผลในวงกว้างได้จริง

2.5 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงการจัดที่มีชุดของคำตอบที่เป็นไปได้แน่นอน ซึ่งเป็นปัญหาที่พบได้ตามสภาพการทำงานจริง และมีความซับซ้อนสูง จึงทำให้การหาผลเฉลยด้วยวิธีการแบบประมาณ (Approximate Algorithm) ที่ให้คำตอบที่ดีภายในช่วงเวลาคำนวณที่จำกัดเป็นวิธีที่ผู้คนหันมาให้ความสนใจกันมาก ซึ่งวิธีการแก้ปัญหาแบบประมาณที่เป็นที่นิยมคือ วิธีการแบบเมตะฮิวริสติกส์ (Metaheuristic Approach) ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นมาให้มีความยืดหยุ่นในการนำไปใช้งานได้โดยไม่ขึ้นกับปัญหา โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทางผู้วิจัยได้ตัดสินใจเลือกวิธีการค้นหาคำตอบโดยอาศัยกลุ่มประชากร (Population-based Search) ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการ

ค้นหาคำตอบของเมตะฮิวริสติกส์ที่มีประสิทธิภาพ คือ วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของ กลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) มาใช้งาน แต่อย่างไรก็ตาม เพื่อที่จะใช้เมตะฮิวริสติกส์ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้อย่างเหมาะสม ผู้วิจัยมีความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทรายทั้งใน และต่างประเทศ ให้เข้าใจถึงมุมมองสภาพ ปัญหาที่กลุ่มผู้วิจัยอื่นสังเกตเห็น และช่องว่างที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสามารถเติมเต็มได้ โดยสามารถสรุป ความสัมพันธ์ของงานวิจัยที่ค้นคว้ามาในข้างต้นกับกระบวนการในระบบห่วงโซ่อุปทานขาเข้าของ อุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลได้ดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการในห่วงโซ่อุปทาน ขาเข้าของอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล

Authors	Yr.	Project Name	Processes covered				
			Cultivating	Harvesting	Transportation	Reception	Milling
Buaphuan	2010	Rate of change model for sugar content in sugarcane	X				
Pagani, Stella et al.	2017	Forecasting sugarcane yields using agro-climatic indicators and Canegro model: A case study in the main production region in Brazil	X				
Neale et al.	2016	Dynamics modeling for sugarcane sucrose estimation using time series satellite imagery	X				
Gunnula et al.	2012	Evaluating Sugarcane Growth and Maturity Using Ground-Based Measurements and Remote Sensing Data	X				
Som-ard et al.	2018	Pre-harvest Sugarcane Yield Estimation Using UAV-Based RGB Images and Ground Observation	X				

ตารางที่ 2-2 (ต่อ) ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการในห่วงโซ่อุปทานขาเข้าของอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล

Authors	Yr.	Project Name	Processes covered				
			Cultivating	Harvesting	Transportation	Reception	Milling
Kaewtraku lpong	2008	multi-objective optimization for cost reduction of mechanical sugarcane harvesting and transportation in thailand		X	X		
LARRAHON DO et al.	2006	An Assessment of After Harvest Sucrose Losses from Sugarcane Field to Factory		X			
Sharath Kumar Reddy et al.	2015	DETIORATION OF SUGARCANE DUE TO DELAYED HARVEST AND CRUSH—A REVIEW		X			
Satidnuwa t and Prichanont	2005	The operation system for farm-to-mill sugarcane supply			X	X	X
Sarapirom e et al.	2013	SUGARCANE TRANSPORTATION ALLOCATION USING MULTI-OBJECTIVE DECISION ANALYSIS, NORTHEAST REGION OF THAILAND			X		
Thuankae wsing et al.	2015	Harvest scheduling algorithm to equalize supplier benefits: A case study from the Thai sugar cane industry		X			X

ตารางที่ 2-2 (ต่อ) ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการในห่วงโซ่อุปทานขาเข้าของอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล

Authors	Yr.	Project Name	Processes covered				
			Cultivating	Harvesting	Transportation	Reception	Milling
da Silva and Marins	2014	A Fuzzy Goal Programming model for solving aggregate production-planning problems under uncertainty: A case study in a Brazilian sugar mill					X
Piewthongngam et al.	2009	Application of crop growth simulation and mathematical modeling to supply chain management in the Thai sugar industry	X	X			
Kittilertpaisan and Pathumnakul	2017	Integrating a multiple crop year routing design for sugarcane harvesters to plant a new crop	X				

เมื่อพิจารณາตารางข้างต้นแล้วจะพบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่กระบวนการใด กระบวนการหนึ่งเป็นหลัก โดยเฉพาะกระบวนการเก็บเกี่ยวซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญของกิจกรรมโลจิสติกส์ขาเข้า และเป็นจุดที่สามารถมองเห็นความเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจน แต่กลับมีงานวิจัยจำนวนไม่มากนักที่สนใจรวมกระบวนการที่มีความต่อเนื่องกันอย่าง กระบวนการขนส่ง และ กระบวนการจัดการคิวอ้อยหน้าลานเข้าไว้ด้วยกัน ทั้งนี้ ด้วยความที่ระบบอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลของไทยนั้นค่อนข้างแตกต่างจากประเทศอื่น ๆ โดยประกอบไปด้วยเกษตรกรรายย่อยจำนวนมากซึ่งมักไม่ได้ขึ้นตรงกับทางโรงงานน้ำตาล และทำการวางแผนการเก็บเกี่ยวรวมถึงจัดส่งอ้อยด้วยตนเอง งานวิจัยที่ช่วยในส่วนของ การบริหารจัดการเก็บเกี่ยวเพียงอย่างเดียวแม้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวของแต่ละแปลงเพาะปลูกได้จริง แต่ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นอาจจะยังไม่มากพอเมื่อเปรียบเทียบกับความสูญเสียเปล่าในระบบที่เกิดขึ้นจากความไม่สม่ำเสมอของการจัดส่งอ้อยของเกษตรกรแต่ละราย ซึ่งทำให้เกิดการรอคอยคิวที่ยาวนานโดยไม่จำเป็น นอกจากนี้ จากการ

ค้นคว้าพบว่าแทบไม่มีงานวิจัยใดเลยที่จะพิจารณาในส่วนของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากกิจกรรมในโลจิสติกส์ขาเข้าของอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล ทางผู้วิจัยได้สังเกตเห็นช่องว่างดังกล่าว และทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาวิธีการบริหารจัดการทั้งทรัพยากรการเก็บเกี่ยว และคิวการจัดส่งอ้อยของเกษตรกร โดยคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม บนความคาดหวังว่าจะสามารถเป็นส่วนหนึ่งที่จะช่วยพัฒนาประสิทธิภาพของอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลในภาพรวมได้



บทที่ 3

ระบบโลจิสติกส์ขาเข้าของสินค้าน้ำตาลในปัจจุบัน

อ้อยจัดเป็นสินค้าเกษตรที่มีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย เพราะนอกจากจะเป็นวัตถุดิบในการผลิตแปรรูปน้ำตาลทรายแล้ว ผลิตภัณฑ์พลอยได้จากอ้อยยังสามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบสำคัญในอุตสาหกรรมอื่น ๆ ไม่ว่าจะเป็นการใช้กากน้ำตาลในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเครื่องดื่ม หรือการใช้กากอ้อยในอุตสาหกรรมพลังงาน แม้อ้อยจะเป็นสินค้าเกษตรที่ค่อนข้างพิเศษ กล่าวคือ โรงงานน้ำตาลจะเป็นผู้ซื้อผลผลิตเกือบทั้งหมด แต่ด้วยการที่ตัวอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทรายเองมีขนาดใหญ่ และมีความเชื่อมโยงกันในแต่ละกระบวนการทำให้ยากต่อการทำความเข้าใจธรรมชาติของระบบทั้งหมด ในบทที่ 3 นี้ ทางผู้วิจัยจะกล่าวถึงระบบโลจิสติกส์ขาเข้าของสินค้าน้ำตาลในประเทศไทยซึ่งเป็นส่วนที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ความสนใจ โดยเนื้อหาในบทนี้ประกอบไปด้วยภาพรวมของอุตสาหกรรมเพื่อให้เข้าใจถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อราค้อ้อย การทำสัญญาซื้อขายอ้อย และกระบวนการที่สำคัญในระบบโลจิสติกส์ขาเข้า ซึ่งได้แก่ การเก็บเกี่ยว การขนส่ง และการจัดการคิวรถก่อนที่อ้อยจะถูกนำเข้าไปยังกระบวนการแปรรูปเป็นน้ำตาล

3.1 ภาพรวมของอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลไทย

3.1.1 ระบบแบ่งปันผลประโยชน์

ในช่วงฤดูเก็บเกี่ยวอ้อยก่อนปี พ.ศ. 2525/2526 ราคาที่โรงงานน้ำตาลรับซื้ออ้อยจากเกษตรกรยังเป็นแบบเสรี ทำให้มักเกิดปัญหาที่ไม่สามารถตกลงราคาซื้อขายกันได้ เกษตรกรจำนวนมากได้รับความเดือดร้อนและมีความรู้สึกว่าการปลูกอ้อยส่งโรงงานนั้นเป็นอาชีพที่ไม่มีความมั่นคง จนในหลาย ๆ ครั้ง รัฐบาลต้องเป็นคนกลางเข้ามาไกล่เกลี่ยช่วยเหลือ และชดเชยราคาอ้อยให้กับเกษตรกร ด้วยเหตุดังกล่าวทางกระทรวงอุตสาหกรรมจึงได้เสนอแนวคิดการกำหนดราคากลางในการซื้อ - ขาย อ้อยขึ้นผ่านระบบแบ่งปันผลประโยชน์เพื่อให้เกิดความเป็นธรรมกับทุกฝ่าย ซึ่งคณะรัฐมนตรีก็ได้อนุมัติให้นำมาใช้ตั้งแต่ปีการผลิต 2525/2526 และเพื่อเป็นหลักประกันของระบบใหม่ที่เกิดขึ้น ทางรัฐบาลก็ได้ประกาศใช้พระราชบัญญัติอ้อยและน้ำตาลทราย พ.ศ. 2527 โดยมีผลบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 9 สิงหาคม พ.ศ. 2527 เป็นต้นมา

ระบบแบ่งปันผลประโยชน์นี้ จะทำให้เกษตรกรชาวไร่อ้อยได้เข้ามามีส่วนร่วม และรับรู้ถึงปริมาณน้ำตาลที่ผลิตได้ตลอดทั้งฤดู ไปจนถึงทำให้เกษตรกรรับทราบว่าผลประโยชน์สุทธิจากการ

จำหน่ายน้ำตาลทรายและผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้ (บางส่วน) เป็นเท่าไร ซึ่งผลประโยชน์นี้เอง จะถูกจัดสรรให้กับชาวไร่อ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 70 และโรงงานน้ำตาลร้อยละ 30 นอกจากนี้ เพื่อความถูกต้องเรียบร้อย ทั้งในด้านจำนวน คุณภาพ และการขนย้าย ในระหว่างกระบวนการผลิต และจัดจำหน่ายน้ำตาลของโรงงานน้ำตาลในแต่ละฤดูการผลิต องค์กรที่เป็นกลาง คือ ศูนย์บริหารการผลิต การจำหน่าย และการขนย้าย จึงถูกตั้งขึ้นโดยกลุ่มเกษตรกรไร่อ้อย โดยมีหน้าที่ดูแลการรับ ผลิต จำหน่าย และขนย้ายน้ำตาลทั่วทั้งประเทศ

3.1.2 การกำหนดราคาอ้อยและน้ำตาลทราย (ก่อน - หลัง)

เมื่อโรงงานน้ำตาลและเกษตรกรไร่อ้อยหันมาใช้ระบบแบ่งปันผลประโยชน์ในการจัดการราคาซื้อ - ขายอ้อย เพื่อความเป็นธรรม และเป็นมาตรฐานเดียวกันแล้วจึงจำเป็นต้องมีราคากลางที่ใช้ในการรับซื้ออ้อยของโรงงานน้ำตาล โดยในแต่ละฤดูการผลิต ราคารับซื้ออ้อยจะถูกประกาศผ่านทางพระราชกฤษฎีกา ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ระยะ ดังนี้

- **การกำหนดราคาอ้อยขั้นต้น** จะถูกกำหนดภายใต้การประมาณการของปริมาณอ้อยเข้าหีบ คุณภาพอ้อย และผลผลิตน้ำตาลต่ออ้อย 1 ตัน ปริมาณการบริโภคน้ำตาลทรายภายในประเทศ ราคาย้ำจำหน่ายน้ำตาลทราย อัตราการแลกเปลี่ยนเงินตรา และงบประมาณรายจ่าย ราคาอ้อยขั้นต้นจะถูกประกาศในช่วงก่อนการเปิดหีบ หรือประมาณเดือนพฤศจิกายนของทุกปี ซึ่งราคาอ้อยขั้นต้นนี้จะถูกใช้เป็นตัวเลขาอ้างอิงสำหรับจำนวนเงินที่เกษตรกรจะได้รับเมื่อทำการจัดส่งอ้อยให้กับทางโรงงานน้ำตาลในระหว่างฤดูการผลิต โดยสูตรการคำนวณราคาอ้อยขั้นต้นตามระบบแบ่งปันผลประโยชน์ เป็นดังแสดงในสมการที่ 3.1

$$\text{ราคาอ้อยขั้นต้น (บาท/ตัน)} = \frac{0.7(E_1 + E_2)}{Q_e} \quad (3.1)$$

เมื่อ E_1 = ประมาณการรายได้จากการจำหน่ายน้ำตาลทรายในประเทศ
 E_2 = ประมาณการรายได้จากการจำหน่ายน้ำตาลทรายไปต่างประเทศ
 Q_e = ประมาณการปริมาณอ้อยที่คาดว่าจะเข้าหีบทั้งหมดในฤดูกาลผลิต

หมายเหตุ: ประมาณการรายได้จะต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ของสูตรคำนวณข้างต้น

- **การกำหนดราคาอ้อยขั้นสุดท้าย** จะถูกพิจารณาโดยใช้รายได้สุทธิ ต้นทุน และผลตอบแทนในการผลิตอ้อย ต้นทุนและผลตอบแทนในการผลิตน้ำตาลทราย ราคาอ้อยขั้นต้น ผลตอบแทนการผลิตและจำหน่ายน้ำตาลทรายขั้นต้น และเงินที่ได้รับจากกองทุน โดยราคาอ้อยขั้นสุดท้ายจะถูกประกาศในช่วงเดือนธันวาคมหลังสิ้นสุดฤดูกาลผลิต โดยสูตรการคำนวณราคาอ้อยขั้นสุดท้ายตามระบบแบ่งปันผลประโยชน์ เป็นดังแสดงในสมการที่ 3.2

$$\text{ราคาอ้อยขั้นสุดท้าย (บาท/ตัน)} = \frac{[0.7(R_1+R_2)]}{Q_0} + X \quad (3.2)$$

เมื่อ	R_1	= รายรับสุทธิจากการจำหน่ายน้ำตาลทรายภายในประเทศ
	R_2	= รายรับสุทธิจากการจำหน่ายน้ำตาลไปต่างประเทศ
	Q_0	= จำนวนอ้อยเข้าหีบทั้งหมด
	X	= รายได้จากกากน้ำตาลสุทธิที่เกินจากปีฐาน (ร้อยละ 70)

ในกรณีที่เมื่อประกาศราคาอ้อยขั้นสุดท้ายแล้วพบว่า มีราคาสูงกว่าราคาอ้อยขั้นต้น ทางโรงงานน้ำตาลจะต้องชำระค่าอ้อยย้อนหลังให้กับเกษตรกรไร่อ้อยเพิ่ม แต่หากราคาอ้อยขั้นสุดท้ายต่ำกว่าราคาอ้อยขั้นต้น โรงงานน้ำตาลจะได้รับเงินชดเชยจากกองทุนอ้อยและน้ำตาลทรายเท่ากับส่วนต่างนั้น โดยไม่หักเงินจากเกษตรกรไร่อ้อยแต่อย่างใด (สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, 2553) ลำดับขั้นตอนการกำหนดราคาอ้อยและน้ำตาลทรายในข้างต้นสามารถแสดงได้ด้วยรูปภาพที่

3.1

หมายเหตุ: การรับซื้ออ้อยที่หน้าโรงงานจะใช้ราคาที่ถูกกำหนดนี้เป็นเกณฑ์สำหรับอ้อยที่มีความหวาน 10 ซี.ซี.เอส ซึ่งค่านี้จะถูกวัดโดยการที่โรงงานซึ่งนำหนักรถบรรทุกอ้อย แล้วนำน้ำที่ได้จากอ้อยที่ผ่านเครื่องหีบมาเข้าห้องตรวจวัดค่าความหวาน เพื่อคำนวณเป็นค่าอ้อยให้กับเกษตรกร หากอ้อยที่เข้าเครื่องหีบมีค่าความหวานมากกว่า หรือน้อยกว่า 10 ซี.ซี.เอส จะถูกเพิ่มหรือหักเงินค่าอ้อยตามที่คณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทรายกำหนด ทั้งนี้ค่าคุณภาพความหวานจะตรวจวัดจากน้ำอ้อยที่ได้จากลูกหีบชุดที่ 1 (First Juice) ซึ่งมีการคำนวณคุณภาพความหวาน ดังแสดงในสมการที่ 3.3

$$CCS = 0.9433P \frac{(100-F)}{100} - \frac{1}{2} [0.9660B \frac{(100-F)}{100} - 0.9433P \frac{(100-F)}{100}] \quad (3.3)$$

เมื่อ CCS = ค่าคุณภาพความหวาน (Commercial Cane Sugar, C.C.S) หมายถึง ค่าคุณภาพของอ้อยที่คำนวณมา จากจำนวนร้อยละของน้ำหนัคน้ำตาลบริสุทธิ์ที่ผลิตได้จากอ้อย (Pure Obtainable Sugar) ในสภาวะการผลิตมาตรฐานของโรงงานน้ำตาล

P = โพล (Pol) หมายถึง จำนวนร้อยละของน้ำตาลซูโครสในน้ำอ้อย

B = บริกซ์ (Brix) หมายถึง จำนวนร้อยละของของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในน้ำอ้อย

F = เส้นใย (Fiber) หมายถึง ส่วนประกอบของอ้อยที่เข้าหีบที่ไม่ละลายน้ำ โดยค่าโพล ค่าบริกซ์ และค่าเส้นใย จะทราบได้จากการตรวจวิเคราะห์ทางเคมีของแผนกลูกหีบ

3.1.3 ประเด็นปัญหา และแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลไทย

จากกรณีพิพาทระหว่างประเทศไทยกับประเทศบราซิล ภายใต้องค์การการค้าโลก (WTO) ในประเด็นที่ทางรัฐบาลไทยได้อุดหนุนอุตสาหกรรมน้ำตาลทราย จนกระทบกับการค้าน้ำตาลทรายโลก (Thai Subsidies concerning Sugar) ในวันที่ 15 มกราคม พ.ศ. 2561 คณะรักษาความสงบแห่งชาติจึงได้มีการประกาศคำสั่ง ที่ 1/2561 “เรื่องการแก้ไขกฎหมายเพื่อรองรับการปรับโครงสร้างอุตสาหกรรมอ้อย และน้ำตาลทรายทั้งระบบ” เพื่อลดต้นทุนค่าน้ำตาลทรายที่ขายหน้าโรงงาน โดยยกเลิกการกำหนดราคาจำหน่ายน้ำตาลทรายที่ใช้บริโภคภายในราชอาณาจักรและให้ราคาจำหน่ายน้ำตาลทรายนั้นเป็นไปตามกลไกของราคาน้ำตาลทรายในตลาดโลก แม้การเปลี่ยนแปลงนี้จะเป็นผลดี

ต่อผู้บริโภคทั่วไป และผู้ผลิตสินค้าจากน้ำตาลทรายในประเทศเนื่องจากราคาซื้อที่ถูกลง แต่การดำเนินการดังกล่าวกลับส่งผลเสียต่อเกษตรกรไร้อ้อยอย่างร้ายแรง เนื่องจากเดิมที่ราคาอ้อยที่เกษตรกรขายได้อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าต้นทุนการผลิตที่เพิ่มสูงขึ้นในทุก ๆ ปีอยู่ก่อนแล้ว เกษตรกรส่วนใหญ่ซึ่งประสบปัญหาขาดอย่างทุนต่อเนื่อง และเมื่อเกษตรกรจะไม่ได้รับเงินอุดหนุนจากการเก็บส่วนต่างน้ำตาลทราย 5 บาทต่อกิโลกรัม หรือเงินช่วยเหลือค่าอ้อย 160 บาทต่อตันอ้อยจากรัฐบาลอีกต่อไป ความอยู่รอดของเกษตรกรไร้อ้อยจึงถือได้ว่าอยู่บนสภาวะสุ่มเสี่ยงเป็นอย่างมาก (วิริยะ คล้ายแดง, 2561) นอกจากนี้ผลกระทบของพระราชบัญญัติภาษีสรรพสามิต พ.ศ. 2560 ในการจัดเก็บภาษีจากเครื่องดื่มไม่มีแอลกอฮอล์ตามปริมาณความหวาน ยังทำให้การจำหน่ายน้ำตาลภายในประเทศไปยังผู้ประกอบการผลิตเครื่องดื่มมีแนวโน้มว่าจะเป็นไปอย่างยากลำบากมากยิ่งขึ้นอีกด้วย

3.2 รูปแบบการซื้อขายอ้อย – ระบบคู่สัญญา

3.2.1 การซื้อขายอ้อยในประเทศไทย

ในอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลไทย สามารถกล่าวได้ว่ามีรูปแบบของการซื้อขายอ้อยอยู่ด้วยกัน 2 รูปแบบ คือ

- **การซื้อขายแบบทันที (Spot Market)** คือ การที่เกษตรกรไร้อ้อยทำการเก็บเกี่ยวและขนส่งอ้อยขึ้นรถบรรทุกมาขายที่หน้าโรงงานน้ำตาลเองโดยตรง โดยไม่มีการแจ้งกับทางโรงงานน้ำตาลก่อนล่วงหน้า รูปแบบนี้เกษตรกรสามารถขายอ้อยให้กับโรงงานใดในปริมาณใด ๆ ตามต้องการ
- **การซื้อขายแบบล่วงหน้า (Future Forward Market)** คือ การที่เกษตรกรไร้อ้อยทำสัญญาการเพาะปลูกและจัดส่งอ้อยให้กับทางโรงงานน้ำตาล โดยสิทธิในการทำสัญญาซื้อขายอ้อยล่วงหน้ากับโรงงานน้ำตาลนั้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการจัดส่งอ้อยได้เกินปริมาณขั้นต่ำที่โรงงานแต่ละแห่งเป็นผู้กำหนด ซึ่งเราสามารถจำแนกเกษตรกรไร้อ้อยได้เป็น 3 กลุ่มตามปริมาณขั้นต่ำ ได้แก่
 - **เกษตรกรไร้อ้อยรายใหญ่** ที่มีขนาดพื้นที่เพาะปลูกมากเพียงพอที่จะจัดส่งอ้อยให้กับโรงงานน้ำตาลได้เกินปริมาณขั้นต่ำที่กำหนด ซึ่งสามารถทำสัญญาซื้อขายอ้อยกับโรงงานได้โดยตรง
 - **เกษตรกรไร้อ้อยคนกลาง** หรือ “หัวหน้าโควตา” เป็นผู้ที่โรงงานน้ำตาลทำสัญญาให้ทำการรวบรวมจัดหาอ้อยมาส่ง โดยจะทำหน้าที่รวบรวมอ้อยจากเกษตรกรรายอื่น ๆ รวม

กับอ้อยของตนเองให้ได้ปริมาณเพียงพอกับปริมาณขั้นต่ำของโรงงาน ซึ่งหัวหน้าโควตานี้ อาจเป็นเกษตรกรที่มีปริมาณอ้อยเป็นจำนวนมาก และสามารถทำสัญญาซื้อขายกับ โรงงานน้ำตาลได้โดยตรง หรือเป็นนายทุนที่รับซื้ออ้อยเพื่อส่งโรงงานน้ำตาลเพียงอย่าง เดียวก็ได้

- **เกษตรกรไร้อ้อยรายเล็ก หรือรายย่อย** ที่มีพื้นที่ปลูกอ้อยน้อย ไม่สามารถจัดส่งอ้อยได้ เท่าปริมาณขั้นต่ำที่ทางโรงงานน้ำตาลกำหนดได้ จึงต้องใช้วิธีทำสัญญาเพาะปลูกกับ หัวหน้าโควตาที่ทำสัญญากับโรงงานน้ำตาลไว้แล้ว ในลักษณะของ “ลูกไร่”

นอกจากนี้ สัญญาซื้อขายแบบล่วงหน้าที่ใช้กันในปัจจุบันยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

- **สัญญาไร่** – เกษตรกรต้องแจ้งที่ตั้ง และขนาดของพื้นที่เพาะปลูกอ้อยให้ทางโรงงาน น้ำตาลรับทราบ หลังจากนั้นเจ้าหน้าที่ของโรงงานน้ำตาลจะเข้ามาสำรวจพื้นที่ไร่ และ ประเมินผลผลิตอ้อยที่ใช้ทำสัญญา
- **สัญญาตัน** – เกษตรกรทำการประเมินปริมาณอ้อยที่จะใช้ทำสัญญากับทางโรงงาน น้ำตาลด้วยตนเอง โรงงานจะไม่ทราบถึงที่ตั้ง และขนาดของพื้นที่ปลูกอ้อยที่ทำสัญญาได้ โดยวิธีนี้มักจะถูกใช้ในเกษตรกรไร้อ้อยรายใหญ่ หัวหน้าโควตา หรือเกษตรกรที่อยู่นอก พื้นที่ส่งเสริมของโรงงานน้ำตาล

ทั้งนี้เราจะเรียกระบบการใช้หนังสือสัญญาที่เกษตรกรไร้อ้อยทำกับโรงงานน้ำตาลเพื่อใช้ ในการซื้อขายอ้อยนี้ว่า “ระบบคู่สัญญา”

3.2.2 ความสำคัญของระบบคู่สัญญา

แม้ว่ารูปแบบการซื้อขายอ้อยจะมีอยู่ 2 รูปแบบ แต่จากข้อกำหนดของคณะกรรมการอ้อย และน้ำตาลทรายที่ให้ผู้ขายอ้อยกับโรงงานน้ำตาลต้องทำสัญญาซื้อขายล่วงหน้าก่อนถึงฤดูกาลผลิต น้ำตาลทราย ทำให้การซื้อขายอ้อยในปัจจุบันเปลี่ยนมาเป็นรูปแบบการซื้อขายล่วงหน้าเกือบทั้งหมด และเนื่องจากอ้อยนั้นเป็นพืชเศรษฐกิจพิเศษที่ถูกปลูกขึ้นเพื่อป้อนขายเป็นวัตถุดิบให้กับโรงงานผลิต น้ำตาลเท่านั้น หลังจากเก็บเกี่ยวอ้อยแล้วก็จำเป็นต้องรีบนำส่งเข้าโรงงานเพื่อแปรรูปให้เร็วที่สุดเพื่อมิ ให้คุณภาพความหวานลดต่ำลง การที่มีข้อจำกัดด้านช่องทางการขายเพียงช่องทางเดียว ทำให้ เกษตรกรต้องการความมั่นใจว่าจะมีโรงงานรับซื้ออ้อยได้ก่อนแล้วจึงตัดสินใจเริ่มเพาะปลูก ใน ขณะเดียวกันโรงงานน้ำตาลต้องใช้เงินทุนในการก่อสร้างโรงงานและจัดซื้อเครื่องจักรเป็นจำนวนมาก

แต่กลับมีช่วงเวลาเปิดโรงงานเพื่อหีบอ้อยเพียง 4 - 5 เดือนต่อปี เพื่อความคุ้มทุน ทางโรงงานน้ำตาลจึงจำเป็นต้องจัดหาอ้อยในปริมาณที่มากเพียงพอ และสม่ำเสมอเข้าเครื่องหีบเพื่อผลิตน้ำตาลตลอด 24 ชั่วโมง การหันมาใช้ระบบคู่สัญญาจึงนับได้ว่าเป็นประโยชน์กับทั้งโรงงานน้ำตาลและเกษตรกรไร้อ้อยเอง นอกจากนี้เกษตรกรที่ทำสัญญายังจะได้รับเงินมัดจำจากการขายอ้อยล่วงหน้า หรือ “เงินเกี้ยว” เป็นเช็คล่วงหน้า ซึ่งสามารถนำไปขายลดกับธนาคารที่โรงงานน้ำตาลมีเครดิตอยู่ แล้วนำเงินไปใช้จ่ายก่อน หรือรอนำไปขึ้นเงินเมื่อครบกำหนดส่งอ้อยต่อไป

3.3 การเก็บเกี่ยว และการบรรทุกอ้อย

3.3.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อน้ำหนักและคุณภาพความหวานของอ้อย

การเก็บเกี่ยวและจัดส่งอ้อยให้กับโรงงานน้ำตาลต้องดำเนินการให้เสร็จสิ้นภายในเวลาที่โรงงานนั้น ๆ เปิดหีบรับอ้อยอยู่ หรือประมาณ 100 - 120 วัน ซึ่งหากทำการเก็บเกี่ยวไม่ทันเกษตรกรมีทางเลือกเดียว คือ ต้องตัดอ้อยทิ้ง ด้วยความที่เมื่อต้นอ้อยสะสมน้ำหนักและน้ำตาลจนสูงสุดแล้ว (หรือต้นอ้อยออกดอกแล้ว) น้ำหนักและน้ำตาลในต้นจะค่อย ๆ ลดลง จึงไม่สามารถเลือกเก็บอ้อยไว้เพื่อรอเก็บเกี่ยวและขายในฤดูการผลิตถัดไปได้ โดยปัจจัยที่ส่งผลกับน้ำหนักและคุณภาพความหวานของอ้อยที่เกษตรกรต้องพิจารณาเพื่อวางแผนเก็บเกี่ยวมีดังต่อไปนี้

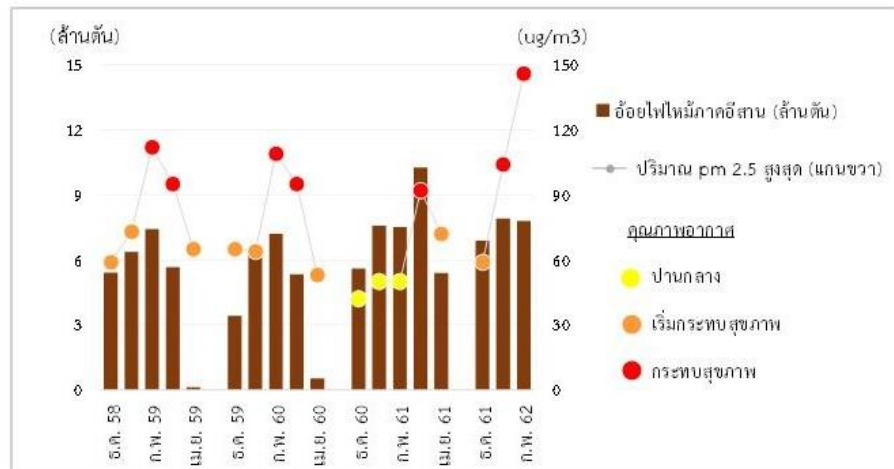
- **พันธุ์ของอ้อย** อ้อยแต่ละพันธุ์มีพฤติกรรมในการสะสมน้ำตาลในลำต้นที่แตกต่างกัน
- **อายุของอ้อย** อ้อยเป็นพืชที่สะสมน้ำหนักรวมและความหวานได้สูงในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ ขึ้นกับพันธุ์ที่ปลูก โดยสามารถสังเกตได้จากช่วงเวลาก่อนหรือหลังการออกดอกของอ้อยเล็กน้อย ที่อ้อยจะมีน้ำหนักและคุณภาพความหวานสูงสุด
- **จำนวนครั้งที่ทำการเก็บเกี่ยว** อายุของอ้อยปลูกจะนับตั้งแต่วันที่เริ่มงอกหรือวันที่เริ่มเพาะปลูก ในขณะที่อ้อยต่อหรืออ้อยที่ถูกเก็บเกี่ยวมาจากฤดูการผลิตก่อนหน้านี้จะนับตั้งแต่วันที่ทำการเก็บเกี่ยว ดังนั้นอ้อยต่อจึงมีความพร้อมและสุกพร้อมเก็บเกี่ยวได้เร็วกว่าอ้อยปลูก และอ้อยต่อที่มีอายุมากกว่าจะถูกเก็บเกี่ยวก่อน แต่อย่างไรก็ตามอ้อยต่อจะได้น้ำหนักที่น้อยกว่าอ้อยปลูก โดยเกษตรกรไร้อ้อยจะทำการเก็บเกี่ยวผลผลิตอ้อยสูงสุดแค่ 3 ครั้งเท่านั้น
- **ระยะเวลา นับตั้งแต่ถูกเก็บเกี่ยวจนเข้าหีบ** อ้อยที่ถูกทิ้งไว้นานจะทำให้ น้ำในลำต้นของอ้อยระเหยออกไป ส่งผลให้สารละลายในอ้อยมีความเข้มข้นขึ้น และเกิดสารปนเปื้อน (Impurity) และสารอื่น ๆ ที่เปลี่ยนน้ำตาลไปเป็นน้ำตาลอินเวท (Invert Sugar) ทำให้ค่าบรีกซ์สูงขึ้น และค่าโพลาไรซต่ำลง คุณภาพความหวานและค่าความบริสุทธิ์ (Purity) จึงลดลงไปตามเวลาด้วย

เช่นกัน นอกจากนี้ น้ำตาลซูโครสในอ้อยที่ใช้ผลิตเป็นน้ำตาลทรายจะถูกแบคทีเรียเปลี่ยนเป็นกรดแลคติก (Lactic) และเด็กซ์แทรน (Dextran) ซึ่งมีความเหนียวและส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการผลิตน้ำตาลทรายโดยรวมของโรงงานน้ำตาล

- **ลักษณะการตัดอ้อย** โคนของต้นอ้อยเป็นส่วนที่มีน้ำหนักและความหวานมากที่สุดในทุกช่วงอายุของอ้อย ยิ่งสามารถตัดอ้อยได้ชิดดินเท่าไรก็ยิ่งได้ค่าความหวานรวมของอ้อยที่สูงมากขึ้นเท่านั้น แต่ในทางกลับกัน ในส่วนของยอดอ้อยเป็นส่วนที่มีน้ำตาลอยู่น้อยและถ้าไม่ตัดทิ้งไปจะส่งผลให้ค่าความหวานโดยรวมลดลง
- **การเผาอ้อย** เนื่องจากการตัดอ้อยสดด้วยแรงงานจำเป็นต้องรีบไถของต้นอ้อย และลอกกาบอ้อยออกทำให้กระบวนการเก็บเกี่ยวเป็นไปอย่างเชื่องช้า การเผาอ้อยก่อนตัดจึงสามารถลดขั้นตอนในสองส่วนที่กล่าวมาและเพิ่มความเร็วโดยรวมในการเก็บเกี่ยวได้ ด้วยปัญหาการขาดแคลนแรงงานที่เริ่มรุนแรงมากขึ้นและกรอบเวลาการเก็บเกี่ยวที่ไม่เพียงพอ ทำให้เกษตรกรไร่อ้อยในหลายพื้นที่นิยมที่จะเผาอ้อยก่อนตัด ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 60 ของปริมาณอ้อยที่ถูกป้อนเข้าสู่โรงงานน้ำตาลทั้งหมดในแต่ละฤดูการผลิต (ภัทริยา นวลใย, 2562) แต่หลังจากอ้อยถูกเผาแล้วน้ำหนักและค่าความหวานของอ้อยจะลดลงอย่างรวดเร็วมากกว่าอ้อยตัดสด ทำให้ต้องรีบนำเข้าสู่โรงงานน้ำตาลภายใน 24 ชั่วโมงเพื่อไม่ให้เกิดความสูญเสียที่มากเกินไป นอกจากนี้อ้อยไฟไหม้ยังส่งผลเสียกับกระบวนการผลิตน้ำตาลของโรงงาน เช่น น้ำเชื่อมที่ได้มีความหนืดสูงจึงต้มระเหยน้ำออกจากน้ำเชื่อมได้ช้าลง ทำให้สิ้นเปลืองทั้งพลังงาน เชื้อเพลิง เวลา และยังส่งผลกับคุณภาพของผลึกน้ำตาลที่ได้อีกด้วย

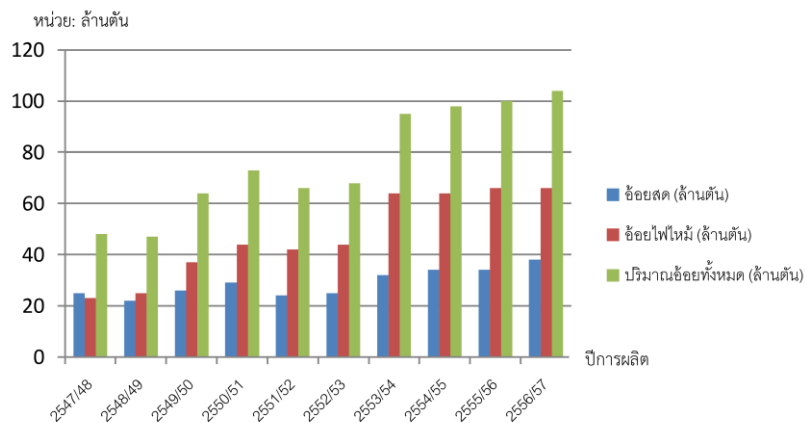
การเผาพืชตามไร่นานับว่าเป็นต้นเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็กหรือ PM 2.5 ที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชากร โดยหากมองไปยังพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทยที่มีพื้นที่เพาะปลูกอ้อยเป็นปริมาณกว่าครึ่งหนึ่งของทั้งประเทศและมักประสบปัญหา PM 2.5 แล้ว จะพบว่าปัญหานี้มีความเกี่ยวข้องกับการเผาอ้อยในช่วงฤดูการเปิดหีบ (ธันวาคม - เมษายน ในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ) อย่างมีนัยสำคัญพร้อมทั้งปัญหาจะยิ่งทวีความรุนแรงขึ้นในช่วงที่อากาศแห้งแล้งและมีปริมาณฝนที่น้อย ดังที่แสดงในรูปภาพที่ 3.2

ปริมาณอ้อยไฟไหม้และ PM 2.5 ในภาคอีสาน



รูปภาพที่ 3.2 แผนภาพแสดงข้อมูล PM 2.5 เทียบกับปริมาณอ้อยไฟไหม้ในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย (สอน. และกรมควบคุมมลพิษ, 2562)

แม้ภาครัฐจะมีการออกมาตรการเพื่อพยายามแก้ไขปัญหา เช่น การคิดค่าปรับอ้อยไฟไหม้จำนวน 30 บาท/ตันอ้อย แล้วนำไปเพิ่มค่าอ้อยให้กับเกษตรกรที่ตัดอ้อยสด หรือการกำหนดสัดส่วนรับซื้ออ้อยสดให้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 60 ต่อปริมาณอ้อยเข้าหีบต่อวัน แต่ปัญหาการเผาอ้อยก่อนตัดนี้ก็ยังไม่มีความโน้มที่จะลดลงแต่อย่างใด โดยรายงานการผลิตน้ำตาลทรายฉบับปิดหีบประจำฤดูกาลผลิต 2547/48 – 2556/57 ในรูปภาพที่ 3.5 ได้แสดงให้เห็นถึงสัดส่วนของน้ำตาลที่ผลิตจากอ้อยสดและอ้อยไฟไหม้ที่ยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง



รูปภาพที่ 3.3 รายงานการผลิตน้ำตาลทรายฉบับปิดหีบของโรงงานทั่วประเทศ ฤดูกาลผลิต 2547/48 – 2556/57

(สอน., ศูนย์บริหารการผลิต การจำหน่าย และการขนย้ายน้ำตาล, 2558)

จะเห็นได้ว่าปัญหาที่เกิดจากการเผาอ้อยนั้นส่งผลกระทบต่อทุกฝ่าย ทั้งที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมน้ำตาล และไม่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้การลดปริมาณอ้อยไฟไหม้จึงเป็นประเด็นที่ทุกคนควรให้ความสนใจ และร่วมมือกันหาทางแก้ไข

3.3.2 ระบบการเก็บเกี่ยวและบรรทุกอ้อย

โดยส่วนใหญ่เกษตรกรไร่อ้อยจะมีความพร้อมสำหรับเก็บเกี่ยวในช่วงประมาณเดือนมกราคม ถึงกุมภาพันธ์ ทั้งในอายุของอ้อยในไร่ที่เหมาะสมและแรงงานตัดอ้อยจำนวนมากที่ว่างงานหลังจากเก็บเกี่ยวข้าวเสร็จสิ้นแล้ว รูปแบบการเก็บเกี่ยวอ้อยในประเทศไทยมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ ดังนี้

- **รูปแบบที่ 1: การใช้แรงงานคนทั้งตัด และขนอ้อยขึ้นรถบรรทุก** มักจะเริ่มการตัดตั้งแต่ช่วงเช้าจนถึงช่วงเย็นขึ้นกับปริมาณของอ้อยที่ตัด คนงานตัดอ้อยจะทำการตัดอ้อยแล้วกองไว้ในไร่ หรือมัดอ้อยประมาณมัดละ 10 ลำแล้ววางเรียงไว้ในไร่ โดยทั่วไปแล้วคนงานสามารถตัดอ้อยได้เฉลี่ยวันละ 1 – 1.5 ตันต่อคนสำหรับอ้อยสด และ 2 – 3 ตันต่อคนสำหรับอ้อยไฟไหม้ ขึ้นอยู่กับขนาด ความยาว และความยากง่ายในการตัดของอ้อยในไร่ ซึ่งอ้อยไฟไหม้จะตัดได้ง่าย และรวดเร็วกว่าอ้อยสดเนื่องจากใบอ้อยถูกเผาไปแล้ว คนงานไม่ต้องทำการริดใบอีก เป็นผลให้ค่าแรงตัดอ้อยสดนั้นสูงกว่าอ้อยไฟไหม้เช่นกัน โดยอัตราจ้างจะถูกคิดเป็นต่อจำนวนมัดอ้อย หรือคิดเป็นระยะตัดต่อวาต่อไร่ การขนอ้อยขึ้นรถบรรทุกสิบล้อหนึ่งคันใช้เวลาประมาณ 4 – 6 ชั่วโมงโดยเฉลี่ย และมีอัตราจ้างคิดเป็นต่อตันต่อที่ขึ้นอ้อย
- **รูปแบบที่ 2: การใช้แรงงานคนตัด และใช้รถคีบอ้อยขึ้นรถบรรทุก** คนงานตัดอ้อยจะทำการตัดอ้อยแล้วมัดหรือกองไว้ในไร่ตามปกติ แล้วจึงใช้รถคีบอ้อยที่กองไว้ขึ้นรถบรรทุก วิธีนี้จะใช้เวลาในการขึ้นอ้อยจนเต็มรถบรรทุกสิบล้อประมาณ 1 – 1.5 ชั่วโมง แต่การขึ้นอ้อยแบบนี้จะทำให้มีหิน ดิน ทราย รวมถึงสิ่งสกปรกปะปนไปกับอ้อยจำนวนมาก เมื่อเข้าสู่สายพานการผลิตอาจก่อให้เกิดความเสียหายกับเครื่องจักรได้
- **รูปแบบที่ 3: การใช้รถตัดอ้อย** ใช้รถที่ออกแบบมาสำหรับการตัดอ้อยโดยเฉพาะแทนแรงงานคน อ้อยที่ได้จะมีขนาดประมาณ 20 – 30 เซนติเมตร ใช้พดลมเพื่อพดเศษกาบหรือใบออกจากท่อนอ้อยพร้อม ๆ กับส่งท่อนอ้อยลงสู่รถบรรทุกที่วิ่งขนบข้างอยู่ โดยรถตัดอ้อยสามารถตัดอ้อยได้ประมาณ 200 – 300 ตันต่อวัน (ระยะเวลาทำงานประมาณ 10 ชั่วโมง) แม้ว่าการใช้รถตัดอ้อยจะเป็นการแก้ปัญหาแรงงานคนของเกษตรกรเจ้าของไร่อ้อยเพราะสามารถตัดและขนอ้อยขึ้นรถบรรทุกได้พร้อม ๆ กัน แต่อ้อยที่ถูกตัดเป็นท่อนขนาดเล็กจะ

สูญเสียน้ำหนักและค่าความหวานเร็วกว่าอ้อยตัดสดทั่วไป ทั้งยังต้องมีการปรับปรุงพื้นที่แปลงปลูกอ้อยให้มีระดับสม่ำเสมอ ไม่มีก้อนหินหรือตอไม้ในพื้นที่ มีการเว้นระยะของต้นอ้อยอย่างเหมาะสม และมีพื้นที่บริเวณหัวและท้ายแปลงสำหรับใช้กลับริด ทำให้ในบางครั้งเกษตรกรไร้อ้อยที่ไม่ได้วางแผนการเพาะปลูกล่วงหน้าหรือมีสภาพพื้นที่เพาะปลูกไม่มากพอไม่สามารถจะใช้งานรถตัดอ้อยได้

ปัญหาที่มักพบในกระบวนการเก็บเกี่ยวอ้อย คือ ปัญหาสภาพแวดล้อมในการทำงานหรืออากาศที่ร้อนจัดภายในไร่ โดยเฉพาะช่วงระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ถึงเมษายน ทำให้หาแรงงานได้ยากและอาจจะทำงานได้ไม่ต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดการเผาอ้อยเพื่อเพิ่มความเร็วในการตัดตามมา นอกจากนี้แรงงานในอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลไทยส่วนมากมีภูมิลำเนาอยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศ เกษตรกรไร้อ้อยต้องจัดการเพื่อไปรับและส่งแรงงานหลังทำการเก็บเกี่ยวอ้อยจนแล้วเสร็จ หากแต่เมื่อถึงช่วงเทศกาลสงกรานต์แรงงานเกือบทั้งหมดจะลากลับบ้านและเกษตรกรที่เก็บเกี่ยวอ้อยไม่หมดจะต้องส่งรถมารับแรงงานอีกครั้งซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายเป็นอย่างมาก

3.4 การจัดส่งอ้อยไปยังโรงงานน้ำตาล

3.4.1 การบรรทุกอ้อย

สำหรับกิจกรรมโลจิสติกส์ขาเข้าของวัตถุดิบนี้ เกษตรกรไร้อ้อยจะเป็นผู้รับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการขนส่งอ้อยจากไร่เข้าสู่โรงงานทั้งหมดด้วยตนเอง โดยปกติแล้วเกษตรกรรายใหญ่ หรือหัวหน้าโควตาจะมีรถบรรทุกเป็นของตนเองเพื่อใช้ขนส่งอ้อยปริมาณมากทั้งส่วนของตนเองและลูกไร่ไปยังโรงงานน้ำตาล ส่วนเกษตรกรรายย่อยต้องใช้วิธีจัดการรับจ้างอิสระหรือรถบรรทุกของหัวหน้าโควตาที่ว่างอยู่ ซึ่งวิธีนี้เกษตรกรจะถูกคิดค่าบริการขนส่งตามระยะทางระหว่างไร่กับโรงงานน้ำตาล

เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้ถนนทางหลวงเสียหายจากน้ำหนักที่มากเกินไปของถนน กรมทางหลวงจึงได้ออกกฎหมายห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนักบรรทุกหรือน้ำหนักลงเพลาเกินกว่าที่กำหนด เพราะอาจทำให้ทางหลวงเสียหายได้ ซึ่งกำหนดน้ำหนักบรรทุกสำหรับรถบรรทุกสิบล้อ และรถบรรทุกสิบล้อพ่วงในปัจจุบันคือ 25 และ 50.5 ตัน ตามลำดับ และเพื่อความปลอดภัยให้บรรทุกได้สูงไม่เกิน 3.8 เมตรจากพื้นดิน แต่เกษตรกรจำนวนมากมีแนวโน้มที่จะให้รถบรรทุก บรรทุกอ้อยเกินทั้งน้ำหนัก และความสูงจากที่กฎหมายกำหนดไว้เพื่อลดค่าใช้จ่ายที่เกิดจากจำนวนเที่ยวขนส่งที่เพิ่มขึ้น รวมไปถึงมีการขับด้วยความเร็วเพื่อเพิ่มจำนวนรอบส่งของคนขับรถบรรทุกเอง ส่งผลให้

เกิดอันตรายกับผู้ใช้งานในช่วงฤดูหีบอ้อยเป็นอย่างมาก โดยปกติแล้วสำหรับการขนส่งอ้อย เส้นทางที่ยานพาหนะต้องวิ่งผ่านแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบหลัก ๆ คือ เส้นทางไนโร และเส้นทางหลวง ซึ่งเมื่อเฉลี่ยทั้งขาไปและกลับแล้วรถบรรทุกทุกสิบล้อจะมีความเร็วเมื่อวิ่งบนทางหลวงอยู่ที่ประมาณ 60 - 70 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

3.4.2 สถานีขนถ่ายอ้อย (Cane Station)

โรงงานน้ำตาลในหลายพื้นที่ได้มีการตั้งสถานีขนถ่ายอ้อยขึ้น โดยมักอยู่ห่างจากโรงงานน้ำตาลไม่เกิน 100 กิโลเมตรโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกษตรกรมีตัวเลือกมากขึ้นในการขนส่งอ้อยมายังสถานีขนถ่ายซึ่งมีระยะทางใกล้กว่าการขนส่งจากไร่ไปโรงงาน ซึ่งเกษตรกรจะถูกเรียกเก็บค่าธรรมเนียมการจัดส่งอ้อยตามน้ำหนักหรือระยะทางจากสถานีขนถ่ายไปยังโรงงานน้ำตาล

3.5 ระบบคิวจัดส่งอ้อย – การจัดการหน้าลาน

รถบรรทุกอ้อยที่มาถึงบริเวณหน้าโรงงานน้ำตาลจำเป็นต้องรอคิวเพื่อที่จะเทอ้อยเข้าเครื่องหีบ เนื่องจากในฤดูการผลิตน้ำตาลหนึ่ง ๆ จะมีช่วงเวลาที่รถบรรทุกอ้อยขนอ้อยเข้ามายังโรงงานน้ำตาลเป็นจำนวนมากเกินกว่ากำลังการผลิตของเครื่องหีบอ้อย ซึ่งแต่ละโรงงานเองก็จะมีวิธีการจัดสรรคิวรถบรรทุกเพื่อเทอ้อยที่แตกต่างกันไป ขึ้นกับช่วงเวลาในฤดู สถานการณ์เฉพาะหน้า และสภาพแวดล้อมโดยรวมของโรงงาน ระบบคิวใหญ่ ๆ ที่พบในอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทรายของไทยมีอยู่ด้วยกัน 2 ระบบ ได้แก่

3.5.1 ระบบคิวเสรี หรือระบบคิวเข้า

ระบบคิวเสรี เป็นระบบคิวที่โรงงานน้ำตาลส่วนมากนิยมใช้กัน จะไม่มีการเรียกรถบรรทุกเข้าโรงงาน เกษตรกรแต่ละรายจึงสามารถกำหนดช่วงเวลาเก็บเกี่ยว และจัดส่งอ้อยได้ตามความต้องการของตนเอง รถบรรทุกคันที่มาถึงโรงงานก่อนจะได้เข้าเทอ้อยก่อน คันที่มาทีหลังก็ต้องคิวกันไปตามลำดับ โดยในบางโรงงานอาจจะมีการจัดสรรให้รถบรรทุกอ้อยสดมีลำดับเทอ้อยไวกว่ารถบรรทุกอ้อยไฟไหม้ หรือแยกแท่นเทอ้อยของรถบรรทุกทั้งสองประเภทออกจากกัน เพื่อความสะดวกและประหยัดเวลาของรถบรรทุกอ้อยสด เป็นการสนับสนุนให้เกษตรกรไร่อ้อยตัดอ้อยสดเพื่อส่งโรงงานกันมากขึ้น และเพื่อควบคุมไม่ให้เกษตรกรที่มีรถบรรทุกจำนวนน้อยกว่าเสียเปรียบเรื่องจำนวนเที่ยวของการจัดส่งอ้อย

3.5.2 ระบบคิวล๊อค หรือระบบคิวออก

ระบบคิวล๊อค เป็นระบบที่โรงงานน้ำตาลกำหนดช่วงเวลาในการเก็บเกี่ยวและจัดส่งอ้อยให้กับเกษตรกรผู้สัญญาทุกคน โดยเกษตรกรจะได้รับหมายเลขคิวจากทางโรงงานน้ำตาลแล้วจะทำการจัดส่งอ้อยตามลำดับการเรียกคิวเท่านั้น ซึ่งระบบนี้เองทำให้โรงงานน้ำตาลสามารถวางแผนกำลังการผลิตและอัตราการจัดส่งอ้อยของเกษตรกรได้อย่างเหมาะสม และปริมาณรถบรรทุกที่เข้ามายังโรงงานในแต่ละช่วงเวลามีความสม่ำเสมอมากกว่าระบบคิวเสรี โดยการจะใช้ระบบคิวล๊อคอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดได้นั้นโรงงานน้ำตาลจำเป็นต้องทำความเข้าใจและอาศัยความร่วมมือของเกษตรกรเป็นอย่างมากเพื่อให้อ้อยที่ถูกจัดส่งเข้าโรงงานมีความสม่ำเสมอและมีปริมาณเหมาะสม แต่ในทางปฏิบัติแล้วเกษตรกรไร้อ้อยมักจะไม่ค่อยยอมรับการนำระบบคิวล๊อคมาใช้มากนัก เนื่องจากในหลาย ๆ ครั้งมีปัจจัยที่ทำให้เกษตรกรไม่สามารถจัดส่งอ้อยได้ตามคิวหรือแผนที่วางไว้ได้ ตัวอย่างเช่น ปัญหาการขาดแคลนแรงงานตัดอ้อย ปัญหาไฟไหม้อ้อยในไร่ที่ลุกลามภายในพื้นที่และทำให้เกษตรกรต้องการจัดส่งอ้อยเกินจำนวน หรือปัญหาสภาพอากาศ มีฝนหลงฤดูทำให้ไม่สามารถนำรถตัดอ้อยหรือรถบรรทุกเข้าไปในไร่ได้

อย่างไรก็ตามทางโรงงานน้ำตาลจะเป็นผู้กำหนดใช้ระบบคิวทั้งสองนี้ในการจัดส่งอ้อยตามความเหมาะสม เช่น ในช่วงต้นฤดูผลิตที่ปริมาณอ้อยเข้าหีบมีน้อยและไม่มีปัญหาการรอคิว โรงงานน้ำตาลอาจจะเลือกใช้ระบบคิวเสรี แต่ในช่วงกลางฤดูผลิตที่เริ่มมีอ้อยเข้าหีบจำนวนมากและมีปัญหาเรื่องการรอคิว โรงงานน้ำตาลอาจจะเลือกนำระบบคิวล๊อคมาใช้เพื่อควบคุมปริมาณการจัดส่งอ้อยให้เหมาะสมและไม่เกิดความสูญเสียจากการรอคอยของรถบรรทุกมากเกินไป

CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.6 วิเคราะห์ระบบโลจิสติกส์ขาเข้า

ระบบโลจิสติกส์ขาเข้าของอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลไทยประกอบไปด้วย 4 กระบวนการหลัก ได้แก่ การเพาะปลูก การเก็บเกี่ยวและบรรทุก การจัดส่ง และการจัดการคิวหน้าลาน โดยในส่วนของกระบวนการเพาะปลูกแม้ว่าการวางแผนจัดการพื้นที่เพาะปลูกจะเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญที่จะทำให้สามารถบริหารจัดการทรัพยากรการผลิต เช่นรถตัดอ้อย และตารางเวลาการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่กลับเป็นจุดที่เริ่มต้นแก้ไขได้ยากที่สุดเนื่องจากเกษตรกรไร้อ้อยนั้นมีจำนวนมากและแต่ละคนยังมีแนวคิด ความต้องการ รวมถึงประสบการณ์และความชำนาญในการเพาะปลูกที่แตกต่างกัน นอกจากนี้อ้อยยังเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีช่วงเวลาการเก็บเกี่ยวอยู่ที่ 2 - 3 ฤดูการผลิต หากจะทำการปรับเปลี่ยนแผนการปลูกใหม่เกษตรกรจำเป็นต้องรื้อถอนอ้อยต่อที่มีอยู่ทั้งหมดเสียก่อน การ

ให้ความร่วมมือของเกษตรกรโดยภาพรวมจึงน่าจะเป็นสิ่งที่สามารถเกิดขึ้นได้หลังจากที่เราสามารถแสดงให้เห็นถึงผลประโยชน์ที่เป็นไปได้ในระยะยาว และมีการจ่ายเงินชดเชยค่าอ้อยที่เหมาะสมแล้วเท่านั้น แต่อย่างไรก็ดี ข้อมูลประมาณการผลผลิตและวันที่เก็บเกี่ยวยังสามารถนำมาใช้เพื่อบริหารจัดการทรัพยากรและคิวการจัดส่งให้ดียิ่งขึ้นได้ โดยหากเรามองกระบวนการทำงานย้อนกลับจะพบว่าความไม่สม่ำเสมอและขาดการจัดการของรถบรรทุกที่เข้ามายังโรงงานน้ำตาลเป็นปัจจัยหลักทำให้เกิดการรอคิวเฉลี่ยที่ยาวนานขึ้น ซึ่งการที่รถบรรทุกอ้อยรอคิวอยู่ที่หน้าโรงงานนานขึ้นนี้จะทำให้รถบรรทุกที่ว่างงานในระบบในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ ลดลง ส่งผลกระทบต่อไปยังกระบวนการตัดอ้อยที่รถตัดจะไม่สามารถทำงานได้หากไม่มีรถบรรทุก หรือแม้แต่การตัดด้วยแรงงานคนโดยการกองอ้อยทิ้งไว้ในไร่หากรถบรรทุกมาไม่ทันเวลาก็จะทำให้เวลารอของอ้อยเพื่อบรรทุกนานขึ้นด้วย ทั้งนี้สามารถสรุปประเด็นปัญหาที่มีอยู่ในระบบโลจิสติกส์ขาเข้าของอุตสาหกรรมน้ำตาลได้ดัง ตารางที่ 3-1



รูปภาพที่ 3.4 โลจิสติกส์ขาเข้าของอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทราย

ตารางที่ 3-1 ตารางสรุปปัญหาที่พบในระบบโลจิสติกส์ขาเข้าของอุตสาหกรรมน้ำตาล

ปัญหาที่พบในระบบโลจิสติกส์ขาเข้าของอุตสาหกรรมน้ำตาล			
การเพาะปลูก	การเก็บเกี่ยวและบรรทุก	การขนส่ง	การจัดการหน้าลาน
<p>- ต้องอาศัยการวางแผนระยะยาวกว่า 3 ฤดูกาลผลิต มีความซับซ้อนในการตัดสินใจ</p>	<p>- จำนวนทรัพยากรสำหรับเก็บเกี่ยวอ้อยที่ไม่เพียงพอส่งผลให้เกิดการเผาอ้อยเพื่อเพิ่มความเร็วในการเก็บเกี่ยว</p>	<p>- การบรรทุกอ้อยเกินน้ำหนักที่กฎหมายกำหนดเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการขนส่งที่สูง แต่อ้อยที่ส่งเข้าโรงงานกลับขายได้ราคาที่ต่ำ การบรรทุกตามกฎหมายจึงอาจได้เงินไม่เพียงพอกับค่าขนส่งที่เกิดขึ้น</p>	<p>- กำลังการผลิตของโรงงานไม่เพียงพอต่อปริมาณอ้อยที่ถูกส่งเข้ามายังโรงงาน</p>
<p>- การเปลี่ยนแปลงพื้นที่เพาะปลูกไม่สามารถทำได้ที่หนึ่งเนื่องจากต้องตัดอ้อยต่อของฤดูกาลผลิตที่แล้วเสียก่อน</p>	<p>- การใช้รถตัดอ้อยถูกจำกัดด้วยสภาพความแข็งของดินในไร่ที่เหมาะสมและระยะห่างระหว่างแนวปลูกอ้อยที่มักต้องวางแผนการปลูกล่วงหน้า รวมไปถึงการที่ต้องมีรถบรรทุกวางเพื่อทยอยขนอ้อยไปพร้อมกับการตัด</p>	<p>- ด้วยข้อจำกัดด้านระยะทางระหว่างไร่อ้อยและโรงงานน้ำตาล ทำให้เกษตรกรไม่สามารถจัดส่งอ้อยไปยังโรงงานที่ไม่มีคิวอ้อยแต่อยู่ไกลได้เนื่องจากไม่คุ้มค่าขนส่ง</p>	<p>- ความไม่สม่ำเสมอของรถบรรทุกอ้อยที่เข้ามายังโรงงานน้ำตาล ส่งผลให้ระยะเวลารอคอยเพื่ออ้อยเฉลี่ยของรถบรรทุกแต่ละคันเพิ่มสูงขึ้น</p>
<p>- ปัจจัยสภาพอากาศไม่สามารถควบคุมได้ ส่งผลกับแผนการเพาะปลูก</p>	<p>- พื้นที่แปลงเพาะปลูกของเกษตรกรส่วนใหญ่มีขนาดเล็กเกินไป ไม่คุ้มค่ากับการเช่ารถตัดอ้อยมาใช้งาน</p>	<p>วิทยาลัย CHULALONGKORN UNIVERSITY</p>	<p>- โรงงานน้ำตาลมีความยุ่งยากในการจัดคิวรถบรรทุกเพื่อเข้าเทอ้อยและให้ได้ผลผลิตน้ำตาลสูงสุด</p>

3.7 สรุป

ระบบโลจิสติกส์ขาเข้าของอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลนับได้ว่ามีความท้าทายในการบริหารจัดการเป็นอย่างมาก อันเนื่องมาจากความหลากหลายและความไม่แน่นอนของปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เริ่มตั้งแต่ในกระบวนการเพาะปลูกที่ต้องพึ่งพาอาศัยสภาพอากาศที่เหมาะสม การกำหนดแนวทางการปลูกที่จะส่งผลกับวิธีการเก็บเกี่ยวในอนาคต หรือการกำหนดปริมาณอ้อยที่จะทำสัญญาซื้อขายกับทางโรงงานน้ำตาล ซึ่งล้วนเป็นการวางแผนล่วงหน้าในระยะยาวกว่า 9 – 12 เดือน เมื่อใกล้ถึงเวลาเก็บเกี่ยวแล้วเกษตรกรก็ต้องเริ่มวางแผน ประมาณการช่วงเวลาเพื่อที่จะว่าจ้างแรงงาน รถสิบล้อ รถตัดอ้อย และรถบรรทุกสำหรับการเก็บเกี่ยว แต่เนื่องจากทรัพยากรเหล่านี้เองก็มีไม่เพียงพอต่อความต้องการของเกษตรกรทุกคน มีการแย่งกันใช้งานและเกิดข้อจำกัดด้านเวลาการใช้ที่ตามมา ซึ่งข้อจำกัดเหล่านี้เองเป็นตัวบีบบังคับให้เกษตรกรตัดสินใจเผาไร่อ้อยเพื่อเพิ่มความเร็วในการเก็บเกี่ยว และการเลือกบรรทุกในปริมาณที่มากผิดข้อกำหนดเพื่อลดต้นทุนและเวลา ส่งผลให้เกิดปัญหามลภาวะทางอากาศและความปลอดภัยบนท้องถนนที่พบเห็นได้ในทุกฤดูการเก็บเกี่ยว สุดท้ายเมื่อถึงขั้นตอนการจัดส่งอ้อยไปยังโรงงาน ด้วยความที่ในระบบมีเกษตรกรไร่อ้อยอยู่เป็นจำนวนมากแต่ยังขาดวิธีการสื่อสารกันเพื่อจัดสรรการส่งอ้อยอย่างมีประสิทธิภาพ ในหลาย ๆ ครั้งจึงเกิดความสูญเสียด้านเวลารอคอยที่ไม่จำเป็นและนำไปสู่การลดลงของรายได้จากการขายอ้อยโดยรวมของเกษตรกร และปริมาณน้ำตาลที่โรงงานน้ำตาลสามารถผลิตได้ในที่สุด อย่างไรก็ตามผู้วิจัยมีความคาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะสามารถเป็นแนวทางในการลดช่องว่างของความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้น และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบโลจิสติกส์ขาเข้าของอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลได้

บทที่ 4

การออกแบบวิธีการจัดตารางทรัพยากร

ในบทนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงการออกแบบวิธีการจัดตารางทรัพยากรแบบหลายวัตถุประสงค์ซึ่งมีพื้นฐานมาจากทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค โดยเริ่มต้นจากการอธิบายลักษณะของปัญหาการบริหารจัดการระบบโลจิสติกส์ขาเข้าของอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลไทย รวมถึงประเด็นที่ต้องการปรับปรุงแก้ไข สาเหตุที่เลือกใช้หลักการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค การหาข้อมูลและข้อจำกัดที่เกิดขึ้นในกระบวนการออกแบบ การออกแบบเบื้องต้นด้วยตัวแบบทางคณิตศาสตร์ และกระบวนการพัฒนาฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาการจัดตารางทรัพยากร

4.1 แนวคิดการออกแบบวิธีการจัดตารางทรัพยากร

4.1.1 ประเด็นปัญหา

ปัญหาภายในอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลไทยในขั้นตอนต่าง ๆ ล้วนแล้วแต่นำไปสู่การเกิดความสูญเสียที่ไม่จำเป็นภายในอุตสาหกรรมโดยภาพรวมจำนวนมาก ไม่ว่าจะเป็นการเริ่มเก็บเกี่ยวอ้อยก่อนหรือหลังเวลาที่เหมาะสมเนื่องจากข้อจำกัดด้านสภาพอากาศ เวลา และทรัพยากรการเก็บเกี่ยว ที่ส่งผลทำให้อ้อยที่เก็บเกี่ยวได้มีคุณภาพไม่เหมาะสม (ค่าคุณภาพมาตรฐานของอ้อยควรอยู่ตั้งแต่ 10 C.C.S ขึ้นไป โดยหากอ้อยที่เก็บเกี่ยวมีค่า C.C.S ต่ำกว่านี้เกษตรกรจะต้องเสียค่าปรับ และในขณะเดียวกันโรงงานน้ำตาลเองก็จะสูญเสียโอกาสที่ได้รับผลผลิตด้วย (คณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, 2560)) การสูญเสียความชื้น และคุณภาพของอ้อยไปกับการรอคอยคิวเทอ้อยของรถบรรทุกบริเวณหน้าโรงงาน และการไม่สามารถดำเนินการเก็บเกี่ยวต่อไปได้แม้จะมีแรงงาน และอุปกรณ์อื่น ๆ ครบถ้วนเนื่องจากกำลังการผลิตของโรงงานไม่สามารถตอบสนองหรือระบายปริมาณรถบรรทุกอ้อยขาเข้าได้ทัน ทั้งนี้ เกษตรกรรายย่อยจะเป็นผู้ที่ได้รับผลกระทบมากที่สุดเนื่องจากมีที่ดินขนาดเล็ก และไม่มีทุนในการเช่าเครื่องจักรรวมถึงการว่าจ้างแรงงานมากนัก เวลาว่างงานที่เกิดขึ้นเมื่อคิดเป็นสัดส่วนของรายได้ที่สูญเสียไปเทียบกับต้นทุนการเพาะปลูกแล้วมีค่าค่อนข้างสูงต่างจากเกษตรกรรายใหญ่ อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการพิจารณาปัญหาดังกล่าวโดยละเอียดแล้วจะเห็นได้ว่าการขาดแคลนทรัพยากรการเก็บเกี่ยว และผลิตเป็นเพียงสาเหตุหนึ่งของปัญหาที่พบในอุตสาหกรรมเท่านั้น หากแต่การขาดการควบคุมรอบตารางเวลาการทำงานที่มีประสิทธิภาพทั้งในส่วนของ

เก็บเกี่ยว ขนส่ง และการรอคิวเท้อยู่ที่หน้าลานกลับเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดช่องโหว่ข้างต้น เป็นที่สังเกตว่า ถึงแม้ระบบการผลิตอ้อยและน้ำตาลจะมีทรัพยากรการเก็บเกี่ยว และมีการปฏิบัติการที่รวดเร็ว แต่หากว่าไม่สามารถจัดสรรและส่งออกอ้อยที่เก็บเกี่ยวเข้าเครื่องหีบได้ภายในเวลาที่เหมาะสม ทั้งเกษตรกร และโรงงานน้ำตาลต่างก็จะได้ไม่ได้รับผลประโยชน์เท่าที่ควร ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบจึงจำเป็นต้องมีการจัดตารางการเก็บเกี่ยว และจัดส่งที่เหมาะสม ซึ่งนอกเหนือจากจะช่วยลดความไม่แน่นอนของจำนวนรถบรรทุกเข้าทำให้เวลารอคอยคิวเท้อยู่เฉลี่ยลดลง ยังส่งผลทำให้สามารถใช้ทรัพยากรการเก็บเกี่ยวที่มีได้อย่างต่อเนื่อง และเต็มประสิทธิภาพอีกด้วย

ทั้งนี้ผู้วิจัยสามารถสรุปความต้องการของผู้มีส่วนเกี่ยวข้องหลักในระบบโลจิสติกส์ขาเข้าของอุตสาหกรรมน้ำตาลทั้งสอง อันได้แก่โรงงานน้ำตาล และเกษตรกรไร่อ้อย ออกมาเป็นประเด็นต่าง ๆ ได้ดังนี้

- **ส่วนที่ 1: โรงงานน้ำตาล** – ต้องการผลิตน้ำตาลทรายให้ได้จำนวนมากที่สุด ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณ และคุณภาพของอ้อยขาเข้าโรงงาน (อ้อยมีน้ำหนักมาก และมีค่า C.C.S สูง)
- **ส่วนที่ 2: เกษตรกรไร่อ้อย** – ต้องการสัดส่วนกำไรจากการขายอ้อยเฉลี่ยรายคนสูงที่สุด ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณ และคุณภาพของอ้อยที่ถูกส่งเข้าโรงงานจากไร่ของตน ปริมาณอ้อยเผาตัดที่น้อยเพื่อลดความสูญเสียจากค่าปรับ การได้รับเงินจากการขายใบอ้อยที่เหลือให้กับโรงงานน้ำตาล และการใช้งานรถตัดอ้อยอย่างเต็มประสิทธิภาพ โดยมีเวลาวางงานน้อยที่สุด

เมื่อพิจารณาเพิ่มเติมไปถึงผู้ที่เกี่ยวข้องหรือผู้ที่ได้รับผลกระทบโดยภาพรวมจากระบบโลจิสติกส์ขาเข้าของอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลด้วยแล้ว จะทำให้ได้ประเด็นที่ควรปรับปรุงแก้ไขเพิ่มขึ้นอีก 2 ประเด็น คือ

- **ส่วนที่ 3: อุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลไทย** – ต้องการให้ค่าเสียโอกาสอันเกิดจากผลรวมการสูญเสียน้ำหนัก การสูญเสียคุณภาพ และการสูญเสียผลผลิตพลอยได้ของอ้อย เช่น ใบอ้อย กาบอ้อย มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งค่าดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับทางเลือกวิธีการเก็บเกี่ยว และจัดลำดับคิวหรือเวลาเข้าส่งอ้อยของรถบรรทุกแต่ละคัน
- **ส่วนที่ 4: สังคม และสิ่งแวดล้อม** – ต้องการให้กระบวนการต่าง ๆ ในระบบโลจิสติกส์ขาเข้าของอุตสาหกรรมอ้อย และน้ำตาลมีการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์รวมกันต่ำที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจาก การเคลื่อนที่ของรถบรรทุก และรถตัดอ้อย และการส่งอ้อยเผาตัดเข้าโรงงานในปริมาณที่น้อยที่สุด

เมื่อพิจารณาประเด็นความต้องการที่กล่าวมาข้างต้นดู จะพบว่าบางประเด็นส่งเสริม หรือมีความขัดแย้งกันเอง ทำให้กระบวนการตัดสินใจหาผลเฉลยสุดท้ายเพื่อบรรลุทุกเป้าหมายมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้ผู้วิจัยสามารถสรุปความสัมพันธ์เชิงส่งเสริม และขัดแย้งระหว่างแต่ละประเด็นได้ดังแสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ตารางแสดงความสัมพันธ์เชิงส่งเสริมและขัดแย้งระหว่างประเด็นปัญหา

		วัตถุประสงค์ที่ได้รับผลกระทบ			
		1. ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุด	2. สัดส่วนกำไรจากการขายอ้อยเฉลี่ยรายคนของเกษตรกรสูงสุด	3. ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด	4. ปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด
วัตถุประสงค์ที่มีค่าดีขึ้น	1. ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุด	-	↓	↓	↓
	2. สัดส่วนกำไรจากการขายอ้อยเฉลี่ยรายคนของเกษตรกรสูงสุด	↓	-	↑	↓
	3. ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด	↓	↑	-	↑
	4. ปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด	↓	↓	↑	-

CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.1.2 การกำหนดแนวทางแก้ไขปัญหา

เนื่องจากการปรับปรุงแก้ไขปัญหาในอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลไทยเป็นโจทย์ปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective) และการแก้ไขปัญหาคำสั่งการทรัพยากรในกรอบเวลาที่จำกัด (ปัญหาการจัดลำดับงาน (Scheduling Problem)) ความซับซ้อนของปัญหาจึงถูกจัดอยู่ในกลุ่ม ปัญหาเอ็นพีแบบยาก (Np-hard) การใช้วิธีการแบบแมนตรงเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวอาจจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการคำนวณที่ยาวนาน และอาจไม่สามารถหาค่าเหมาะสมที่สุดภายใต้ทรัพยากรที่มีอยู่ภายในเวลาจำกัดได้ นอกจากนี้การวางแผนการปฏิบัติงานจริงในระบบโลจิสติกส์ขาเข้าของสินค้าน้ำตาลมักจะมีเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ไม่ว่าจะเป็นในส่วนของสภาพอากาศ หรือปัจจัยอื่นที่ทำให้การเก็บเกี่ยวและขนส่งต้องหยุดชะงัก จึงมีความจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการ

วางแผนที่สามารถปรับเปลี่ยนได้อย่างรวดเร็วเพื่อตอบสนองต่อเหตุการณ์เหล่านี้ได้โดยผู้มีส่วนเกี่ยวข้องยังคงได้รับผลประโยชน์สูงสุดเท่าที่เป็นไปได้ ผู้วิจัยจึงได้ตัดสินใจนำ Metaheuristic ซึ่งมีความสามารถในการหาคำตอบที่ดีภายใต้กรอบระยะเวลาที่สั้นเข้ามาช่วยในการหาผลเฉลยของปัญหาดังกล่าว โดยได้เลือกเอาทฤษฎีการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) มาใช้เป็นเครื่องมือในการจัดการกับปัญหาดังกล่าว

4.1.3 การกำหนดขอบเขตของปัญหา

กำหนดให้ $J = \{1, 2, \dots, n\}$ เป็นเซตของแปลงเพาะปลูกอ้อยซึ่งถูกครอบครองโดยเกษตรกรไร้อ้อยในเซต $I = \{1, 2, \dots, n\}$ ซึ่งเกษตรกร $i \in I$ อาจเป็นเจ้าของได้มากกว่าหนึ่งแปลงเพาะปลูก ทั้งนี้ผู้วิจัยสามารถเขียนอธิบายความสัมพันธ์ของแปลงเพาะปลูก j ที่ถูกครอบครองโดยเกษตรกร i ได้ด้วย $J(i)$ โดยที่แต่ละแปลงเพาะปลูก $j \in J(i)$ จะมีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างกันคือ ตำแหน่งที่ตั้ง (f_j) ในระนาบ 2 มิติ ค่าประมาณการผลิตอ้อย (μ_j) ในหน่วยตัน และค่าประมาณการคุณภาพของอ้อย (π_j) ในหน่วย C.C.S

นอกจากนี้ ทุก ๆ แปลงเพาะปลูก $j \in J(i)$ จะมีเส้นทางเชื่อมระหว่างกัน และเชื่อมกับโรงงานน้ำตาล (\emptyset) ที่มีกำลังการผลิตคงที่ m ตันอ้อย/ชั่วโมง โดยเส้นทางดังกล่าวจะถูกแสดงได้ด้วยเซตของเส้นทาง A ซึ่งเส้นทาง $a \in A$ ใด ๆ เองก็จะประกอบไปด้วย ข้อมูลระยะทาง (d_a) และระยะเวลาการเดินทางที่ใช้ของรถบรรทุก (τ_a) ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทางผู้วิจัยกำหนดให้รถบรรทุกอ้อยที่ใช้ในระบบมีเพียงชนิดเดียว และรถทุกคันมีประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ หรือความสามารถในการบรรทุกอ้อยที่ l ตัน มีอัตราการเผาผลาญน้ำมันเชื้อเพลิงที่ g^u กิโลเมตร/ลิตร โดยที่น้ำมันเชื้อเพลิงแต่ละลิตรมีอัตราการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ g^e กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ และมีราคาคงที่ g^c บาท/ลิตร

ในมุมมองของทรัพยากร กำหนดให้ $R = \{R_1 \cup R_2 \cup R_3\}$ เป็นเซตของทรัพยากรการเก็บเกี่ยวอ้อย โดยที่ R_1, R_2 และ R_3 เป็นเซตของรถตัดอ้อย ทีมตัดอ้อยสด และทีมตัดอ้อยเผา ทั้งนี้ทุก ๆ ทรัพยากรการเก็บเกี่ยวในกลุ่มเดียวกันจะมีประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานที่เท่ากัน อันประกอบไปด้วย อัตราการเก็บเกี่ยว (h_r^s) ในหน่วย ตันอ้อย/ชั่วโมง ค่าใช้จ่ายในการเก็บเกี่ยว (h_r^c) ในหน่วย บาท/ตันอ้อย อัตราการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงจากกระบวนการเก็บเกี่ยว (h_r^g) ในหน่วย ลิตร/ตันอ้อย อัตราการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการเก็บเกี่ยว (h_r^e) ในหน่วย กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์/ตันอ้อย อัตราส่วนของสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนจากกระบวนการเก็บเกี่ยว (h_r^d)

อัตราส่วนของอ้อยที่สูญเสียไประหว่างกระบวนการเก็บเกี่ยว (h_r^l) อัตราส่วนใบอ้อยและกาบอ้อยที่เหลือจากการเก็บเกี่ยว (h_r^u) ค่าปรับหน้าโรงงานจากวิธีการเก็บเกี่ยว (h_r^f) ในหน่วย บาท/ตันอ้อย ค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงหน้าดินที่เสื่อมสภาพหลังจากการเก็บเกี่ยวด้วยวิธีต่าง ๆ (h_r^i) และปริมาณงานสูงสุดต่อวันที่สามารถทำได้โดยวิธีการเก็บเกี่ยว (δ_r)

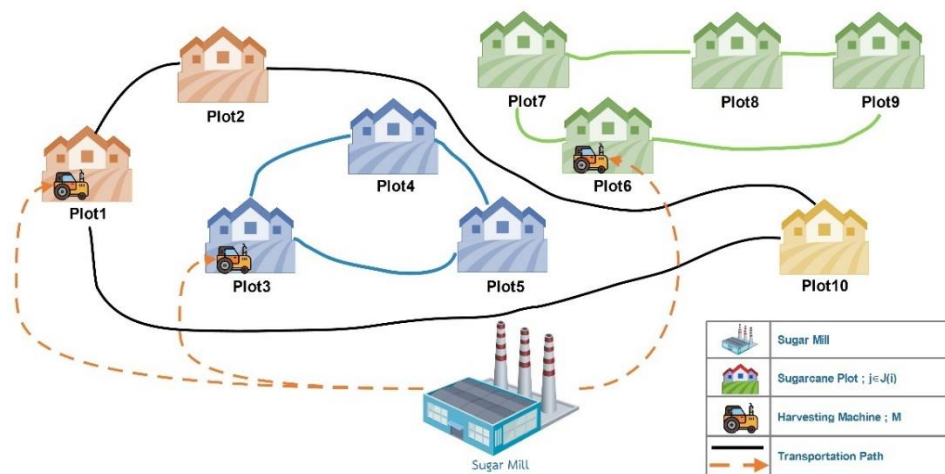
นอกเหนือไปจากทรัพยากรการเก็บเกี่ยวอ้อย ผู้วิจัยยังกำหนดให้ $T = \{1, 2, \dots, n\}$ เป็นเซตของรถบรรทุกอ้อยที่มีอัตราการบรรทุกสูงสุด l ตัน หรือเนื่องจากกระบวนการเก็บเกี่ยวจะเริ่มต้นได้ผู้วิจัยจำเป็นต้องมีรถบรรทุกที่ว่างประจำอยู่ที่แปลงเพาะปลูกด้วยก่อนเสมอ ดังนั้น เวลาที่มาถึงหรือเวลาเริ่มปฏิบัติงานที่แปลงเพาะปลูก $j \in J(i)$ ของทุก ๆ ทรัพยากรการเก็บเกี่ยว และรถบรรทุกอ้อยจะต้องเท่ากันเสมอ โดยผู้วิจัยจะแทนเวลาข้างต้นด้วย θ_{rj} และ σ_{tj} ตามลำดับ เมื่อรถบรรทุกทำการบรรทุกอ้อยจนเต็มคันรถแล้วก็จะวิ่งกลับไปยังโรงงานน้ำตาลเพื่อเทอ้อยเข้าเครื่องหีบ โดยเวลาส่งอ้อย หรือเวลาที่เริ่มเทอ้อยลงเครื่องหีบ (ρ_{tj}) ของรถบรรทุก $t \in T$ จากแปลงเพาะปลูก $j \in J(i)$ จะต้องไม่น้อยกว่า $\sigma_{tj} + \frac{\mu_j}{h_r^f}$ ซึ่งอ้อยที่ถูกตัด และบรรทุกอยู่บนรถจะเริ่มสูญเสียคุณภาพความหวานไปด้วยอัตราการเสื่อมสภาพ (φ_r) ในหน่วย C.C.S./ชั่วโมง

โดยทั่วไปแล้ว ในฤดูการเก็บเกี่ยวอ้อยหนึ่ง ๆ ของไทย โรงงานน้ำตาลจะได้รับอนุญาตให้เดินเครื่องหีบเพื่อรับอ้อยได้ประมาณ 20 สัปดาห์ ซึ่งแผนการเก็บเกี่ยวอ้อยโดยภาพรวมมักถูกกำหนดสำหรับทั้งฤดูการผลิตโดยใช้ค่าพยากรณ์ผลผลิตน้ำตาลตั้งแต่เริ่มฤดู อย่างไรก็ตาม จากปัจจัยความไม่แน่นอนต่าง ๆ แผนการเก็บเกี่ยวที่มีอยู่อาจจำเป็นต้องถูกปรับเปลี่ยน และแจกแจงอย่างละเอียดในระดับปฏิบัติการ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงกำหนดให้ จำนวนแปลงเพาะปลูกที่ต้องเก็บเกี่ยว ทรัพยากรการเก็บเกี่ยวที่มีอยู่ และข้อจำกัดการทำงานของวันทำการใด ๆ เป็นข้อมูลที่ทราบตั้งแต่ต้นวัน โดยแบบจำลองที่ทางผู้วิจัยพัฒนาขึ้นสามารถนำเข้าข้อมูลต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้นเพื่อประมวลผลก่อนจะให้ผลลัพธ์เป็นแผนการปฏิบัติงานโดยละเอียดของทรัพยากรทั้งหมดภายในระบบ ภายใต้กรอบเวลาที่สนใจ

อย่างไรก็ดี ทรัพยากรที่จำเป็นในกระบวนการทำงานเพื่อเก็บเกี่ยวและจัดส่งอ้อยเข้าโรงงานน้ำตาล ตั้งแต่ รถตัดอ้อย แรงงานตัดอ้อยสด แรงงานตัดอ้อยไฟไหม้ รถบรรทุกอ้อย ไปจนถึงเครื่องหีบอ้อย ล้วนมีอยู่อย่างจำกัด และเกษตรกร $i \in I$ ทุกรายจำเป็นต้องใช้งานทรัพยากรเหล่านี้ร่วมกันอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ผู้วิจัยจึงขอแบ่งกระบวนการทำงานของวิธีการจัดตารางทรัพยากรออกเป็น 2 ระดับ ดังนี้

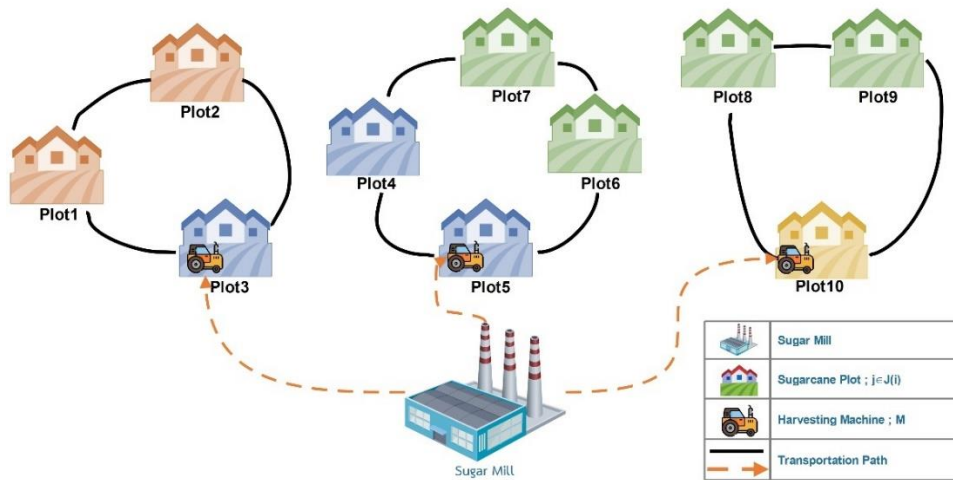
4.1.3.1 การจับกลุ่มให้กับพื้นที่เพาะปลูกของเกษตรกรเบื้องต้น

กำหนดให้แปลงเพาะปลูกอ้อย $j \in J(i)$ ซึ่งมีพิกัดที่ตั้งบนระนาบ 2 มิติ f_j ใกล้เคียงกันอยู่ในกลุ่มเดียวกันโดยไม่สนใจความเป็นเจ้าของแปลงเพาะปลูกของเกษตรกร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดระยะทางรวมในการเคลื่อนที่ของทรัพยากรการเก็บเกี่ยว เพิ่มอัตราการทำงาน และกระจายการใช้งานทรัพยากรรถตัดอ้อยให้ทั่วถึง ซึ่งจำนวนกลุ่มพื้นที่เก็บเกี่ยว (G) นี้จะถูกกำหนดโดยจำนวนรถตัดอ้อยในเซต R_1 ที่มีอยู่ในระบบ เพื่อกระจายทรัพยากรรถตัดอ้อยในพื้นที่อย่างเท่าเทียมกัน



รูปภาพที่ 4.1 แผนภาพแสดงการจัดสรรทรัพยากรรถตัดอ้อยระหว่างเกษตรกรแบบเดิม

รูปภาพที่ 4.1 แสดงการจัดสรรทรัพยากรรถตัดอ้อยเพื่อเก็บเกี่ยวอ้อยของเกษตรกรแบบปกติ ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่า ตามปกติแล้วเมื่อเกษตรกร $i \in I$ ได้รับคิวของรถตัดอ้อยมาใช้งาน มักจะใช้ทรัพยากรรถตัดอ้อยนั้นเก็บเกี่ยวอ้อยจากแปลงเพาะปลูก $j \in J(i)$ ของตนเองจนครบหมดก่อน แล้วจึงส่งต่อรถตัดให้กับเกษตรกรรายอื่นใช้งาน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสภาพการทำงานจริงซึ่งมีรถตัดอ้อยไม่เพียงพอต่อความต้องการของเกษตรกรแล้ว วิธีการเช่นนี้มีโอกาสทำให้ระยะเวลารวมที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถตัดอ้อยสูง และมีการสูญเสียโอกาสในการตัดอ้อยโดยไม่จำเป็น โดยในรูปภาพที่ 4.2 แสดงถึงการจัดสรรทรัพยากรรถตัดอ้อยโดยการแบ่งกลุ่มแปลงเพาะปลูกที่ไม่สนใจความเป็นเจ้าของ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าวิธีการดังกล่าวมีแนวโน้มการกระจายตัวของทรัพยากรรถตัดอ้อยระหว่างเกษตรกรอย่างเท่าเทียมกัน ส่งผลทำให้เกษตรกรรายย่อยสามารถใช้อ้อยในการเก็บเกี่ยวได้มากยิ่งขึ้น



รูปภาพที่ 4.2 แผนภาพแสดงการจัดสรรทรัพยากรรถตัดอ้อยด้วยการจัดกลุ่มแบบ k -means

การจับกลุ่มแปลงเพาะปลูกอ้อยข้างต้นจะดำเนินการโดยวิธีการจัดกลุ่มแบบเคมีน (K-means Clustering) ซึ่งใช้ระยะทางระหว่างแปลงกับจุดศูนย์กลางกลุ่มเป็นเกณฑ์ โดยมีข้อจำกัดในการจัดกลุ่มคือ ผลรวมของค่าประมาณการผลิตอ้อย μ_j ในกลุ่มหนึ่ง ๆ จะต้องมากกว่า หรือเท่ากับ กำลังการเก็บเกี่ยวในหนึ่งวันของรถตัดอ้อย โดยที่ทรัพยากรรถตัดอ้อยจะไม่สามารถถูกโอนย้ายระหว่างกลุ่มที่ถูกจัดไว้แล้วได้ ทั้งนี้ รูปภาพที่ 4.1 และ 4.2 แสดงตัวอย่างของพื้นที่แปลงเพาะปลูกอ้อย $j \in J(i)$ ของเกษตรกรทั้งหมด 4 คน รอบโรงงานน้ำตาลที่มีปริมาณ μ_j และคุณภาพ π_j ของผลผลิตแตกต่างกันจำนวน 10 แปลง ซึ่งถูกแสดงความเป็นเจ้าของด้วยสีที่แตกต่างกัน คือ

- แปลงเพาะปลูกที่ 1 – 2 เป็นของ เกษตรกรคนที่ 1 (สีส้ม)
- แปลงเพาะปลูกที่ 3 – 5 เป็นของ เกษตรกรคนที่ 2 (สีฟ้า)
- แปลงเพาะปลูกที่ 6 – 9 เป็นของ เกษตรกรคนที่ 3 (สีเขียว)
- แปลงเพาะปลูกที่ 10 เป็นของ เกษตรกรคนที่ 4 (สีเหลือง)

4.1.3.2 การจัดตารางการเก็บเกี่ยว และจัดส่งอ้อยโดยละเอียด

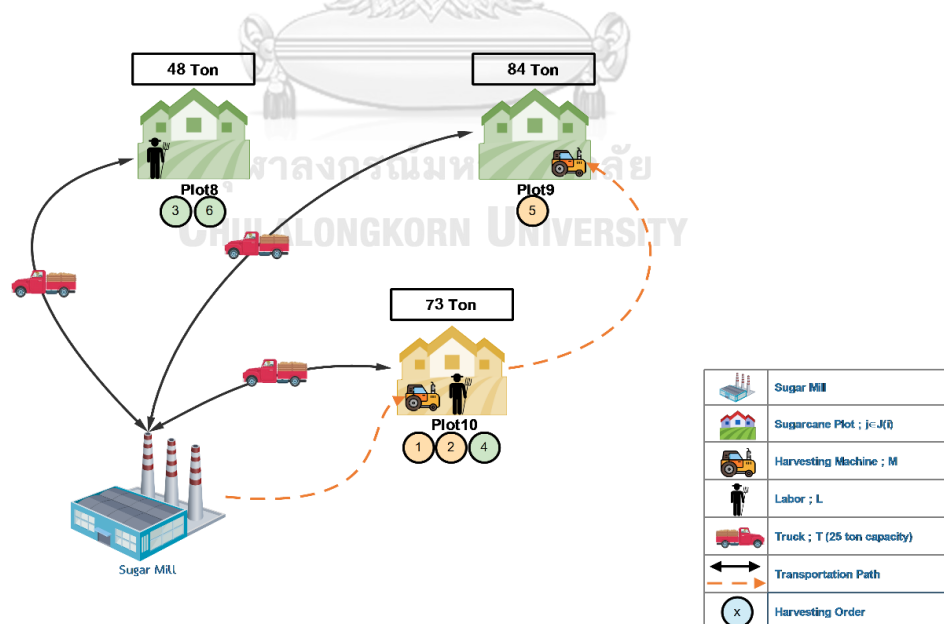
ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยจะนำข้อมูลของกลุ่มแปลงเพาะปลูกที่ถูกจัดจากหัวข้อ 4.1.3.1 มาใช้งานเพื่อตอบสนองต่อประเด็นความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียทั้ง 4 ในหัวข้อ 4.1.1 โดยผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงตารางการเก็บเกี่ยว และจัดส่งอ้อยซึ่งมีรายละเอียด

- แปลงเพาะปลูก $j \in J(i)$ ถูกเก็บเกี่ยวโดยทรัพยากรการเก็บเกี่ยว $r \in R$ ใด และผลผลิตอ้อยที่ได้จะถูกบรรทุกโดยรถบรรทุกอ้อย $t \in T$ คันใด

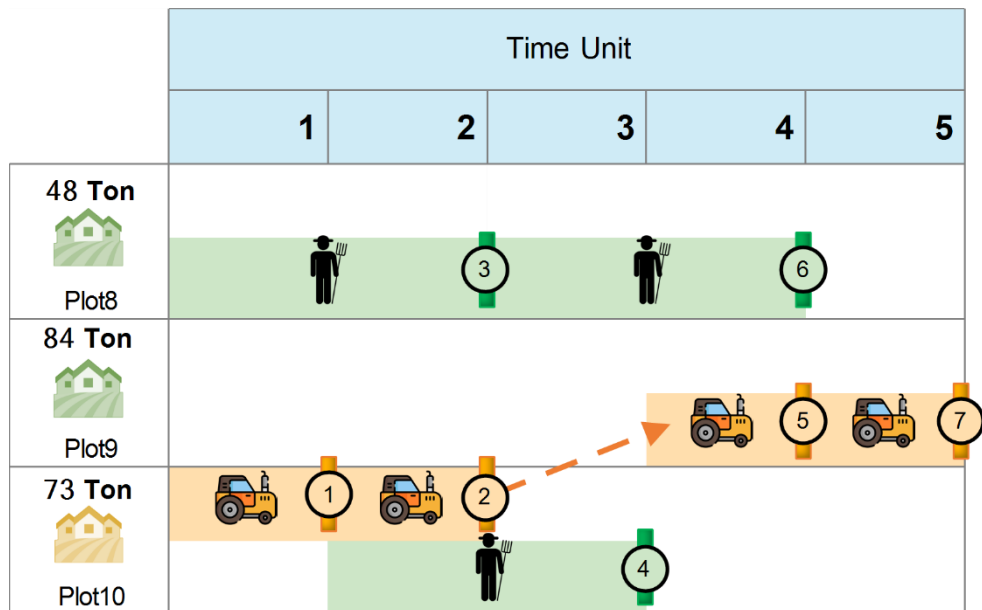
- ช่วงเวลาเริ่มเก็บเกี่ยวที่แปลงเพาะปลูก $j \in J(i)$ โดยทรัพยากรการเก็บเกี่ยว $r \in R$ และรถบรรทุกอ้อย $t \in T$
- ลำดับคิว และเวลาการจัดส่งอ้อยจากแปลงเพาะปลูก $j \in J(i)$ โดยรถบรรทุกอ้อย $t \in T$
- เส้นทางเคลื่อนที่ของทรัพยากรการเก็บเกี่ยว $r \in R$ และรถบรรทุกอ้อย $t \in T$

รูปภาพที่ 4.3 และ 4.4 แสดงตัวอย่างการจัดตารางการเก็บเกี่ยว และจัดส่งอ้อยจากกลุ่มของแปลงเพาะปลูกที่ 8 – 10 ซึ่งมีปริมาณผลผลิตอ้อยในไร่ 48 ตัน 84 ตัน และ 73 ตัน ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดการเก็บเกี่ยว และจัดส่งอ้อยของรูปภาพที่ 4.4 ดังนี้

- ลำดับที่ 1 เก็บเกี่ยวจากแปลงเพาะปลูกที่ 10 โดยการใช้อรถตัดอ้อย
- ลำดับที่ 2 เก็บเกี่ยวจากแปลงเพาะปลูกที่ 10 โดยการใช้อรถตัดอ้อย
- ลำดับที่ 3 เก็บเกี่ยวจากแปลงเพาะปลูกที่ 8 โดยการใช้อแรงงานคนตัดปกติ
- ลำดับที่ 4 เก็บเกี่ยวจากแปลงเพาะปลูกที่ 10 โดยการใช้อแรงงานคนตัดปกติ
- ลำดับที่ 5 เก็บเกี่ยวจากแปลงเพาะปลูกที่ 9 โดยการใช้อรถตัดอ้อย
- ลำดับที่ 6 เก็บเกี่ยวจากแปลงเพาะปลูกที่ 8 โดยการใช้อแรงงานคนตัดปกติ



รูปภาพที่ 4.3 แผนภาพแสดงการจัดสรรทรัพยากรเก็บเกี่ยวอ้อยในแปลงอ้อยที่ 8 9 และ 10



รูปภาพที่ 4.4 แผนภาพแสดงการจัดตารางการเก็บเกี่ยว และจัดส่งอ้อยในแปลงที่ 8 9 และ 10

หมายเหตุ: ในรูปภาพที่ 4.4 จะเห็นว่า ลำดับการจัดส่งอ้อยที่ 1 และ 2 ของระบบตัวอย่าง ณ แปลงเพาะปลูกที่ 10 จะถูกเก็บเกี่ยวโดยรถตัดอ้อย และรถตัดคันดังกล่าวจะเคลื่อนที่ต่อไปยังแปลงเพาะปลูกที่ 9 เพื่อทำการเก็บเกี่ยวสำหรับลำดับการจัดส่งที่ 5 ในขณะที่ปล่อยให้แรงงานคนทำการเก็บเกี่ยวอ้อยที่เหลืออีก 23 ตัน สำหรับลำดับการจัดส่งที่ 4 ซึ่งมีจำนวนอ้อยไม่เต็มคันรถที่ 25 ตัน อ้อย และไม่คุ้มทุนกับการใช้รถตัดต่อไป

4.2 การออกแบบปัญหาการจัดตารางทรัพยากรโดยใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์

4.2.1 เซต และพารามิเตอร์ (Sets and Parameters)

- I คือ เซตของเกษตรกรไร่อ้อย
- $J(i)$ คือ เซตของแปลงเพาะปลูกอ้อย ที่ถูกรอบครองโดยเกษตรกร $i \in I$
- R คือ เซตของทรัพยากรการเก็บเกี่ยวอ้อย $\{R_1 \cup R_2 \cup R_3\}$
 - R_1 คือ เซตของรถตัดอ้อย
 - R_2 คือ เซตของแรงงานตัดอ้อยสด
 - R_3 คือ เซตของแรงงานตัดอ้อยไฟไหม้
- T คือ เซตของรถบรรทุกอ้อย
- G คือ เซตของทิมตัดอ้อย
- \emptyset คือ โรงงานน้ำตาล

- A คือ เซตของเส้นทางการเคลื่อนที่ระหว่างแปลงเพาะปลูก $j \in J(i)$ และ \emptyset
- d_a แสดงถึง ระยะทางในหน่วยกิโลเมตร ของเส้นทางการเคลื่อนที่ $a \in A$
- τ_a แสดงถึง ระยะเวลาการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกอ้อยในหน่วยวินาทีบนเส้นทางการเคลื่อนที่ $a \in A$
- f_j แสดงถึง ตำแหน่งที่ตั้งของแปลงเพาะปลูก $j \in J(i)$ บนระนาบ 2 มิติ
- π_j แสดงถึง ค่าประมาณการ C.C.S ของอ้อยในแปลงเพาะปลูกที่ $j \in J(i)$
- μ_j แสดงถึง ค่าประมาณการผลิตในหน่วยตันอ้อย ของแปลงเพาะปลูกที่ $j \in J(i)$
- g^u แสดงถึง อัตราการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงคงที่ของรถบรรทุกในหน่วย กิโลเมตร/ลิตร
- g^e แสดงถึง อัตราการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์คงที่ของน้ำมันเชื้อเพลิงในหน่วย กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์/ลิตร
- g^c แสดงถึง ราคาน้ำมันเชื้อเพลิงคงที่ในหน่วย บาท/ลิตร
- h_r^s แสดงถึง อัตราการเก็บเกี่ยวอ้อยของทรัพยากรการเก็บเกี่ยว $r \in R$ ในหน่วย ตันอ้อย/ชั่วโมง
- h_r^c แสดงถึง ค่าใช้จ่ายในการเก็บเกี่ยวอ้อยด้วยทรัพยากรการเก็บเกี่ยว $r \in R$ ในหน่วย บาท/ตันอ้อย
- h_r^g แสดงถึง อัตราการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของทรัพยากรการเก็บเกี่ยว $r \in R$ ในหน่วย ลิตร/ตันอ้อย
- h_r^e แสดงถึง อัตราการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของทรัพยากรการเก็บเกี่ยว $r \in R$ ในหน่วย กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์/ตันอ้อย
- h_r^d แสดงถึง อัตราส่วนสิ่งสกปรกปนเปื้อนจากการเก็บเกี่ยวด้วยทรัพยากรการเก็บเกี่ยว $r \in R$
- h_r^l แสดงถึง อัตราส่วนการสูญเสียอ้อยจากการเก็บเกี่ยวด้วยทรัพยากรการเก็บเกี่ยว $r \in R$
- h_r^f แสดงถึง ค่าปรับ ณ จุดรับอ้อยจากการเก็บเกี่ยวด้วยทรัพยากรการเก็บเกี่ยว $r \in R$
- h_r^i แสดงถึง ค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงหน้าดินที่เสื่อมสภาพหลังจากการเก็บเกี่ยวด้วยทรัพยากรการเก็บเกี่ยว $r \in R$
- h_r^u แสดงถึง อัตราส่วนใบอ้อย และกาบอ้อยที่เหลือจากการเก็บเกี่ยวด้วยทรัพยากรการเก็บเกี่ยว $r \in R$
- δ_r แสดงถึง กำลัการเก็บเกี่ยวสูงสุดต่อวันของทรัพยากรการเก็บเกี่ยว $r \in R$

- φ_r แสดงถึง อัตราการเสื่อมคุณภาพของอ้อยที่ถูกเก็บเกี่ยวด้วยทรัพยากรการเก็บเกี่ยว $r \in R$ ในหน่วย C.C.S/ชั่วโมง
- m แสดงถึง อัตราการหีบอ้อยคงที่ของโรงงานน้ำตาลในหน่วย ต้นอ้อย/ชั่วโมง
- l แสดงถึง น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของรถบรรทุกในหน่วย ต้นอ้อย/คัน
- v แสดงถึง ต้นทุนการเพาะปลูกอ้อยเฉลี่ยในหน่วย บาท/ต้นอ้อย
- s แสดงถึง ราคาขายอ้อยเฉลี่ยในหน่วย บาท/ต้นอ้อย
- ε แสดงถึง ราคาขายใบอ้อย และกาบอ้อยเพื่อผลิตไฟฟ้าเฉลี่ยในหน่วย บาท/ต้น
- ϑ แสดงถึง ราคาขายน้ำตาลดิบเฉลี่ยในหน่วย บาท/ตัน
- q แสดงถึง มาตรฐานคุณภาพอ้อยที่โรงงานยอมรับได้ในหน่วย C.C.S
- b แสดงถึง ค่าปรับ หรือเงินส่วนเพิ่มที่เกิดจากส่วนต่างของคุณภาพอ้อยจากค่ามาตรฐานในหน่วย บาท/C.C.S
- p แสดงถึง หน่วยเวลาสุดท้ายของระบบที่สนใจ

4.2.2 ตัวแปรตัดสินใจ

- x_{ra} = $\begin{cases} 1 & \text{ตัดสินใจให้แปลงเพาะปลูก } j \in J(i) \text{ ถูกตัดโดยทรัพยากรตัดอ้อย } r \in R; a = (j', j) \\ 0 & \text{ไม่ตัดสินใจให้แปลงเพาะปลูก } j \in J(i) \text{ ถูกตัดโดยทรัพยากรตัดอ้อย } r \in R; a = (j', j) \end{cases}$
- y_{ta} = $\begin{cases} 1 & \text{ตัดสินใจให้อ้อยจากแปลงเพาะปลูก } j \in J(i) \text{ ถูกบรรทุกโดยรถบรรทุก } t \in T; a = (j', j) \\ 0 & \text{ไม่ตัดสินใจให้อ้อยจากแปลงเพาะปลูก } j \in J(i) \text{ ถูกบรรทุกโดยรถบรรทุก } t \in T; a = (j', j) \end{cases}$
- α_a = $\begin{cases} 1 & \text{ตัดสินใจให้อ้อยจากแปลงเพาะปลูก } j \in J(i) \text{ ถูกจัดส่งต่อจาก } j' \in J(i); a = (j', j) \\ 0 & \text{ไม่ตัดสินใจให้อ้อยจากแปลงเพาะปลูก } j \in J(i) \text{ ถูกจัดส่งต่อจาก } j' \in J(i); a = (j', j) \end{cases}$
- θ_{rj} = จำนวนจริงบวกซึ่งกำหนดเวลามาถึงแปลงเพาะปลูก หรือเริ่มต้นเก็บเกี่ยวของทรัพยากรการเก็บเกี่ยว $r \in R$ ณ แปลงเพาะปลูก $j \in J(i)$
- σ_{tj} = จำนวนจริงบวกซึ่งกำหนดเวลามาถึงแปลงเพาะปลูก หรือเริ่มต้นเก็บเกี่ยวของรถบรรทุกอ้อย $t \in T$ ณ แปลงเพาะปลูก $j \in J(i)$
- ρ_{tj} = จำนวนจริงบวกซึ่งกำหนดเวลามาถึงโรงงานน้ำตาล หรือเริ่มต้นเทอ้อยของรถบรรทุกอ้อย $t \in T$ ณ แปลงเพาะปลูก $j \in J(i)$
- ω_{tjr} = จำนวนจริงบวกซึ่งกำหนดระยะเวลาที่รถบรรทุกอ้อย $t \in T$ ใช้ตั้งแต่เริ่มตัดอ้อย ณ แปลงเพาะปลูก $j \in J(i)$ โดยทรัพยากรการเก็บเกี่ยว $r \in R$ จนกระทั่งเทอ้อยเข้าเครื่องหีบ

- β_{tjr} = จำนวนจริงบวกซึ่งกำหนดระยะเวลาคอยส่วนเกินที่รถบรรทุกอ้อย $t \in T$ ใช้ตั้งแต่เริ่มตัดอ้อย ณ แปลงเพาะปลูก $j \in J(i)$ โดยทรัพยากรการเก็บเกี่ยว $r \in R$ จนกระทั่งอ้อยเข้าเครื่องหีบ
- k_{jr}^x = จำนวนเต็มบวกซึ่งกำหนดลำดับการเคลื่อนที่ ของทรัพยากรการเก็บเกี่ยว $r \in R$ ไปยังแปลงเพาะปลูก $j \in J(i)$ เพื่อป้องกันการเกิด subtour
- k_{jt}^y = จำนวนเต็มบวกซึ่งกำหนดลำดับการเคลื่อนที่ ของรถบรรทุกอ้อย $t \in T$ ไปยังแปลงเพาะปลูก $j \in J(i)$ เพื่อป้องกันการเกิด subtour
- k_j^α = จำนวนเต็มบวกซึ่งกำหนดลำดับการจัดส่งอ้อย ณ โรงงานน้ำตาล ของรถบรรทุกอ้อยที่มาจากแปลงเพาะปลูก $j \in J(i)$ เพื่อป้องกันการเกิด subtour

4.2.3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาการจัดตารางทรัพยากรสำหรับระบบโลจิสติกส์ขาเข้า ประกอบไปด้วย 4 วัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน ดังนี้

4.2.3.1 Maximize z_1 : ผลผลิตน้ำตาลทรายของโรงงานน้ำตาล

ผลผลิตน้ำตาลทรายที่ออกจากโรงงานน้ำตาลนี้ เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการหมุนเวียนของเงินในอุตสาหกรรมในภาพรวม โดยปัจจัยที่ส่งผลกับปริมาณน้ำตาลทรายที่ผลิตได้ประกอบไปด้วย น้ำหนักและคุณภาพของอ้อย (C.C.S) ที่ถูกจัดส่งหน้าโรงงานน้ำตาล ปริมาณสิ่งปนเปื้อนที่ติดมากับอ้อย และประสิทธิภาพของเครื่องจักรในการแยกน้ำตาลออกจากอ้อย อย่างไรก็ตามวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ความสนใจในระบบโลจิสติกส์ขาเข้า ผู้วิจัยจึงจะสร้างสมการวัตถุประสงค์โดยพิจารณาจากค่าน้ำหนัก คุณภาพ และปริมาณสิ่งปนเปื้อนในอ้อยเท่านั้น โดยเราสามารถแสดงสมการเพื่อหาผลผลิตน้ำตาลทรายของโรงงานน้ำตาล ได้ดังสมการที่ 4.1

ผลผลิตน้ำตาลทรายของโรงงานน้ำตาล

$$z_1 = \max_{(x, \omega)} (\sum_{j \in J} \pi_j \mu_j - \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} \omega_{tjr} \varphi_r \pi_j \mu_j - \sum_{r \in R} \sum_{a \in A} x_{ra} h_r^d \pi_j \mu_j) \quad (4.1)$$

ทั้งนี้สมการที่ (4.1) มีองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน คือ

- ค่าประมาณการผลผลิตน้ำตาลทั้งหมดที่เป็นไปได้ภายในกรอบเวลาวางแผนที่สนใจ

- การเสื่อมสภาพของอ้อยจากเวลารอคอยที่เริ่มตั้งแต่การเก็บเกี่ยวไปจนกระทั่งเทอ้อยเข้าเครื่องหีบ
- ความสูญเสียน้ำตาลอันเกิดมาจากสิ่งปนเปื้อนในวิธีการเก็บเกี่ยวต่าง ๆ

4.2.3.2 Maximize z_2 : สัดส่วนกำไรจากการขายอ้อยเฉลี่ยรายคนของเกษตรกร

ผลกำไรของเกษตรกรเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกษตรกร และครอบครัวสามารถดำรงชีพอยู่ได้ โดยรายรับของเกษตรกรประกอบไปด้วย การขายอ้อยให้กับโรงงานน้ำตาล และการขายผลิตภัณฑ์พลอยได้ให้กับโรงไฟฟ้า ซึ่งราคาหรือจำนวนที่สามารถส่งขายได้จะขึ้นอยู่กับคุณภาพ และปริมาณซึ่งเป็นผลมาจากวิธีการเก็บเกี่ยวต่าง ๆ ในขณะที่รายจ่ายของเกษตรกรส่วนใหญ่ประกอบด้วย ค่าเพาะปลูก ค่าเก็บเกี่ยว และค่าขนส่งอ้อย อย่างไรก็ตามในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเน้นไปที่การหาผลกำไรเฉลี่ยรายคนของเกษตรกร แทนที่จะเป็นผลรวมกำไรของเกษตรกรจากทั้งระบบเนื่องจากต้องการให้เกษตรกรรายเล็กมีผลกำไรจากการประกอบอาชีพมากยิ่งขึ้น โดยเราสามารถแสดงสมการเพื่อหาสัดส่วนกำไรจากการขายอ้อยเฉลี่ยรายคนของเกษตรกร ได้ดังสมการที่ 4.2

สัดส่วนกำไรจากการขายอ้อยเฉลี่ยรายคนของเกษตรกร

$$z_2 = \max_{(x, \omega)} \left[\text{avg}_{i \in I} \left(\begin{aligned} & \left(\sum_{r \in R} \sum_{a \in A} x_{ra} \mu_j [b(\pi_j - q) + s - v - h_r^f + \varepsilon h_r^u] \right) \\ & - \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} \omega_{tjr} \pi_j \mu_j \varphi_r b \\ & - \sum_{r \in R} \sum_{a \in A} x_{ra} (h_r^c \mu_j + d_a g^u g^c) \\ & - \sum_{j \in J} (d_{(\emptyset, j)} + d_{(j, \emptyset)}) g^u g^c \end{aligned} \right) \right] \quad (4.2)$$

ทั้งนี้สมการที่ 4.2 มีองค์ประกอบสำคัญ 4 ส่วน คือ

- ค่าประมาณการราคาขายอ้อย และผลิตภัณฑ์พลอยได้ทั้งหมดที่เป็นไปได้ภายในกรอบเวลาวางแผนที่สนใจ
- ค่าเสื่อมสภาพของอ้อยจากเวลารอคอยที่เริ่มตั้งแต่การเก็บเกี่ยวไปจนถึงการเทอ้อยเข้าเครื่องหีบ
- ค่าใช้จ่ายในการเก็บเกี่ยวอ้อย
- ค่าน้ำมันรถบรรทุก

4.2.3.3 Minimize z_3 : ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรม

เนื่องจากอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลเป็นอุตสาหกรรมใหญ่ มีผู้มีส่วนเกี่ยวข้องจำนวนมาก การตัดสินใจใด ๆ ย่อมก่อให้เกิดผลกระทบในแง่ของการสูญเสียโอกาสภายในระบบไม่มากนัก โดยในกระบวนการโลจิสติกส์ขาเข้าของสินค้าน้ำตาลจะสามารถจำแนกการสูญเสียข้างต้นได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ การสูญเสียจากการรอคอยคิวเทอ้อยของรถบรรทุกที่ไม่จำเป็น และ การสูญเสียจากเสื่อมสภาพเนื่องจากวิธีการเก็บเกี่ยวที่ไม่เหมาะสม แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยจะนำเสนอเพิ่มเติมในมุมมองของค่าเสียโอกาสในอุตสาหกรรมข้างเคียง หรือการสูญเสียของอุตสาหกรรมพลังงานจากการเผาอ้อยก่อนเก็บเกี่ยวที่ส่งผลให้ปริมาณไบอ้อยที่นำเข้ามาใช้ในการผลิตไฟฟ้ามีจำนวนลดลง ซึ่งเป็นมุมมองค่าเสียโอกาสที่งานวิจัยอื่นยังไม่ให้ความสนใจมากนัก นอกจากนี้ผู้วิจัยยังพิจารณารวมถึงค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการปรับปรุงการเสื่อมสภาพของดินจากวิธีการเก็บเกี่ยวที่ไม่เหมาะสม โดยค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมโดยรวมสามารถแสดงเป็นสมการ ได้ดังสมการที่ 4.3

ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรม

$$z_3 = \min_{(x, \omega, \beta)} \left[\vartheta \left(\begin{aligned} & \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} \pi_j \mu_j \left[\omega_{tjr} (\varphi_r - \varphi_{r(\text{green})}) + \beta_{tjr} \varphi_r \right] \\ & + \sum_{r \in R} \sum_{a \in A} x_{ra} \pi_j \mu_j \left[(h_r^d - h_{r(\text{green})}^d) + h_r^l \right] \\ & + \sum_{r \in R} \sum_{a \in A} x_{ra} \mu_j \left[\varepsilon (h_{r(\text{green})}^u - h_r^u) + h_r^i \right] \end{aligned} \right) \right] \quad (4.3)$$

ทั้งนี้สมการที่ 4.3 มีองค์ประกอบสำคัญ 3 ส่วน คือ

- ค่าเสียโอกาสจากการเสื่อมสภาพจากการรอคอยคิวเทอ้อยเกินกำหนด
- ค่าเสียโอกาสจากการเสื่อมสภาพจากวิธีการเก็บเกี่ยวอ้อยต่าง ๆ
- ค่าเสียโอกาสจากการขายไบอ้อยให้กับโรงไฟฟ้า และค่าปรับปรุงดิน

4.2.3.4 Minimize z_4 : ปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ปัญหามลภาวะทางอากาศซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชากรกำลังเป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจอย่างมากอยู่ในขณะนี้ มีความสอดคล้องเป็นอย่างมากกับช่วงเวลาการเก็บเกี่ยวอ้อยในพื้นที่ต่าง ๆ ซึ่งในระบบโลจิสติกส์ขาเข้าของสินค้าน้ำตาลมีกิจกรรมที่ทำให้เกิดมลภาวะในอากาศได้แก่ การเผาอ้อยก่อนเก็บเกี่ยว และการขนส่งอ้อย ทั้งนี้เพื่อให้สามารถทำความเข้าใจ และวัดค่าได้ง่าย ทางผู้วิจัยจึงใช้ปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมาจากกิจกรรมต่าง ๆ เป็นเกณฑ์ โดยเราสามารถแสดงสมการเพื่อหาปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ได้ดังสมการที่ (4.4)

ปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

$$z_4 = \min_{(x,y)} (\sum_{r \in R} \sum_{a \in A} x_{ra} (d_a g^u g^e + h_r^g g^e + h_r^e) + \sum_{j \in J} (d_{(\emptyset,j)} + d_{(j,\emptyset)}) g^u g^e) \quad (4.4)$$

ทั้งนี้สมการที่ 4.4 มีองค์ประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ

- ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการเก็บเกี่ยว
- ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากน้ำมันเชื้อเพลิงของรถบรรทุก

4.2.4 ข้อจำกัด

ปัญหาการจัดตารางทรัพยากร สามารถแบ่งข้อจำกัดเป็น 6 กลุ่ม เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจได้ ดังนี้

4.2.4.1 ข้อจำกัดด้านการมอบหมายงาน

ทุกทรัพยากรการเก็บเกี่ยวจะออกจากโรงงานน้ำตาลในตอนต้นของรอบเวลาวางแผน และเดินทางเพื่อไปปฏิบัติงานที่แปลงเพาะปลูกอ้อยที่ได้รับมอบหมายตามลำดับ โดยจะกลับเข้าสู่โรงงานหลังจากที่ปฏิบัติงานจนครบถ้วนแล้วเท่านั้น ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับโจทย์ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางที่รถแต่ละคันจะออกเดินทางไปยังจุดหมายต่าง ๆ แล้ววนกลับมายังจุดเริ่มต้นได้เพียงครั้งเดียว ในที่นี้สมการข้อจำกัดที่ (1) – (4) กำหนดให้ทุกทรัพยากรการเก็บเกี่ยว $r \in R$ และทรัพยากรรถบรรทุกอ้อย $t \in T$ จะได้รับมอบหมายงานสูงสุดเพียง 1 ชุดต่อรอบเวลาการวางแผนเท่านั้น (ซึ่งทรัพยากรหนึ่ง ๆ อาจจะไม่ถูกมอบหมายงานเลยก็ได้) โดยจะมีเส้นทางการเคลื่อนที่ออกจากโรงงานน้ำตาล \emptyset ไปยังแปลงเพาะปลูก $i, j \in J$ ใด ๆ และวนกลับมายังโรงงานได้ไม่เกินหนึ่งครั้ง ในขณะที่สมการข้อจำกัดที่ (5) – (6) กำหนดการเริ่มต้นนับลำดับคิวการเทอ้อยในโรงงานน้ำตาล โดยพิจารณาคิวให้เป็นลักษณะของการเคลื่อนที่ของรถเช่นเดียวกัน หากแต่ลำดับคิวเทอ้อยจะต้องถูกมอบหมายเสมอไม่ว่าจะเป็นในกรณีใด

$$\sum_{i \in J} x_{r,(i,\emptyset)} \leq 1; \forall r \in R \quad (1)$$

$$\sum_{j \in J} x_{r,(\emptyset,j)} \leq 1; \forall r \in R \quad (2)$$

$$\sum_{i \in J} y_{t,(i,\emptyset)} \leq 1; \forall t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{j \in J} y_{t,(\emptyset,j)} \leq 1; \forall t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{i \in J} \alpha_{(i,\emptyset)} = 1 \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} \alpha_{(\emptyset,j)} = 1 \quad (6)$$

4.2.4.2 ข้อจำกัดด้านความสมดุลของการเคลื่อนที่

ในการปฏิบัติงานจริง เมื่อเราทำการเก็บเกี่ยวอ้อย ณ แปลงเพาะปลูกหนึ่ง ๆ เสร็จสิ้นแล้ว ก็จะไม่กลับไปปฏิบัติงานซ้ำยังแปลงเพาะปลูกเดิมอีก โดยในปัญหาการจัดตารางทรัพยากรนี้ ผู้วิจัยใช้สมการข้อจำกัดที่ (7) – (8) กำหนดให้ทรัพยากรการเก็บเกี่ยว $r \in R$ และทรัพยากรรถบรรทุกอ้อย $t \in T$ เคลื่อนที่ไปยังโรงงานน้ำตาล หรือแปลงเพาะปลูกอ้อยใด ๆ ได้เพียงครั้งเดียว ซึ่งในกรณีนี้ผู้วิจัยได้กำหนดให้ทุกแปลงเพาะปลูกต้องถูกเก็บเกี่ยวภายในรอบเวลาการวางแผน โดยมีสมการข้อจำกัดที่ (9) – (10) คอยควบคุมให้จำนวนครั้งที่เคลื่อนที่เข้า และออกในแต่ละจุดมีผลรวมที่เท่ากันเสมอ และสมการที่ (11) – (12) จะทำหน้าที่กำหนดลำดับคิวการเทอ้อยที่อยู่ต่อเนื่องกันในโรงงานน้ำตาลโดยใช้หลักการเดียวกัน

$$\sum_{r \in R} \sum_{i \in J: i \neq j} x_{r,(i,j)} = 1; \forall j \in J \cup \emptyset \quad (7)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{i \in J: i \neq j} y_{t,(i,j)} = 1; \forall j \in J \cup \emptyset \quad (8)$$

$$\sum_{i \in J \cup \emptyset} x_{r,(i,j)} = \sum_{n \in J \cup \emptyset} x_{r,(j,n)}; \forall r \in R, \forall j \in J \cup \emptyset \quad (9)$$

$$\sum_{i \in J \cup \emptyset} y_{t,(i,j)} = \sum_{n \in J \cup \emptyset} y_{t,(j,n)}; \forall t \in T, \forall j \in J \cup \emptyset \quad (10)$$

$$\sum_{i \in J: i \neq j} \alpha_{(i,j)} = 1; \forall j \in J \cup \emptyset \quad (11)$$

$$\sum_{i \in J \cup \emptyset} \alpha_{(i,j)} = \sum_{n \in J \cup \emptyset} \alpha_{(j,n)}; \forall j \in J \cup \emptyset \quad (12)$$

4.2.4.3 ข้อจำกัดด้านการเกิด Subtour

เพื่อควบคุมเส้นทาง ลำดับการปฏิบัติงานของทรัพยากรและการเทอ้อย ให้เป็นลักษณะของการเดินทางแบบทางเดียว ไม่มีการวิ่งรอกย้อนกลับ หรือเกิดเส้นทางย่อย (Subtour) สมการข้อจำกัดที่ (13) – (18) จึงถูกกำหนดขึ้น ทั้งนี้ ลำดับการปฏิบัติงานของทรัพยากรจะถูกกำหนดด้วยเวลาเริ่มต้นตัดอ้อยที่จะถูกกล่าวถึงในส่วนถัดไป

$$k_{jr}^x \geq k_{ir}^x + x_{r,(i,j)} - M(1 - x_{r,(i,j)}); \forall r \in R, \forall i, j \in J: i \neq j \quad (13)$$

$$k_{jr}^x \geq x_{r,(\emptyset,j)} - M(1 - x_{r,(\emptyset,j)}); \forall r \in R, \forall j \in J \quad (14)$$

$$k_{jt}^y \geq k_{it}^y + y_{t,(i,j)} - M(1 - y_{t,(i,j)}); \forall t \in T, \forall i, j \in J: i \neq j \quad (15)$$

$$k_{jt}^y \geq y_{t,(\emptyset,j)} - M(1 - y_{t,(\emptyset,j)}); \forall t \in T, \forall j \in J \quad (16)$$

$$k_j^\alpha \geq k_i^\alpha + \alpha_{(i,j)} - M(1 - \alpha_{(i,j)}); \forall i, j \in J: i \neq j \quad (17)$$

$$k_j^\alpha \geq \alpha_{(\emptyset,j)} - M(1 - \alpha_{(\emptyset,j)}); \forall j \in J \quad (18)$$

4.2.4.4 ข้อจำกัดในกระบวนการทำงาน

หนึ่งในข้อจำกัดสำคัญของกระบวนการเก็บเกี่ยวอ้อย คือทรัพยากรการเก็บเกี่ยว $r \in R$ จะต้องมีรถบรรทุกอ้อย $t \in T$ อยู่ด้วยจึงจะสามารถเริ่มต้นเก็บเกี่ยว ณ แปลงเพาะปลูก $j \in J$ ได้ ๆ

ได้เสมอ ซึ่งสมการข้อจำกัดที่ (19) ทำหน้าที่ควบคุมเวลาเริ่มต้นดังกล่าว โดยมี (20) – (21) เป็นสมการข้อจำกัดที่กำหนดระยะเวลาขั้นต่ำระหว่าง 2 แปลงเพาะปลูกที่มีคิวตัดต่อเนื่องกัน ซึ่งเวลาดังกล่าวจะต้องไม่น้อยไปกว่าผลรวมของระยะเวลาในการตัดของทรัพยากร $\frac{\mu_i}{h_r^s}$ กับระยะเวลาในการเคลื่อนที่ระหว่างแปลงอ้อย $\tau_{(i,j)}$ สำหรับแต่ละทรัพยากรการเก็บเกี่ยว ในขณะที่ทรัพยากรรถบรรทุกอ้อยจะต้องนำระยะเวลาในการหีบอ้อย $m\mu_i$ และระยะเวลาการเคลื่อนที่ไป – กลับจากแปลงอ้อย $i, j \in J$ กับโรงงานน้ำตาล \emptyset เข้ามาร่วมพิจารณาด้วย ส่วนสมการข้อจำกัดที่ (22) – (23) จะคอยดูแลให้เวลาเริ่มต้นเก็บเกี่ยวอ้อยที่มากที่สุดไม่มากเกินไปจนเกินกว่ากรอบเวลาการวางแผนที่สนใจ และ (24) ทำหน้าที่ควบคุมไม่ให้จำนวนงานที่มอบหมายไปยังทรัพยากรการเก็บเกี่ยว $r \in R$ รวมแล้วมากเกินไปกว่าอัตราการทำงานสูงสุดของทรัพยากร

$$\sum_{r \in R} \theta_{rj} = \sum_{t \in T} \sigma_{tj} ; \forall j \in J \quad (19)$$

$$\theta_{rj} \geq \theta_{ri} + \frac{\mu_i}{h_r^s} + \tau_{(i,j)} - M(1 - x_{r,(i,j)}); \forall r \in R, \forall i, j \in J: i \neq j \quad (20)$$

$$\sigma_{tj} \geq \sigma_{ti} + \sum_{r \in R} \sum_{n \in J} (x_{r,(n,j)} \frac{\mu_i}{h_r^s}) + \tau_{(i,\emptyset)} + m\mu_i + \tau_{(\emptyset,j)} - M(1 - y_{t,(i,j)}) ; \forall t \in T, \forall i, j \in J: i \neq j \quad (21)$$

$$\theta_{rj} \leq p - \frac{\mu_j}{h_r^s} - \tau_{(j,\emptyset)}; \forall r \in R, \forall j \in J \quad (22)$$

$$\sigma_{tj} \leq p - \sum_{r \in R} \sum_{i \in J} (x_{r,(i,j)} \frac{\mu_j}{h_r^s}) - \tau_{(j,\emptyset)}; \forall t \in T, \forall j \in J \quad (23)$$

$$\sum_{a \in A} x_{ra} \leq \delta_r ; \forall r \in R \quad (24)$$

4.2.4.5 ข้อจำกัดของลำดับการจัดส่งอ้อย

สำหรับการจัดส่งอ้อยซึ่งถูกเก็บเกี่ยวแล้วด้วยรถบรรทุกยังโรงงานน้ำตาล เพื่อความสะดวกในการคำนวณ ทางผู้วิจัยได้กำหนดให้โรงงานน้ำตาลมีระบบการรับอ้อยที่มีหน่วยให้บริการหน่วยเดียว (Single Queue) โดยคำนวณระยะเวลาการให้บริการต่ออ้อยจากอัตราการทำงานของเครื่องหีบอ้อย m และปริมาณอ้อยเข้าหีบ μ_i จากแปลงเพาะปลูกอ้อย $i \in J$ ซึ่งสมการข้อจำกัดที่ (25) จะเป็นตัวกำหนดเวลาขั้นต่ำในการจัดส่งอ้อยจากแปลง $j \in J$ ยังโรงงานน้ำตาล ρ_{tj} ของรถบรรทุกอ้อย $t \in T$ ใด ๆ ที่จะต้องเกิดขึ้นห่างจากเวลาเริ่มต้นเก็บเกี่ยว σ_{tj} เท่ากับระยะเวลาปฏิบัติงานของทรัพยากรการเก็บเกี่ยว $r \in R$ รวมกับระยะเวลาการเคลื่อนที่จากแปลงอ้อยกลับมายังโรงงานน้ำตาลเป็นอย่างน้อย ทั้งนี้ (26) – (27) จะเป็นสมการที่ช่วยควบคุมให้ระยะเวลาการจัดส่งอ้อยในข้างต้นอยู่ห่างกันเท่ากับอัตราการให้บริการต่ออ้อย และเกิดขึ้นไม่เกินกรอบเวลาการวางแผนที่สนใจ ส่วนสมการข้อจำกัดที่ (28) – (29) ใช้ในการคำนวณระยะเวลาการรอคอยจริง และระยะเวลารอคอยส่วนเกินของอ้อยที่ถูกตัดโดยทรัพยากรการเก็บเกี่ยว $r \in R$ จากแปลงเพาะปลูก $j \in J$ ที่ถูกจัดส่งโดย

รถบรรทุกอ้อย $t \in T$ ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ω_{tjr} และ β_{tjr} ในส่วนนี้จัดอยู่ในกลุ่มของตัวแปรช่วย (Auxiliary Variables) ที่ทำให้การคำนวณค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์สะดวกมากยิ่งขึ้น

$$\rho_{tj} \geq \sigma_{tj} + \sum_{r \in R} \sum_{i \in J} x_{r,(i,j)} \frac{\mu_j}{h_r^s} + \tau_{(j,\emptyset)} - M(1 - \sum_{i \in J} y_{t,(i,j)})$$

$$; \forall t \in T, \forall j \in J \quad (25)$$

$$\rho_{tj} - \rho_{t'j} \geq m\mu_j - M(3 - \alpha_{(i,j)} - y_{tj} - y_{t'j}); \forall t, t' \in T: t \neq t', \forall i, j \in J \quad (26)$$

$$\rho_{tj} \leq p; \forall t \in T, \forall j \in J \quad (27)$$

$$\sum_{r \in R} \omega_{tjr} = (\rho_{tj} - \sigma_{tj}); \forall t \in T, \forall j \in J \quad (28)$$

$$\sum_{t \in T} \beta_{tjr} = \sum_{t \in T} \omega_{tjr} - \sum_{r \in R} \sum_{a \in A} x_{r,(i,j)} \mu_j (h_r^s + \tau_{(j,\emptyset)})$$

$$; \forall i, j \in J, \forall r \in R \quad (29)$$

4.2.4.6 ข้อจำกัดของตัวแปรตัดสินใจ

สมการข้อจำกัดที่ (30) – (40) ในส่วนสุดท้ายนี้ ทำหน้าที่ช่วยกำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจทุกตัวต้องมีค่าที่มากกว่า หรือเท่ากับ 0 (Non-zero Constraints)

$$x_{ra} \in \{0,1\}; \forall r \in R, \forall a \in A \quad (30)$$

$$y_{ta} \in \{0,1\}; \forall t \in T, \forall a \in A \quad (31)$$

$$\alpha_a \in \{0,1\}; \forall a \in A \quad (32)$$

$$\theta_{rj} \geq 0; \forall r \in R, \forall j \in J \quad (33)$$

$$\sigma_{tj} \geq 0; \forall t \in T, \forall j \in J \quad (34)$$

$$\rho_{tj} \geq 0; \forall t \in T, \forall j \in J \quad (35)$$

$$\omega_{tjr} \geq 0; \forall t \in T, \forall j \in J, \forall r \in R \quad (36)$$

$$\beta_{tjr} \geq 0; \forall t \in T, \forall j \in J, \forall r \in R \quad (37)$$

$$k_{jr}^x \geq 0; \forall j \in J, \forall r \in R \quad (38)$$

$$k_{jt}^y \geq 0; \forall j \in J, \forall t \in T \quad (39)$$

$$k_j^\alpha \geq 0; \forall j \in J \quad (40)$$

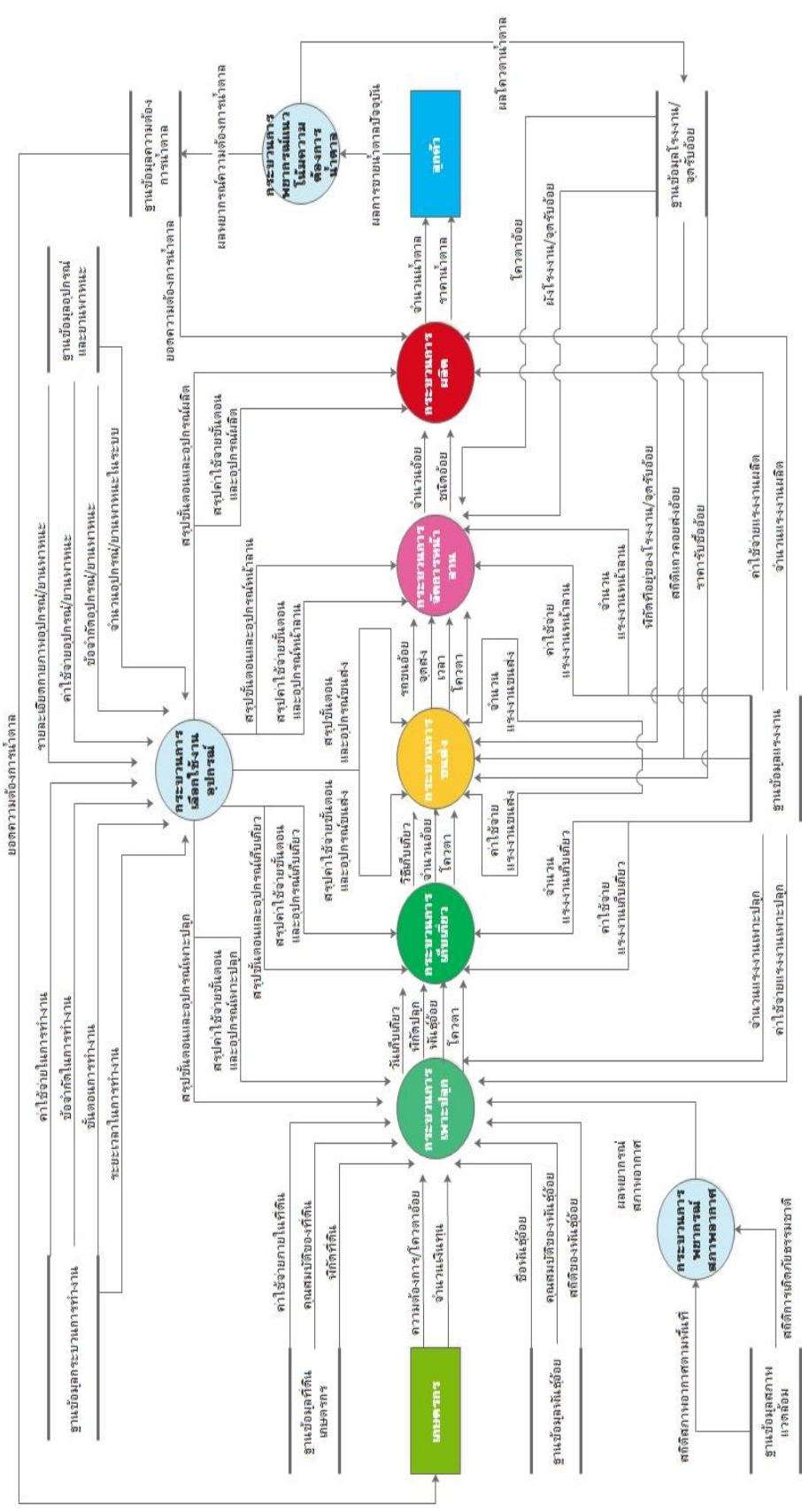
4.3 การกำหนดสมมติฐานสำหรับการออกแบบฮิวริสติกส์

อุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทรายเป็นอุตสาหกรรมที่มีขนาดใหญ่ ทำให้มีปัจจัยด้านระบบโลจิสติกส์เข้าที่กระทบต่อการปฏิบัติการอยู่เป็นจำนวนมาก นอกจากนี้การเก็บรวบรวมและจำแนกผลกระทบจากกรณีต่าง ๆ ให้ครบถ้วนแม่นยำจึงเป็นไปได้ยาก ส่งผลทำให้แบบจำลองคณิตศาสตร์ซึ่งจำลองพฤติกรรมของระบบมีความซับซ้อน เป็นต้นว่า

- ลักษณะพันธุ์ วิธีการปลูก ระยะห่าง และช่วงเวลาการปลูกอ้อยของเกษตรกรแต่ละราย
- ตำแหน่งที่ตั้งของแปลงเพาะปลูกและเส้นทางที่เครื่องจักรสามารถเดินทางเข้า-ออก
- สภาพความชื้น และความแข็งตัวของพื้นดินภายในแปลงเพาะปลูก
- รายชื่อเกษตรกรไร้อ้อยทั้งหมดภายในพื้นที่ส่งเสริมการเพาะปลูก (รอบโรงงานน้ำตาล)
- ข้อมูลประมาณการคุณภาพและผลผลิตอ้อยที่แม่นยำในแต่ละแปลงเพาะปลูก

จากสาเหตุดังกล่าว เราจะสามารถเขียนแผนภาพเพื่อแสดงการไหลของข้อมูลที่เป็นภายในห่วงโซ่อุปทานจริงของสินค้าน้ำตาล เพื่อความสะดวกในการทำความเข้าใจภาพรวมของผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากกระบวนการต่าง ๆ ที่มีความต่อเนื่องกัน ได้ดังแสดงในรูปภาพที่ 4.5





รูปภาพที่ 4.5 แผนภาพแสดงการไหลของข้อมูลภายในห่วงโซ่คุณค่าสินค้า

จากรูปภาพที่ 4.5 ซึ่งแสดงการไหลของข้อมูลภายในห่วงโซ่อุปทานสินค้าน้ำตาล เราจะพบว่า หากเกิดความผิดพลาด หรือความคลาดเคลื่อนขึ้นในกระบวนการหนึ่ง ๆ จากปัจจัยใดก็ตามในระบบโลจิสติกส์ขาเข้า จะส่งผลกระทบต่อการค้าขาย หรือการค้นหาคำตอบที่ตามมาในกระบวนการอื่นทั้งหมด ทั้งนี้ เพื่อให้เกิดความสะดวกและเป็นแบบแผนเดียวกันในการออกแบบชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบ ผู้วิจัยจึงได้กำหนดให้คุณสมบัติต่าง ๆ ของปัจจัยข้างต้นมีค่าคงที่ และมีรายละเอียด ดังนี้

- กำหนดให้เกษตรกรไร้อ้อยในระบบที่สนใจปลูกอ้อยพันธุ์เดียวกัน โดยมีอัตราการเสื่อมสภาพของอ้อยเท่ากัน
- กำหนดให้อัตราการเสื่อมสภาพของอ้อยมีค่าคงที่ ไม่แปรผันตามระดับความชื้น และอุณหภูมิ
- กำหนดให้แปลงเพาะปลูกแต่ละแปลงไม่มีข้อจำกัดในด้านเส้นทางสำหรับการเดินทางเข้า-ออก ทรัพยากรการเก็บเกี่ยว และรถบรรทุกสามารถเคลื่อนที่ระหว่างกันได้ โดยระยะทางระหว่างแต่ละแปลงจะใช้ค่าจากการกระจัดจากจุดศูนย์กลาง (Euclidean Distance)
- กำหนดให้ระยะห่างในการปลูกอ้อย และสภาพความแข็งตัวของพื้นดินในทุกแปลงปลูกอ้อยเหมาะสมกับการนำรถตัดอ้อยมาใช้ในขั้นตอนการเก็บเกี่ยว
- กำหนดให้เกษตรกรในระบบที่สนใจมีเพียงเกษตรกรที่ทำสัญญาจัดส่งอ้อยกับทางโรงงานน้ำตาลก่อนแล้วเท่านั้น
- กำหนดให้ข้อมูลประมาณการคุณภาพ และผลผลิตอ้อยที่ได้รับมีความถูกต้องแม่นยำ
- กำหนดให้การเก็บเกี่ยวสามารถทำได้ทั้งในช่วงกลางวันและกลางคืน โดยมีประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวเท่ากัน
- กำหนดให้อัตราการทำงานของทรัพยากรการเก็บเกี่ยวมีค่าคงที่ และเท่ากันสำหรับทุกทรัพยากรในกลุ่มเดียวกัน
- กำหนดให้อัตราการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงมีค่าคงที่สำหรับทุกทรัพยากรการเก็บเกี่ยวในกลุ่มเดียวกัน
- กำหนดให้รถบรรทุกอ้อยทั้งหมดมีประสิทธิภาพในการทำงาน อัตราการใช้น้ำมัน รวมถึงอัตราการบรรทุกเท่ากัน
- กำหนดให้ต้นทุนการเพาะปลูกอ้อยมีค่าคงที่สำหรับทุกแปลงเพาะปลูก
- กำหนดให้ราคาซื้อขายอ้อยที่หน้าโรงงาน และอัตราส่วนค่าปรับจากคุณภาพอ้อยมีค่าคงที่ตลอดช่วงเวลาระบบที่สนใจ

4.4 การพัฒนาฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาการจัดตารางทรัพยากร

4.4.1 การกำหนดพารามิเตอร์ของ PSO

เนื่องจากฮิวริสติกส์ที่พัฒนาขึ้นนี้มี PSO เป็นส่วนประกอบที่สำคัญ ซึ่งประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบโดยรวมของ PSO จะเป็นผลมาจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นที่เหมาะสม ไม่ว่าจะเป็นส่วนหนึ่งของความละเอียดในการค้นหา ความรวดเร็วในการลู่เข้าหาคำตอบ หรือความหลากหลายของคำตอบ ดังนั้น ก่อนที่จะเข้าสู่การอธิบายขั้นตอนการทำงานของฮิวริสติกส์โดยภาพรวม ทางผู้วิจัยจะกล่าวถึงการกำหนดองค์ประกอบที่สำคัญของ PSO เพื่อการใช้งานในกระบวนการต่าง ๆ ของโมเดลก่อนเป็นลำดับแรก

4.4.1.1 พารามิเตอร์ควบคุม

พารามิเตอร์ควบคุมที่สำคัญของ PSO คือ ค่าถ่วงน้ำหนัก w ที่กำหนดอิทธิพลจากขนาดความเร็วในการเคลื่อนที่เดิมของอนุภาค และค่าคงที่ความเร่ง c_p และ c_g ซึ่งมีหน้าที่ควบคุมแนวโน้มนการเคลื่อนที่ไปยังทิศทางเดียวกับตำแหน่งของ $pbest$ และ $gbest$ โดยขนาดของค่าคงที่ความเร่งจะเป็นปัจจัยกำหนดความกว้างของการค้นหาคำตอบของอนุภาคบนปริภูมิการค้นหาในรอบการคำนวณหนึ่ง ๆ ซึ่งการกำหนดค่าคงที่ความเร่งที่เหมาะสมสำหรับปัญหาที่เฉพาะเจาะจงนับได้ว่าเป็นความท้าทายอย่างยิ่ง

อย่างไรก็ดี Kennedy and Mendes (2002) ได้คิดค้นสัมประสิทธิ์การหดตัวของการค้นหา (Constriction Coefficient) ซึ่งช่วยในการเลือกค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัวเพื่อรับประกันการลู่เข้าหาคำตอบของ PSO โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชัน c_p และ c_g ได้ดังสมการที่ 4.5

$$\chi = \frac{2}{\varphi - 2 + \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}} \quad (4.5)$$

เมื่อ $\varphi = c_p + c_g > 4$

เมื่ออ้างอิงจากสมการที่ 4.5 เราจะสามารถเขียนสมการปรับปรุงความเร็วของอนุภาคจากสมการที่ 2.3 ใหม่ได้ ดังแสดงในสมการที่ 4.6

$$\vec{v}_i(t+1) = \chi \left(\underbrace{\vec{v}_i(t)}_{\text{Inertia}} + \underbrace{c_p r_1 (\vec{x}_{pbest_i} - \vec{x}_i(t))}_{\text{Cognitive Learning}} + \underbrace{c_g r_2 (\vec{x}_{gbest_i} - \vec{x}_i(t))}_{\text{Social Learning}} \right) \quad (4.6)$$

จากทฤษฎีข้างต้น Eberhart and Shi (2000) ได้กำหนดค่าของ φ เป็นค่าคงที่เอาไว้ที่ $\varphi = 4.1$ และได้แนะนำเสนอค่าคงที่ความเร่ง c_p และ c_g ที่เหมาะสมกับค่าของ φ เอาไว้ที่ $c_p = c_g = 2.05$ ซึ่งจากค่าดังกล่าวนี้เอง จะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การหดตัวในสมการที่ 4.5 ที่ $\chi = 0.729$ และเมื่อนำค่าดังกล่าวมาแทนค่าลงในสมการที่ 4.6 เราจะสามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่า สมการปรับปรุงความเร็วของอนุภาคโดยทั่วไปของ PSO มีค่าพารามิเตอร์ควบคุม คือ $w = 0.729$ และ $c_p = c_g = 1.49455$ ซึ่งทางผู้วิจัยเองก็ได้เลือกนำค่าของพารามิเตอร์ควบคุมดังกล่าวมาใช้ในกระบวนการออกแบบ และพัฒนาฮิวริสติกส์ด้วยเช่นกัน

4.3.1.2 พารามิเตอร์ทั่วไป

การทำงานของ PSO จะไม่อาจสมบูรณ์ได้หากขาดพารามิเตอร์อื่นที่ทำหน้าที่กำกับลำดับกระบวนการทำงานของโมเดลโดยรวม โดยรายชื่อของพารามิเตอร์ทั่วไป และการตั้งค่าสำหรับใช้งานในฮิวริสติกส์เพื่อการจัดตารางทรัพยากรที่ออกแบบที่มีรายละเอียดดังนี้

- ขนาดของประชากร หรือจำนวนอนุภาค = 15 อนุภาค
- จำนวนรอบการคำนวณสูงสุด = 1,000 รอบ
- ค่าต่ำสุด และสูงสุดของตำแหน่งคำตอบในแต่ละมิติ = [0,1]
- ความเร็วสูงสุดของเวกเตอร์ความเร็ว = 10% ของตำแหน่งคำตอบในแต่ละมิติ หรือ ± 0.1

4.4.2 การออกแบบการเข้ารหัสของอนุภาค

วิธีการ PSO เริ่มต้นจากการสุ่มค่าตำแหน่งของแต่ละอนุภาคภายในขอบเขตของปริภูมิคำตอบก่อนเสมอ ดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.2.1 ซึ่งทั่วไปแล้วแต่ละอนุภาคจะประกอบไปด้วยคุณสมบัติของตำแหน่งในหลายมิติ (Dimension) ที่ถูกเข้ารหัสไว้ โดยจำนวนมิติที่มีมักจะเท่ากับจำนวนของตัวแปรตัดสินใจภายในปัญหา อย่างไรก็ตาม ทางผู้วิจัยได้ออกแบบวิธีการเข้ารหัสของอนุภาค โดยการกำหนดให้จำนวนมิติของอนุภาคมีค่าเท่ากับ $4N$ เมื่อ N คือจำนวนแปลงเก็บเกี่ยวอ้อยภายในกรอบเวลาวางแผนที่สนใจ และมีช่วงความกว้างของคำตอบในแต่ละมิติเท่ากับ [0,1] ภายใต้ปริภูมิคำตอบก่อนการถอดรหัส (หรือตามค่าต่ำสุด และสูงสุดที่กำหนด) ซึ่งมีหลักการเข้ารหัสคำตอบในแต่ละมิติของอนุภาคดังนี้

- มิติที่ γ^s ของอนุภาคเมื่อ $1 \leq \gamma^s \leq N$ กำหนดเวลาเริ่มเก็บเกี่ยวอ้อยของแปลงเพาะปลูกที่ $1 \leq j \leq N ; j \in J(i)$

- มิติที่ γ^f ของอนุภาคเมื่อ $N < \gamma^f \leq 2N$ กำหนดเวลาการจัดส่งอ้อยที่โรงงานน้ำตาลของแปลงเพาะปลูกที่ $1 \leq j \leq N ; j \in J(i)$
- มิติที่ γ^r ของอนุภาคเมื่อ $2N < \gamma^r \leq 3N$ กำหนดทรัพยากรการเก็บเกี่ยวอ้อยของแปลงเพาะปลูกที่ $1 \leq j \leq N ; j \in J(i)$
- มิติที่ γ^t ของอนุภาคเมื่อ $3N < \gamma^t \leq 4N$ กำหนดทรัพยากรการเก็บเกี่ยวอ้อยของแปลงเพาะปลูกที่ $1 \leq j \leq N ; j \in J(i)$

สำหรับการเข้ารหัสข้างต้นในมิติคำตอบที่ $1 \leq \gamma \leq 2N$ หากเราพิจารณาโดยคิดเป็นกรอบเวลาการวางแผนเก็บเกี่ยวที่ 26 ชั่วโมง (หรือ $24 + 2$ ชั่วโมง โดย 2 ชั่วโมงสุดท้ายจะเป็นการทดเวลาการทำงานไปยังวันถัดไป เพื่อแทนที่การว่างงานของทรัพยากรการเก็บเกี่ยวระหว่างเคลื่อนที่ไปยังแปลงเก็บเกี่ยวในช่วงต้นของวัน) หรือ 1,560 นาที จะพบว่า หากต้องการแบ่งช่วงบนความกว้างของปริภูมิคำตอบที่กำหนดด้วยหน่วยเวลาว่างแผน 1 นาที จะสามารถทำได้ด้วยช่วงกว้างขนาด 0.00064 ของตำแหน่งคำตอบ และเมื่อนำช่วงดังกล่าวมาเรียงลำดับต่อกันจากน้อยไปหามากจะทำให้เราสามารถถอดรหัสเป็นเวลาของการเก็บเกี่ยว และจัดส่งอ้อยตลอดทั้งวันได้ ในขณะที่มิติคำตอบอื่นที่ $2N < \gamma \leq 3N$ หรือ $3N < \gamma \leq 4N$ จะถูกแบ่งเป็นช่วงที่มีความกว้างขึ้นกับจำนวนของทรัพยากรการเก็บเกี่ยว และรถบรรทุกที่มีภายในกรอบเวลาว่างแผนที่สนใจ

อย่างไรก็ตาม เพื่อความเข้าใจที่ดียิ่งขึ้น ผู้วิจัยจะยกตัวอย่างของอนุภาค และวิธีการเข้ารหัสซึ่งประกอบไปด้วยแปลงเพาะปลูกอ้อยจำนวน 2 แปลง ทรัพยากรการเก็บเกี่ยวทั้ง 3 ชนิด ชนิดละ 1 ทีม และทรัพยากรรถบรรทุกจำนวน 3 คัน โดยแสดงการกำหนดช่วงการเข้ารหัสดังตารางที่ 4-2 และแสดงตัวอย่างการเข้ารหัสได้ดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-2 ตารางแสดงตัวอย่างการกำหนดช่วงของการเข้ารหัสอนุภาค

หัวข้อ	จำนวน (Capacity)	ช่วงการเข้ารหัส
กรอบเวลาว่างแผน	1,560 นาที	$1/1,560 = 0.00064$
ทรัพยากรการเก็บเกี่ยว	รถตัดอ้อย = 1 คัน (14แปลง)	$(14/14+2+3) = [0, 0.7368]$
	ทีมตัดอ้อยสด = 1 ทีม (2แปลง)	$(16/14+2+3) = (0.7368, 0.8421]$
	ทีมตัดอ้อยไฟไหม้ = 1 ทีม (3แปลง)	$(19/14+2+3) = (0.8421, 1]$
ทรัพยากรรถบรรทุก	3 คัน	$1/3 = 0.3333$

ตารางที่ 4-3 ตารางแสดงตัวอย่างการเข้ารหัส และถอดรหัสของอนุภาค

	$1 \leq \gamma^s \leq N$	$N < \gamma^f \leq 2N$	$2N < \gamma^r \leq 3N$	$3N < \gamma^t \leq 4N$
	Start Time	Deliver Time	Resources	Trucks
$N = 1$	0.0448	0.128	0.5231	0.1234
$N = 2$	0.1536	0.4608	0.8077	0.5567
	↓	↓	↓	↓
$N = 1$	70 นาที	200 นาที	รถตัดอ้อย	รถบรรทุกคันที่ 1
$N = 2$	240 นาที	720 นาที	ทีมตัดอ้อยสด	รถบรรทุกคันที่ 2

จากตารางที่ 4-2 เราจะเห็นได้ว่าในหัวข้อการเข้ารหัสหนึ่ง ๆ เราจะนำจำนวน หรืออัตราการทำงานสูงสุดในกรณีของทรัพยากรการเก็บเกี่ยว มาแปลงให้อยู่ในช่วง $[0, 1]$ ซึ่งการที่มีทรัพยากรที่มากขึ้น หรือกรอบเวลาการวางแผนที่ยาวขึ้น จะส่งผลให้ช่วงของการเข้ารหัสหนึ่ง ๆ นั้นแคบลงไปด้วย ส่วนในตารางที่ 4-3 ได้แสดงให้เห็นแปลงเพาะปลูกซึ่งถูกเข้ารหัสโดยแบ่งออกเป็น 4 มิติ โดยหากเราทำการถอดรหัสจะได้ว่า แปลงอ้อยที่ $N=1$ เริ่มการเก็บเกี่ยวอ้อยในนาที่ที่ 70 ของกรอบเวลาการวางแผนด้วยรถตัดอ้อย และจัดส่งอ้อยให้กับโรงงานน้ำตาลในนาที่ที่ 200 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 1 ส่วนแปลงอ้อยที่ $N=2$ เริ่มการเก็บเกี่ยวอ้อยในนาที่ที่ 240 ของกรอบเวลาการวางแผนด้วยทีมตัดอ้อยสด และจัดส่งอ้อยให้กับโรงงานน้ำตาลในนาที่ที่ 720 ด้วยรถบรรทุกคันที่ 2 เป็นต้น

4.4.3 ข้อมูลนำเข้าของปัญหา

จากการออกแบบวิธีการจัดตารางทรัพยากรโดยใช้ตัวแบบคณิตศาสตร์ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2 และการกำหนดปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อระบบโลจิสติกส์ขาเข้าของอุตสาหกรรมน้ำตาลในหัวข้อที่ 4.3 เราสามารถแบ่งประเภทของข้อมูลออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ข้อมูลที่จะมีค่าคงที่ตลอดทั้งฤดูการผลิต ได้แก่ อัตราการทำงาน of ทรัพยากรเก็บเกี่ยว หรือราคาซื้อขายอ้อย และข้อมูลที่จะเปลี่ยนแปลงไปตามกรอบเวลาการวางแผนในแต่ละวัน หรือข้อมูลนำเข้าในแต่ละกรอบเวลาการวางแผน อันประกอบด้วยตำแหน่งที่ตั้งของแปลงเพาะปลูกอ้อยในระนาบ 2 มิติ ระยะทางระหว่างแปลงเพาะปลูก ข้อมูลประมาณการผลิตในหน่วยตันอ้อย ข้อมูลประมาณการคุณภาพอ้อยในหน่วย C.C.S และข้อมูลเกษตรกรเจ้าของแปลงเพาะปลูกอ้อย โดยตัวอย่างของข้อมูลนำเข้าในข้างต้นสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4-4 และ 4-5

ตารางที่ 4-4 ตารางแสดงตัวอย่างข้อมูลนำเข้าพื้นฐานของพื้นที่เพาะปลูกอ้อย

Node	X Coordinate	Y Coordinate	C.C.S	Yield (Ton)	No. of Growers
Fac	0	0	-	-	-
Field1	-24	48	12	214.57	1
Field2	-23	44	11	89.15	2
Field3	-31	44	13	94.72	3
Field4	-41	11	11	47.36	4
Field5	-50	-44	15	25	5

ตารางที่ 4-5 ตารางแสดงตัวอย่างข้อมูลนำเข้าระยะทางระหว่างแปลงเพาะปลูกในหน่วยกิโลเมตร

Node	Fac	Field1	Field2	Field3	Field4	Field5
Fac	-	53.67	49.65	53.82	42.45	66.60
Field1	53.67	-	4.12	8.06	61.40	95.60
Field2	49.65	4.12	-	8.00	57.87	92.05
Field3	53.82	8.06	8.00	-	55.90	90.03
Field4	42.45	61.40	57.87	55.90	-	34.21
Field5	66.60	95.60	92.05	90.03	34.21	-

ทั้งนี้ ข้อมูลนำเข้าในตารางที่ 4-4 และ 4-5 ข้างต้นเป็นข้อมูลทั่วไปของแปลงเพาะปลูกอ้อยในพื้นที่โดยรอบโรงงานน้ำตาลที่จะถูกสำรวจ และจัดเก็บไว้ในฐานข้อมูลของโรงงานในแต่ละฤดูการผลิต อย่างไรก็ตาม การที่เราจะนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการจัดตารางทรัพยากรได้อย่างมีประสิทธิภาพได้นั้นจำเป็นต้องผ่านกระบวนการจัดเตรียมข้อมูลตามหัวข้อที่ 4.4.4 เสียก่อน

4.4.4 กระบวนการจัดเตรียมข้อมูล (Data Preprocessing)

กระบวนการจัดเตรียมข้อมูล คือ การนำข้อมูลนำเข้ามาแปลงค่าให้สะดวกต่อการคำนวณหาผลลัพธ์ และเป็นไปตามแนวทางแก้ไขปัญหาดังที่กำหนดไว้ในหัวข้อที่ 4.1.2 โดยเราสามารถจำแนกการจัดเตรียมข้อมูลได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

4.4.4.1 การคำนวณระยะเวลาเดินทางเฉลี่ยระหว่างแปลงเพาะปลูกอ้อย

จากตารางที่ 4-5 ซึ่งเป็นข้อมูลระยะทางระหว่างแต่ละแปลงเพาะปลูกในหน่วยกิโลเมตร เราจะนำความเร็วเฉลี่ยของรถบรรทุกอ้อยที่มีอ้อยบรรทุกอยู่เต็มคันรถ หรือประมาณ 60 กิโลเมตร/ชั่วโมง มาใช้ในการคำนวณหาระยะเวลาเดินทางระหว่างแปลงในหน่วยชั่วโมง โดยจะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 ตารางแสดงระยะเวลาการเดินทางระหว่างแปลงเพาะปลูกในหน่วยชั่วโมง

Node	Fac	Field1	Field2	Field3	Field4	Field5
Fac	-	0.895	0.828	0.897	0.708	1.11
Field1	0.895	-	0.069	0.134	1.023	1.593
Field2	0.828	0.069	-	0.133	0.965	1.534
Field3	0.897	0.134	0.133	-	0.932	1.501
Field4	0.708	1.023	0.965	0.932	-	0.570
Field5	1.11	1.59	1.534	1.501	0.570	-

4.4.4.2 การแบ่งแปลงเก็บเกี่ยวโดยใช้น้ำหนักบรรทุกเป็นเกณฑ์

เนื่องจากในสภาพแวดล้อมการทำงานจริงนั้น ทรัพยากรการเก็บเกี่ยวที่เลือกใช้ในแปลงเพาะปลูกที่มีขนาดใหญ่อาจจะไม่มีความจำเป็นต้องเป็นชนิดเดียวกันทั้งหมด นอกจากนี้ปริมาณอ้อยในหนึ่งรอบการจัดส่งยังถูกจำกัดด้วยอัตราการบรรทุกสูงสุดของรถบรรทุกอ้อยที่ 25 ตัน เพื่อความสะดวกในการกำหนดตารางการทำงาน และจัดสรรพื้นที่เก็บเกี่ยวของทรัพยากรที่ชัดเจน ทางผู้วิจัยจึงตัดแบ่งแปลงเพาะปลูกอ้อยเดิมออกเป็นแปลงที่มีขนาดเล็กลง โดยใช้อัตราบรรทุกอ้อยสูงสุดของรถบรรทุกเป็นเกณฑ์ ซึ่งจะสามารถเขียนตารางข้อมูลนำเข้าที่ 4-4 หลังผ่านการตัดแบ่งได้ใหม่ดังตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 ตารางแสดงข้อมูลแปลงเก็บเกี่ยวย่อยที่ใช้พื้นที่ของรถบรรทุกเป็นเกณฑ์

Node	X Coordinate	Y Coordinate	C.C.S	Yield (Ton)	No. of Growers
Fac	0	0	-	-	-
Plot1	-24	48	12	25	1
Plot2	-24	48	12	25	1
Plot3	-24	48	12	25	1
Plot4	-24	48	12	25	1
Plot5	-24	48	12	25	1
Plot6	-24	48	12	25	1
Plot7	-24	48	12	25	1
Plot8	-24	48	12	25	1
Plot9	-24	48	12	14.57	1
Plot10	-23	44	11	25	2
Plot11	-23	44	11	25	2
Plot12	-23	44	11	25	2
Plot13	-23	44	11	14.15	2
Plot14	-31	44	13	25	3
Plot15	-31	44	13	25	3
Plot16	-31	44	13	25	3
Plot17	-31	44	13	19.72	3
Plot18	-41	-11	11	25	4
Plot19	-41	-11	11	22.36	4
Plot20	-50	-44	15	25	1

4.4.4.3 การจัดกลุ่มแปลงเก็บเกี่ยวย่อยให้กับรถตัดอ้อย

ผู้วิจัยมีความตั้งใจที่จะจัดสรรแปลงอ้อยซึ่งอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกันให้เป็นกลุ่มงานซึ่งอยู่ภายใต้การดูแลของรถตัดอ้อยคันหนึ่ง ๆ โดยวิธีการดังกล่าวนอกจากจะช่วยจำกัดขอบเขตการเคลื่อนที่ที่ไม่จำเป็นของรถตัดอ้อยให้น้อยที่สุด และสามารถช่วยเพิ่มโอกาสให้กับเกษตรกรรายย่อยให้ได้รับการจัดสรรรถตัดอ้อยมาใช้งานได้มากขึ้นแล้ว ยังเป็นการช่วยกำหนดขอบเขตการค้นหาคำตอบให้แคบลงได้อีกด้วย ในส่วนนี้ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้ PSO ร่วมกับหลักการแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบ k-

means เพื่อการจัดกลุ่มแปลงอ้อยที่เหมาะสมให้กับรถตัดอ้อย ซึ่งแปลงอ้อยจะถูกกำหนดกลุ่มรถตัดอ้อย โดยอ้างอิงจากตำแหน่งของจุดศูนย์กลางพื้นที่ปฏิบัติงานของรถตัดอ้อยที่อยู่ใกล้กับตนเองมากที่สุด

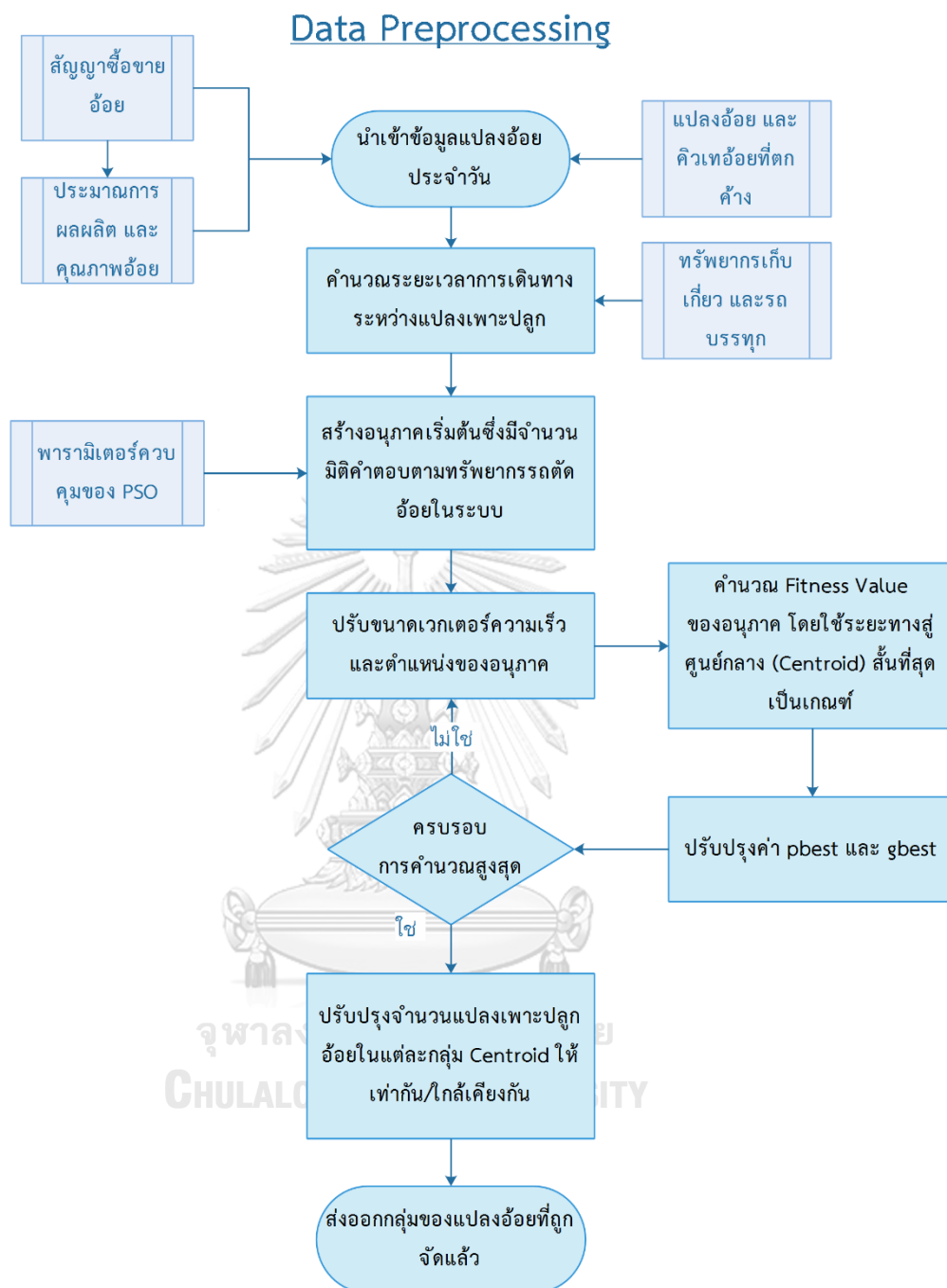
กระบวนการจัดกลุ่มแปลงอ้อยให้กับรถตัดอ้อย เริ่มต้นจากการกำหนดค่าคุณสมบัติเริ่มต้นของอนุภาคอันได้แก่ พารามิเตอร์ควบคุม (w, c_p, c_g) ขอบเขตการค้นหาบนระนาบ 2 มิติ ($MaxXY, MinXY$) ความเร็วสูงสุดของอนุภาค ($MinV, MaxV$) จำนวนอนุภาค ($numP$) และจำนวนรอบการคำนวณสูงสุด ($MaxIter$) ตามที่กำหนดไว้ในหัวข้อที่ 4.4.1 ก่อนที่จะทำการสร้างตัวแปรเพื่อเก็บค่าความเหมาะสมของคำตอบ min_dist โดยค่าความเหมาะสมในที่นี้จะคิดจากผลรวมของระยะทางจากทุกแปลงอ้อยไปยังจุดศูนย์กลางของแต่ละกลุ่มน้อยที่สุด แล้วจึงสร้างเซตคำตอบเริ่มต้นของการจัดกลุ่มแปลงอ้อย $sol_cluster$ เพื่อใช้ในการเก็บผลเฉลยต่อไป

เมื่อทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ ตัวแปร และเซตคำตอบในขั้นตอนข้างต้นเสร็จเรียบร้อยแล้วเราจะทำการสุ่มเซตของตำแหน่งที่ตั้งจุดศูนย์กลางกลุ่ม (k_p) และเซตของความเร็วเริ่มต้น (v_p) ของแต่ละอนุภาค $p \in numP$ บนระนาบ 2 มิติขึ้นตามจำนวนกลุ่มที่ต้องการ หรือเท่ากับจำนวนรถตัดอ้อยที่มีอยู่ในระบบ แต่เนื่องจาก k_p ที่ถูกสุ่มขึ้นมาเป็นค่าเริ่มต้น เราจึงบันทึกให้ตำแหน่งนั้นเป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดของอนุภาค ($pbest_p$) ไปโดยปริยาย ในเบื้องต้นเราจะทำการคำนวณหาผลรวมระยะทาง sum_dist_p จากเซตตำแหน่ง k_p ของแต่ละอนุภาค แล้วเลือกอนุภาคที่ให้ค่า sum_dist_p น้อยที่สุดเพื่อกำหนดขึ้นเป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดของฝูง ($gbest$) ก่อนจะเก็บค่า min_dist เท่ากับ sum_dist_p และเก็บเซตคำตอบ $sol_cluster$ จากการแปลงค่าตำแหน่งของอนุภาคดังกล่าว

หลังจากที่ได้ค่าเริ่มต้นแล้ว เราจะเข้าสู่กระบวนการทำงานของ PSO หรือการปรับเวกเตอร์ความเร็ว v_p^* และตำแหน่งของอนุภาค k_p^* โดยอ้างอิงทิศทางจากตำแหน่งของ $pbest_p$ และ $gbest$ ซึ่งหากอนุภาคใดหลังปรับตำแหน่งแล้วให้ค่า $sum_dist_p^*$ ใหม่ที่น้อยกว่า sum_dist_p เดิม เราจะทำการปรับตำแหน่ง $pbest_p$ ให้เท่ากับ k_p^* และหาก $sum_dist_p^*$ ที่ได้มีค่าน้อยกว่า min_dist ก็จะมีแนวโน้มว่าตำแหน่งของอนุภาค $p \in numP$ ในขณะนั้นเป็น $gbest$ ใหม่ด้วยเช่นกัน เมื่อดำเนินการขั้นตอนข้างต้นจนครบสำหรับทุกอนุภาคแล้ว จะคิดเป็น 1 รอบการคำนวณ และเมื่อทำซ้ำจนครบตามรอบการคำนวณที่กำหนดก็จะเป็นอันจบขั้นตอนการจัดกลุ่มด้วย PSO ที่มี $sol_cluster$ ของอนุภาค $gbest$ เป็นเซตคำตอบของการจัดกลุ่ม

อย่างไรก็ดี ตำแหน่งที่ตั้งของแปลงเก็บเกี่ยวอ้อยที่ถูกนำเข้ามาอาจจะอยู่ใกล้กันมาก ส่งผลให้รถตัดอ้อยบางคันมีแปลงอ้อยอยู่ในพื้นที่ดูแลเป็นจำนวนมาก ในขณะที่รถตัดอ้อยคันอื่น มีแปลงเก็บเกี่ยวในพื้นที่น้อยกว่า ด้วยจุดประสงค์ที่ต้องการกระจายงานของรถตัดอ้อยให้สมดุล และทั่วถึงมากที่สุด เราจึงจำเป็นต้องนำ *sol_cluster* ที่ได้จากส่วนก่อนหน้าไปเข้าสู่กระบวนการซ่อมแซมคำตอบ ซึ่งทำได้โดยการนำจำนวนแปลงเก็บเกี่ยวอ้อย และรถตัดอ้อยทั้งหมดในระบบมาคำนวณเพื่อหาจำนวนแปลงเก็บเกี่ยวอ้อยเฉลี่ยต่อรถตัดอ้อย 1 คัน ก่อนที่จะเลือกกลุ่มของรถตัดอ้อยที่มีจำนวนสมาชิกมากกว่าค่าเฉลี่ยขึ้นมา แล้วทำการย้ายแปลงเพาะปลูกซึ่งอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางกลุ่มนั้นไปยังกลุ่มอื่นซึ่งอยู่ใกล้เคียง และมีจำนวนสมาชิกน้อยกว่าค่าเฉลี่ย โดยเราจะดำเนินการซ่อมแซมดังกล่าวซ้ำจนกว่าทุกกลุ่มมีจำนวนแปลงเก็บเกี่ยวอ้อยที่ประมาณกัน

ทั้งนี้เราสามารถเขียนสรุปขั้นตอนการทำงานในรูปแบบของแผนภาพ สำหรับกระบวนการจัดเตรียมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกันตามลำดับ ได้ดังรูปภาพที่ 4.6 และสามารถเขียนสรุปขั้นตอนการทำงานในรูปแบบของรหัสเทียม (Pseudo Code) โดยแสดงในส่วนของขั้นตอนการนำเข้าข้อมูลในหัวข้อที่ 4.4.3 จนถึงการแบ่งแปลงเก็บเกี่ยวอ้อย ได้ดังรูปภาพที่ 4.7 ขั้นตอนการจัดกลุ่มแปลงเก็บเกี่ยวด้วย PSO ได้ดังรูปภาพที่ 4.8 ขั้นตอนการหาค่าเหมาะสมของคำตอบ ได้ดังรูปภาพที่ 4.9 และขั้นตอนการซ่อมแซมคำตอบจากการจัดกลุ่ม ได้ดังรูปภาพที่ 4.10



รูปภาพที่ 4.6 แผนภาพแสดงกระบวนการจัดเตรียมข้อมูล

Pseudocode for Parameter Initialization

```

1: Import Basic Parameters:
2: import Field & Resource Datas
3:    $I \leftarrow$  Set of cane growers
4:    $J \leftarrow$  Set of cane fields with properties: location ( $f_j$ ), yield ( $\mu_j$ ), quality ( $\pi_j$ ), ownership  $J(i)$ 
5:    $R \leftarrow$  Set of harvesting resources with set of operational properties
6:    $T \leftarrow$  Set of loading trucks
7:    $A \leftarrow$  Set of arc connected between every field  $j \in J$  with distance  $d_a$ 
8: End import
9: Preprocessing:
10: for  $a \in A$ 
11:   Calculate traveling time of arc ( $\tau_a$ )
12: End for
13: Divide imported fields data using truck capacity as a criteria
14:  $R_1 \leftarrow$  subset of  $R$  that only consist of harvesting machines
15: call CLUSTERING( $J, R_1$ )
16: Update  $sol\_cluster$  as another property of set  $J$ 

```

รูปภาพที่ 4.7 Pseudo Code แสดงขั้นตอนการนำเข้าข้อมูล การคำนวณระยะทาง และการแบ่งแปลงเก็บเกี่ยวอ้อย

Pseudocode for Field Clustering

```

1: Function CLUSTERING( $J, R_1$ )
2:   Particle Initialization:
3:   Set  $MaxIter, MinV, MaxV, MaxXY, MinXY, w, c_1, c_2, pbest, gbest, numP$ 
4:    $min\_dist \leftarrow inf$ 
5:    $sol\_cluster \leftarrow \{\}$ 
6:   for  $p = 1, \dots, numP$ 
7:      $k_p \leftarrow$  random  $|R_1|$  points of centroid in 2D plane between ( $MinXY, MaxXY$ )
8:      $v_p \leftarrow$  random  $|R_1|$  sets of velocities in 2D between ( $MinV, MaxV$ )
9:     call CLUSTERFITNESS( $J, k_p$ )
10:    Update  $pbest$  (as it is the initial solution)
11:     $pbest_p \leftarrow k_p$ 
12:    if  $sum\_dist_p < min\_dist$  then
13:      Update  $gbest, min\_dist$  and  $best\_cluster$ 
14:       $gbest \leftarrow pbest_p$ 
15:       $min\_dist \leftarrow sum\_dist_p$ 
16:       $sol\_cluster \leftarrow group\_cluster_p$ 
17:    End if
18:  End for
19:  Main Loop:
20:   $iter \leftarrow 0$ 
21:  While  $iter < MaxIter$ 
22:    for  $p = 1, \dots, numP$ 
23:      Update particle velocities in every dimension ( $|R_1|$ )
24:       $v_p^{m+1} \leftarrow w(v_p^m) + c_1 r_1 (pbest_p^m - k_p^m) + c_2 r_2 (gbest - k_p^m)$ 
25:      Adjust size of  $v_p^{m+1}$  according to  $MaxV$  and  $MinV$ 
26:      Update particle positions in every dimension ( $|R_1|$ )
27:       $k_p^{m+1} \leftarrow k_p^m + v_p^{m+1}$ 
28:      Adjust position of  $k_p^{m+1}$  according to  $MaxXY$  and  $MinXY$ 
29:      call CLUSTERFITNESS( $J, k_p^{m+1}$ )
30:      if  $sum\_dist_p < sum\_dist_p$  then
31:         $pbest_p \leftarrow k_p^*$ 
32:         $group\_cluster_p \leftarrow group\_cluster_p^*$ 
33:        if  $sum\_dist_p < min\_dist$  then
34:          Update  $gbest, min\_dist$  and  $sol\_cluster$ 
35:           $gbest \leftarrow pbest_p$ 
36:           $min\_dist \leftarrow sum\_dist_p$ 
37:           $sol\_cluster \leftarrow group\_cluster_p$ 
38:        End if
39:      End if
40:    End for
41:     $iter \leftarrow iter + 1$ 
42:  End While
43:  call CLUSTERREPAIR( $J, gbest, sol\_cluster, R_1$ )
44:  return  $sol\_cluster$ 

```

รูปภาพที่ 4.8 Pseudo Code แสดงขั้นตอนการจัดกลุ่มแปลงอ้อยด้วย PSO โดยใช้หลักของ k-means

Pseudocode for Clustering Fitness Value Calculation

```

1: Function CLUSTERFITNESS( $J, k_p$ )
2:    $sum\_dist_p \leftarrow 0$ 
3:   for  $j \in J$ 
4:     Calculate distance  $d_{pj}^m$  from  $f_j$  to every centroid  $m$  in  $k_p$ 
5:      $group\_cluster_{pj} \leftarrow m = \text{centroid in } k_p \text{ which is closest to } f_j$ 
6:      $sum\_dist_p \leftarrow sum\_dist_p + \min_m(d_{pj}^m)$ 
7:   End for
8: return  $group\_cluster_p$ , and  $sum\_dist_p$ 

```

รูปภาพที่ 4.9 Pseudo Code แสดงขั้นตอนการหาค่าความเหมาะสมของการจัดกลุ่มด้วยระยะทาง

Pseudocode for Clustering Repair

```

1: Function CLUSTERREPAIR( $J, gbest, sol\_cluster, R_1$ )
2:    $num\_field = \text{total number of cane fields in } J$ 
3:    $avg\_group \leftarrow (num\_field / |R_1|)$ 
4:    $group \leftarrow \{\}$ 
5:   for  $n = 1, \dots, |gbest|$ 
6:      $group_n \leftarrow group_n \cup \{j \in J : sol\_cluster_j = n\}$ 
7:     Calculate distance  $d_j^n$  from  $f_j \in J$  to  $gbest_n$ 
8:     Sort members in  $group_n$  ascending from field  $j$  that closest to  $gbest_n$ 
9:   End for
10:  While any  $|group_n| > avg\_group$  do
11:     $group_n \leftarrow group_n \setminus \{j \in J : j \text{ is the last member in } group_n\}$ 
12:    insert field  $j$  to second nearest group  $n'$  which  $|group_{n'}| < avg\_group$ 
13:  End While
14:  for  $j \in J$ 
15:     $sol\_cluster_j \leftarrow n : j \in group_n$ 
16:  End for
17: return  $sol\_cluster$ 

```

รูปภาพที่ 4.10 Pseudo Code แสดงขั้นตอนการซ่อมแซมคำตอบของการจัดกลุ่มแปลงอ้อย

4.4.5 กระบวนการหาคำตอบของฮิวริสติกส์

ส่วนปฏิบัติการหลักของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาการจัดตารางทรัพยากร จะเริ่มต้นหลังจากขั้นตอนของการนำเข้า และจัดเตรียมข้อมูลในหัวข้อที่ 4.4.3 – 4.4.4 เสร็จสิ้นเป็นที่เรียบร้อยแล้ว แต่เพื่อความสะดวกในการทำความเข้าใจการทำงานโดยภาพรวมของฮิวริสติกส์ที่ออกแบบขึ้น ผู้วิจัยจะกล่าวถึงโมดูล (Module) หรือชุดของกระบวนการทำงานและตัดสินใจย่อย อันเป็นส่วนประกอบสำคัญภายในฮิวริสติกส์ จำนวน 5 โมดูล ได้แก่

4.4.5.1 การสร้างอนุภาคเริ่มต้น (Particles Generation)

เนื่องจากฮิวริสติกส์ที่ออกแบบขึ้นนี้ใช้ PSO เป็นองค์ประกอบหลักในการขับเคลื่อน การสร้างอนุภาคจึงเปรียบเสมือนเป็นจุดเริ่มต้นของการค้นหาผลเฉลย หากแต่อนุภาคที่ทำการค้นหาคำตอบอยู่ในระบบนั้นมีจำนวนมาก และในระหว่างขั้นตอนการทำงานของฮิวริสติกส์อาจมีการสร้างอนุภาคใหม่มากกว่าหนึ่งครั้ง โมดูลสำหรับควบคุมการวนซ้ำในการกำหนดค่าคุณสมบัติเริ่มต้นของแต่ละอนุภาคจึงเป็นสิ่งสำคัญ

สำหรับโมดูลการสร้างอนุภาคเริ่มต้น หรือ *PARTICLEGENERATE* นี้จะเริ่มด้วยการนำเข้าข้อมูลของระบบ พารามิเตอร์ของ PSO และเซต *particles* ที่จัดเก็บตำแหน่งของอนุภาคทั้งหมดในระบบ ก่อนจะเรียกใช้งานโมดูล *INIRAND* เพื่อสร้างผลเฉลยเริ่มต้นสำหรับอนุภาค $p \in particles$ (หลักการการทำงานของโมดูล *INIRAND* ถูกอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.4.5.2) และทำการสุ่มค่าเวกเตอร์ความเร็วแบบยูนิฟอร์มในทุก ๆ มิติของอนุภาคบนช่วง $[MinV, MaxV]$ โดยเราจะบันทึกค่าตำแหน่งของอนุภาคที่ได้รับมาจากโมดูล *INIRAND* เอาไว้ใน *particle_p* และบันทึกค่าเวกเตอร์ความเร็วเริ่มต้นไว้ใน *vel_p* ทั้งนี้ตำแหน่งคำตอบของอนุภาค *particle_p* ที่ได้จะถูกนับว่าเป็นค่าที่ดีที่สุดของอนุภาค *pbest_p* ไปโดยปริยายเนื่องจากเป็นค่าตำแหน่งแรก

เมื่อได้ค่าตำแหน่งของอนุภาคมาแล้ว ให้ทำการคำนวณหาค่าความเหมาะสม (fitness value) ของอนุภาคดังกล่าว โดยในกรณีที่ตำแหน่งเริ่มต้นของอนุภาคนั้นมีค่าคำตอบที่เป็นไปได้ (feasible) เราจะเรียกใช้งานโมดูล *LOCALSEARCH* เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนพัฒนาคำตอบด้วยการค้นหาเฉพาะที่ (หลักการการทำงานของโมดูล *LOCALSEARCH* ถูกอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.4.5.4) ทั้งนี้สาเหตุที่ผู้วิจัยเลือกนำอนุภาคที่มีค่าผลเฉลยที่มีค่าคำตอบที่เป็นไปได้ไปทำการค้นหาเฉพาะที่ต่อ เพราะจะทำให้การปรับแต่งตารางงานเป็นไปได้โดยสะดวกมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้การดำเนินการดังกล่าวยังจะช่วยลดขั้นตอนการซ่อมแซมที่ไม่จำเป็นจากกรณีที่มีค่าคำตอบมีความขัดแย้งกับสมการข้อจำกัดจำนวนมาก เมื่อได้ผ่านกระบวนการค้นหาเฉพาะที่แล้ว เราจะทำการเปรียบเทียบ fitness value ของอนุภาคที่ผ่านการพัฒนาด้วยการค้นหาเฉพาะที่กับค่า *gbest* ปัจจุบัน ซึ่งหากอนุภาคใดให้ค่า fitness value ที่ดีกว่า *gbest* ปัจจุบัน เราจะทำการบันทึกตำแหน่งของอนุภาคดังกล่าวเป็น *gbest* ใหม่ โดยจะทำการวนซ้ำในขั้นตอนข้างต้นทั้งหมดไปจนกว่าจะครบทุกอนุภาค ทั้งนี้ เราสามารถเขียน Pseudo Code เพื่อแสดงการทำงานของโมดูลสำหรับสร้างอนุภาคเริ่มต้นได้ดัง รูปภาพที่ 4.11

Pseudocode for Particle Generation

```

1: Function PARTICLEGENERATE(particles, gbest, prob, param)
2:   for  $p \in \text{particles}$ 
3:     call INIRAND(prob, param)
4:      $\text{position}_p \leftarrow \text{ini\_position}$ 
5:      $\text{vel}_p \leftarrow$  random value between [MinV, MaxV]
6:     Update pbest (as it is the initial solution)
7:      $\text{pbest}_p \leftarrow \text{position}_p$ 
8:     Calculate for fitness values
9:     if p is feasible then
10:      call LOCALSEARCH(p, param)
11:    End if
12:    if  $\text{fitness}_p > \text{fitness}_g$  then
13:      Update gbest and  $\text{fitness}_g$ 
14:       $\text{gbest} \leftarrow \text{pbest}_p$ 
15:       $\text{fitness}_g \leftarrow \text{fitness}_p$ 
16:    End if
17:  End for
18: return gbest and particles

```

รูปภาพที่ 4.11 Pseudo Code แสดงการทำงานของโมดูลควบคุมการสร้างอนุภาคเริ่มต้น

4.4.5.2 การหาผลเฉลยเริ่มต้นของอนุภาค (Initial Solution)

การหาผลเฉลยเริ่มต้น หรือการกำหนดตำแหน่งในแต่ละมิติบนปริภูมิการค้นหาของทุกอนุภาค สำหรับฮิวริสติกส์ปัญหาการจัดตารางทรัพยากรที่ออกแบบขึ้นนี้ จะเป็นการมอบหมายงานให้กับทรัพยากรต่าง ๆ ในเบื้องต้น ซึ่งในส่วนนี้ผู้วิจัยมีแนวคิดหลักดังนี้ คือ

- ในการกำหนดลำดับการมอบหมายงาน คือ จะมอบหมายงานให้กับทรัพยากรแรงงานตัดอ้อยสดจนครบก่อนเสมอ แล้วจึงมอบหมายงานที่เหลืออยู่ให้กับทรัพยากรอื่น เนื่องจากแรงงานตัดอ้อยสดเป็นทรัพยากรที่ดีที่สุดในระบบ อ้อยที่ถูกเก็บเกี่ยวโดยทรัพยากรชนิดนี้มีคุณภาพที่สูง ความสูญเสียต่ำ และเป็นที่ต้องการของโรงงานน้ำตาล
- งานที่มอบหมายให้กับทรัพยากรจะต้องทำให้ได้ผลลัพธ์ หรือผลเฉลยที่มีค่า Feasible เสมอ เพื่อความสะดวกในการค้นหา และพัฒนาคำตอบในขั้นตอนต่อไป
- หากทรัพยากรที่ต้องการมอบหมายงานนั้นยังไม่ถึงอัตราการทำงานสูงสุด เราจะค้นหาความเป็นไปได้ในการแทรกงานดังกล่าว โดยทดลองขยับตารางงานเดิมภายในทรัพยากรก่อนเสมอ

ขั้นตอนการหาผลเฉลยเริ่มต้นของอนุภาค เริ่มต้นจากการสร้างเซตว่าง *ResA* และ *TruckA* สำหรับใช้เก็บตารางงานของทรัพยากรการเก็บเกี่ยว และรถบรรทุกอ้อย แล้วตามด้วยการ

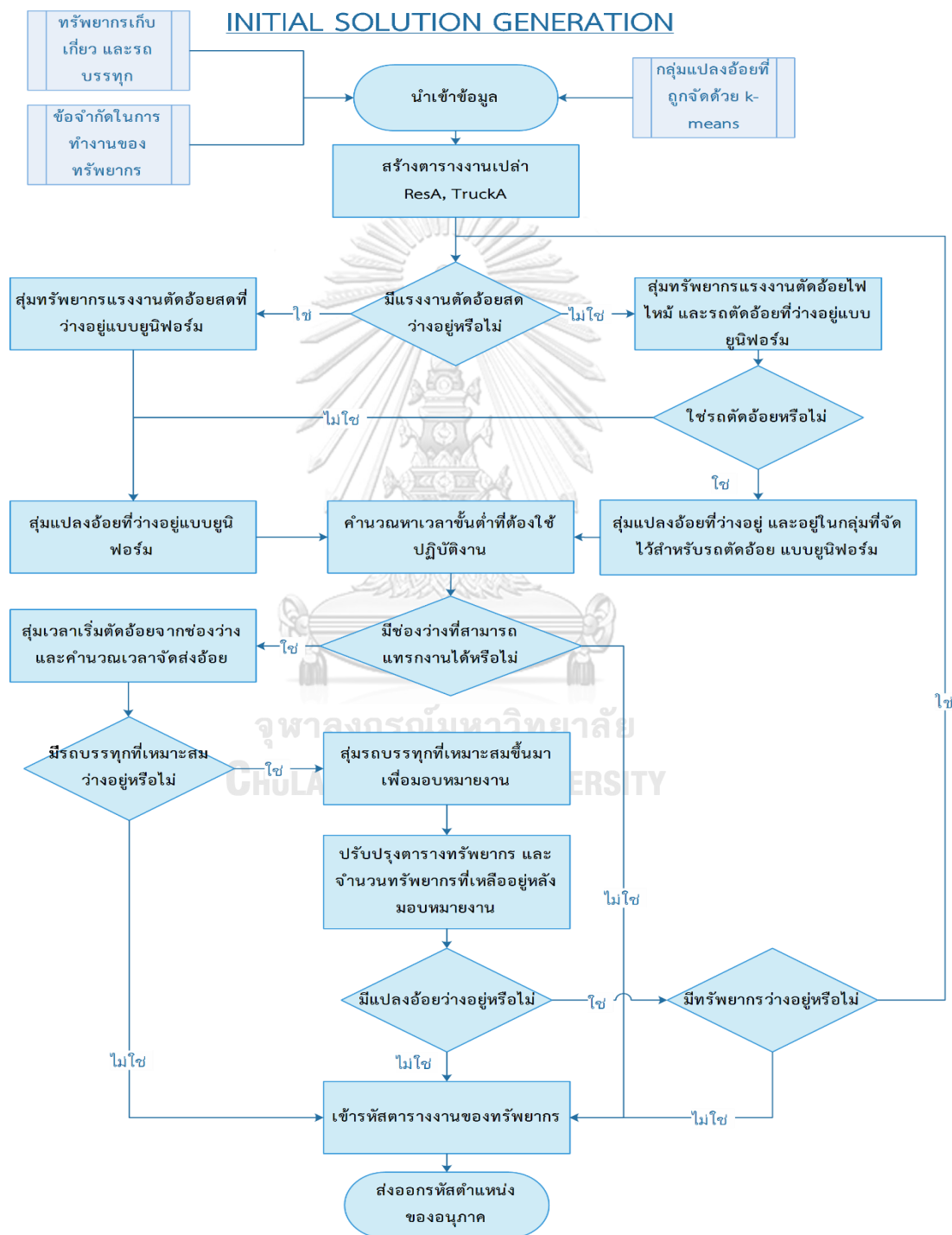
สร้างเซต *UsablePlot* และ *UsableRes* ซึ่งทำหน้าที่จัดเก็บรายชื่อแปลงอ้อยรวมถึงทรัพยากร การเก็บเกี่ยวที่ยังใช้งานได้ โดยเราจะทำการสุ่มคู่ของทรัพยากร *asgn_res* และแปลงอ้อย *asgn_plot* ขึ้นมาจาก *UsableRes* และ *UsablePlot* ภายใต้เงื่อนไขที่ว่า หากยังมีทรัพยากรที่เป็นแรงงานตัดอ้อยสดเหลือว่างอยู่ *asgn_res* จะต้องสุ่มขึ้นมาจากกลุ่มของแรงงานตัดอ้อยสดที่เหลือก่อนเสมอ และเนื่องจากว่าเราได้ทำการจัดแบ่งกลุ่มของแปลงอ้อยกับรถตัดอ้อยเอาไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.4.2.3 ดังนั้น หากทรัพยากรเก็บเกี่ยวที่สุ่มได้เป็นรถตัดอ้อย เราจะสามารถสุ่มแปลงอ้อย *asgn_plot* ที่เหลืออยู่ใน *UsablePlot* โดยอ้างอิงจากเซตของกลุ่มแปลงอ้อย *sol_cluster* เท่านั้น

เมื่อได้คู่ของทรัพยากรกับแปลงอ้อยมาแล้ว เราจะทำการคำนวณเพื่อหาระยะเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงานดังกล่าว *time_req* และเซตช่องว่างภายในตารางงาน *ResA* ที่สามารถมอบหมายงานได้ *avail_time* แล้วจึงสุ่มเลือกเวลาเริ่มต้นเก็บเกี่ยว *asgn_start* และเวลาจัดส่งอ้อย *asgn_end* แบบยูนิฟอร์มจากเซตช่องว่าง *avail_time* จากนั้นจึงทำการค้นหาเซตของรถบรรทุก *suitable_truck* ที่สามารถปฏิบัติงานตามเวลา *asgn_start* และ *asgn_end* ที่เลือกมาในข้างต้นได้ แล้วสุ่มรถบรรทุก *asgn_truck* ขึ้นมาเพื่อมอบหมายงานลงในตารางงาน *ResA* และ *TruckA* ก่อนที่จะนำคู่ของทรัพยากรกับแปลงอ้อยที่ถูกใช้ไปแล้วออกจาก *UsablePlot* และ *UsableRes* เป็นอันสิ้นสุด 1 รอบของการมอบหมายงาน โดยหลักการเบื้องต้นในการกำหนดเวลา งานสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

- เวลาเริ่มต้นเก็บเกี่ยว *asgn_start* ที่แปลงอ้อย *asgn_plot* โดยทรัพยากร *asgn_res* จะต้องมากกว่า หรือเท่ากับผลรวมของเวลาสิ้นสุดงาน ณ แปลงอ้อยก่อนหน้า (หากไม่มีงานก่อนหน้าให้นับที่เวลา 0) กับระยะเวลาในการเคลื่อนที่ระหว่างแปลง
- เวลาเริ่มต้นเก็บเกี่ยว *asgn_start* ที่แปลงอ้อย *asgn_plot* โดยทรัพยากร *asgn_res* เมื่อรวมกับระยะเวลาในการเก็บเกี่ยว และระยะเวลาในการเคลื่อนที่ระหว่างแปลงแล้ว จะต้องน้อยกว่า หรือเท่ากับเวลาเริ่มต้นของงาน ณ แปลงอ้อยถัดไป (หากไม่มีงานถัดไปให้นับที่เวลา 1,560)
- เวลาในการจัดส่งอ้อย *asgn_end* ที่โรงงานน้ำตาลจะต้องไม่ทับซ้อนกับเวลาจัดส่งของแปลงอ้อยอื่นที่มีอยู่ก่อนหน้า

ทั้งนี้เราจะดำเนินการตามขั้นตอนการมอบหมายงานข้างต้นซ้ำไปจนกว่าจะไม่มีแปลงอ้อย หรือทรัพยากรเก็บเกี่ยวเหลือว่างอยู่ในเซต *UsablePlot* และ *UsableRes* อีก แล้วจึงทำการ

แปลงค่าจากตารางงาน *ResA* และ *TruckA* ที่ได้ให้อยู่ในรูปของตำแหน่งบนปริภูมิคำตอบ $[0,1]$ ในแต่ละมิติของอนุภาค สำหรับโมดูลการหาผลเฉลยเริ่มต้นของอนุภาค หรือ *INIRAND* นี้ สามารถเขียนขั้นตอนการทำงานในรูปแบบของแผนภาพ ได้ดังรูปภาพที่ 4.12 และสามารถเขียนสรุปให้อยู่ในรูปแบบ Pseudo Code ได้ดังรูปภาพที่ 4.13



รูปภาพที่ 4.12 แผนภาพแสดงกระบวนการหาผลเฉลยเริ่มต้นของอนุภาค

Pseudocode for Initial Solution Generation

```

1: Function INIRAND(prob, param)
2:   UsablePlot ← J
3:   UsableRes ← R
4:   ResA ← Empty set of harvesting resources working schedule
5:   TruckA ← Empty set of loading trucks working schedule
6:   While UsableRes, UsableTruck, UsablePlot available do
7:     if any Green Labor Resource available then
8:       asgn_res ← random Green Labor from UsableRes
9:     Else
10:      asgn_res ← random resource from UsableRes
11:    End if
12:    if asgn_res is Machine then
13:      asgn_plot ← random from sol_cluster in UsablePlot
14:    Else
15:      asgn_plot ← random from UsablePlot
16:    End if
17:    Calculate for working time requirement (time_req) of the asgn_plot with asgn_res
18:    Calculate set of current time slot (avail_time) of the asgn_res
19:    if it is possible to insert asgn_plot in any avail_time then
20:      asgn_start ← random from possible slot in avail_time
21:      asgn_end ← asgn_start + time_req
22:      Adjust asgn_end based on others in ResA
23:      Calculate set of available truck for this job (suitable_truck) from TruckA
24:      if suitable_truck set is empty then
25:        Break
26:      Else
27:        asgn_truck ← random from suitable_truck
28:        asgn_job ← {asgn_res, asgn_truck, asgn_start, asgn_end, asgn_plot}
29:        Update ResA, TruckA and UsablePlot
30:        ResA ← ResA ∪ asgn_job
31:        TruckA ← TruckA ∪ asgn_job
32:        UsablePlot ← UsablePlot \ {asgn_plot | asgn_plot ∈ J}
33:        if asgn_res in ResA meet its capacity then
34:          UsableRes ← UsableRes \ {asgn_res | asgn_res ∈ R}
35:        End if
36:      End if
37:    Else
38:      UsableRes ← UsableRes \ {asgn_res | asgn_res ∈ R}
39:      Skip this loop
40:    End if
41:  End While
42:  Convert ResA and TruckA to ini_position within dimension range [MinD, MaxD]
43:  return ini_position

```

รูปภาพที่ 4.13 Pseudo Code แสดงโมดูลการหาผลเฉลยเริ่มต้นของอนุภาค

ทั้งนี้ เราสามารถแสดงตัวอย่างของการหาผลเฉลยเริ่มต้นของอนุภาคตามขั้นตอนของฮิวริสติกส์ที่ออกแบบขึ้นสำหรับปัญหาขนาดเล็ก (20 คันรถบรรทุก) ได้ดังตารางที่ 4-8 4-9 และ 4-10

ตารางที่ 4-8 ตารางแสดงตัวอย่างการหาผลเฉลยเริ่มต้นของอนุภาคสำหรับปัญหาขนาดเล็ก (1)

Resources	Start Time	End Time	Plot	Assigned Truck
Harvesting Machine				
Green Team1	287.77, 388.74	387.92, 490.79	2, 19	6, 4
Green Team2	111.33, 271.27	220.25, 376.96	20, 10	8, 2
Burnt Team1				
Burnt Team2				
Burnt Team3				

ตารางที่ 4-9 ตารางแสดงตัวอย่างการหาผลเฉลยเริ่มต้นของอนุภาคสำหรับปัญหาขนาดเล็ก (2)

Resources	Start Time	End Time	Plot	Assigned Truck
Harvesting Machine	342.28	395.3	8	5
Green Team1	287.77, 388.74	387.92, 490.79	2, 19	6, 4
Green Team2	111.33, 271.27	220.25, 376.96	20, 10	8, 2
Burnt Team1				
Burnt Team2				
Burnt Team3	452.92	515.31	6	3

ตารางที่ 4-10 ตารางแสดงตัวอย่างการหาผลเฉลยเริ่มต้นของอนุภาคสำหรับปัญหาขนาดเล็ก (3)

Resources	Start Time	End Time	Plot	Assigned Truck
Harvesting Machine	33.50, 95.52, 127.38, 152.73, 206.63, 259.51, 315.13, 342.28, 395.19, 428.68	77.31, 135.25, 186.26, 204.45, 253.19, 304.85, 354.06, 395.30, 439.97, 466.98	7, 18, 1, 3, 9, 14, 11, 8, 13, 4	2, 5, 9, 3, 4, 9, 8, 5, 2, 7
Green Team1	287.77, 388.74	387.92, 490.79	2, 19	6, 4
Green Team2	111.33, 271.27	220.25, 376.96	20, 10	8, 2
Burnt Team1	60.94	122.88	5	6
Burnt Team2	110.13, 174.02	171.91, 233.81	15, 17	7, 5
Burnt Team3	320.17, 393.45, 452.92	388.92, 456.65, 515.31	16, 12, 6	7, 1, 3

จากตารางที่ 4-8 4-9 และ 4-10 แสดงตารางการทำงานของทรัพยากรในขั้นตอนต่าง ๆ อันประกอบด้วยเวลาเริ่มต้นเก็บเกี่ยว (Start Time) เวลาจัดส่งอ้อยที่โรงงานน้ำตาล (End Time) แปลงเพาะปลูกอ้อยที่ได้รับมอบหมาย (Plot) และทรัพยากรรถบรรทุกที่ทำงานร่วมกัน (Assigned Truck) โดยในตารางที่ 4-8 จะเป็นการสุ่มมอบหมายงานให้กับทรัพยากรที่มตัดอ้อยสดจนครบเสียก่อน แล้วจึงเริ่มทำการสุ่มแบบยูนิฟอร์มเพื่อมอบหมายงานให้กับทรัพยากรอื่นดังตารางที่ 4-9 และในท้ายที่สุดตารางที่ 4-10 แสดงให้เห็นถึงตารางทรัพยากรที่เป็นผลเฉลยเริ่มต้น ซึ่งถูกมอบหมายงานจนครบทุกแปลงเพาะปลูกแล้ว โดยตารางทรัพยากรในข้างต้นนี้จะถูกนำไปเข้ารหัสตามหัวข้อที่ 4.4.2 เพื่อแปลงเป็นตำแหน่งมิติของอนุภาคต่อไป

4.4.5.3 การแก้ไขตำแหน่งของอนุภาค

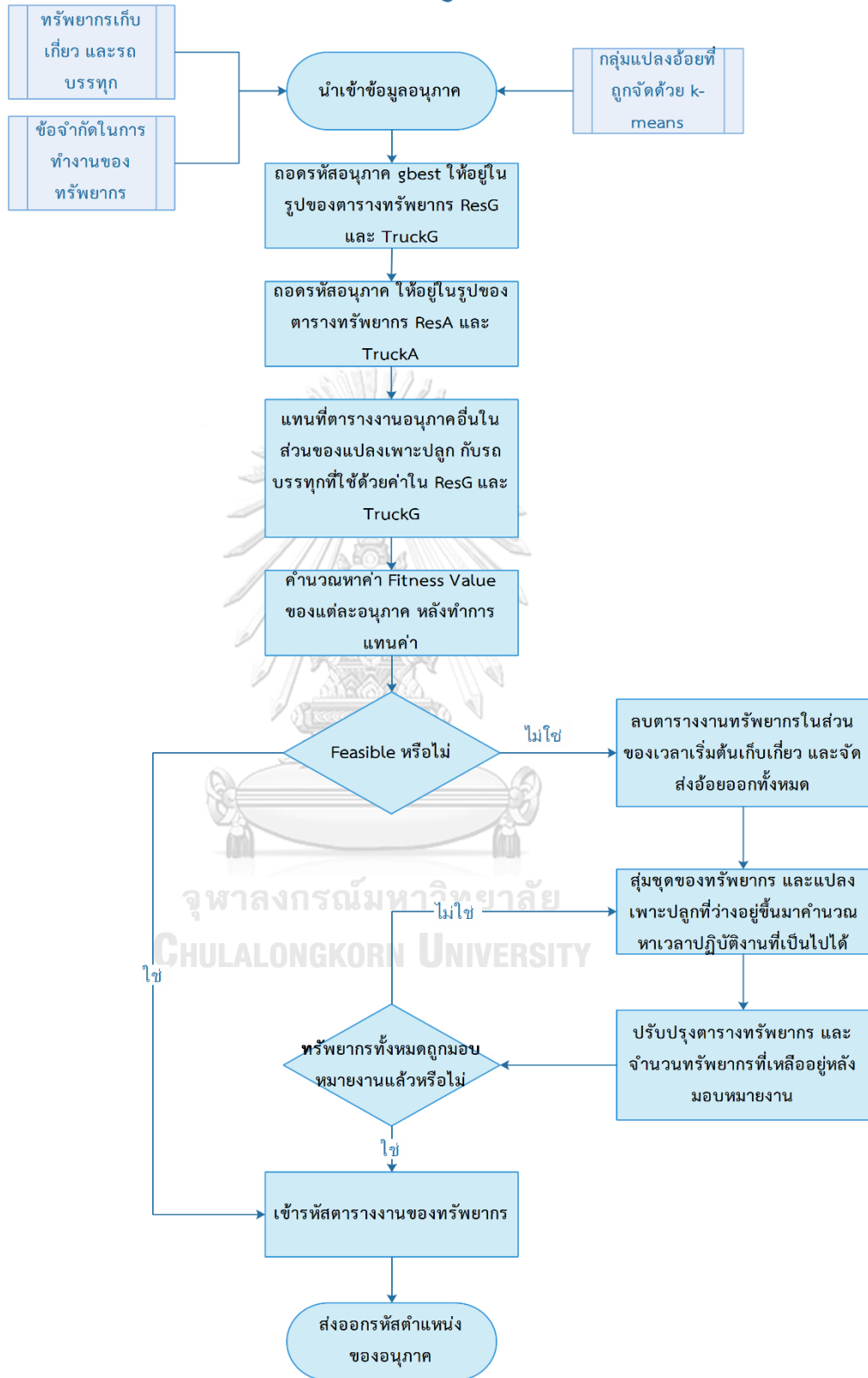
ในอิวิริสติกส์ที่ออกแบบขึ้นนี้ จะเห็นได้ว่าอนุภาคหนึ่ง ๆ นั้นมีจำนวนมิติของตำแหน่งที่ค่อนข้างสูง ส่งผลทำให้เมื่อถึงเวลาปรับเวกเตอร์ความเร็วและตำแหน่งในแต่ละมิติของอนุภาค มีโอกาสต่ำที่ถอดรหัสแล้วจะได้ผลเฉลยที่เป็น Feasible Solution ด้วยเหตุนี้เอง ทางผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะใช้อนุภาค *gbest* เป็นพื้นฐานสำหรับการกำหนดว่าทรัพยากรการเก็บเกี่ยวหนึ่ง ๆ ถูกจับคู่กับแปลงเพาะปลูก และทรัพยากรรถบรรทุกใดบ้าง กล่าวคือ ทุกอนุภาคจะถูกปรับให้มีการจัดชุดของทรัพยากรเก็บเกี่ยว และรถบรรทุกที่เหมือนกันกับชุดคำตอบที่ดีที่สุดของฝูง โดยจะอาศัยการปรับเวกเตอร์ความเร็ว และตำแหน่งของอนุภาคด้วย PSO เป็นตัวช่วยในการค้นหาตารางเวลาทำงานที่เหมาะสมเพียงอย่างเดียว (เนื่องจากตำแหน่งในมิติคำตอบส่วนหลังของทุกอนุภาคนั้นจะมีค่าเท่ากันทั้งหมด เมื่อเข้าสู่กระบวนการปรับตำแหน่งจึงให้ผลเท่าเดิม)

ในโมดูลการแก้ไขตำแหน่งของอนุภาค หรือ *REASSIGN* นี้จะทำการปรับแก้ไขตำแหน่งบนมิติคำตอบของอนุภาคที่ $2N < \gamma \leq 4N$ มีค่าเท่ากับอนุภาค *gbest* ทุกครั้งที่มีการพัฒนาของผลเฉลย ในขณะที่ใช้ *LOCALSEARCH* ในการเลือกคู่ทรัพยากรกับแปลงอ้อยที่เหมาะสมกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งเมื่อปรับตำแหน่งในมิติ $2N < \gamma \leq 4N$ ของอนุภาคใหม่ตาม *gbest* แล้วจะต้องทำการหาผลเฉลยใหม่ในส่วนของการตารางเวลาการทำงานที่ feasible ขึ้นมาทดแทนด้วย สำหรับการหาผลเฉลยทดแทนของอนุภาคจะมีหลักการใกล้เคียงกับการหาผลเฉลยเริ่มต้นในหัวข้อที่ 4.4.5.2 หากแต่จะข้ามขั้นตอนการสุ่มหาชุดคำตอบของทรัพยากร แปลงอ้อย และรถบรรทุกไป แล้วสนใจเพียงการหาเวลาเริ่มต้นเก็บเกี่ยว *asgn_start* และ เวลาจัดส่งอ้อย *asgn_end* ที่สามารถตอบสนองต่อข้อจำกัดที่กำหนดไว้ได้

โมดูลแก้ไขตำแหน่งของอนุภาค เริ่มต้นจากการนำเข้าอนุภาค $gbest$ ซึ่งจะถูกใช้เป็นค่าตำแหน่งอ้างอิง มาแปลงค่าให้เป็นตารางงาน $ResG$ และ $TruckG$ สำหรับทรัพยากรการเก็บเกี่ยว และรถบรรทุกเสียก่อน จากนั้นจะทำการนำเข้าข้อมูลเซตของตำแหน่งคำตอบของทุกอนุภาค $particles$ มาทำการปรับแก้ตำแหน่งที่ละอนุภาค โดยทุก ๆ อนุภาค $p \in particles$ จะถูกแปลงค่าเป็นตารางงาน $ResA_p$ และ $TruckA_p$ แล้วเราจะทำการสร้างตารางงานเปล่า Res_{rep} และ $Truck_{rep}$ ขึ้นมาสำหรับใช้เก็บค่าตารางงานใหม่ จากนั้นจะนำคู่ของทรัพยากรกับแปลงอ้อยจาก $ResG$ และ $TruckG$ และคู่ของเวลาเก็บเกี่ยวกับจัดส่งอ้อยจาก $ResA_p$ และ $TruckA_p$ มาจัดเป็นตารางงานใหม่ก่อนจะใส่ในตาราง Res_{rep} และ $Truck_{rep}$ ที่สร้างขึ้น

หากทำการทดสอบ fitness value ของตาราง Res_{rep} และ $Truck_{rep}$ แล้วพบว่าชุดงานข้างต้นยังอยู่ในกลุ่มของคำตอบที่ feasible เราจะเข้าไปปรับตำแหน่งของอนุภาคถัดไป แต่หากเป็นกลุ่มคำตอบที่ Infeasible เราจะต้องทำการปรับปรุงในส่วนของเวลาเริ่มต้นเก็บเกี่ยว $start$ และเวลาจัดส่งอ้อย end ของอนุภาคดังกล่าว โดยให้ทำการนำคู่ของเวลา ($start, end$) ทั้งหมดออกจาก Res_{rep} และ $Truck_{rep}$ เสียก่อน แล้วจึงสุ่มงาน $asgn_job$ หรือคู่ของทรัพยากรกับแปลงอ้อย ($res, plot$) ขึ้นมาคำนวณเพื่อหาระยะเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงาน $time_req$ และเซตช่องว่างภายในตารางงาน Res_{rep} ที่สามารถมอบหมายงานได้ $avail_time$ แล้วทำการสุ่มแบบยูนิฟอร์มเพื่อเลือกเวลาเริ่มต้นเก็บเกี่ยว $asgn_start$ และเวลาจัดส่งอ้อย $asgn_end$ จากช่องว่างดังกล่าว มาใส่ลงใน Res_{rep} และ $Truck_{rep}$ โดยขั้นตอนการปรับปรุงนี้จะถูกวนซ้ำไปจนกว่าตารางงาน Res_{rep} และ $Truck_{rep}$ จะเต็ม ซึ่งในท้ายที่สุดเราจะแปลงตาราง Res_{rep} และ $Truck_{rep}$ กลับมาเป็นค่าตำแหน่งของอนุภาค $p \in particles$ บนปริภูมิคำตอบ $[0,1]$ ในแต่ละมิติของอนุภาค ทั้งนี้เราสามารถเขียนสรุปขั้นตอนการทำงานของโมดูลแก้ไขตำแหน่งของอนุภาคในรูปแบบของแผนภาพได้ดังแสดงในรูปภาพที่ 4.14 และในรูปแบบ Pseudo Code ได้ดังแสดงในรูปภาพที่ 4.15

Particle Reassignment



รูปภาพที่ 4.14 แผนภาพแสดงกระบวนการแก้ไขตำแหน่งของอนุภาค

Pseudocode for Work Schedule Reassignment

```

1: Function REASSIGN(particles, gbest, param)
2:   Convert gbest positiong to working schedule ResG and TruckG
3:   for p ∈ particles
4:     Convert positionp to working schedule ResAp and TruckAp
5:     Set empty schedule Res_rep and Truck_rep
6:     Update plot assignment in Res_re and Truck_rep with ResG and TruckG
7:       Res_rep ← Res_rep ∪ {(res, plot): (res, plot) ∈ ResG}
8:       Truck_rep ← Truck_rep ∪ {(truck, plot): (truck, plot) ∈ TruckG}
9:     Update working time assignment in Res_rep and Truck_rep with ResAp and TruckAp
10:      Res_rep ← Res_rep ∪ {(start, end): (start, end) ∈ ResAp}
11:      Truck_rep ← Truck_rep ∪ {(start, end): (start, end) ∈ TruckAp}
12:     Calculate for fitness values
13:     if p is infeasible
14:       Remove working time assignment in Res_rep and Truck_rep
15:       Res_rep ← Res_rep ∪ {(start, end): (start, end) ∈ ResAp}
16:       Truck_rep ← Truck_rep ∪ {(start, end): (start, end) ∈ TruckAp}
17:     End if
18:     While any working time in Res_rep is unassigned do
19:       asgn_job ← random unassigned pair of (res, plot) from Res_rep
20:       Calculate working time requirement (time_req) for asgn_job
21:       Calculate set of available time (avail_time) from Res_rep and Truck_rep
22:       asgn_start ← random from possible slot in avail_time
23:       asgn_end ← asgn_start + time_req
24:       Adjust asgn_end based on others in Res_rep
25:     End While
26:     Convert Res_rep and Truck_rep back to positionp* within dimension [MinD, MaxD]
27:     Update new position of p
28:       positionp ← positionp*
29:   End for
30: return particles

```

รูปภาพที่ 4.15 Pseudo Code แสดงโมดูลการปรับแก้ตำแหน่งบนมิติคำตอบของอนุภาคตาม *gbest*

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ทั้งนี้ เราสามารถแสดงตัวอย่างของการแก้ไขตำแหน่งของอนุภาคตามขั้นตอนของฮิวริสติกส์ที่ออกแบบขึ้นสำหรับปัญหาขนาดเล็ก (20 คันรถบรรทุก) โดยใช้วัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุดเป็นเกณฑ์ ได้ดังตารางที่ 4-11

ตารางที่ 4-11 ตารางแสดงตัวอย่างการแก้ไขตำแหน่งของอนุภาคสำหรับปัญหาขนาดเล็ก

Resources	Start Time	End Time	Plot	Assigned Truck
Harvesting Machine			4, 12, 8, 5, 6, 10, 9	9, 1, 8, 9, 3, 7, 9
Green Team1			3, 1	6, 5
Green Team2			7, 11	8, 7
Burnt Team1			20, 14, 15	2, 1, 2
Burnt Team2			17, 2, 19	7, 6, 1
Burnt Team3			18, 13, 16	5, 4, 3

Resources	Start Time	End Time	Plot	Assigned Truck
Harvesting Machine	108.64, 225.68, 271.27, 348.91, 411.53, 437.76, 452.92	144.98, 276.55, 376.96, 385.25, 446.47, 494.10, 515.31	9, 12, 10, 8, 4, 5, 6	9, 1, 7, 8, 9, 9, 3
Green Team1	66.35, 289.41	125.62, 328.68	1, 3	5, 6
Green Team2	427.72, 466.43	484.06, 502.77	7, 11	8, 7
Burnt Team1	17.31, 111.33, 133.48	53.650, 220.25, 189.82	14, 20, 15	1, 2, 2
Burnt Team2	84.06, 287.77, 388.74	140.40, 387.92, 490.79	17, 2, 19	7, 6, 1
Burnt Team3	16.34, 72.68, 259.40	72.680, 129.02, 295.74	16, 18, 13	3, 5, 4

จากตารางที่ 4-11 แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างของตารางทรัพยากรภายในอนุภาคหนึ่ง ซึ่งถูกแทนที่ตำแหน่ง Plot และ Assigned Truck ด้วยตำแหน่งในอนุภาค *gbest* ซึ่งมีค่า Fitness value ของวัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุดที่ดีกว่า โดยต่อมาตารางทรัพยากรที่วางอยู่ถูกสุ่ม และมอบหมายตารางเวลาการทำงานใหม่ให้เหมาะสมจนครบทุกคู่ของแปลงเพาะปลูก

4.4.5.4 การค้นหาคำตอบเฉพาะที่ (Local Search)

โมดูลการค้นหาคำตอบเฉพาะที่ของฮิวริสติกส์ที่ออกแบบขึ้น หรือ *LOCALSEARCH* เป็นขั้นตอนการค้นหาคำตอบที่แตกต่างจากการปรับเวกเตอร์ความเร็วและตำแหน่งของอนุภาคด้วย PSO ซึ่งทำการค้นหาเฉพาะเวลาเริ่มต้นเก็บเกี่ยวและจัดส่งอ้อย โดยโมดูลนี้จะเน้นไปที่การเปลี่ยนคู่ของแปลงเพาะปลูก และทรัพยากรรถบรรทุก เราอาจกล่าวได้ว่าเป็นโมดูลสำคัญที่ทำให้กระบวนการค้นหาคำตอบของเรานั้นมีความรวดเร็ว และมีความหลากหลายของคำตอบมากยิ่งขึ้น โมดูลการค้นหาคำตอบเฉพาะที่นี้สามารถจำแนกได้เป็น 3 โมดูลย่อย อันได้แก่ การเปลี่ยนทรัพยากรเก็บเกี่ยวของแปลงอ้อย การสลับทรัพยากรเก็บเกี่ยวระหว่างแปลงอ้อย และการสลับตารางเวลาของทรัพยากรเก็บเกี่ยว โดยกระบวนการทำงานของแต่ละโมดูลย่อยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- **การเปลี่ยนทรัพยากรเก็บเกี่ยวของแปลงอ้อย (*CHANGERES*):** การเปลี่ยนทรัพยากรเก็บเกี่ยวของแปลงอ้อยอ้างอิงอยู่บนแนวคิดที่ว่า การจับคู่ของทรัพยากรเก็บเกี่ยวกับแปลงอ้อยในปัจจุบันอาจไม่เหมาะสมกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการ จึงจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนชนิดของทรัพยากรเก็บเกี่ยวสำหรับแปลงอ้อยนั้น ๆ โดยโมดูล *CHANGERES* นี้มีวิธีการทำงาน เริ่มจาก การสร้างเซตของชุดคำตอบต้องห้าม *Tabu_List* ขึ้นมาเพื่อจัดเก็บคู่ของแปลงอ้อยและทรัพยากรที่ถูกใช้ไปแล้ว หรือคู่ของแปลงอ้อยกับทรัพยากรที่ไม่ทำให้ค่าของผลเฉลยดีขึ้นเอาไว้ พร้อมทั้งกำหนดตัวแปร *no_imprv* สำหรับจัดเก็บจำนวนครั้งที่ทำการค้นหาแล้วไม่มีการพัฒนาของผลเฉลย จากนั้นจึงทำการแปลงค่าตำแหน่งบนมิติคำตอบของอนุภาคให้อยู่ในรูปของตารางงาน *ResA* และ *TruckA* แล้วคำนวณหาเซตของทรัพยากรเก็บเกี่ยวที่ยังทำงานไม่ครบจำนวนสูงสุดต่อวัน *avail_res* และเซตของทรัพยากรเก็บเกี่ยวที่ได้รับมอบหมายงาน หรือแปลงอ้อยอย่างน้อย 1 งาน *change_res* ซึ่งจะสามารถโอนย้ายไปให้กับทรัพยากรอื่นได้

เมื่อกำหนดค่าเบื้องต้นเสร็จสิ้น เราจะสุ่มหาทรัพยากรที่จะโอนย้ายงานออก *before_res* ขึ้นมาจาก *change_res* โดยทรัพยากรนี้จะถูกนำมาสุ่มงาน *change_job* จากรายชื่อของงานที่มีอยู่เพื่อเตรียมโอนย้ายไปให้กับทรัพยากรเก็บเกี่ยวอื่น ทั้งนี้เราจะสุ่มทรัพยากรซึ่งได้รับการโอนย้ายงาน *after_res* จากทรัพยากรประเภทอื่นที่มีอยู่ใน *avail_res* อย่างไรก็ตาม หากคู่ของ *after_res* และ *change_job* ที่สุ่มได้มีอยู่ในรายการ *Tabu_List* หรือหาก *after_res* ที่สุ่มได้เป็นรถตัดอ้อย และ *change_job* ไม่

ตรงกับกลุ่มแปลงอ้อยที่ถูกจัดเอาไว้ตาม *sol_cluster* ให้เราเพิ่มจำนวนรอบ *no_imprv* ขึ้น 1 หน่วย ก่อนจะข้ามรอบการคำนวณนั้นไปแล้วทำขั้นตอนการสุ่มข้างต้นใหม่อีกครั้ง

หากผ่านการตรวจสอบด้วย *Tabu_List* และข้อจำกัดของรถตัดอ้อยข้างต้นแล้ว คู่ของทรัพยากร *after_res* และแปลงอ้อย *change_job* จะถูกนำมาคำนวณเพื่อหาช่องว่างที่เหมาะสมสำหรับแทรกงานใหม่โดยอ้างอิงเวลาจัดส่งอ้อยของทรัพยากรอื่น ๆ จากตารางงาน *ResA* และ *TruckA* ซึ่งในกรณีที่สามารถแทรกงานได้ เราจะสร้างตารางงานเปล่า *ResA** และ *TruckA** ขึ้นมาเพื่อเก็บค่าตารางงานใหม่ซึ่งได้ผ่านการนำงาน *change_job* ออกจาก *before_res* ไปใส่ใน *after_res* แล้ว ทั้งนี้ถ้าตารางงาน *ResA** และ *TruckA** ไปคำนวณหาค่า fitness value แล้วพบว่าค่าผลเฉลยดีขึ้นกว่าเดิม ให้แทนค่า *ResA* และ *TruckA* ด้วย *ResA** และ *TruckA** แล้วปรับตัวแปร *no_imprv* ให้กลับมาอยู่ที่ค่าเริ่มต้น (เริ่มนับใหม่ที่ 0) แต่ไม่ว่าจะเป็นในกรณีใดก็ตาม เมื่อจบรอบการคำนวณเราก็จะเพิ่มคู่ของทรัพยากรและแปลงอ้อยดังกล่าวในรายการ *Tabu_List* รวมถึงนับรอบ *no_imprv* เพิ่มขึ้นขึ้น 1 รอบ ก่อนจะขึ้นสู่อรอบการคำนวณใหม่เช่นเดียวกัน โดยเราจะวนซ้ำขั้นตอนในข้างต้นไปจนกว่าผลเฉลยจะไม่มีการพัฒนาติดต่อกันมากกว่า 50 ครั้ง (*no_imprv* > 50) โดยเราสามารถแสดงกระบวนการเปลี่ยนทรัพยากรเก็บเกี่ยวของแปลงอ้อยในรูปแบบของ Pseudo Code ได้ดังรูปภาพที่ 4.16

Pseudocode for Local Search – Change of Harvesting Resources

```

1: Function CHANGERES(p, param)
2:   Tabu_List ← {}
3:   no_imprv ← 0
4:   Convert positionp to working schedule ResA and TruckA
5:   Calculate for set of resources avail_res that working capacity do not met
6:   Calculate for set of resources change_res that have job assigned at least 1 job
7:   While no_imprv < 50 do
8:     before_res ← random resource from change_res
9:     change_job ← random job within before_res
10:    after_res ← random different type of resource from avail_res
11:    no_imprv ← no_imprv + 1
12:    if set of before_res, change_job and after_res is in Tabu_List then
13:      Skip this loop
14:    End if
15:    if after_res is Machine and change_job is not correlated with sol_cluster then
16:      Update Tabu_List
17:      Tabu_List ← Tabu_List ∪ {before_res, after_res, change_job}
18:      Skip this loop
19:    Else
20:      Calculate for possible slot of insertion from ResA and TruckA
21:      if there is no possible slot then
22:        Update Tabu_List
23:        Tabu_List ← Tabu_List ∪ {before_res, after_res, change_job}
24:        Skip this loop
25:      Else
26:        ResA* ← ResA
27:        TruckA* ← TruckA
28:        Update job in ResA* according to before_res, after_res and change_job
29:        ResA* ← ResA* \ {before_res, change_job}
30:        ResA* ← ResA* ∪ {after_res, change_job}
31:        Adjust all asgn_start and asgn_end in ResA* and TruckA*
32:      End if
33:    End if
34:    Calculate for new fitness values from ResA* and TruckA*
35:    if fitness* > fitness then
36:      Update ResA and TruckA with ResA* and TruckA*
37:      ResA ← ResA*
38:      TruckA ← TruckA*
39:      Update fitness values and reset no_imprv
40:      fitness ← fitness*
41:      no_imprv ← 0
42:    End if
43:    Update Tabu_List
44:    Tabu_List ← Tabu_List ∪ {before_res, after_res, change_job}
45:  End While
46:  Convert ResA and TruckA back to positionp
47: return p

```

รูปภาพที่ 4.16 Pseudo Code แสดงโมดูลการค้นหาเฉพาะที่-การเปลี่ยนทรัพยากรที่เก็บเกี่ยวของแปลงอ้อย

- การสลับทรัพยากรเก็บเกี่ยวระหว่างแปลงอ้อย (*JOBSWAP*): การสลับทรัพยากรเก็บเกี่ยวระหว่างแปลงอ้อยอ้างอิงอยู่บนแนวคิดที่ว่า การสลับคู่แปลงอ้อยระหว่าง 2 ทรัพยากรเก็บเกี่ยว จะมีส่วนช่วยในการปรับปรุงค่าผลเฉลี่ยของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการได้ โดยโมดูลนี้มีวิธีการทำงาน เริ่มจาก การสร้างเซตของชุดคำตอบต้องห้าม *Tabu_List* ขึ้นมาเพื่อจัดเก็บคู่ของแปลงอ้อย และทรัพยากรที่ถูกใช้ไปแล้ว หรือคู่ของแปลงอ้อย และทรัพยากรที่

ไม่ทำให้ค่าของผลเฉลยดีขึ้นไว้ พร้อมทั้งกำหนดตัวแปร *no_imprv* สำหรับเก็บจำนวนครั้งที่ทำการค้นหาแล้วไม่มีการพัฒนาของผลเฉลย จากนั้นทำการแปลงค่าตำแหน่งบนมิติคำตอบของอนุภาคให้อยู่ในรูปของตารางงาน *ResA* และ *TruckA* แล้วคำนวณหาเซตของทรัพยากรเก็บเกี่ยวที่ได้รับมอบหมายงานอย่างน้อย 1 งาน *avail_swap_res* เพื่อที่จะสลับคู่งาน หรือแปลงอ้อยกับทรัพยากรอื่นได้

เมื่อทำการตั้งค่าเบื้องต้นเสร็จสิ้น เราจะสุ่มหาทรัพยากร *swap_res1* และ *swap_res2* ขึ้นมาจาก *avail_swap_res* จากนั้นทำการสุ่มงาน *swap_job1* ภายใน *swap_res1* และ *swap_job2* ภายใน *swap_res2* ที่จะนำมาสลับกันระหว่างทรัพยากร โดยหากทั้งสองคู่งานและทรัพยากรที่สุ่มได้มีอยู่ในรายการ *Tabu_List* หรือถ้าหากทรัพยากรที่สุ่มได้เป็นรถตัดอ้อย แต่งาน *swap_job* ที่ต้องสลับด้วยไม่ตรงกับกลุ่มแปลงอ้อยที่จัดเอาไว้ตาม *sol_cluster* ให้เราเพิ่มจำนวนรอบ *no_imprv* ขึ้น 1 หน่วย ก่อนจะข้ามรอบการคำนวณนั้นไปแล้วทำขั้นตอนการสุ่มข้างต้นใหม่อีกครั้ง

หากผ่านการตรวจสอบด้วย *Tabu_List* และข้อจำกัดของรถตัดอ้อยข้างต้นแล้ว คู่ของทรัพยากร และแปลงอ้อยจะถูกนำมาคำนวณหาความเป็นไปได้ในการสลับงานโดยพิจารณาจากคิวการจัดส่งอ้อยทั้งหมดที่โรงงานน้ำตาล รวมถึงเวลาที่ว่างงานที่เหลืออยู่ของทั้งทรัพยากร *swap_res1* และ *swap_res2* เพื่อในกรณีที่เวลาปฏิบัติงานของสองทรัพยากรนั้นต่างกันมากจนส่งผลให้ต้องมีการขยับตารางงานบางส่วน ซึ่งในกรณีที่สามารถสลับงานได้ เราจะสร้างตารางงานเปล่า *ResA** และ *TruckA** ขึ้นมาเพื่อเก็บตารางงานใหม่ซึ่งได้ผ่านการสลับงาน *swap_job1* ใน *swap_res1* กับ *swap_job2* ใน *swap_res2* รวมทั้งขยับเวลาปฏิบัติงานของงานอื่น ๆ ภายในทรัพยากร *swap_res1* และ *swap_res2* เพื่อให้ได้ตารางงานที่ feasible ทั้งนี้ถ้า *ResA** และ *TruckA** ไปคำนวณหาค่า fitness value แล้วพบว่าค่าผลเฉลยดีขึ้นกว่าเดิมให้แทนค่า *ResA* และ *TruckA* ด้วย *ResA** และ *TruckA** แล้วปรับตัวแปร *no_imprv* ให้กลับมาอยู่ที่ค่าเริ่มต้น (เริ่มนับใหม่ที่ 0) แต่ไม่ว่าจะเป็นในกรณีใดก็ตาม เมื่อจบรอบการคำนวณเราก็จะเพิ่มคู่ของทรัพยากรและแปลงอ้อยดังกล่าวในรายการ *Tabu_List* รวมถึงนับรอบ *no_imprv* เพิ่มขึ้นขึ้น 1 รอบ ก่อนจะขึ้นสู่อรอบการคำนวณใหม่เช่นเดียวกัน โดยเราจะวนซ้ำขั้นตอนในข้างต้นไปจนกว่าผลเฉลยจะไม่มีการพัฒนาติดต่อกันมากกว่า 50 ครั้ง (*no_imprv* > 50) ทั้งนี้ เราสามารถแสดง

กระบวนการสลับทรัพยากรเก็บเกี่ยวระหว่างแปลงอ้อยในรูปแบบของ Pseudo Code ได้ดัง
รูปภาพที่ 4.17

Pseudocode for Local Search – Swapping Job Between 2 Resources

```

1: Function JOBSWAP(p, param)
2:   Tabu_List ← {}
3:   no_imprv ← 0
4:   Convert positionp to working schedule ResA and TruckA
5:   Calculate for set of resources avail_swap_res that have job assigned
6:   While no_imprv < 50 do
7:     swap_res1, swap_res2 ← random different resources from avail_swap_res
8:     swap_job1, swap_job2 ← random job within swap_res1 and swap_res2
9:     no_imprv ← no_imprv + 1
10:    if set of swap_res1, swap_res2, swap_job1 and swap_job2 is in Tabu_List then
11:      Skip this loop
12:    End if
13:    if any of swap_res is Machine and swap_job is not correlated with sol_cluster then
14:      Update Tabu_List
15:      Tabu_List ← Tabu_List ∪ {swap_res1, swap_res2, swap_job1, swap_job2}
16:      Skip this loop
17:    Else
18:      Calculate for possible slot of insertion from ResA and TruckA
19:      if there is no possible slot then
20:        Update Tabu_List
21:        Tabu_List ← Tabu_List ∪ {swap_res1, swap_res2
22:          , swap_job1, swap_job2}
23:        Skip this loop
24:      Else
25:        ResA* ← ResA
26:        TruckA* ← TruckA
27:        Update job swap_job1 from swap_res1 in ResA* with swap_job2
28:        ResA* ← ResA* \ {swap_res1, swap_job1}
29:        ResA* ← ResA* ∪ {swap_res1, swap_job2}
30:        Update job swap_job2 from swap_res2 in ResA* with swap_job1
31:        ResA* ← ResA* \ {swap_res2, swap_job2}
32:        ResA* ← ResA* ∪ {swap_res2, swap_job1}
33:        Adjust all asgn_start and asgn_end in ResA* and TruckA*
34:      End if
35:    End if
36:    Calculate for new fitness values from ResA* and TruckA*
37:    if fitness* > fitness then
38:      Update ResA and TruckA with ResA* and TruckA*
39:      ResA ← ResA*
40:      TruckA ← TruckA*
41:      Update fitness values and reset no_imprv
42:      fitness ← fitness*
43:      no_imprv ← 0
44:    End if
45:    Update Tabu_List
46:    Tabu_List ← Tabu_List ∪ {swap_res1, swap_res2, swap_job1, swap_job2}
47:  End While
48:  Convert ResA and TruckA back to positionp
49:  return p

```

รูปภาพที่ 4.17 Pseudo Code แสดงโมดูลการค้นหาเฉพาะที่-การสลับทรัพยากรเก็บเกี่ยวระหว่าง
แปลงอ้อย

- การสลับตารางเวลาของทรัพยากรเก็บเกี่ยว (SEQSWAP): การสลับตารางเวลาของทรัพยากรเก็บเกี่ยวอ้างอิงอยู่บนแนวคิดที่ว่า การสลับลำดับงานภายในของทรัพยากรเก็บเกี่ยวหนึ่ง ๆ ที่ได้รับมอบหมายแปลงอ้อยมากกว่า 2 แปลง จะมีส่วนช่วยปรับปรุงเส้นทางและลดเวลาทำให้ได้ค่าผลเฉลยของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีขึ้นได้ โดยโมดูลนี้มีวิธีการทำงานเริ่มต้นจาก การสร้างเซตของชุดคำตอบต้องห้าม *Tabu_List* ขึ้นมาเพื่อจัดเก็บคู่ของแปลงอ้อยและทรัพยากรที่ถูกใช้ไปแล้ว หรือคู่ของแปลงอ้อยและทรัพยากรที่ไม่ทำให้ค่าของผลเฉลยดีขึ้นเอาไว้ พร้อมทั้งกำหนดตัวแปร *no_imprv* สำหรับเก็บจำนวนครั้งที่ทำการค้นหาแล้วไม่มีการพัฒนาของผลเฉลย ต่อจากนั้นให้ทำการแปลงค่าตำแหน่งบนมิติคำตอบของอนุภาคให้อยู่ในรูปของตารางงาน *ResA* และ *TruckA* แล้วคำนวณหาเซตของทรัพยากรเก็บเกี่ยวที่ได้รับมอบหมายงานมากกว่า 2 งานขึ้นไป *avail_swap_res* เพื่อสลับคู่งานภายในทรัพยากรให้เกิดการปรับปรุงเส้นทางการเคลื่อนที่ได้

เมื่อทำการตั้งค่าเบื้องต้นเสร็จแล้ว เราจะสุ่มหาทรัพยากร *swap_res* ขึ้นมาจาก *avail_swap_res* จากนั้นทำการสุ่มงาน *swap_job1* และ *swap_job2* ที่ต่างกันจากภายในทรัพยากร *swap_res* โดยหากทรัพยากรที่สุ่มได้ และคู่ของงานที่จะนำมาสลับกันมีอยู่ในรายการ *Tabu_List* ให้เราเพิ่มจำนวนรอบ *no_imprv* ขึ้น 1 หน่วย ก่อนจะข้ามรอบการคำนวณนั้นไปแล้วทำขั้นตอนการสุ่มข้างต้นใหม่อีกครั้ง

หากผ่านการตรวจสอบด้วย *Tabu_List* และข้อจำกัดของรถตัดอ้อยข้างต้นแล้ว เราจะสร้างตารางงานเปล่า *ResA** และ *TruckA** ขึ้นมาเพื่อเก็บตารางงานใหม่ซึ่งได้ผ่านการสลับงาน *swap_job1* กับ *swap_job2* รวมทั้งขยับเวลาของงานอื่นภายในทรัพยากร *swap_res* เพื่อให้ได้ตารางงานที่ feasible ทั้งนี้ถ้า *ResA** และ *TruckA** ไปคำนวณหาค่า fitness value แล้วพบว่าค่าผลเฉลยดีขึ้นกว่าเดิมให้แทนค่า *ResA* และ *TruckA* ด้วย *ResA** และ *TruckA** แล้วปรับตัวแปร *no_imprv* ให้กลับมาอยู่ที่ค่าเริ่มต้น (เริ่มนับใหม่ที่ 0) แต่ไม่ว่าจะเป็นในกรณีใดก็ตาม เมื่อจบรอบการคำนวณเราก็จะเพิ่มคู่ของทรัพยากรและแปลงอ้อยดังกล่าวในรายการ *Tabu_List* รวมถึงนับรอบ *no_imprv* เพิ่มขึ้นขึ้น 1 รอบ ก่อนจะขึ้นสู่อรอบการคำนวณใหม่เช่นเดียวกัน โดยเราจะวนซ้ำขั้นตอนในข้างต้นไปจนกว่าผลเฉลยจะไม่มีการพัฒนาติดต่อกันมากกว่า 50 ครั้ง (*no_imprv* > 50) โดยสามารถแสดงกระบวนการสลับตารางเวลาของทรัพยากรเก็บเกี่ยวในรูปแบบของ Pseudo Code ได้ดังรูปภาพที่ 4.18

Pseudocode for Local Search – Swapping Working Sequence in Same Resource

```

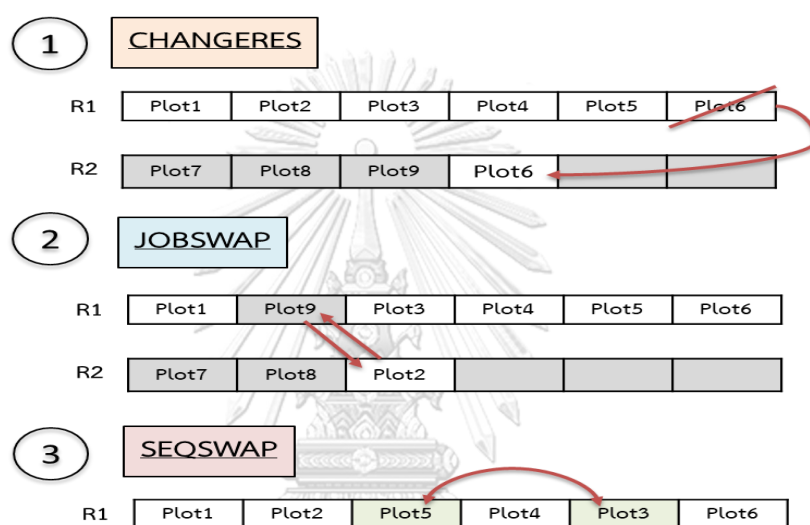
1: Function SEQSWAP( $p, param$ )
2:    $Tabu\_List \leftarrow \{\}$ 
3:    $no\_imprv \leftarrow 0$ 
4:   Convert  $position_p$  to working schedule  $ResA$  and  $TruckA$ 
5:   Calculate for set of resources  $avail\_swap\_res$  that have more than 1 job assigned
6:   While  $no\_imprv < 50$  do
7:      $swap\_res \leftarrow$  random resource from  $avail\_swap\_res$ 
8:      $swap\_job1 \leftarrow$  random job within  $swap\_res$ 
9:      $swap\_job2 \leftarrow$  random different job within  $swap\_res$ 
10:     $no\_imprv \leftarrow no\_imprv + 1$ 
11:    if set of  $swap\_res, swap\_job1$  and  $swap\_job2$  is in  $Tabu\_List$  then
12:      Skip this loop
13:    Else
14:       $ResA^* \leftarrow ResA$ 
15:       $TruckA^* \leftarrow TruckA$ 
16:      Update job of  $swap\_res$  in  $ResA^*$  by removing  $swap\_job1, swap\_job2$ 
17:       $ResA^* \leftarrow ResA^* \setminus \{swap\_res, swap\_job1\}$ 
18:       $ResA^* \leftarrow ResA^* \setminus \{swap\_res, swap\_job2\}$ 
19:      Update  $swap\_res$  by replacing  $swap\_job1$  in  $swap\_job2$  work time
20:       $ResA^* \leftarrow ResA^* \cup \{swap\_res, swap\_job1 | asgn\_start_1^* = asgn\_start_2\}$ 
21:      Update  $swap\_res$  by replacing  $swap\_job2$  in  $swap\_job1$  work time
22:       $ResA^* \leftarrow ResA^* \cup \{swap\_res, swap\_job2 | asgn\_start_2^* = asgn\_start_1\}$ 
23:      Adjust all  $asgn\_start$  and  $asgn\_end$  in  $ResA^*$  and  $TruckA^*$ 
24:    End if
25:    Calculate for new fitness values from  $ResA^*$  and  $TruckA^*$ 
26:    if  $fitness^* > fitness$  then
27:      Update  $ResA$  and  $TruckA$  with  $ResA^*$  and  $TruckA^*$ 
28:       $ResA \leftarrow ResA^*$ 
29:       $TruckA \leftarrow TruckA^*$ 
30:      Update fitness values and reset  $no\_imprv$ 
31:       $fitness \leftarrow fitness^*$ 
32:       $no\_imprv \leftarrow 0$ 
33:    End if
34:    Update  $Tabu\_List$ 
35:     $Tabu\_List \leftarrow Tabu\_List \cup \{swap\_res, swap\_job1, swap\_job2\}$ 
36:  End While
37:  Convert  $ResA$  and  $TruckA$  back to  $position_p$ 
38:  return  $p$ 

```

รูปภาพที่ 4.18 Pseudo Code แสดงโมดูลการค้นหาเฉพาะที่-การสลับตารางเวลาของทรัพยากร
เก็บเกี่ยว

ทั้งนี้ เราสามารถทำแผนภาพเพื่อสรุปการทำงานของแต่ละโมดูลสำหรับการค้นหาเฉพาะที่ได้ดังแสดงในรูปภาพที่ 4.19 และเพื่อเป็นการเพิ่มความต่อเนื่องในการค้นหา รวมถึงความหลากหลายของคำตอบ (Diversity) ของอนุภาคในส่วนของกระบวนการค้นหาคำตอบเฉพาะที่ เราจะจัดแบ่งชุดของโมดูลย่อยออกเป็น 3 ชุด และทำการสุ่มค่าดัชนีการค้นหา rnd_idx แบบยูนิฟอร์ม เพื่อกำหนดว่าอนุภาค p จะถูกนำไปผ่านชุดของโมดูลใด โดยชุดของโมดูลการค้นหาคำตอบเฉพาะที่ และช่วงของ rnd_idx ที่กำหนดไว้ (ช่วงของดัชนีการค้นหา เป็นผลมาจากการทดลองของผู้วิจัย) คือ

- **จุดที่ 1:** การเปลี่ยนทรัพยากรเก็บเกี่ยวของแปลงอ้อย และการสลับตารางเวลาของทรัพยากรเก็บเกี่ยว $rnd_idx \leq 0.25$
- **จุดที่ 2:** การสลับทรัพยากรเก็บเกี่ยวระหว่างแปลงอ้อย และการสลับตารางเวลาของทรัพยากรเก็บเกี่ยว $0.25 < rnd_idx \leq 0.5$
- **จุดที่ 3:** การเปลี่ยนทรัพยากรเก็บเกี่ยวของแปลงอ้อย การสลับตารางเวลาของทรัพยากรเก็บเกี่ยว และการสลับตารางเวลาของทรัพยากรเก็บเกี่ยว $0.5 < rnd_idx$



รูปภาพที่ 4.19 แผนภาพแสดงการทำงานของโมดูลการค้นหาคำตอบเฉพาะที่

เราสามารถแสดงโมดูลการค้นหาคำตอบเฉพาะที่ และการจัดชุดโมดูลย่อยในรูปแบบของ Pseudo Code ได้ดังรูปภาพที่ 4.20 และแสดงโมดูลการค้นหาคำตอบเฉพาะที่โดยภาพรวมในรูปแบบของแผนภาพ ได้ดังรูปภาพที่ 4.21

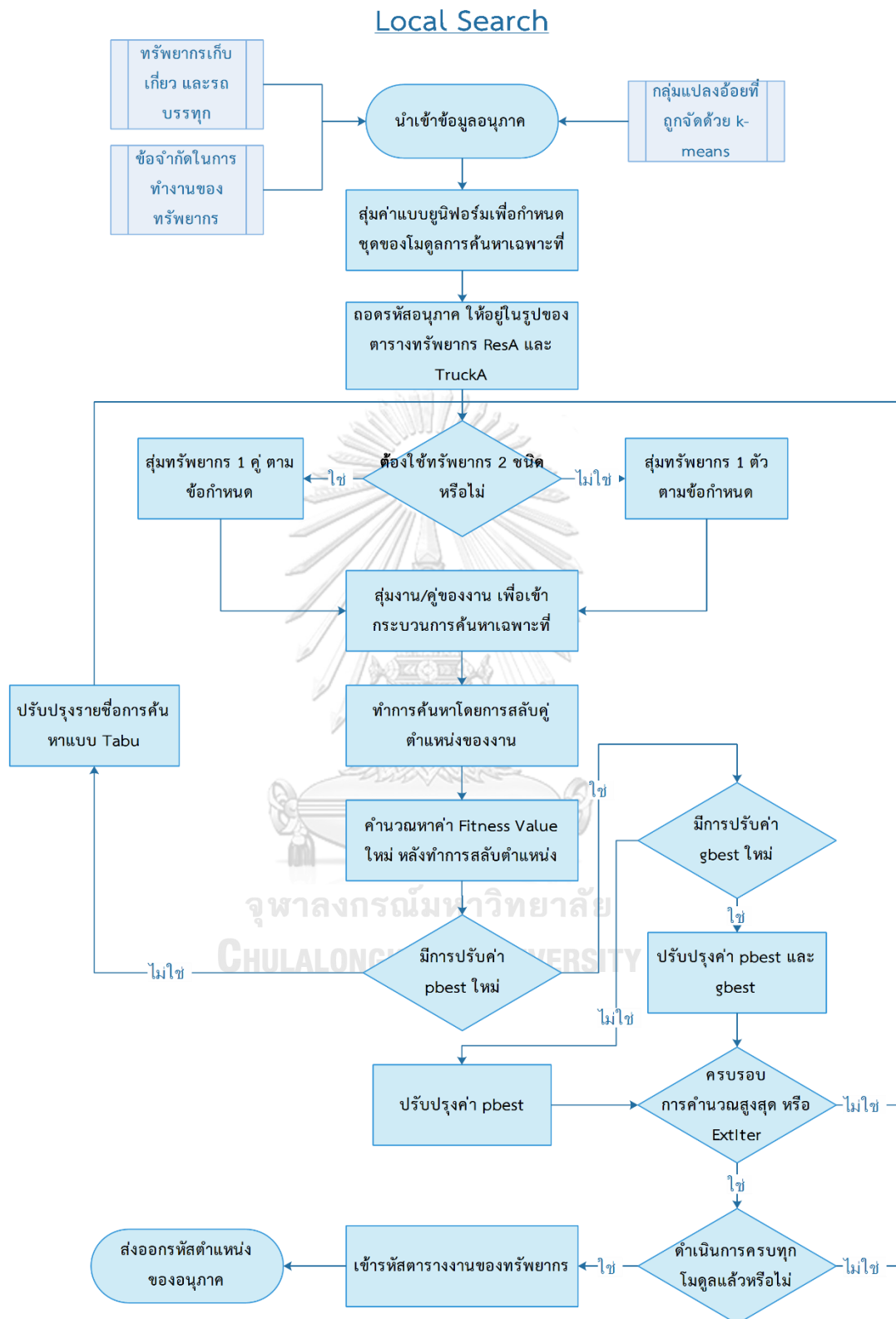
Pseudocode for Local Search

```

1: Function LOCALSEARCH(p, param)
2:   rnd_idx ← random numbers between [0,1]
3:   if rnd_idx ≤ 0.25 then
4:     call CHANGERES(p, param)
5:     call SEQSWAP(p, param)
6:   Else if rnd_idx > 0.25 and rnd_idx ≤ 0.5 then
7:     call JOBSWAP(p, param)
8:     call SEQSWAP(p, param)
9:   Else
10:    call CHANGERES(p, param)
11:    call JOBSWAP(p, param)
12:    call SEQSWAP(p, param)
13:   End if
14: return p

```

รูปภาพที่ 4.20 Pseudo Code แสดงโมดูลการค้นหาคำตอบเฉพาะที่-การจัดชุดของโมดูลย่อย



รูปภาพที่ 4.21 แผนภาพแสดงกระบวนการค้นหาเฉพาะที่

ทั้งนี้ เราสามารถแสดงตัวอย่างของการหาคำตอบเฉพาะที่ของอนุภาคตามขั้นตอนของฮิวริสติกส์ที่ออกแบบขึ้นสำหรับปัญหาขนาดเล็ก (20 คันรถบรรทุก) โดยใช้วัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุดเป็นเกณฑ์ ได้ดังตารางที่ 4-12

ตารางที่ 4-12 ตารางแสดงตัวอย่างของการค้นหาคำตอบเฉพาะที่สำหรับปัญหาขนาดเล็ก

Resources	Start Time	End Time	Plot	Assigned Truck
Harvesting Machine	33.50, 95.52, 127.38, 152.73, 206.63, 259.51, 315.13, 342.28, 395.19, 428.68	77.31, 135.25, 186.26, 204.45, 253.19, 304.85, 354.06, 395.30, 439.97, 466.98	7, 18, 1, 3, 9, 14, 11, 8, 13, 4	2, 5, 9, 3, 4, 9, 8, 5, 2, 7
Green Team1	287.77, 388.74	387.92, 490.79	2, 19	6, 4
Green Team2	111.33, 271.27	220.25, 376.96	20, 10	8, 2
Burnt Team1	60.94	122.88	5	6
Burnt Team2	110.13, 174.02	171.91, 233.81	15, 17	7, 5
Burnt Team3	320.17, 393.45, 452.92	388.92, 456.65, 515.31	16, 12, 6	7, 1, 3

Resources	Start Time	End Time	Plot	Assigned Truck
Harvesting Machine	17.310, 108.64, 259.40, 289.41, 348.91, 411.53, 466.43]	53.65, 144.98, 295.74, 328.68, 385.25, 446.47, 502.77	14, 9, 13, 3, 8, 4, 11	3, 4, 9, 8, 5, 2, 7
Green Team1	287.77, 388.74	387.92, 490.79	2, 19	6, 4
Green Team2	111.33, 271.27	220.25, 376.96	20, 10	8, 2
Burnt Team1	84.06, 133.48, 437.76	140.40, 189.82, 494.10	17, 15, 5	6, 7, 1
Burnt Team2	16.34, 225.68, 427.72	72.680, 276.55, 484.06	16, 12, 7	5, 1, 9
Burnt Team3	16.34, 66.35, 452.92	73.65, 125.62, 515.31	18, 1, 6	2, 9, 3

จากตารางที่ 4-12 แสดงให้เห็นถึงการค้นหาคำตอบเฉพาะที่ด้วยชุดของโมดูลย่อยที่ 3 ซึ่งทำการเปลี่ยนทรัพยากรการเก็บเกี่ยวสำหรับแปลงอ้อย แล้วจึงทำการสลับทรัพยากรเก็บเกี่ยวระหว่างแปลงอ้อย และท้ายที่สุดทำการสลับตารางเวลาเก็บเกี่ยวอ้อยภายในทรัพยากร โดยเราจะพบว่า

สัดส่วนการใช้งานของทรัพยากรที่มตัดอ้อยสด ไม่ลดน้อยลงสำหรับวัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุด หากแต่มีการลดลงของทรัพยากรรดตัดอ้อยไปเพิ่มในส่วนของทรัพยากรที่มตัดอ้อยไฟไหม้

4.4.5.5 การปรับปรุง และพัฒนาคำตอบ (Repair & Improvement Mechanism)

โมดูลกระบวนการปรับปรุง และพัฒนาคำตอบซึ่งอยู่ในฮิวริสติกส์ที่ออกแบบขึ้นนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 โมดูลย่อย คือ

- **การซ่อมแซมคำตอบที่เป็นไปไม่ได้:** โมดูลการซ่อมแซมคำตอบที่เป็นไปไม่ได้ ของอนุภาคนี้จะทำงานในช่วงของการสร้างผลเฉลยเริ่มต้น การสร้างอนุภาคใหม่ หรือในกรณีที่ทำการค้นหาเฉพาะที่แต่ตำแหน่งของอนุภาคอยู่ในช่วงที่ถอดรหัสออกมาเป็นตารางงาน *ResA* และ *TruckA* แล้วให้คำตอบที่ Infeasible โดยการซ่อมแซมจะมุ่งเน้นไปที่การหาค่าคำตอบที่เป็น feasible solution ที่อยู่ใกล้เคียงที่สุดเพื่อให้อนุภาคในแบบจำลองถูกใช้ในการค้นหาอย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ลำดับขั้นตอนการซ่อมแซมคำตอบของอนุภาคที่ออกแบบไว้มีรายละเอียดดังนี้
 - **ขั้นตอนที่ 1:** ถอดรหัสตำแหน่งของอนุภาคให้อยู่ในรูปของตารางงาน *ResA* และ *TruckA* โดยเรียงลำดับแปลงเพาะปลูกตามเวลาเริ่มเก็บเกี่ยวอ้อยจากน้อยไปหามากเพื่อความสะดวกในการจัดลำดับงาน และการเคลื่อนที่
 - **ขั้นตอนที่ 2:** พิจารณาว่า เวลาเริ่มต้นเก็บเกี่ยวอ้อยของแต่ละทรัพยากรเก็บเกี่ยวหนึ่ง ๆ ในตารางงาน *ResA* ปัจจุบัน มีงานใดที่ใช้เวลาปฏิบัติงานของทรัพยากรทับซ้อนกันกับงานก่อนหน้า หรือจุดสิ้นสุดของงานสุดท้ายอยู่นอกกรอบเวลาวางแผนที่ตั้งไว้หรือไม่ โดยหากมีงานที่เวลาทับซ้อนกัน (คำนวณช่วงเวลาปฏิบัติงานของทรัพยากรได้จาก เวลาเริ่มต้นเก็บเกี่ยว+ระยะเวลาเก็บเกี่ยว+ระยะเวลาเคลื่อนที่ไปยังแปลงถัดไป) เราจะทำการคำนวณเพิ่มเติมเพื่อหาช่วงเวลาว่างภายในทรัพยากรดังกล่าวของงานก่อนหน้า หรืองานถัดไปที่สามารถปรับตารางเวลาปฏิบัติงานงานไปข้างหน้า หรือถอยหลังได้ แล้วทำการปรับตารางเวลานั้นใหม่ แต่ถ้าหากว่าทำอย่างไรก็ไม่สามารถปรับตารางงานใน *ResA* ให้ feasible ได้ ในกรณีที่เป็นการสร้างผลเฉลยเริ่มต้น หรือการสร้างอนุภาคใหม่ เราจะข้ามไปทำการสุ่มหาทรัพยากร *asgn_res* อื่นเพื่อมอบหมายงานดังกล่าว ส่วนถ้าเป็นกรณีของการค้นหาคำตอบ

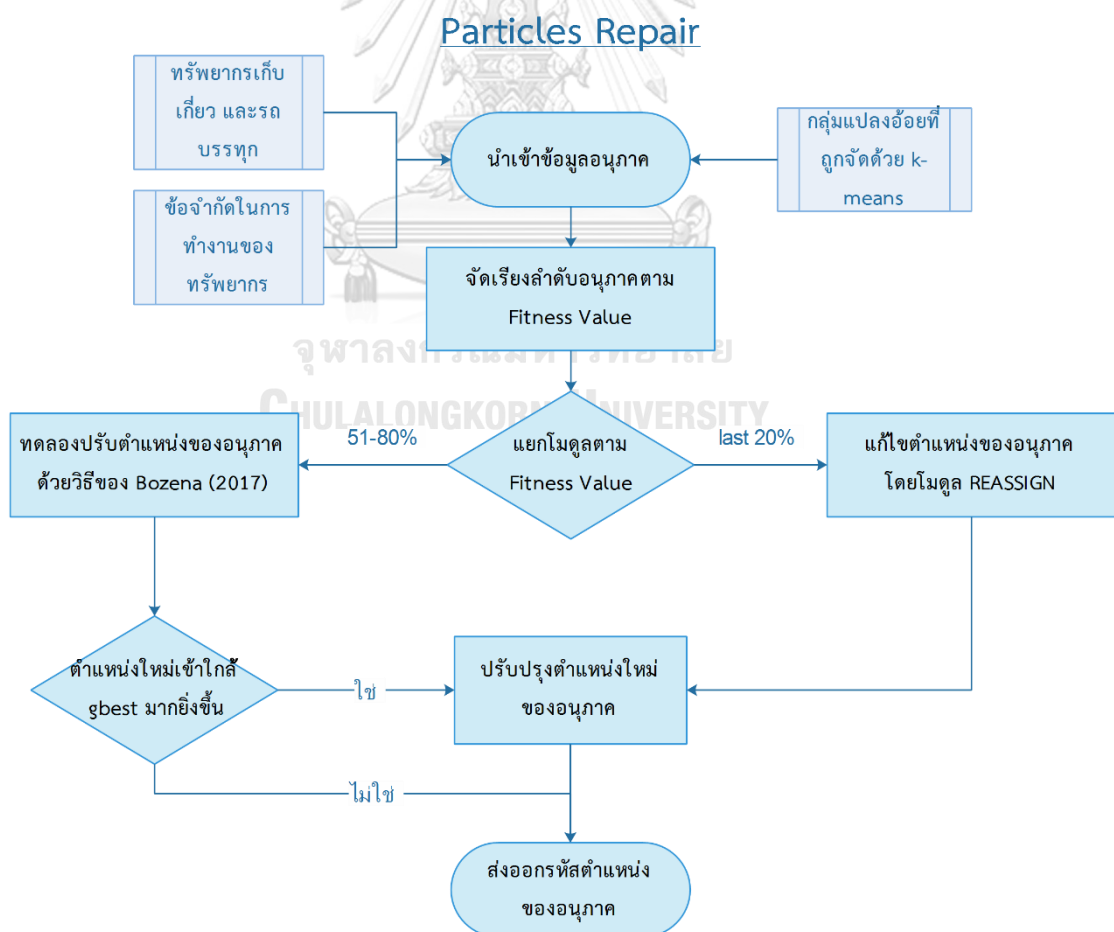
เฉพาะที่ เราจะบันทึกคู่ของงานและทรัพยากรดังกล่าวลงใน *Tabu_List* ก่อนจะเข้าไปยังรอบการค้นหาลัดไป

- **ขั้นตอนที่ 3:** เมื่อปรับตารางงานของทรัพยากรเก็บเกี่ยวใน *ResA* แล้ว ตารางงานของรถบรรทุก *TruckA* ซึ่งทำงานในแปลงอ้อยเดียวกันจะได้รับผลกระทบไปด้วย ทั้งนี้จะใช้วิธีคิดเกี่ยวกับการทับซ้อน หรือจุดสิ้นสุดของตารางงาน เหมือนกันกับในขั้นตอนที่ 2 แต่จะแตกต่างกันที่วิธีการคำนวณช่วงเวลาปฏิบัติงานของรถบรรทุกซึ่งมีความซับซ้อนมากกว่า (คำนวณช่วงเวลาปฏิบัติงานของรถบรรทุกได้จาก เวลาเริ่มต้นเก็บเกี่ยว+ระยะเวลาเก็บเกี่ยว+ระยะเวลาเคลื่อนที่ไปยังโรงงานน้ำตาล+ระยะเวลาเทอ้อย+ระยะเวลาเคลื่อนที่ไปยังแปลงอ้อยลัดไป) โดยถ้าหากไม่สามารถปรับตารางงานของรถบรรทุกที่ได้รับผลกระทบจาก *ResA* ใน *TruckA* ให้ได้ผลเฉลยที่ feasible ได้ เราจะทำการสับเปลี่ยนรถบรรทุก *asgn_truck* คันอื่นมาแทนที่เพื่อมอบหมายงานดังกล่าว ทั้งนี้ถ้าหากไม่มีรถบรรทุกคันใดสามารถรับมอบหมายงานดังกล่าวได้เลย ในกรณีที่เป็นการสร้างผลเฉลยเริ่มต้น หรือการสร้างอนุภาคใหม่ เราจะเข้าไปทำการสับเปลี่ยนทรัพยากร *asgn_res* อื่นเพื่อมอบหมายงานดังกล่าวอีกครั้ง ส่วนถ้าเป็นกรณีของการค้นหาคำตอบเฉพาะที่ เราจะบันทึกคู่ของงานและทรัพยากรดังกล่าวลงใน *Tabu_List* ก่อนจะเข้าไปรอบการค้นหาลัดไป

- **การซ่อมแซมและพัฒนาคำตอบ:** กระบวนการซ่อมแซมและพัฒนาคำตอบ หรือ *PARTICLEREPAIR* นี้จะถูกเรียกใช้ในทุก ๆ รอบการคำนวณที่กำหนด หรือในที่นี้คือรอบการคำนวณ ซึ่งไม่มีการพัฒนาของผลเฉลยติดต่อกันที่หารด้วย 5 ลงตัว ($\text{Mod}(\text{Noimp_count}, 5) = 0$) เนื่องจากผู้วิจัยได้กำหนดค่าความเร็วสูงสุดของอนุภาคเอาไว้ที่ 10% ของความกว้างมิติคำตอบ และหลังจาก 5 รอบการค้นหอนุภาคจำนวนหนึ่ง จึงมีแนวโน้มที่จะลู่เข้าใกล้จุด *gbest* มาก ซึ่งจากการทดสอบพบว่า กลุ่มอนุภาคที่ให้ค่าผลเฉลยที่แย้มักจะไม่พบผลเฉลยที่ดีขึ้นในรอบการค้นหาลัด ๆ ไป ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะดำเนินการปรับปรุงอนุภาคกลุ่มดังกล่าว โดยโมดูลพัฒนาคำตอบเริ่มต้นจากการนำอนุภาคทั้งหมดในระบบมาจัดเรียงลำดับตามค่า fitness values จากดีที่สุดไปแย้มที่สุด ก่อนจะแบ่งอนุภาคที่ต้องนำมาพัฒนาคำตอบออกเป็น 2 ส่วน คือ

- **อนุภาคที่มีค่าแย่ที่สุด 20% สุดท้าย:** อนุภาคกลุ่มนี้จะถูกนำมาทำลายทิ้ง (Destroy) แล้วสร้างขึ้นใหม่โดยใช้แนวทางของการแก้ไขตำแหน่งของอนุภาคในหัวข้อที่ 4.4.5.3 (*REASSIGN*)
- **อนุภาคที่มีค่าแย่ที่สุด 30% รองลงมา:** อนุภาคกลุ่มนี้ จะถูกนำมาทำการพัฒนาตำแหน่งโดยใช้วิธีการของ Božena (2017) ซึ่งคำนวณหาเวกเตอร์ความเร็วใหม่ของอนุภาคนั้น ๆ ด้วยสมการที่ 2.7 และ 2.8 ดังอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.2.3.1 ก่อนที่จะทดลองปรับตำแหน่งของอนุภาคบนปริภูมิการค้นหา โดยในกรณีที่ตำแหน่งใหม่นั้นเข้าใกล้ค่า *gbest* มากยิ่งขึ้น เราจะจดจำตำแหน่งของอนุภาครวมถึงเวกเตอร์ความเร็วใหม่นั้นแทนค่าเดิม และนำไปใช้ในรอบการคำนวณถัดไปของ PSO

ทั้งนี้ เราสามารถแสดงโมดูลสำหรับการปรับปรุง และพัฒนาค่าตอบของอนุภาคในรูปแบบของแผนภาพ ได้ดังรูปภาพที่ 4.22 และในรูปแบบของ Pseudo Code ได้ดังรูปภาพที่ 4.23



รูปภาพที่ 4.22 แผนภาพแสดงกระบวนการปรับปรุง และพัฒนาค่าตอบ

Pseudocode for Solution Improvement	
1:	Function <i>PARTICLEREPAIR</i> (<i>particles, gbest, param</i>)
2:	Sort members in <i>particles</i> by the <i>fitness values</i>
3:	Destroy & Repair:
4:	<i>d_set</i> ← Set of 20% particles with worst <i>fitness values</i>
5:	<i>particles</i> ← <i>particles</i> \ <i>d_set</i>
6:	call <i>REASSIGN</i> (<i>d_set, gbest, param</i>)
7:	Update <i>particles</i> with new particle in <i>d_set</i> *
8:	<i>particles</i> ← <i>particles</i> ∪ <i>d_set</i>
9:	Position Improvement:
10:	<i>imp_set</i> ← Set of 30% particles with worst <i>fitness values</i> next to <i>d_set</i>
11:	<i>particles</i> ← <i>particles</i> \ <i>imp_set</i>
12:	Calculate improvement velocity and new position
13:	for <i>i</i> ∈ <i>imp_set</i>
14:	<i>new_vel1_i</i> ← $vel_i^t / (vel_i^t - vel_i^{t-1})$; <i>t</i> = current <i>Iter</i>
15:	<i>new_position1_i</i> ← <i>position_i</i> + <i>new_vel1_i</i>
16:	<i>new_vel2_i</i> ← $(vel_i^{t-1} - vel_i^t) / vel_i^{t-1}$; <i>t</i> = current <i>Iter</i>
17:	<i>new_position2_i</i> ← <i>position_i</i> + <i>new_vel2_i</i>
18:	if <i>new_position1_i</i> or <i>new_position2_i</i> closer to <i>gbest</i> then
19:	Update position of particle <i>i</i> in <i>imp_set</i> with better <i>new_position_i</i>
20:	<i>position_i</i> ← <i>new_position_i</i>
21:	Update improvement status <i>imp_stat_i</i>
22:	<i>imp_stat_i</i> ← true
23:	End if
24:	End for
25:	Update <i>particles</i> with new particle in <i>imp_set</i>
26:	<i>particles</i> ← <i>particles</i> ∪ <i>imp_set</i>
27:	return <i>particles</i>

รูปภาพที่ 4.23 Pseudo Code แสดงโมดูลการปรับปรุง และพัฒนาคำตอบ

4.4.5.6 ภาพรวมของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาการจัดตารางทรัพยากร

กระบวนการหาคำตอบของฮิวริสติกส์ในภาพรวม จะเริ่มต้นจากส่วนของ Initialization ที่ทำการกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ PSO ตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.4.1 โดยในที่นี้จะมีพารามิเตอร์ที่เพิ่มขึ้นมาจากหัวข้อที่ 4.4.1 คือ พารามิเตอร์ที่ทำหน้าที่กำหนดจำนวนมิติของอนุภาคสำหรับการถอดรหัส (*numDim*) พารามิเตอร์ที่ทำหน้าที่บันทึกจำนวนรอบการคำนวณซึ่งไม่มีการพัฒนาของผลเฉลย (*Noimp_count*) พารามิเตอร์ที่ควบคุมการสร้างอนุภาคใหม่ในกรณีที่ไม่มีการพัฒนาของผลเฉลยถึงจำนวนครั้งที่กำหนด (*RndIter*) และพารามิเตอร์ที่ควบคุมการหยุดการค้นหาคำตอบในกรณีที่ไม่มีการพัฒนาของผลเฉลยถึงจำนวนครั้งที่กำหนด (*ExtIter*)

เมื่อสิ้นสุดขั้นตอนการกำหนดพารามิเตอร์ของ PSO เราจะทำการสร้างเซตว่าง *particles* ซึ่งมีขนาดเท่ากับจำนวนอนุภาคในระบบ หรือ *numP* สำหรับเก็บค่าตำแหน่งบนปริภูมิคำตอบของแต่ละอนุภาค จากนั้นจึงเข้าสู่ขั้นตอนแรกของการหาผลเฉลยอนุภาคเริ่มต้นโดยการเรียกใช้โมดูล

PARTICLEGENERATE ในหัวข้อที่ 4.4.5.1 และเมื่อได้ค่าตำแหน่งของทุกอนุภาคพร้อมทั้ง *gbest* มาแล้ว จะทำการเรียกใช้งานโมดูล *REASSIGN* เพื่อปรับให้ทุกอนุภาคมีลักษณะการมอบหมายชุดของทรัพยากรและรถตัดอ้อยเดียวกัน และให้ PSO ในส่วนต่อไปช่วยในการค้นหาเวลาทำงานที่ดีที่สุดแทน ทั้งนี้ Pseudo Code แสดงกระบวนการทำงานหลักของฮิวริสติกส์ในส่วนของกร Initialize สามารถแสดงได้ดังรูปภาพที่ 4.24

Pseudocode for MAIN Heuristic (1)	
1:	Begin
2:	import from <i>Parameter Initialization</i>
3:	$param \leftarrow$ set of parameters from I, J, R, T
4:	Particle Initialization:
5:	Set <i>prob</i> that contained basic PSO parameters
6:	$\{w, wdamp, c_1, c_2\} \leftarrow \{0.729, 0.999, 1.49445, 1.49445\}$
7:	$\{MaxD, MinD\} \leftarrow \{1, 0\}$
8:	$\{MaxV, MinV\} \leftarrow 0.1 \times \{MaxD, MinD\}$
9:	$numP \leftarrow 15$
10:	$numDim \leftarrow 4 \times numP$
11:	$MaxIter \leftarrow 1,000$
12:	$RndIter \leftarrow 0.05 \times MaxIter$
13:	$ExtIter \leftarrow 0.11 \times MaxIter$
14:	$Noimp_count \leftarrow 0$
15:	Set starting value of <i>pbest</i> and <i>gbest</i>
16:	Set <i>particles</i> as set of size <i>numP</i> to contain particle value
17:	call <i>PARTICLEGENERATE</i> (<i>particles, gbest, prob, param</i>)
18:	call <i>REASSIGN</i> (<i>particles, gbest, param</i>)

รูปภาพที่ 4.24 Pseudo Code แสดงกระบวนการทำงานหลักของฮิวริสติกส์ (1)

ถัดจากส่วน Initialization เราจะกล่าวถึงส่วนกระบวนการทำงานของ PSO ภายในฮิวริสติกส์ ที่นับเป็นส่วนหลักของกระบวนการค้นหาที่ออกแบบขึ้น โดยเราสามารถแบ่งการวนซ้ำของ PSO ได้เป็น 2 ระดับ คือ

- การวนซ้ำเพื่อปรับขนาดเวกเตอร์ความเร็วและตำแหน่งของอนุภาค: เป็นส่วนของการวนซ้ำจนกว่าทุกอนุภาคจะได้รับการปรับตำแหน่ง ซึ่งในรอบการปรับตำแหน่งของแต่ละอนุภาคนี้จะเริ่มต้นที่การตรวจสอบว่าอนุภาคดังกล่าวผ่านโมดูลการปรับปรุงตำแหน่ง (*PARTICLEREPAIR*) มาในรอบการคำนวณ *Iter* ก่อนหน้าหรือไม่ หากอนุภาคดังกล่าวผ่านการปรับปรุงตำแหน่งแล้ว เราจะข้ามในส่วนของการปรับตำแหน่งในรอบนี้ไป แต่ถ้าอนุภาคไม่ได้ผ่านการปรับปรุงในรอบก่อนหน้า เราจะทำการปรับขนาดเวกเตอร์ความเร็วของอนุภาคด้วยสมการที่ 2.3 และปรับตำแหน่งพิกัดของอนุภาคด้วยสมการที่ 2.4 ทั้งนี้เวกเตอร์ความเร็วและตำแหน่งจะถูกควบคุมให้อยู่ในช่วงของ $[MinV, MaxV]$ และ $[MinD, MaxD]$ ในแต่ละมิติของปริภูมิคำตอบ จากนั้นจะนำอนุภาคซึ่งถูกปรับตำแหน่ง

แล้วไปคำนวณหาค่า fitness value แล้วนำมาเปรียบเทียบกับ $pbest_p$ โดยหากให้ค่าที่ดีกว่า $pbest_p$ เราจะแทนที่ค่า $pbest_p$ เดิมด้วยตำแหน่งใหม่ของอนุภาค และหากค่าดังกล่าวดีกว่า $gbest$ ด้วย เราจะแทนที่ค่าตำแหน่ง $gbest$ ด้วยตำแหน่งใหม่ของอนุภาคนี้เช่นกัน ก่อนจะปรับให้ค่าพัฒนาค่าตอบ $Noimp_count$ กลับเป็นค่าเริ่มต้น แต่ถ้าหากอนุภาคหลังการปรับตำแหน่งไม่ให้ค่า fitness ที่ดีขึ้น เราจะจำตำแหน่งใหม่ของอนุภาคนี้ไว้โดยไม่ต้องแทนที่ค่า $pbest_p$ และ $gbest$ แต่อย่างใด

- การวนซ้ำสำหรับ PSO ในภาพรวม: เมื่อทำการวนซ้ำเพื่อปรับตำแหน่งของอนุภาคจนครบแล้ว เซต *particles* จะถูกนำมาพิจารณาในหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้
 - รอบการคำนวณ หรือ *Iter* ที่ผ่านมามีการพัฒนาค่าผลเฉลย $gbest$ ใหม่หรือไม่ โดยถ้ามีการพัฒนาของผลเฉลย $gbest$ เราจะทำการเรียกใช้งานโมดูล *REASSIGN* เพื่อเปลี่ยนชุดคำตอบและจุดเริ่มต้นของการค้นหาของอนุภาคอื่นทั้งหมด แต่ถ้าไม่มีการพัฒนาของค่าผลเฉลย เราจะตรวจสอบว่าจำนวนรอบการคำนวณซึ่งไม่มีการพัฒนาของผลเฉลยติดต่อกันถูกหารด้วย 5 ลงตัวหรือไม่ ($\text{Mod}(Noimp_count, 5) = 0$) หากใช่เราจะทำการเรียกใช้โมดูล *PARTICLEREPAIR* เพื่อปรับปรุงคุณภาพของคำตอบ โดยตัวเลข 5 ที่นำมาหารนี้ถูกตั้งขึ้นโดยส่วนหนึ่งอ้างอิงจากขนาดสูงสุดของเวกเตอร์ความเร็วที่ 10% ของความกว้างตำแหน่งคำตอบในแต่ละมิติ ซึ่ง 5 ครั้งของการเคลื่อนที่นั้นมากพอที่จะเคลื่อนที่ได้ระยะทางครึ่งหนึ่งของช่วงมิติคำตอบ และอีกส่วนหนึ่งอ้างอิงจากการสังเกตพฤติกรรมการพบเจอคำตอบระหว่างลู่อู่เข้าหาตำแหน่ง $gbest$ ของอนุภาคของผู้วิจัย
 - ค่าผลเฉลยไม่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนครบ $RndIter$ ครั้ง หรือหารด้วย $RndIter$ ลงตัวหรือไม่ ($\text{Mod}(Noimp_count, RndIter) = 0$) ถ้าใช่เราจะเรียกใช้โมดูล *PARTICLEGENERATE* เพื่อทำการสร้างอนุภาคเริ่มต้นใหม่ (Multi-Start)
 - ค่าผลเฉลยไม่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนครบ $ExtIter$ ครั้ง หรือ *Iter* มากกว่า $MaxIter$ เราจะหยุดการทำงานของฮิวริสติกส์แล้วใช้ค่า $gbest$ ในขณะนั้นเป็นผลเฉลยสุดท้ายในทันที

ทั้งนี้ Pseudo Code แสดงกระบวนการทำงานโดยภาพรวมของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาการ
จัดการทรัพยากร สามารถแสดงได้ดังรูปภาพที่ 4.25

Pseudocode for MAIN Heuristic (2)

```

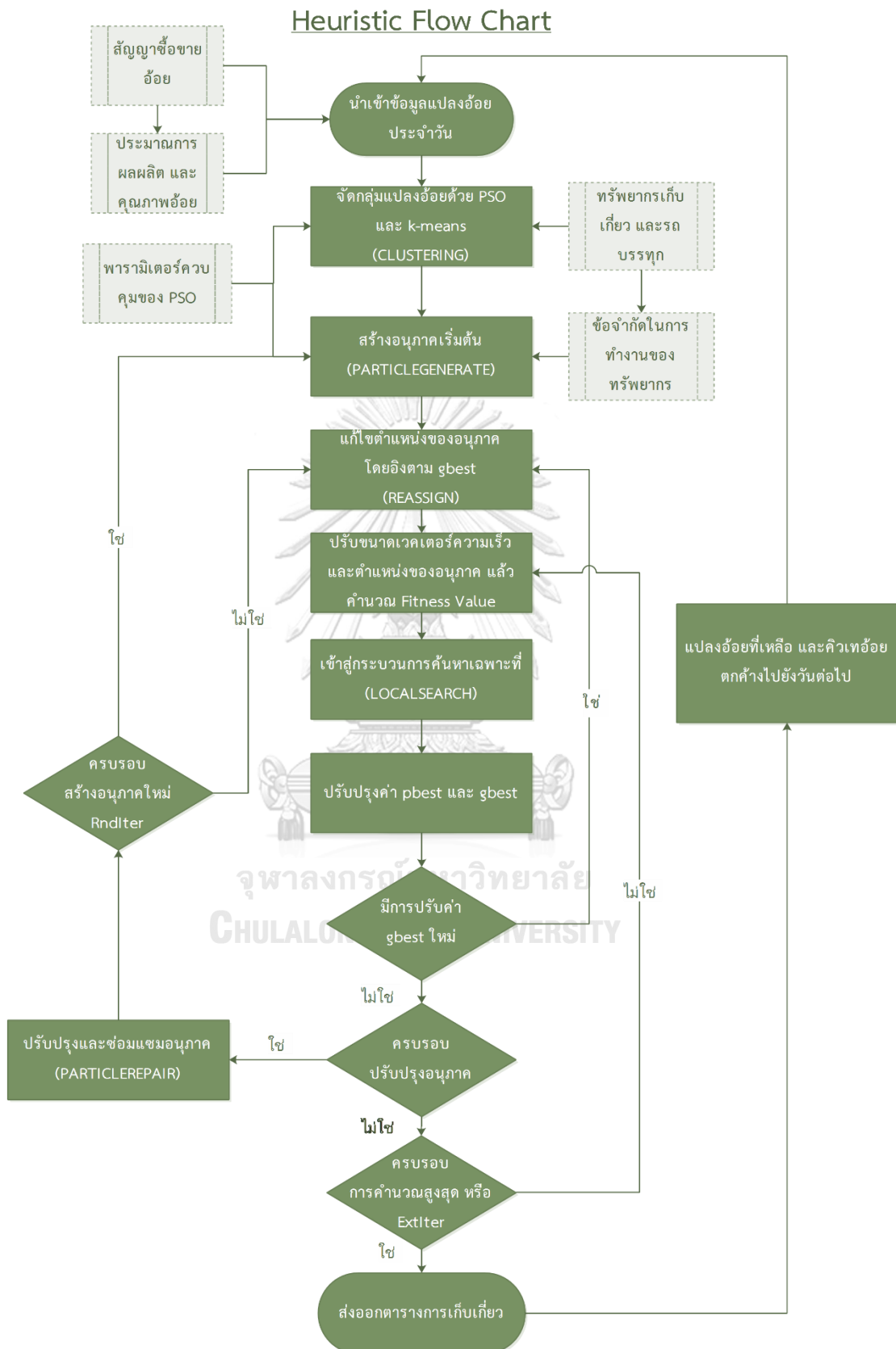
19: Main Loop:
20:   for  $Iter = 1, \dots, MaxIter$ 
21:      $Noimp\_count \leftarrow Noimp\_count + 1$ 
22:     for  $p \in particles$ 
23:       if particle improvement status  $imp\_stat_p$  is false then
24:         Update particle velocities in dimensions that represent working time
25:          $vel_p^{m*} \leftarrow \left[ w(vel_p^m) + c_1r_1(pbest_p^m - position_p^m) \right. \\ \left. + c_2r_2(gbest - position_p^m) \right]$ 
26:         Adjust size of  $vel_p^{m*}$  according to  $MaxV$  and  $MinV$ 
27:         Update particle positions in dimensions that represent working time
28:          $position_p^{m*} \leftarrow position_p^m + vel_p^{m*}$ 
29:         Adjust position of  $position_p^{m*}$  according to  $MaxXY$  and  $MinXY$ 
30:       Else
31:         Update improvement status  $imp\_stat_p$ 
32:          $imp\_stat_p \leftarrow false$ 
33:       End if
34:       Calculate for fitness values
35:       if  $p$  is feasible then
36:         call LOCALSEARCH( $p, param$ )
37:       End if
38:       if  $fitness_p^* > fitness_p$  then
39:         Update  $pbest_p$ 
40:          $pbest_p \leftarrow position_p^*$ 
41:         if  $fitness_p^* > fitness_g$  then
42:           Update  $gbest, fitness_g$  and  $Noimp\_count$ 
43:            $gbest \leftarrow pbest_p$ 
44:            $fitness_g \leftarrow fitness_p^*$ 
45:            $Noimp\_count \leftarrow 0$ 
46:         End if
47:       End if
48:     End for
49:     if there is new  $gbest$  in this  $Iter$  then
50:       call REASSIGN( $particles, gbest, param$ )
51:     Else if  $Noimp\_count$  can be divisible by 5 then
52:       call PARTICLEREPAIR( $particles, gbest, param$ )
53:     End if
54:     if  $Noimp\_count$  can be divisible by  $RndIter$  then
55:       call PARTICLEGENERATE( $gbest, prob, param$ )
56:     End if
57:     if  $Noimp\_count > ExtIter$  then
58:       Break
59:     End if
60:     Update damping value  $w$ 
61:      $w \leftarrow w \times wdamp$ 
62:   End for
63: End
64: return  $gbest$ 

```

รูปภาพที่ 4.25 Pseudo Code แสดงกระบวนการทำงานหลักของฮิวริสติกส์ (2)

4.5 สรุป

จากการศึกษาระบบโลจิสติกส์ขาเข้าของอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลไทย ผู้วิจัยได้กำหนดวัตถุประสงค์ที่ต้องการบรรลุจากการจัดตารางทรัพยากรทั้งหมด 4 วัตถุประสงค์ คือ ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุด สัดส่วนกำไรจากการขายอ้อยเฉลี่ยรายคนของเกษตรกรสูงสุด ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด และปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด โดยแต่ละวัตถุประสงค์ก็มีความขัดแย้งซึ่งกันและกัน ทั้งนี้ทางผู้วิจัยได้ทำการออกแบบตัวแบบคณิตศาสตร์เพื่อจำลองปัญหาดังกล่าว ก่อนจะพัฒนาฮิวริสติกส์สำหรับการจัดตารางทรัพยากรโดยมีพื้นฐานมาจากตัวแบบที่ออกแบบขึ้น โดยกำหนดกรอบเวลาการวางแผนจัดตารางทรัพยากรเอาไว้ที่ 26 ชั่วโมง โดยกระบวนการทำงานของฮิวริสติกส์เริ่มจากการรับข้อมูลแปลงอ้อยที่พร้อมเก็บเกี่ยวมาจากสัญญาการซื้อขายอ้อย และแปลงอ้อยที่เหลือมาจากกรอบเวลาวางแผนก่อนหน้ามาจัดกลุ่มเพื่อกระจายภาระงานของรถตัดอ้อยโดยใช้หลัก k-means ก่อนจะนำกลุ่มแปลงอ้อยดังกล่าวมาทำการสร้างอนุภาคเริ่มต้นโดยอิงจากข้อจำกัดในการทำงานของทรัพยากร ซึ่งกลุ่มของอนุภาคเริ่มต้นจะถูกนำมาปรับตำแหน่งพิกัดบางส่วนตามอนุภาค *gbest* แล้วนำเข้าสู่กระบวนการค้นหา และพัฒนาคำตอบโดยใช้ PSO ร่วมกับการทำการค้นหาเฉพาะที่ โดยในทุกรอบการคำนวณที่กำหนด (ที่ไม่มีการพัฒนาของผลเฉลย) อนุภาคทั้งหมดจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการปรับปรุงตำแหน่งคำตอบ รวมไปถึงการทำ Multi-Start สร้างอนุภาคเริ่มต้นใหม่เพื่อขยายขอบเขตการค้นหา ซึ่งในท้ายที่สุดเมื่อครบจำนวนรอบที่กำหนด ผลเฉลยที่ดีที่สุดจะถูกนำมาเป็นตารางทรัพยากรที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาแบบวัตถุประสงค์เดียวหรือกลุ่มของผลเฉลยที่ดีที่สุดจะถูกนำมาผ่านการพิจารณาคัดเลือกต่อไปสำหรับปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ ส่วนแปลงอ้อยที่เหลืออยู่ (ในกรณีที่ปัญหาขนาดใหญ่มาก) จะถูกส่งต่อไปเพื่อใช้วางแผนทรัพยากรในกรอบเวลาวางแผนถัดไป ทั้งนี้เราสามารถสรุปกระบวนการทำงานของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาการจัดตารางทรัพยากรได้ดังแสดงในรูปภาพที่ 4.26



รูปภาพที่ 4.26 แผนภาพแสดงกระบวนการทำงานของฮิวริสติกส์ของปัญหาการจัดตารางทรัพยากร

บทที่ 5

ผลการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้ทางผู้วิจัยจะกล่าวถึงวิธีการจำลองข้อมูลนำเข้า และผลลัพธ์ของการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบสนับสนุนการปฏิบัติงานที่ออกแบบขึ้น ซึ่งมี PSO เป็นส่วนประกอบหลักในการจัดตารางทรัพยากร โดยในส่วนของ การทดสอบประสิทธิภาพจะประกอบด้วย ผลเฉลยเปรียบเทียบกับวิธีการจัดตารางทรัพยากรด้วยวิธีการหาค่าตอบแบบแมนตรง โดยใช้วัตถุประสงค์เดียวเป็นเกณฑ์ และผลการวัดสมรรถนะของอัลกอริทึมในการหาผลเฉลยแบบมีหลายวัตถุประสงค์เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้มีส่วนเกี่ยวข้องกับระบบอุตสาหกรรมน้ำตาล

5.1 Instance Generation

ในการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบสนับสนุนการปฏิบัติงาน หรือในที่นี้คือ ฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาการจัดตารางทรัพยากรนั้น ขนาดของปัญหานั้นเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เราทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบต่าง ๆ ภายในระบบ ตลอดจนการตอบสนองของฮิวริสติกส์ต่อปัจจัยดังกล่าว ซึ่งการกำหนดวิธีการจำลองข้อมูลนำเข้าของระบบโลจิสติกส์ขาเข้าของอุตสาหกรรมน้ำตาลที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลนำเข้าสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ข้อมูลนำเข้าที่มีค่าคงที่ตลอดฤดูการผลิต เช่น อัตราการทำงาน of เครื่องจักร หรือค่าใช้จ่ายในการเก็บเกี่ยวอ้อย โดยผู้วิจัยสามารถแสดงข้อมูลนำเข้าที่มีค่าคงที่ หรือพารามิเตอร์เหล่านี้ได้ดัง ตารางที่

5-1

ตารางที่ 5-1 ตารางแสดงพารามิเตอร์ หรือข้อมูลนำเข้าที่มีค่าคงที่

No.	Parameters	Meaning	Values	Units	References
1	g^u	อัตราการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง	4	km/litre	ทศพล นภาสวัสดิ์ (2556)
2	g^e	อัตราการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำมัน	2.7446	kgCO ₂ /litre	องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (2562)
3	g^c	ราคาน้ำมันเชื้อเพลิง	28	Baht/litre	ปตท. (2562)
4	h_r^s	อัตราการเก็บเกี่ยวอ้อยของทรัพยากร	R1=25 R2=6.25 R3=13.5	ton/hour	วิชัย โอบานกุล et al. (2555)
5	h_r^c	ค่าใช้จ่ายในการเก็บเกี่ยวอ้อยของทรัพยากร	R1=280 R2=250 R3=220	Baht/ton	โอบานกุล et al. (2555)

ตารางที่ 5-1 (ต่อ) ตารางแสดงพารามิเตอร์ หรือข้อมูลนำเข้าที่มีค่าคงที่

6	h_r^g	อัตราการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของ ทรพยากร	R1=1.5 R2=0 R3=0	litre/ton	โอภาณุกุล et al. (2555)
7	h_r^e	อัตราการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ของทรพยากร	R1=0 R2=0 R3=219.5	kgCO ₂ /ton	สุภาพร พงศ์ธรพฤกษ์ and เสวียน เปรมประสิทธิ์ (2560)
8	h_r^d	อัตราส่วนสิ่งสกปรกจากการเก็บเกี่ยว ของทรพยากร	R1=13.98 R2=11.04 R3=8.73	%	โอภาณุกุล et al. (2555)
9	h_r^l	อัตราการสูญเสียจากการเก็บเกี่ยวอ้อย ของทรพยากร	R1=3.5117 R2=3.0565 R3=2.8269	%	โอภาณุกุล et al. (2555)
10	h_r^f	ค่าปรับจากการใช้งานทรพยากร	R1=-30 R2=-30 R3=30	Baht/ton	นวลไย (2562)
11	h_r^i	ค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงหน้าดินจาก การเก็บเกี่ยว	R1=0 R2=0 R3=1000	Baht/plot	มิตรผลกรุ๊ป (2561)
12	h_r^u	อัตราส่วนใบอ้อยและกาบอ้อยจากการ เก็บเกี่ยว	R1=17 R2=17 R3=0	%	โอภาณุกุล et al. (2555)
13	δ_r	อัตราการเก็บเกี่ยวสูงสุดของทรพยากร	R1=14 R2=2 R3=3	plot/day	โอภาณุกุล et al. (2555)
14	φ_r	อัตราการเสื่อมคุณภาพของอ้อยหลังการ เก็บเกี่ยว	R1=0.10834 R2=0.04114 R3=0.06488	% C.C.S/hour	Solomon et al (2550)
15	m	อัตราการหีบอ้อยของโรงงานน้ำตาล	500	ton/hour	โรงงานน้ำตาลบุรีรัมย์ (2558)
16	l	น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของรถบรรทุก	25	ton	กรมทางหลวง (2558)
17	v	ต้นทุนการเพาะปลูกอ้อย	665	Baht/ton	ศิลา จำเนียรสุข (2562)
18	s	ราคาขายอ้อยเฉลี่ยหน้าโรงงาน	900	Baht/ton	สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและ น้ำตาลทราย (2560)
19	ε	ราคาขายใบอ้อยเฉลี่ยให้โรงงานไฟฟ้า	1,000	Baht/ton	มิตรผลกรุ๊ป (2563)
20	ϑ	ราคาขายน้ำตาลทรายดิบเฉลี่ย	16,132.85	Baht/ton	Investing.com (2017)
21	q	ค่าคุณภาพอ้อยมาตรฐานที่โรงงาน ยอมรับ	10	C.C.S	สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและ น้ำตาลทราย (2563)
22	b	ค่าปรับ หรือเงินส่วนเพิ่มจากคุณภาพ อ้อยที่ต่างจากมาตรฐาน	42	Baht/C.C.S	สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและ น้ำตาลทราย (2563)

ส่วนข้อมูลนำเข้าประเภทที่สองคือ ข้อมูลนำเข้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามกรอบเวลาการวางแผน ที่สนใจ เช่น ตำแหน่งที่ตั้งแปลงเพาะปลูกอ้อย ปริมาณผลผลิตอ้อยในไร่ คุณภาพอ้อย หรือจำนวน ทรัพยากร โดยในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะให้ความสนใจกับการจำลองข้อมูลนำเข้าประเภทที่สอง บนระบบที่ ประกอบไปด้วยโรงงานน้ำตาลจำนวน 1 โรง แปลงเพาะปลูกอ้อยทำสัญญาโดยรอบโรงงาน ทรัพยากรการเก็บเกี่ยว และทรัพยากรรถบรรทุกส่วนกลาง โดยเราสามารถแบ่งการจำลองข้อมูล นำเข้านี้ออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

5.1.1 การจำลองแปลงเพาะปลูกอ้อย

ขนาดของแปลงเพาะปลูกอ้อยในประเทศไทยมีความหลากหลายเป็นอย่างมาก โดยมีตั้งแต่ ขนาด 1 ไร่ ไปจนถึงขนาดที่ใหญ่กว่า 100 ไร่ ทั้งยังประกอบไปด้วยพันธุ์อ้อย กรรมวิธีการปลูก และ คุณภาพของอ้อยที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขาดข้อมูลแปลงอ้อยจากพื้นที่เพาะปลูก จริงที่เพียงพอ ด้วยข้อมูลบางส่วนนั้นเป็นความลับ เช่น ตำแหน่งที่ตั้งของแปลงเพาะปลูกอ้อย เกษตรกร หรือปริมาณอ้อยทำสัญญากับโรงงานน้ำตาล ผู้วิจัยจึงมีความจำเป็นต้องทำการจำลอง ปัญหาโดยใช้ข้อมูลทางสถิติที่เคยถูกจัดเก็บไว้ โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ให้ความสนใจปัญหา ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากกรณีการเผาอ้อยก่อนตัด ผู้วิจัยจึงเลือกใช้พื้นที่เพาะปลูกอ้อยในภาค ตะวันออกเฉียงเหนือของไทยซึ่งเป็นหนึ่งในพื้นที่ที่มีความหนาแน่นของการปลูกอ้อยค่อนข้างสูง และ ประสบปัญหาฝุ่นละออง PM 2.5 จากการเผาอ้อยในทุกปีการผลิต เป็นต้นแบบในการจำลองแปลง เพาะปลูกอ้อยสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของฮิวริสติกส์ ซึ่งผู้วิจัยจะพิจารณาในส่วนของแปลง เพาะปลูกของเกษตรกรในพื้นที่ที่มีขนาดตั้งแต่ 2 ไร่ จนถึง 50 ไร่ เท่านั้น เนื่องจากเป็นกลุ่มของ เกษตรกรที่มีปริมาณของผลผลิตไม่คุ้มค่าต่อการจัดซื้อรถตัดอ้อยเป็นของตนเอง และยังคงมีความ จำเป็นต้องแบ่งควาใช้รถตัดอ้อย รวมถึงทรัพยากรอื่น ๆ จากส่วนกลาง ซึ่ง Kaewtrakulpong (2008) ได้ทำการสำรวจพื้นที่ และระบุสัดส่วนของแปลงเพาะปลูกอ้อยในครอบครองของเกษตรกรแต่ละ ขนาดเอาไว้ ดังนี้

- พื้นที่เพาะปลูก 1 – 10 ไร่ คิดเป็น 51.61% ของจำนวนแปลงเพาะปลูกทั้งหมด
- พื้นที่เพาะปลูก 10-20 ไร่ คิดเป็น 29.03% ของจำนวนแปลงเพาะปลูกทั้งหมด
- พื้นที่เพาะปลูกมากกว่า 20 ไร่ คิดเป็น 19.35% ของจำนวนแปลงเพาะปลูกทั้งหมด

จากข้อมูลสัดส่วนแปลงเพาะปลูกอ้อยแต่ละขนาด ผู้วิจัยได้นำมาจัดเรียงในรูปแบบของการ แจกแจงความน่าจะเป็นสะสม (Cumulative Probability Distribution) แล้วทำการสุ่มค่าแบบยูนิ

ฟอร์มเพื่อหาช่วงของขนาดแปลงเพาะปลูกที่จะทำการจำลองขึ้น และเมื่อได้ช่วงของขนาดแปลงเพาะปลูกแล้ว ผู้วิจัยจะทำการสุ่มค่าแบบยูนิฟอร์มภายในช่วงของขนาดแปลงเพาะปลูกนั้นอีกครั้งหนึ่ง โดยจะกำหนดให้แปลงเพาะปลูกที่สุ่มขึ้นถูกรอบครองโดยเกษตรกรไร้อ้อย หนึ่งคนต่อหนึ่งแปลง ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการดำเนินการซ้ำขั้นตอนข้างต้น ไปจนกว่าปริมาณอ้อยรวมจากแปลงเพาะปลูกที่สร้างขึ้นจะมีค่าเท่ากับกำลังการหีบอ้อยของโรงงานน้ำตาลในหนึ่งวัน

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เนื่องจากผู้วิจัยกำหนดพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นเกณฑ์ในการจำลองแปลงเพาะปลูก พันธุ์อ้อยที่ใช้ก็ต้องมีความเหมาะสมกับพื้นที่เช่นเดียวกัน ผู้วิจัยได้กำหนดให้เกษตรกรเลือกใช้อ้อยพันธุ์เดียวกันทั้งหมดเพื่อความสะดวกในการคำนวณ คือ พันธุ์ เค 84-200 ซึ่งเป็นที่นิยมปลูกในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ให้ค่าความหวานค่อนข้างสูง และสามารถปลูกในพื้นที่อาศัยน้ำฝนเพียงอย่างเดียวได้ (อดิศักดิ์ คำนวนศิลป์, 2558) โดยในแปลงเพาะปลูกอ้อยหนึ่ง ๆ ที่จำลองขึ้นในส่วนก่อนหน้าจะถูกสุ่มค่าคุณภาพความหวานของอ้อยแบบยูนิฟอร์มในช่วง 11 - 15 C.C.S

สำหรับแปลงเพาะปลูกอ้อยในประเทศไทยส่วนมากแล้ว มักจะตั้งอยู่ในพื้นที่ที่ห่างจากโรงงานน้ำตาลเป็นระยะทางไม่เกิน 50 กิโลเมตร (พงษ์ศักดิ์ อยู่หุ่น, 2548) เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในขั้นตอนการขนส่ง ซึ่งตำแหน่งที่ตั้งของทุกแปลงเพาะปลูกที่จำลองขึ้นนี้ ก็จะถูกสุ่มแบบยูนิฟอร์มภายในระยะ 2 มิติ ภายในรัศมีห่างจากโรงงานน้ำตาลไม่เกิน 50 กิโลเมตร เช่นเดียวกัน

อย่างไรก็ดี จากการจำลองแปลงเพาะปลูกอ้อยข้างต้นจะเห็นได้ว่า แม้ปริมาณอ้อยที่นำเข้าโรงงานน้ำตาลสูงสุดต่อวันจะมีจำนวนที่เท่ากัน แต่จำนวนแปลงเก็บเกี่ยวอ้อยซึ่งจะถูกตัดแบ่งโดยใช้อัตราบรรทุกสูงสุดของรถบรรทุกเป็นเกณฑ์ตามขั้นตอนการจัดเตรียมข้อมูลในหัวข้อที่ 4.3.4 จะมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก และเนื่องจากข้อจำกัดด้านการตรวจสอบคุณภาพ และการคำนวณค่าอ้อย ทำให้ไม่สามารถรวมอ้อยที่ถูกเก็บเกี่ยวแล้วไม่เต็มคันรถของเกษตรกรตั้งแต่สองรายขึ้นไปเข้าด้วยกันได้ ทั้งนี้ เพื่อเป็นการกำหนดมาตรฐานในการทดสอบประสิทธิภาพของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาการจัดตารางทรัพยากร ทางผู้วิจัยจึงกำหนดขนาดของปัญหาโดยใช้จำนวนของแปลงเก็บเกี่ยวอ้อยที่ถูกตัดแบ่งแล้ว และความสามารถในการค้นหาคำตอบของโปรแกรม CPLEX OPL Solver ซึ่งผู้วิจัยจะใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการค้นหาของฮิวริสติกส์ที่ออกแบบขึ้นเป็นเกณฑ์ โดยจากการทดสอบในเบื้องต้น เราสามารถแบ่งขนาดของปัญหาออกเป็น 3 ขนาด คือ

- ปัญหาขนาดเล็ก: ขนาด 20 แปลงเก็บเกี่ยว (20 คันรถ)
- ปัญหาขนาดกลาง: ขนาด 50 แปลงเก็บเกี่ยว (50 คันรถ)

- **ปัญหาขนาดใหญ่:** ขนาด 150 แปลงเก็บเกี่ยว (150 คันรถ)

5.1.2 การจำลองทรัพยากรการเก็บเกี่ยว

ทรัพยากรการเก็บเกี่ยวภายในระบบที่ออกแบบขึ้นนี้ จัดได้ว่าเป็นทรัพยากรส่วนกลางที่เกษตรกรไร้อ้อยแต่ละรายใช้งานร่วมกัน และสามารถเคลื่อนย้ายไปมาระหว่างแปลงเพาะปลูกได้อย่างอิสระ โดยจากการสำรวจตัวอย่างพบว่า อัตราส่วนของแต่ละทรัพยากรการเก็บเกี่ยวอ้อยในระบบโลจิสติกส์ขาเข้าของอุตสาหกรรมน้ำตาลไทยโดยประมาณ คือ รถตัดอ้อย 5.14% แรงงานตัดอ้อยสด 37.51% และ แรงงานตัดอ้อยไฟไหม้ 57.35% (โอบานุกุล et al., 2555) แต่เนื่องจากผู้วิจัยต้องการสังเกตพฤติกรรมของการจัดสรรทรัพยากรที่เปลี่ยนแปลงไปตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน และเพื่อความสะดวก ผู้วิจัยจึงได้กำหนดปริมาณทรัพยากรการเก็บเกี่ยวโดยใช้จำนวนแปลงเก็บเกี่ยวย่อยที่แตกต่างกันในแต่ละขนาดของปัญหา จากหัวข้อที่ 5.1.1 เป็นเกณฑ์ โดยให้สัดส่วนของปริมาณอ้อยนำเข้าที่มีคิดเป็น 80% ของอัตราการทำงานรวมสูงสุดของทรัพยากรการเก็บเกี่ยว และกำหนดจำนวนของรถบรรทุกอ้อยไว้ที่ 1.5 เท่า ของจำนวนทรัพยากรการเก็บเกี่ยว ซึ่งจะช่วยให้เราได้จำนวนทรัพยากรการเก็บเกี่ยว และขนส่ง ในแต่ละขนาดของปัญหา ดังนี้

- **ปัญหาขนาดเล็ก:** รถตัดอ้อย 1 คัน แรงงานตัดอ้อยสด 2 ทีม แรงงานตัดอ้อยไฟไหม้ 3 ทีม รถบรรทุกอ้อย 9 คัน
- **ปัญหาขนาดกลาง:** รถตัดอ้อย 1 คัน แรงงานตัดอ้อยสด 8 ทีม แรงงานตัดอ้อยไฟไหม้ 11 ทีม รถบรรทุกอ้อย 30 คัน
- **ปัญหาขนาดใหญ่:** รถตัดอ้อย 3 คัน แรงงานตัดอ้อยสด 24 ทีม แรงงานตัดอ้อยไฟไหม้ 33 ทีม รถบรรทุกอ้อย 90 คัน

5.2 โปรแกรมและอุปกรณ์การคำนวณ

ในการคำนวณ และทดสอบประสิทธิภาพของระบบสนับสนุนการปฏิบัติการ ทางผู้วิจัยได้ใช้คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก ซึ่งมีหน่วยประมวลผล Intel® Core™ i7-9750H และ RAM ขนาด 16 Gb. โดยมีโปรแกรมที่ใช้สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของการจัดตารางทรัพยากร คือ

- CPLEX OPL 12.10 Solver สำหรับทดสอบวิธีการหาคำตอบแบบแม่นยำตรง
- MATLAB 2019a สำหรับทดสอบฮิวริสติกส์

ทั้งนี้ ผู้วิจัยจะทำการทดสอบกับปัญหาทั้ง 3 ขนาดดังที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่ 5.1 โดยมีจำนวนชุดของข้อมูลนำเข้า (Instances) ขนาดปัญหาละ 10 ชุด และทำการทดสอบประสิทธิภาพทั้งจากการหาคำตอบโดยใช้วัตถุประสงค์เดียว และหลายวัตถุประสงค์เป็นเกณฑ์

5.3 ผลการทดสอบแบบวัตถุประสงค์เดียว

การทดสอบประสิทธิภาพของการหาผลเฉลยโดยใช้วัตถุประสงค์เดียวเป็นเกณฑ์ จะทำโดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ และระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณระหว่างการหาคำตอบด้วยวิธีแมนตรงกับการหาคำตอบด้วยฮิวริสติกส์ของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และเพื่อความสมจริงในการจำลองสถานการณ์การวางแผนการจัดตารางทรัพยากรซึ่งมักจะมีเวลาว่างแผนที่จำกัด ผู้วิจัยได้กำหนดระยะเวลาการคำนวณสูงสุดในการหาคำตอบเอาไว้ที่ 3 ชั่วโมงต่อหนึ่งฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ทั้งนี้ ผลการทดสอบประสิทธิภาพจากการหาคำตอบจำนวน 10 รอบ (Repetition) ต่อชุดข้อมูลนำเข้า รวมทั้งสิ้น 10 ชุดข้อมูลต่อหนึ่งขนาดปัญหา ได้ผลดังนี้คือ

5.3.1 ปัญหาขนาดเล็ก

สำหรับปัญหาขนาดเล็ก เราสามารถแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบระหว่างวิธีแมนตรงกับฮิวริสติกส์ที่ออกแบบขึ้นได้ดังแสดงในตารางที่ 5-2

ตารางที่ 5-2 ตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาดเล็ก

Instances	Methods	Results	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
1	Direct Method	Obj Val	5,886.81	6,750.31	79,475.26	10,961.39
		(%Gap)	-	0.44%	-	0.95%
		CPU Times	415.61	10,800	738.81	10,800
	Heuristic	Best Obj	5,886.81	6,756.52	79,475.26	10,958.73
		Avg Obj	5,886.81	6,756.06	79,475.26	10,959.26
		Sd of Obj	0	1.45	0	1.12
		Avg CPU Times	1.37	37.07	1.53	21.26
	Differences	Sd of CPU Times	0.92	26.68	1.07	23.77
		Best Obj	0%	+0.09%	0%	+0.02%
		Avg Obj	0%	+0.09%	0%	+0.02%
		CPU Times	+99.67%	+99.66%	+99.79%	+99.8%

ตารางที่ 5-2 (ต่อ) ตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาดเล็ก

Instances	Methods	Results	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
2	Direct Method	Obj Val	4,508.52	4,837.02	75,003.32	9,481.08
		(%Gap)	-	0.32%	-	1.81%
		CPU Times	283.82	10,800	1020.85	10,800
	Heuristic	Best Obj	4,508.52	4,840.38	75,003.32	9,452.50
		Avg Obj	4,508.52	4,839.89	75,003.32	9,456.65
		Sd of Obj	0	0.51	0	4.9
		Avg CPU Times	14.37	26	4.78	37.01
		Sd of CPU Times	14.48	15.32	3.11	27.92
	Differences	Best Obj	0%	+0.07%	0%	+0.3%
		Avg Obj	0%	+0.06%	0%	+0.26%
		CPU Times	+94.94%	+99.76%	+99.53%	+99.66%
	3	Direct Method	Obj Val	5,133.59	5,218.92	80,461.36
(%Gap)			-	0.65%	-	0.70%
CPU Times			1510.43	10,800	271.61	10,800
Heuristic		Best Obj	5,133.59	5,225.86	80,461.36	12,853.35
		Avg Obj	5,133.59	5,224.47	80,461.36	12,858.71
		Sd of Obj	0	2.92	0	9.65
		Avg CPU Times	2.34	14.22	1.5	29.56
		Sd of CPU Times	2.54	16.67	1.11	26.97
Differences		Best Obj	0%	+0.13%	0%	0%
		Avg Obj	0%	+0.11%	0%	-0.04%
		CPU Times	+99.85%	+99.87%	+99.45%	+99.73%
4		Direct Method	Obj Val	4,651.63	4,760.92	72,627.77
	(%Gap)		-	1.48%	-	1.43%
	CPU Times		1095.81	10,800	277.44	10,800
	Heuristic	Best Obj	4,651.63	4,795.44	72,627.77	6,559.97
		Avg Obj	4,651.63	4,782.07	72,627.77	6,605.08
		Sd of Obj	0	10.75	0	27.23
		Avg CPU Times	8.06	21.67	16.98	72.17
		Sd of CPU Times	11.44	15.91	21	65.52
	Differences	Best Obj	0%	+0.73%	0%	+0.17%
		Avg Obj	0%	+0.44%	0%	-0.51%
		CPU Times	+99.26%	+99.8%	+93.88%	+99.33%

ตารางที่ 5-2 (ต่อ) ตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาดเล็ก

Instances	Methods	Results	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
5	Direct Method	Obj Val	5,344.26	-	77,419.87	9,453.54
		(%Gap)	-	-	-	1.30%
		CPU Times	708.05	10,800	1038.72	10,800
	Heuristic	Best Obj	5,344.26	5,886.52	77,419.87	9,453.54
		Avg Obj	5,344.26	5,886.52	77,419.87	9,453.54
		Sd of Obj	0	0	0	0
		Avg CPU Times	2.05	5.31	3.07	16
		Sd of CPU Times	1.29	6.95	1.48	25.34
		Differences	Best Obj	0%	-	0%
	Avg Obj		0%	-	0%	0%
	CPU Times		+99.71%	+99.95%	+99.7%	+99.85%
	6	Direct Method	Obj Val	5,139.37	4,779.39	81,789.41
(%Gap)			-	10.49%	2.72%	1.72%
CPU Times			384.2	10,800	10800	10,800
Heuristic		Best Obj	5,139.37	5,226.52	79,561.73	12,247.02
		Avg Obj	5,139.37	5,200.55	79,562.60	12,260.29
		Sd of Obj	0	19.95	2.75	19.79
		Avg CPU Times	1.96	23.01	15.98	24.97
		Sd of CPU Times	1.03	25.02	17.15	32.59
Differences		Best Obj	0%	+9.36%	+2.8%	+0.17%
		Avg Obj	0%	+8.81%	+2.8%	+0.07%
		CPU Times	+99.49%	+99.79%	+99.85%	+99.77%
7		Direct Method	Obj Val	4,916.06	5,374.17	70,610.73
	(%Gap)		-	0.37%	-	3.30%
	CPU Times		575.92	10,800	734.54	10,800
	Heuristic	Best Obj	4,916.06	5,373.59	70,610.73	4,866.24
		Avg Obj	4,916.06	5,365.87	70,610.73	4,883.25
		Sd of Obj	0	8.99	0	16.5
		Avg CPU Times	2.81	24.22	3.52	37.06
		Sd of CPU Times	2.02	24.85	2.32	64.34
	Differences	Best Obj	0%	-0.01%	0%	+0.47%
		Avg Obj	0%	-0.15%	0%	+0.12%
		CPU Times	+99.51%	+99.78%	+99.52%	+99.66%

ตารางที่ 5-2 (ต่อ) ตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาดเล็ก

Instances	Methods	Results	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
8	Direct Method	Obj Val	4,877.02	6,351.63	75,170.93	7,392.23
		(%Gap)	-	0.17%	-	1.14%
		CPU Times	891.03	10,800	256.08	10,800
	Heuristic	Best Obj	4,877.02	6,351.63	75,170.93	7,390.76
		Avg Obj	4,877.02	6,350.63	75,170.93	7,390.93
		Sd of Obj	0	3.15	0	0.27
		Avg CPU Times	10.36	37.73	3.18	29.23
		Sd of CPU Times	14.46	21.97	2.67	35.21
		Differences	Best Obj	0%	0%	0%
	Avg Obj		0%	-0.02%	0%	+0.02%
	CPU Times		+98.84%	+99.65%	+98.76%	+99.73%
	9	Direct Method	Obj Val	4,411.65	3,842.30	75,861.21
(%Gap)			-	6.17%	-	1.18%
CPU Times			594.46	10,800	269.48	10,800
Heuristic		Best Obj	4,411.65	4,056.84	75,861.21	8,651.05
		Avg Obj	4,411.65	4,054.68	75,861.21	8,686.88
		Sd of Obj	0	5.76	0	22.95
		Avg CPU Times	3.63	27.61	2.24	56.15
		Sd of CPU Times	1.87	24.48	2.11	45.69
		Differences	Best Obj	0%	+5.58%	0%
Avg Obj			0%	+5.53%	0%	-0.41%
CPU Times			+99.39%	+99.74%	+99.17%	+99.48%
10		Direct Method	Obj Val	4,314.83	3,901.05	69,334.89
	(%Gap)		-	8.85%	-	2.38%
	CPU Times		926.2	10,800	700.556	10,800
	Heuristic	Best Obj	4,314.83	4,222.41	69,334.89	5,764.93
		Avg Obj	4,314.83	4,215.28	69,334.89	5,776.78
		Sd of Obj	0	7.7	0	8.3
		Avg CPU Times	3.86	30.91	2.09	34.57
		Sd of CPU Times	2.66	32.23	1.41	28.62
		Differences	Best Obj	0%	+8.24%	0%
	Avg Obj		0%	+8.06%	0%	-0.09%
	CPU Times		+99.58%	+99.71%	+99.7%	+99.68%

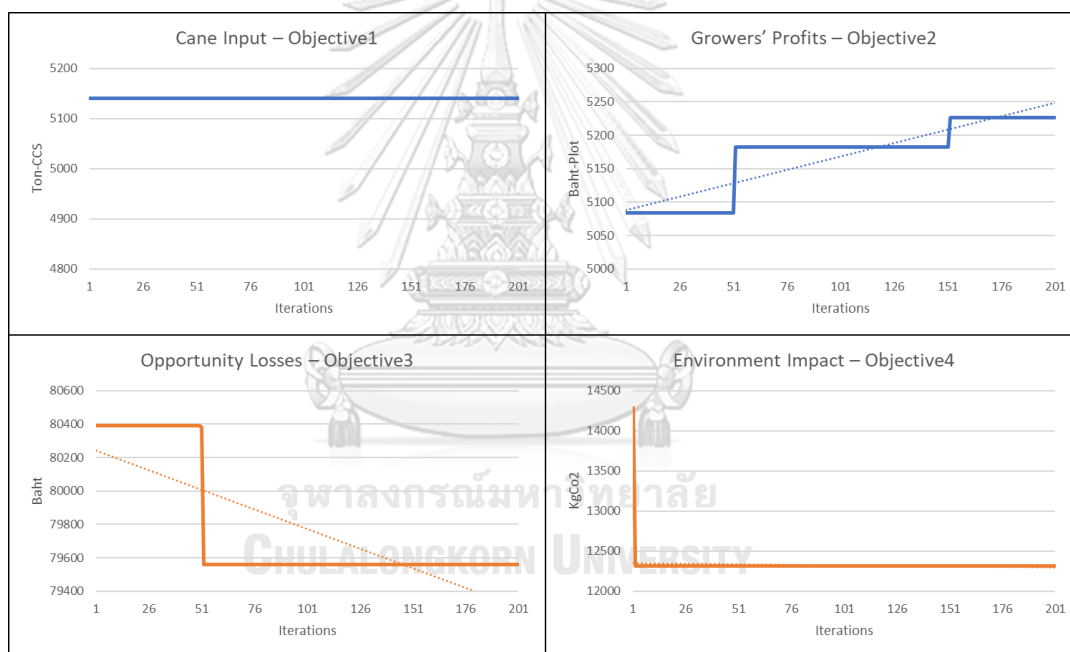
จากตารางที่ 5-2 แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพของวิธีแมนตรงแบบวัตถุประสงค์เดียวสำหรับ ปัญหาขนาดเล็กนั้นให้ผลการค้นหาที่ดีสำหรับกรณีที่ใช้ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุด และค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุดเป็นเกณฑ์ โดยค่าผลเฉลยที่ได้เกือบทั้งหมดเป็นผลเฉลยที่ดีที่สุด (Optimal Solutions) และใช้เวลาในการค้นหาคำตอบตั้งแต่ 256.08 วินาที ถึง 1,510.43 วินาที (ยกเว้นเพียงชุดข้อมูลนำเข้าที่ 6 ที่ใช้เวลาในการหาผลเฉลยด้วยเกณฑ์ค่าสูญเสียโอกาสของ อุตสาหกรรมต่ำสุด จนครบ 3 ชั่วโมง และมีระยะห่างจากค่าเป้าหมาย (%Gap) ที่ 2.72%) แต่ในส่วนของ ผลการค้นหาสำหรับวัตถุประสงค์สัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุด และปริมาณการปล่อยแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด วิธีแมนตรงจะใช้เวลาการค้นหาคำตอบจนครบกำหนด 3 ชั่วโมงในทุก ๆ ชุดข้อมูลนำเข้า และไม่มีผลเฉลยใดเลยที่เป็นผลเฉลยที่ดีที่สุด โดยจะมีค่าระยะห่างจากเป้าหมาย ตั้งแต่ร้อยละน้อยที่สุด 0.17% จากชุดข้อมูลนำเข้าที่ 8 ไปจนถึงมากที่สุด 8.85% จากชุดข้อมูลนำเข้าที่ 10 และยังมีในกรณีของชุดข้อมูลนำเข้าที่ 5 ซึ่งใช้วัตถุประสงค์สัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุดเป็นเกณฑ์ ที่ไม่พบผลเฉลยภายในระยะเวลาที่กำหนดอีกด้วย

เมื่อเปรียบเทียบกับการค้นหาผลเฉลยด้วยวิธีแมนตรงแล้ว ค่าผลเฉลยที่ดีที่สุดของฮิวริสติกส์จาก การค้นหาคำตอบเป็นจำนวน 10 ครั้ง จะให้ค่าที่ดีกว่า หรือเท่ากับวิธีแมนตรงในเกือบทุกชุดข้อมูล (ยกเว้นชุดข้อมูลนำเข้าที่ 7 สำหรับวัตถุประสงค์สัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุด ที่ให้ค่าผลเฉลยที่แย่ กว่าวิธีแมนตรงอยู่ 0.01%) โดยผลเฉลยที่ดีกว่ามากที่สุดเป็นของการหาผลเฉลยที่ใช้สัดส่วนกำไรของ เกษตรกรสูงสุดเป็นเกณฑ์ในชุดข้อมูลที่ 6 ซึ่งผลกำไรเฉลี่ยต่อไร่ของเกษตรกรที่มากขึ้นกว่าผลเฉลยที่ได้ จากวิธีแมนตรงถึง 10.49% ในขณะที่เดียวกัน หากพิจารณาที่ค่าของผลเฉลยเฉลี่ยที่ได้ จะพบว่า มีเพียง บางกรณีเท่านั้นที่ให้ผลเฉลยที่แย่กว่าวิธีแมนตรง โดยส่วนต่างระหว่างผลเฉลยเฉลี่ยของฮิวริสติกส์กับ วิธีแมนตรงสำหรับปัญหาขนาดเล็ก มีค่าอยู่ระหว่าง - 0.51% จนถึง 8.81% ซึ่งผลเฉลยที่แตกต่างกัน ข้างต้นนี้ล้วนเป็นผลเฉลยที่เกิดจากกรณีที่ใช้สัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุด หรือปริมาณการปล่อยแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุดเป็นเกณฑ์ทั้งสิ้น และเป็นกรณีเดียวกันกับที่วิธีแมนตรงไม่สามารถหาผล เฉลยที่ดีที่สุดได้

อย่างไรก็ดี ความแตกต่างที่ชัดเจนที่สุดของการหาผลเฉลยด้วยฮิวริสติกส์และวิธีแมนตรงคือ ระยะเวลาในการค้นหา โดยจากระยะเวลาการค้นหาสูงสุด 3 ชั่วโมงที่กำหนดไว้ ฮิวริสติกส์ใช้เวลาใน การค้นหาคำตอบโดยเฉลี่ยต่ำที่สุด 1.37 วินาที และสูงที่สุด 72.17 วินาที น้อยกว่าเวลาน้อยที่สุด ของวิธีแมนตรงที่ 256.08 วินาทีเป็นอย่างมาก ซึ่งสามารถคิดเป็นส่วนต่างด้านระยะเวลาการค้นหาที่ดี ขึ้นในหน่วยของเปอร์เซ็นต์เทียบกับวิธีแมนตรง ได้ระหว่าง 93.88% (ชุดข้อมูลนำเข้าที่ 4 ใน

วัตถุประสงค์ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด) จนถึง 99.95% (ชุดข้อมูลนำเข้าที่ 5 ใน วัตถุประสงค์สัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุด)

หากเราพิจารณาในส่วนของพฤติกรรมการลู่เข้าหาคำตอบของฮิวริสติกส์ จะพบว่า อัตราการลู่เข้าหาคำตอบของอนุภาคสำหรับปัญหาขนาดเล็กนั้นมีความรวดเร็วเป็นอย่างมาก โดยมักจะได้ผลเฉลยที่ให้ค่าเทียบเท่า หรือดีกว่าผลเฉลยจากวิธีแมนตรงตั้งแต่ภายในขั้นตอนของการสร้างอนุภาคในหัวข้อที่ 4.4.5.1 (*PARTICLEGENERATE*) จึงอาจจะทำให้ไม่เห็นถึงพฤติกรรมการลู่เข้าหาคำตอบโดยใช้หลักการของ PSO ในการค้นหาเท่าที่ควร ทั้งนี้ ตัวอย่างกราฟแสดงการลู่เข้าหาคำตอบของฮิวริสติกส์ในแต่ละเกณฑ์วัตถุประสงค์ของปัญหาการจัดตารางทรัพยากรสำหรับปัญหาขนาดเล็กสามารถแสดงได้ด้วยรูปภาพที่ 5.1



รูปภาพที่ 5.1 กราฟแสดงลำดับการลู่เข้าหาคำตอบของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาขนาดเล็ก

จากรูปภาพที่ 5.1 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงตัวอย่างของจำนวนรอบการคำนวณ (Iterations) ที่ใช้ในการค้นหา และการพัฒนาหาคำตอบของฮิวริสติกส์ที่ออกแบบขึ้นจากชุดข้อมูลนำเข้าที่ 6 รอบการค้นหาค่าที่ 2 โดยแกน X แสดงจำนวนของรอบการคำนวณ และแกน Y แสดงค่าผลเฉลยตามแต่ละวัตถุประสงค์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ จะพบว่า ในกรณีของปัญหาขนาดเล็กนี้มีจำนวนครั้งของการพัฒนาผลเฉลยที่น้อย และการเจอผลเฉลยที่ดีที่สุดโดยรวม (Global Optimum) เกิดทั้งหมดเกิดจากการทำ Multi-Start หรือการเรียกใช้โมดูล *PARTICLEGENERATE* เพื่อสร้างอนุภาคใหม่ โดยมีเพียง

กรณีของการใช้วัตถุดิบประสงค์ปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุดเป็นเกณฑ์เท่านั้นที่มีการพัฒนาของผลเฉลยจากการค้นหาเฉพาะที่ของอนุภาค ซึ่งพบผลเฉลยที่ดีที่สุดโดยรวมในรอบการคำนวณที่ 1

ส่วนพฤติกรรมการจัดการตารางทรัพยากรตามเกณฑ์วัตถุดิบประสงค์ทั้งของฮิวริสติกส์ และวิธีแมนตรง สามารถนำมาเขียนเปรียบเทียบจำนวนแปลงอ้อยที่ถูกมอบหมายให้กับทรัพยากรแต่ละประเภทในชุดข้อมูลนำเข้าต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 5-3 โดยในกรณีของวัตถุดิบประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุด จะมีพฤติกรรมการจัดการที่เลือกใช้แรงงานตัดอ้อยไฟไหม้ และแรงงานตัดอ้อยสดจนครบอัตราการทำงานสูงสุดในหนึ่งวันก่อน แล้วจึงใช้รถตัดอ้อยในการตัดแปลงอ้อยที่เหลืออยู่ ในขณะที่กรณีของวัตถุดิบประสงค์สัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุด ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด และปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด จะมีพฤติกรรมการจัดการที่เลือกใช้แรงงานตัดอ้อยสดจนครบอัตราการทำงานสูงสุดในหนึ่งวันก่อน แล้วจึงเลือกใช้ใช้งานรถตัดอ้อย และเลือกแรงงานตัดอ้อยไฟไหม้เป็นลำดับสุดท้าย อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยพบว่าผลเฉลยที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธีแมนตรงในชุดข้อมูลนำเข้าบางส่วน มีจำนวนแปลงอ้อยที่ถูกตัดโดยทีมตัดอ้อยไฟไหม้มากกว่าชุดข้อมูลนำเข้าอื่น ๆ อันเนื่องมาจากการใช้งานทรัพยากรแรงงานตัดอ้อยสด หรือรถตัดอ้อยได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ เช่น ชุดข้อมูลนำเข้าที่ 6 ในส่วนของวัตถุดิบประสงค์สัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุด และค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด ซึ่งเป็นส่วนที่สามารถอธิบายค่าระยะห่างจากค่าเป้าหมายที่เกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 5-3 ตารางแสดงสัดส่วนการมอบหมายงานให้กับทรัพยากรสำหรับปัญหาขนาดเล็ก

Instances	Cane Input						Growers' Profits					
	OPL			Heuristic			OPL			Heuristic		
	Machine	Green	Burnt	Machine	Green	Burnt	Machine	Green	Burnt	Machine	Green	Burnt
1	7	4	9	7	4	9	14	4	2	14	4	2
2	7	4	9	7	4	9	14	4	2	14	4	2
3	7	4	9	7	4	9	14	4	2	14	4	2
4	7	4	9	7	4	9	14	4	2	14	4	2
5	7	4	9	7	4	9	-	-	-	14	4	2
6	7	4	9	7	4	9	14	3	3	14	4	2
7	7	4	9	7	4	9	14	4	2	14	4	2
8	7	4	9	7	4	9	14	4	2	14	4	2
9	7	4	9	7	4	9	14	4	2	14	4	2
10	7	4	9	7	4	9	13	4	3	14	4	2

ตารางที่ 5-3 (ต่อ) ตารางแสดงสัดส่วนการมอบหมายงานให้กับทรัพยากรสำหรับปัญหาขนาดเล็ก

Instances	Opportunity Losses						Environmental Impact					
	OPL			Heuristic			OPL			Heuristic		
	Machine	Green	Burnt	Machine	Green	Burnt	Machine	Green	Burnt	Machine	Green	Burnt
1	14	4	2	14	4	2	14	4	2	14	4	2
2	14	4	2	14	4	2	14	4	2	14	4	2
3	14	4	2	14	4	2	14	4	2	14	4	2
4	14	4	2	14	4	2	14	4	2	14	4	2
5	14	4	2	14	4	2	14	4	2	14	4	2
6	12	4	4	14	4	2	14	4	2	14	4	2
7	14	4	2	14	4	2	14	4	2	14	4	2
8	14	4	2	14	4	2	14	4	2	14	4	2
9	14	4	2	14	4	2	14	4	2	14	4	2
10	14	4	2	14	4	2	14	4	2	14	4	2

จากตารางที่ 5-3 จะเห็นได้ว่า ไม่มีความแตกต่างมากนักระหว่างจำนวนของแปลงอ้อยที่มอบหมายให้กับทรัพยากรการเก็บเกี่ยวประเภทหนึ่ง ๆ ในผลเฉลยของฮิวริสติกส์ และวิธีแมนตรง โดยความแตกต่างระหว่างของจำนวนแปลงอ้อยในผลเฉลยจะเกิดขึ้นในส่วนของการจัดลำดับการตัดอ้อย ภายในทรัพยากรเก็บเกี่ยวเดียวกัน หรือการสลับแปลงอ้อยในความดูแลระหว่างสองทรัพยากรที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของทรัพยากรที่ต่างออกไป และเปลี่ยนแปลงสัดส่วนกำไรของเกษตรกรได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.3.2 ปัญหาขนาดกลาง

สำหรับปัญหาขนาดกลาง ผู้วิจัยพบว่าการค้นหาคำตอบโดยวิธีแมนตรง ด้วย CPLEX OPL ไม่สามารถหาผลเฉลยได้ แม้กระทั่งกับกรณีวัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุด หรือค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด ซึ่งสามารถหาผลเฉลยที่ดีที่สุดได้ในเวลาไม่นานสำหรับปัญหาขนาดเล็ก อย่างไรก็ตาม เราสามารถแสดงผลของการค้นหาคำตอบด้วยฮิวริสติกส์ที่ออกแบบขึ้นได้ดังแสดงในตารางที่ 5-4

ตารางที่ 5-4 ตารางแสดงประสิทธิภาพการหาคำตอบของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาขนาดกลาง

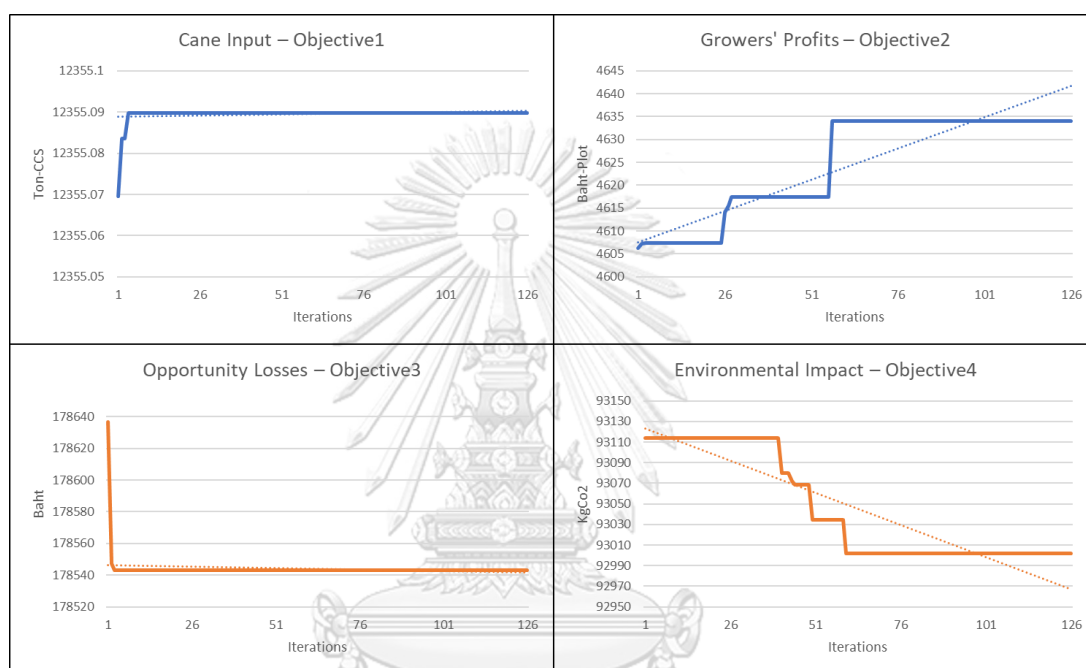
Instances	Results	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
1	Best Obj	12,031.01	4,835.39	179,035.31	92,194.34
	Avg Obj	12,031.01	4,829.29	179,035.31	92,269.11
	Sd of Obj	0	5.14	0	48.92
	Avg CPU Times	59.69	95	84.4	73.55
	Sd of CPU Times	48.8	22.81	41.13	47.45
2	Best Obj	13,341.69	5,413.09	193,963.44	107,792.78
	Avg Obj	13,341.68	5,345.56	194,099.40	107,876.88
	Sd of Obj	0.03	33.05	90.22	54.74
	Avg CPU Times	38.9	30.55	32.43	42.75
	Sd of CPU Times	13.33	12.28	20.28	19.98
3	Best Obj	11,897.66	4,720.31	175,596.35	89,769.94
	Avg Obj	11,897.66	4,717.34	175,598.88	89,850.83
	Sd of Obj	0	2.76	6.89	68.54
	Avg CPU Times	49.34	88.17	69.96	56.51
	Sd of CPU Times	22.56	15.85	16.32	25
4	Best Obj	11,825.35	4,367.79	184,690.96	98,906.49
	Avg Obj	11,825.35	4,352.40	184,691.38	99,102.31
	Sd of Obj	0	6.99	0.68	99.01
	Avg CPU Times	51.97	111	97.6	46.93
	Sd of CPU Times	20.57	47.5	49.4	15.04
5	Best Obj	12,262.96	5,198.21	190,056.50	104,663.04
	Avg Obj	12,262.96	5,189.73	190,057.37	104,744.60
	Sd of Obj	0	8.33	1.18	60.07
	Avg CPU Times	52.65	84.41	76.28	57.49
	Sd of CPU Times	19.68	29.7	18.22	38.04
6	Best Obj	12,528.04	4,916.25	175,014.92	87,433.74
	Avg Obj	12,528.04	4,904.68	175,014.92	87,574.80
	Sd of Obj	0	11.04	0	125.78
	Avg CPU Times	57.08	104.85	100.07	94.9
	Sd of CPU Times	11.81	18.05	40.14	45.74

ตารางที่ 5-4 (ต่อ) ตารางแสดงประสิทธิภาพการหาคำตอบของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาขนาดกลาง

Instances	Results	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
7	Best Obj	13,505.66	5,370.89	179,713.47	92,759.12
	Avg Obj	13,505.66	5,354.81	179,713.96	92,838.09
	Sd of Obj	0	11.81	0.97	86.56
	Avg CPU Times	64.75	120.52	86.95	54.26
	Sd of CPU Times	34.93	43.5	38.09	27.69
8	Best Obj	12,451.68	5,026.63	179,615.33	92,518.64
	Avg Obj	12,451.68	5,013.31	179,615.33	92,564.98
	Sd of Obj	0	11.91	0	44.44
	Avg CPU Times	72.58	98.05	96.04	91.58
	Sd of CPU Times	37.08	18.05	35.55	65.18
9	Best Obj	12,355.09	4,638.14	178,543.22	93,001.58
	Avg Obj	12,355.09	4,633.23	178,543.38	93,131.26
	Sd of Obj	0.01	10.54	0.31	108.76
	Avg CPU Times	63.44	103.27	66.57	92.71
	Sd of CPU Times	52.22	22.65	21.41	48.97
10	Best Obj	13,154.63	5,551.27	195,218.00	108,492.05
	Avg Obj	13,154.63	5,547.26	195,218.02	108,535.43
	Sd of Obj	0	1.95	0.09	29.88
	Avg CPU Times	64.3	125.9	90.72	53.34
	Sd of CPU Times	28.31	108.13	43.35	24.61

จากตารางที่ 5-4 แสดงให้เห็นว่า ผลเฉลี่ยของวิธีการค้นหาคำตอบด้วยฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาขนาดกลางโดยใช้วัตถุประสงค์เดียวเป็นเกณฑ์นั้นให้ยังค่าคำตอบที่เกาะกลุ่มกัน ด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดเพียง 0.24% จากค่าผลเฉลี่ยเฉลี่ย โดยผลเฉลี่ยที่ได้จากการใช้วัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุด และค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุดเป็นเกณฑ์ มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดที่ 0.03% ซึ่งมีความสอดคล้องกันกับในปัญหาขนาดเล็กที่ให้ค่าผลเฉลี่ยที่ดีที่สุด และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำสำหรับสองวัตถุประสงค์ข้างต้น นอกจากนี้ ในส่วนของระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ ฮิวริสติกส์ที่ออกแบบขึ้นใช้เวลาโดยเฉลี่ยในการรู้เข้าหาคำตอบ ตั้งแต่ร้อยละที่ 30.55 วินาที ในชุดข้อมูลนำเข้าที่ 2 ในกรณีที่ใช้วัตถุประสงค์สัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุดเป็นเกณฑ์ ไปจนถึงมากที่สุดที่ 125.90 วินาที ในชุดข้อมูลนำเข้าที่ 10 ที่ใช้วัตถุประสงค์สัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุดเป็นเกณฑ์ โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะเวลาในการหาคำตอบอยู่ระหว่าง 17% ถึง 86% ของระยะเวลาที่ใช้การค้นหาคำตอบเฉลี่ย

เมื่อพิจารณาในส่วนของพฤติกรรมการลู่เข้าหาคำตอบของฮิวริสติกส์ ผู้วิจัยพบว่าอัตราการลู่เข้าหาคำตอบของอนุภาคสำหรับปัญหาขนาดกลางนั้นแม้ว่าจะใช้ระยะเวลาในการค้นหาสูงสุดที่นานขึ้นกว่าปัญหาขนาดเล็กอยู่ 74.45% ในขณะที่จำนวนแปลงเก็บเกี่ยวซึ่งต้องวางแผนเพิ่มขึ้นถึง 150% ตัวอย่างกราฟแสดงการลู่เข้าหาคำตอบของฮิวริสติกส์ในแต่ละเกณฑ์ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาการจัดตารางทรัพยากรสำหรับปัญหาขนาดกลาง สามารถแสดงได้ด้วยรูปภาพที่ 5.2



รูปภาพที่ 5.2 กราฟแสดงลำดับการลู่เข้าหาคำตอบของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาขนาดกลาง

จากรูปภาพที่ 5.2 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงตัวอย่างของจำนวนรอบการคำนวณที่ใช้ในการค้นหา และการพัฒนาค่าคำตอบของฮิวริสติกส์ที่ออกแบบขึ้นจากชุดข้อมูลนำเข้าที่ 9 รอบการค้นหาที่ 8 โดยแกน X แสดงจำนวนของรอบการคำนวณ และแกน Y แสดงค่าผลเฉลยตามแต่ละวัตถุประสงค์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ จะพบว่า ในกรณีของปัญหาขนาดกลางนี้มีการพัฒนาของผลเฉลยทั้งระหว่างรอบการคำนวณของ PSO และการทำ Multi-Start ด้วยโมดูล *PARTICLEGENERATE* เมื่อครบรอบการคำนวณที่กำหนด (*RndIter*) โดยการพัฒนาของผลเฉลยระหว่างรอบการคำนวณของ PSO เช่นในกรณีที่ใช้เกณฑ์วัตถุประสงค์สัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุด หรือปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด ช่วยให้เราเห็นถึงอิทธิพลของโมดูลการค้นหาเฉพาะที่ (*LOCALSEARCH*) ที่มีต่อการพัฒนาคำตอบของปัญหาที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งทำให้การสร้างผลเฉลยเริ่มต้นของอนุภาคให้ค่าที่ห่างจากผลเฉลยที่ดีที่สุดโดยรวม

ทั้งนี้ พฤติกรรมการจัดตารางทรัพยากรตามเกณฑ์วัตถุประสงค์ของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาขนาดกลาง สามารถนำมาเขียนแสดงจำนวนแปลงอ้อยที่ถูกมอบหมายให้กับทรัพยากรแต่ละประเภทในชุดข้อมูลนำเข้าต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 5-5

ตารางที่ 5-5 ตารางแสดงสัดส่วนการมอบหมายงานให้กับทรัพยากรสำหรับปัญหาขนาดกลาง

Instances	Cane Input			Growers' Profits		
	Machine	Green	Burnt	Machine	Green	Burnt
1	1	16	33	14	16	20
2	1	16	33	14	16	20
3	1	16	33	14	16	20
4	1	16	33	14	16	20
5	1	16	33	14	16	20
6	1	16	33	14	16	20
7	1	16	33	14	16	20
8	1	16	33	14	16	20
9	1	16	33	14	16	20
10	1	16	33	14	16	20
Instances	Opportunity Losses			Environmental Impact		
	Machine	Green	Burnt	Machine	Green	Burnt
1	14	16	20	14	16	20
2	14	16	20	14	16	20
3	14	16	20	14	16	20
4	14	16	20	14	16	20
5	14	16	20	14	16	20
6	14	16	20	14	16	20
7	14	16	20	14	16	20
8	14	16	20	14	16	20
9	14	16	20	14	16	20
10	14	16	20	14	16	20

จากตารางที่ 5-5 จะพบว่าพฤติกรรมการเลือกใช้ทรัพยากรในปัญหาขนาดกลางไม่มีความแตกต่างกับในปัญหาขนาดเล็กมากนัก คือ ในกรณีของวัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุด จะมี

พฤติกรรมการจัดตารางที่เลือกใช้แรงงานตัดอ้อยไฟไหม้ และแรงงานตัดอ้อยสดจนครบอัตราการทำงานสูงสุดในหนึ่งวันก่อน แล้วจึงใช้รถตัดอ้อยในการตัดแปลงอ้อยที่เหลืออยู่ ในขณะที่กรณีของวัตถุประสงค์สัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุด ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด และปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด จะมีพฤติกรรมการจัดตารางที่เลือกใช้แรงงานตัดอ้อยสดจนครบอัตราการทำงานสูงสุดในหนึ่งวันก่อน แล้วจึงเลือกใช้งานรถตัดอ้อย และเลือกแรงงานตัดอ้อยไฟไหม้ เป็นลำดับสุดท้าย ความแตกต่างของผลเฉลยในแต่ละรอบการค้นหาจึงเกิดจากการจัดลำดับการตัดอ้อย และแปลงอ้อยที่มอบหมายให้กับทรัพยากรหนึ่ง ๆ เท่านั้น

5.3.3 ปัญหาขนาดใหญ่

จากการค้นหาคำตอบโดยวิธีแมนตรงสำหรับปัญหาขนาดใหญ่ ด้วย CPLEX OPL พบว่าไม่สามารถหาผลเฉลยได้ในทุกเกณฑ์วัตถุประสงค์เช่นเดียวกับปัญหาขนาดกลาง ด้วยทรัพยากรการคำนวณที่ไม่เพียงพอกับขนาดของปัญหา โดยเราสามารถแสดงผลของการค้นหาคำตอบด้วยฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาขนาดใหญ่ได้ดังตารางที่ 5-6

ตารางที่ 5-6 ตารางแสดงประสิทธิภาพการหาคำตอบของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาขนาดใหญ่

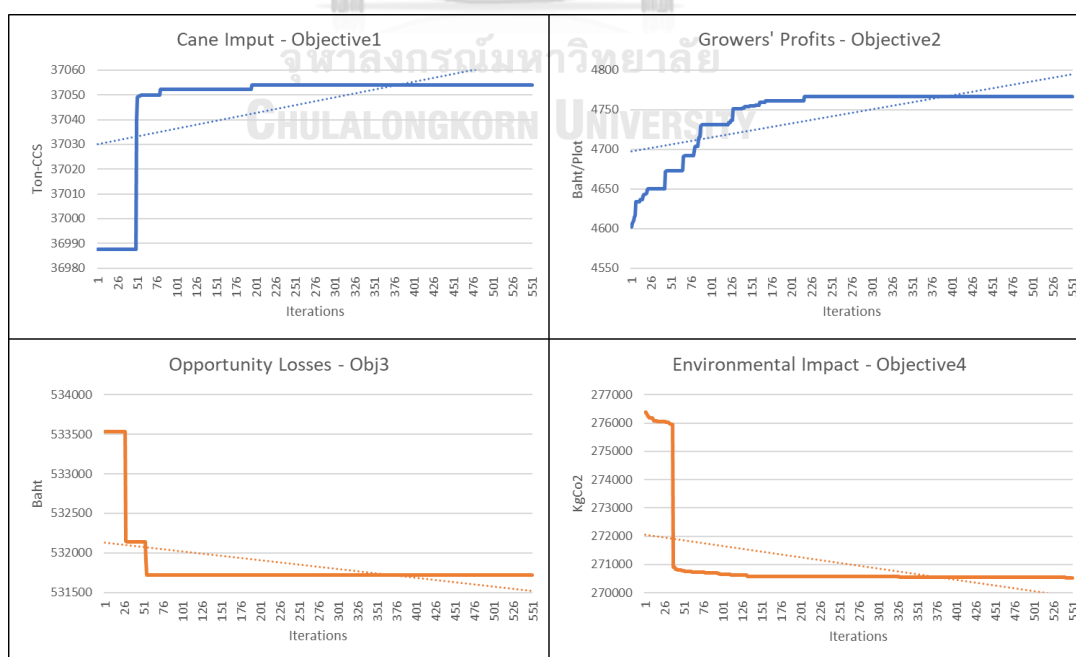
Instances	Cat	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
1	Best Obj	37,053.98	4,778.94	531,377.62	270,381.33
	Avg Obj	37,048.47	4,732.96	531,930.37	271,853.30
	Sd of Obj	5.61	34.72	480.07	4422.51
	Avg CPU Times	597.39	341.91	211.17	798.62
	Sd of CPU Times	319.84	146.72	68.66	367.83
2	Best Obj	36,001.70	4,706.06	537,380.09	276,620.02
	Avg Obj	35,996.17	4,642.33	537,711.85	277,330.64
	Sd of Obj	4.05	45.65	480.88	1949.84
	Avg CPU Times	372.55	256.94	222.03	669.11
	Sd of CPU Times	325.42	53.25	49.77	408.54
3	Best Obj	34,988.29	4,397.18	536,324.56	276,296.73
	Avg Obj	34,976.40	4,338.46	536,770.84	276,361.81
	Sd of Obj	9.85	53.42	356.23	47.97
	Avg CPU Times	365.5	312.45	174.02	711.13
	Sd of CPU Times	218.53	156.87	31.13	306.4

ตารางที่ 5-6 (ต่อ) ตารางแสดงประสิทธิภาพการหาคำตอบของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาขนาดใหญ่

Instances	Cat	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
4	Best Obj	35,767.48	5,000.28	543,303.87	284,640.22
	Avg Obj	35,754.92	4,960.02	544,113.20	284,685.50
	Sd of Obj	8.02	22.69	812.89	37.71
	Avg CPU Times	413.12	345.58	257.05	831.29
	Sd of CPU Times	261.75	125.89	124.5	311
5	Best Obj	41,202.99	5,676.42	567,844.92	307,636.59
	Avg Obj	41,192.59	5,638.21	568,235.70	307,749.46
	Sd of Obj	10.71	46.85	361.32	98.13
	Avg CPU Times	463.8	269.64	180.81	710.72
	Sd of CPU Times	348.59	71.05	34.79	319.72
6	Best Obj	36,833.73	4,944.78	531,280.19	269,791.03
	Avg Obj	36,818.91	4,908.80	531,812.34	270,516.77
	Sd of Obj	9.74	32.11	507.01	1922.82
	Avg CPU Times	390.98	348.66	215.02	674.22
	Sd of CPU Times	263.92	115.97	79.75	212.66
7	Best Obj	38,437.74	5,124.91	530,346.81	269,467.85
	Avg Obj	38,427.37	5,088.34	531,342.82	269,544.90
	Sd of Obj	8.85	27.85	601.54	67.68
	Avg CPU Times	353.05	308.69	317.81	864.81
	Sd of CPU Times	233.11	55.66	215.69	220.59
8	Best Obj	35,549.17	4,571.06	518,696.25	258,905.96
	Avg Obj	35,540.69	4,513.69	519,033.62	260,060.17
	Sd of Obj	9.58	54.45	242.43	3356.08
	Avg CPU Times	294.82	255.1	217.79	806.89
	Sd of CPU Times	236.54	73.63	90.36	373.17
9	Best Obj	36,389.39	4,781.35	523,446.25	262,468.96
	Avg Obj	36,374.21	4,746.66	523,916.97	262,694.83
	Sd of Obj	17.59	43.71	391.91	295.36
	Avg CPU Times	222.37	301.05	222.76	861.35
	Sd of CPU Times	163.48	77.51	71.67	525.75
10	Best Obj	37,625.17	5,165.44	539,533.48	279,226.38
	Avg Obj	37,609.19	5,119.76	540,024.66	279,334.68
	Sd of Obj	13.49	44.04	483.2	84.59
	Avg CPU Times	442.48	290.08	273.93	655.64
	Sd of CPU Times	325.74	77.7	140.92	310.78

จากตารางที่ 5-6 แสดงให้เห็นว่า ผลเฉลยของวิธีการค้นหาคำตอบด้วยฮิวริสติกส์สำหรับ ปัญหาขนาดใหญ่โดยใช้วัตถุประสงค์เดียวเป็นเกณฑ์นั้นให้ค่าคำตอบที่กระจายตัวมากกว่าปัญหา ขนาดกลาง ด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่าง 0.01% ไปจนถึงสูงสุดที่ 1.63% ของค่าผลเฉลยเฉลี่ย โดยผลเฉลยที่ได้จากการใช้วัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุด และค่าสูญเสียโอกาสของ อุตสาหกรรมต่ำสุดเป็นเกณฑ์นั้น มีความสอดคล้องกันกับผลที่ได้จากปัญหาขนาดเล็ก และขนาดกลาง ด้วยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในทุกกรณีต่ำกว่า 0.11% ของค่าผลเฉลยเฉลี่ย นอกจากนี้ ในส่วนของ ระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ ฮิวริสติกส์ที่ออกแบบขึ้นใช้เวลาโดยเฉลี่ยในการลู่เข้าคำตอบ ตั้งแต่ร้อยละที่ 174.02 วินาที ในชุดข้อมูลนำเข้าที่ 3 ในกรณีที่ใช้วัตถุประสงค์ค่าสูญเสียโอกาสของ อุตสาหกรรมต่ำสุดเป็นเกณฑ์ ไปจนถึงมากที่สุดที่ 864.81 วินาที ในชุดข้อมูลนำเข้าที่ 7 ที่ใช้ วัตถุประสงค์ปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุดเป็นเกณฑ์ โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของระยะเวลาในการหาคำตอบอยู่ระหว่าง 18% ถึง 87% ของระยะเวลาที่ใช้การค้นหาคำตอบเฉลี่ย

เมื่อพิจารณาในส่วนของพฤติกรรมการลู่เข้าหาคำตอบของฮิวริสติกส์ ผู้วิจัยพบว่าอัตราการลู่ เข้าหาคำตอบของอนุภาคสำหรับปัญหาขนาดใหญ่ นั้น ใช้ระยะเวลาในการค้นหาสูงสุดที่มากขึ้นกว่า ปัญหาขนาดกลางอย่างมากถึง 586.9% ในขณะที่จำนวนแปลงเก็บเกี่ยวซึ่งต้องวางแผนเพิ่มขึ้นจาก เดิม 200% ทั้งนี้ ตัวอย่างกราฟแสดงการลู่เข้าหาคำตอบของฮิวริสติกส์ในแต่ละเกณฑ์ฟังก์ชัน วัตถุประสงค์ สามารถแสดงได้ด้วยรูปภาพที่ 5.3



รูปภาพที่ 5.3 กราฟแสดงลำดับการลู่เข้าหาคำตอบของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาขนาดใหญ่

จากรูปภาพที่ 5.3 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงตัวอย่างของจำนวนรอบการคำนวณที่ใช้ในการค้นหา และการพัฒนาค่าคำตอบของฮิวริสติกส์ที่ออกแบบขึ้นจากชุดข้อมูลนำเข้าที่ 1 รอบการค้นหาที่ 7 โดยแกน x แสดงจำนวนของรอบการคำนวณ และแกน Y แสดงค่าผลเฉลี่ยตามแต่ละวัตถุประสงค์ที่ใช้ เป็นเกณฑ์ จะพบว่า ในกรณีของปัญหาขนาดใหญ่จะมีการพัฒนาของผลเฉลยเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งในระหว่างรอบการคำนวณของ PSO ด้วยโมดูลการค้นหาเฉพาะที่ *LOCALSEARCH* และการทำ Multi-Start ด้วยโมดูล *PARTICLEGENERATE* เมื่อครบรอบการคำนวณ *RndIter* ที่กำหนด ซึ่งหากเปรียบเทียบกับปัญหาขนาดกลาง จะพบว่าจำนวนรอบการคำนวณที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ โดยเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้นมาก โดยมีกรณีที่รอบการค้นหาในบางชุดข้อมูลนำเข้าใช้รอบการคำนวณของ PSO จนครบตาม *MaxIter* ที่กำหนด และถูกบังคับให้หยุดการค้นหา ทั้งนี้ปัญหาขนาดใหญ่สามารถแสดงกระบวนการพัฒนาของผลการค้นหาของ PSO ให้เห็นได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในกรณีที่ใช้เกณฑ์วัตถุประสงค์สัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุด หรือปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด

ทั้งนี้ พฤติกรรมการจัดตารางทรัพยากรตามเกณฑ์วัตถุประสงค์ของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาขนาดใหญ่ สามารถนำมาเขียนแสดงจำนวนแปลงอ้อยที่ถูกมอบหมายให้กับทรัพยากรแต่ละประเภท ในชุดข้อมูลนำเข้าต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 5-7

ตารางที่ 5-7 ตารางแสดงสัดส่วนการมอบหมายงานให้กับทรัพยากรสำหรับปัญหาขนาดใหญ่

Instances	Cane Input			Growers' Profits		
	Machine	Green	Burnt	Machine	Green	Burnt
1	3	48	99	42	48	60
2	3	48	99	42	48	60
3	3	48	99	42	48	60
4	3	48	99	42	48	60
5	3	48	99	42	48	60
6	3	48	99	42	48	60
7	3	48	99	42	48	60
8	3	48	99	42	48	60
9	3	48	99	42	48	60
10	3	48	99	42	48	60

ตารางที่ 5-7 (ต่อ) ตารางแสดงสัดส่วนการมอบหมายงานให้กับทรัพยากรสำหรับปัญหาขนาดใหญ่

Instances	Opportunity Losses			Environmental Impact		
	Machine	Green	Burnt	Machine	Green	Burnt
1	42	48	60	42	48	60
2	42	48	60	42	48	60
3	42	48	60	42	48	60
4	42	48	60	42	48	60
5	42	48	60	42	48	60
6	42	48	60	42	48	60
7	42	48	60	42	48	60
8	42	48	60	42	48	60
9	42	48	60	42	48	60
10	42	48	60	42	48	60

จากตารางที่ 5-7 จะพบว่า พฤติกรรมการเลือกใช้ทรัพยากรในปัญหาขนาดใหญ่ไม่มีความแตกต่างกับในปัญหาขนาดเล็ก และปัญหาขนาดกลางแต่อย่างใด โดยในกรณีของวัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุด จะมีพฤติกรรมการจัดตารางที่เลือกใช้แรงงานตัดอ้อยไฟไหม้ และแรงงานตัดอ้อยสดจนครบอัตราการการทำงานสูงสุดในหนึ่งวันก่อน แล้วจึงใช้รถตัดอ้อยในการตัดแปลงอ้อยที่เหลืออยู่ในขณะที่กรณีของวัตถุประสงค์สัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุด ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด และปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด จะมีพฤติกรรมการจัดตารางที่เลือกใช้แรงงานตัดอ้อยสดจนครบอัตราการการทำงานสูงสุดในหนึ่งวันก่อน แล้วจึงเลือกใช้งานรถตัดอ้อย และเลือกแรงงานตัดอ้อยไฟไหม้เป็นลำดับสุดท้ายความแตกต่างของผลเฉลยในแต่ละรอบการค้นหาก็เกิดจากการจัดลำดับการตัด และแปลงอ้อยที่มอบหมายให้กับทรัพยากรหนึ่ง ๆ เท่านั้น

5.4 ผลการทดสอบแบบหลายวัตถุประสงค์

การแก้ปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ในวิธานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงเพียงส่วนของผลลัพธ์จากการค้นหาผลเฉลยด้วยฮิวริสติกส์เท่านั้น และด้วยธรรมชาติของการแก้ไขปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์แล้ว จะต้องทำการค้นหาคำตอบจำนวนหลาย ๆ ครั้งก่อนที่จะเลือกหนึ่งคำตอบขึ้นมา จากกลุ่มคำตอบดังกล่าว ทั้งนี้ เพื่อให้เกิดการตัดสินใจที่สามารถตอบสนองทุกวัตถุประสงค์ที่ต้องการได้มากที่สุด ประสิทธิภาพของการค้นหาคำตอบด้วยฮิวริสติกส์ที่ออกแบบขึ้นจึงเป็นส่วนสำคัญ โดยการวัดประสิทธิภาพของการค้นหาคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์ทำได้โดยการใช้ตัวชี้วัดการลู่เข้าสู่

กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Generational Distance) ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้า และความหลากหลายของคำตอบ (Inverted Generational Distance) และ ตัวชี้วัดสมรรถนะด้าน ความหลากหลายของคำตอบ (Diversity Metrics / Spread) โดยผลการทดสอบประสิทธิภาพจาก การหาคำตอบจำนวน 10 รอบ ต่อชุดข้อมูลนำเข้า รวมทั้งสิ้น 10 ชุดข้อมูล ต่อหนึ่งขนาดปัญหา ได้ผลดังต่อไปนี้

5.4.1 ปัญหาขนาดเล็ก

สำหรับปัญหาขนาดเล็ก เราสามารถเขียนตารางแสดงค่าสูงสุด และต่ำสุดของผลเฉลยในแต่ละวัตถุประสงค์ ระยะเวลาการค้นหาคำตอบ และค่าดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบทั้งสอง ชนิด ของการหาคำตอบจำนวน 10 ชุดข้อมูลนำเข้า ได้ดังตารางที่ 5-8

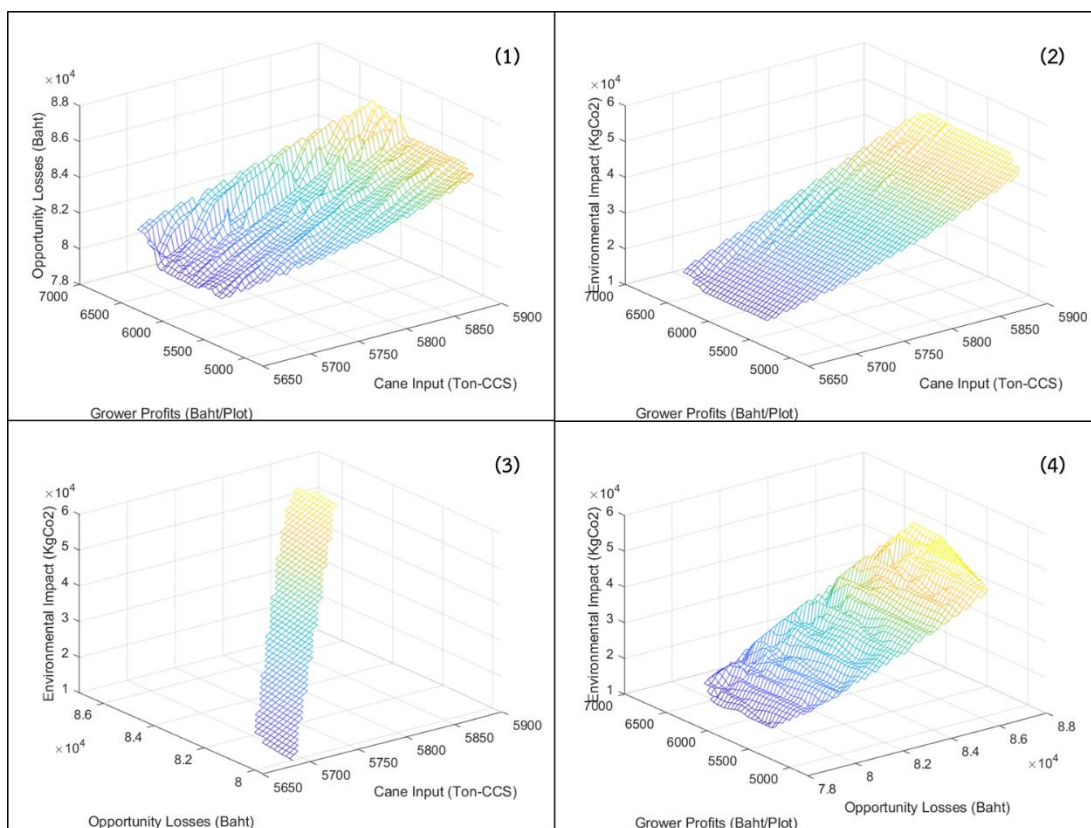
ตารางที่ 5-8 ตารางแสดงค่าประสิทธิภาพและผลเฉลยแบบหลายวัตถุประสงค์ของปัญหาขนาดเล็ก

Instances	Values	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	CPU Times	GD	IGD	Spread
1	Max	5,886.81	6,756.62	87,101.33	51,665.82	60.89	0.0266	0	0.6161
	Min	5,677.63	4,731.64	79,465.19	10,958.73				
2	Max	4,508.55	4,840.38	82,537.70	52,031.62	48.31	0.0248	0	0.6759
	Min	4,292.23	2,285.36	75,002.68	9,452.50				
3	Max	5,133.82	5,225.86	87,358.39	51,497.20	34.55	0.0289	0	0.5693
	Min	4,935.76	3,583.11	80,458.38	12,853.35				
4	Max	4,651.66	4,792.41	82,478.32	51,891.30	44.32	0.0208	0	0.5532
	Min	4,423.54	2,704.97	72,626.97	6,559.97				
5	Max	5,344.38	5,886.86	86,957.71	52,019.68	33.58	0.0306	0	0.7134
	Min	5,127.13	2,792.85	77,393.89	9,453.54				
6	Max	5,139.87	5,226.52	86,526.99	52,079.06	39.5	0.0443	0	0.5382
	Min	4,935.95	3,582.43	79,561.61	12,247.00				
7	Max	4,916.26	5,374.17	78,132.29	51,558.41	51.32	0.0246	0	0.5609
	Min	4,679.19	3,556.93	70,607.40	4,850.40				
8	Max	4,877.07	6,351.80	83,741.97	51,354.31	49.88	0.0325	0	0.6408
	Min	4,654.91	3,660.23	75,168.31	7,390.76				
9	Max	4,411.81	4,057.27	83,294.12	51,477.21	63.65	0.0251	0	0.5344
	Min	4,196.04	2,486.85	75,846.67	8,651.05				
10	Max	4,314.93	4,222.46	77,287.64	51,485.58	44.73	0.0172	0	0.5979
	Min	4,079.12	2,365.21	69,331.56	5,755.08				

จากตารางที่ 5-8 หากเรียงลำดับการกระจายตัวของคำตอบเราจะพบว่า ค่าผลเฉลี่ยในวัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุด และค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุดมีความกว้างของช่วงคำตอบที่ต่ำ ซึ่งสามารถระบุได้จากผลต่างระหว่างค่าผลเฉลี่ยที่ดีที่สุด และแย่ที่สุดที่มีค่าไม่เกิน 5% และ 12% ของผลเฉลี่ยสูงสุดตามลำดับ ถัดมา คือ วัตถุประสงค์สัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุดที่มีค่าผลต่างระหว่างผลเฉลี่ยปานกลางอยู่ระหว่าง 30% จนถึง 53% ของค่าผลเฉลี่ยสูงสุด และในส่วนของวัตถุประสงค์ปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด มีช่วงความกว้างของผลเฉลี่ยที่สูงมากตั้งแต่ 75% ไปจนถึง 91% ของค่าผลเฉลี่ยสูงสุด ในขณะที่เมื่อพิจารณาส่วนของระยะเวลาการค้นหาคำตอบพบว่า ใช้ระยะเวลาในการค้นหาสำหรับปัญหาขนาดเล็กโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 47.07 วินาทีต่อรอบการค้นหา โดยมีระยะเวลาการค้นหาคำตอบอยู่ที่ 33.58 วินาที และมีระยะเวลาค้นหาสูงสุดคือ 63.65 วินาที

เมื่อตรวจสอบที่ค่าดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพของการค้นหาคำตอบจะพบว่า ปัญหาขนาดเล็กมีค่าดัชนีการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่ต่ำ โดยมีค่า GD สูงสุดเพียง 0.0443 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจุดคำตอบที่ฮิวริสติกส์ค้นพบนั้นมีความใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบพาเรโตที่แท้จริงโดยประมาณ ในขณะที่ค่าดัชนีความหลากหลายของคำตอบมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5344 จนถึง 0.7134 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง หรือมีขอบเขตของกลุ่มคำตอบบางส่วนที่ครอบคลุมกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงโดยประมาณ

ทั้งนี้ เราสามารถวาดกราฟพื้นผิวบนระนาบ 3 มิติเพื่อแสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ของผลเฉลี่ยที่ได้จากชุดข้อมูลนำเข้าที่ 1 ระหว่างแต่ละวัตถุประสงค์ รวมทั้งหมด 4 ชุดความสัมพันธ์ สำหรับปัญหาขนาดเล็กได้ดังรูปภาพที่ 5.4 โดยรูปภาพย่อยที่ 5.4 (1) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุด สัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุด และค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด รูปภาพย่อยที่ 5.4 (2) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุด สัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุด และปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด รูปภาพย่อยที่ 5.4 (3) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุด ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด และปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด และรูปภาพย่อยที่ 5.4 (4) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุประสงค์สัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุด ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด และปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด



รูปภาพที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของผลเฉลี่ยในแต่ละวัตถุประสงค์ของปัญหาขนาดเล็ก

จากรูปภาพย่อยที่ 5.4 (1) และ 5.4 (2) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สำหรับปัญหาขนาดเล็กแล้ว วัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุดกับสัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุดมีความขัดแย้งกันอย่างมีนัยสำคัญ เราสามารถบรรลุทั้ง 2 วัตถุประสงค์นี้ไปพร้อมกันได้ในช่วงแรกโดยแลกมากับค่าผลเฉลี่ยของวัตถุประสงค์ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด และปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุดที่แย่ง แต่เมื่อค่าผลเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจนถึงจุด ๆ หนึ่ง จะไม่มีกลุ่มคำตอบใดที่สามารถตอบสนองกับทั้งสองวัตถุประสงค์ได้อีก และต้องเลือกเพียงวัตถุประสงค์ใดวัตถุประสงค์หนึ่ง ซึ่งเป็นผลมาจากความต้องการใช้งานทรัพยากรที่ต่างกัน นอกจากนี้ หากค่าของผลเฉลี่ยสัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุดเพิ่มมากขึ้นถึงจุด ๆ หนึ่ง ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมจะเพิ่มสูงขึ้นเป็นพิเศษ ประมาณ 2% ของค่าสูญเสียโอกาสสูงสุด ในขณะที่กำไรต่อแปลงของเกษตรกรเพิ่มขึ้น 6.9% (สังเกตได้จากช่วงกำไร 6,000 - 6,700 บาท/แปลง) ซึ่งจากการวิเคราะห์ตารางทรัพยากร พบว่า ผลกำไรต่อแปลงอ้อยของเกษตรกรที่เพิ่มขึ้นนั้นมีสาเหตุมาจากการที่เกษตรกรรายย่อยซึ่งมีจำนวนแปลงอ้อยน้อยได้รับการจัดสรรทรัพยากรแรงงานตัดอ้อยสด หรือรถตัดอ้อยเกือบทั้งหมด ในขณะที่เกษตรกรรายใหญ่ถูกจัดสรรให้ใช้ทรัพยากรแรงงานตัดอ้อยไฟไหม้ โดยการสลับทรัพยากรเก็บเกี่ยวที่ใช้ในแต่ละแปลงอ้อยนี้ ส่งผลทำให้ทรัพยากรที่ดีที่สุด (แรงงานตัดอ้อยสด) อาจถูกนำไปใช้กับแปลง

อ้อยที่มีปริมาณผลผลิตไม่เต็มคันรถ จนเกิดเป็นค่าสูญเสียโอกาสโดยรวมของอุตสาหกรรมที่สูงขึ้น ส่วนรูปภาพย่อยที่ 5.4 (3) และ 5.4 (4) แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของค่าผลเฉลี่ยที่คล้ายคลึงกันในวัตถุประสงค์ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด และปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด โดยมีผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุดเป็นปัจจัยหลักที่ขัดแย้งอย่างชัดเจนกับวัตถุประสงค์ทั้งสอง

5.4.2 ปัญหาขนาดกลาง

สำหรับปัญหาขนาดกลาง เราสามารถเขียนตารางแสดงค่าสูงสุด และต่ำสุดของผลเฉลี่ยในแต่ละวัตถุประสงค์ ระยะเวลาการค้นหาคำตอบ และค่าดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบทั้งสองชนิด ของการหาคำตอบจำนวน 10 ชุดข้อมูลนำเข้า ได้ดังตารางที่ 5-9

ตารางที่ 5-9 ตารางแสดงค่าประสิทธิภาพและผลเฉลี่ยแบบหลายวัตถุประสงค์ของปัญหาขนาดกลาง

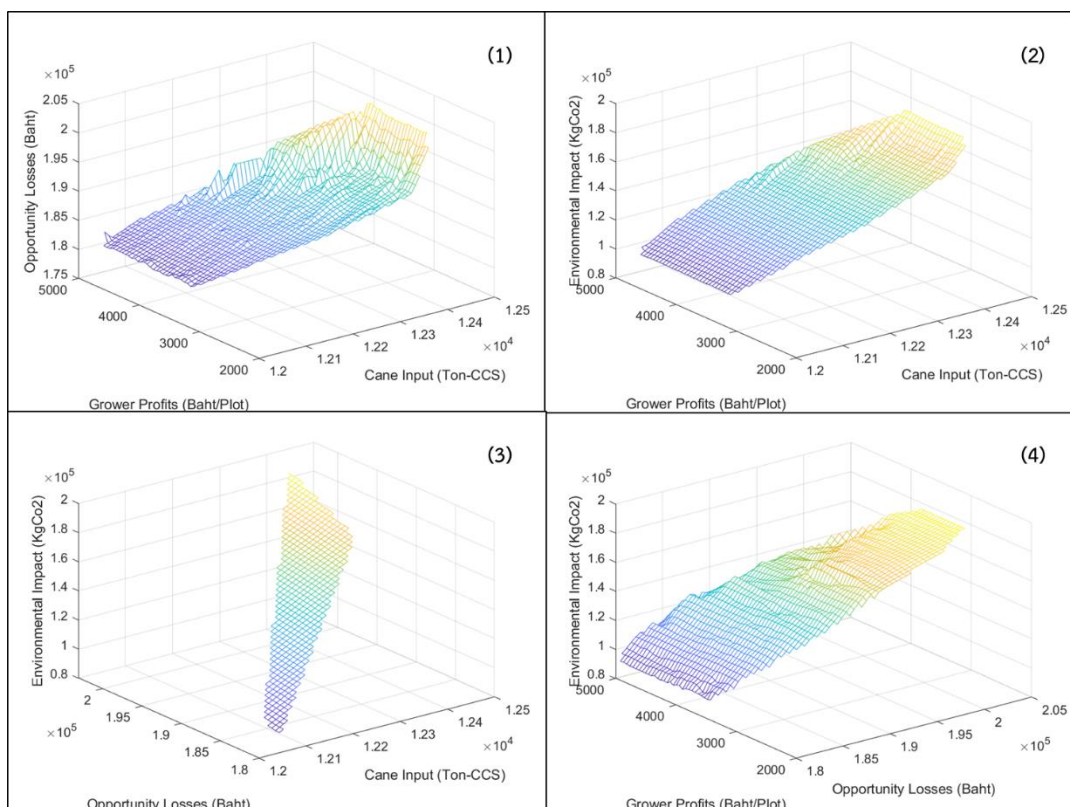
Instances	Values	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	CPU Times	GD	IGD	Spread
1	Max	12,033.02	4,832.70	203,097.68	184,675.10	248.29	0.0322	0	0.8381
	Min	11,614.96	2,244.04	178,927.07	92,134.13				
2	Max	13,341.69	5,413.11	209,434.50	185,894.97	221.32	0.0373	0	0.7451
	Min	12,958.63	2,259.10	193,889.14	107,775.72				
3	Max	11,899.56	4,717.38	202,163.10	186,018.72	220.07	0.0379	0	0.82
	Min	11,472.48	2,081.65	175,448.50	89,704.45				
4	Max	11,826.39	4,353.63	206,273.18	186,351.24	302.31	0.028	0	0.7422
	Min	11,423.89	2,046.46	184,611.95	98,910.78				
5	Max	12,263.39	5,192.00	208,035.38	186,253.33	193.34	0.0316	0	0.7206
	Min	11,874.52	2,653.29	190,012.19	104,536.67				
6	Max	12,529.86	4,913.12	202,428.20	184,760.56	194.84	0.0216	0	0.807
	Min	12,101.53	3,123.55	174,934.65	87,438.21				
7	Max	13,507.19	5,367.60	203,571.65	185,655.28	242.45	0.0443	0	0.8047
	Min	13,084.63	2,989.84	179,602.15	92,652.79				
8	Max	12,453.30	5,019.70	203,518.57	185,074.69	259.24	0.036	0	0.7848
	Min	12,034.63	2,494.55	179,510.71	92,470.34				
9	Max	12,357.53	4,629.80	203,204.29	186,663.92	231.1	0.039	0	0.7429
	Min	11,932.93	2,494.10	178,368.04	92,999.10				
10	Max	13,154.63	5,547.75	210,339.96	184,734.03	193.18	0.033	0	0.863
	Min	12,779.22	2,953.96	195,182.87	108,461.62				

จากตารางที่ 5-9 หากเรียงลำดับการกระจายตัวของคำตอบเราจะพบว่า ค่าผลเฉลี่ยในวัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุด และค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุดมีความกว้างของ

ของช่วงคำตอบที่ต่ำ ซึ่งสามารถระบุได้จากผลต่างระหว่างค่าผลเฉลี่ยที่ดีที่สุด และแย่ที่สุดที่มีค่าไม่เกิน 4% และ 14% ของผลเฉลี่ยสูงสุดตามลำดับ แต่ต่างจากในปัญหาขนาดเล็ก วัตถุประสงค์สัดส่วนผลกำไรของเกษตรกรสูงสุด และปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด มีค่าผลต่างระหว่างผลเฉลี่ยสูงสุด และต่ำสุดที่ใกล้เคียงกันอยู่ระหว่าง 36% ถึง 58% และ 41% ถึง 53% ของค่าผลเฉลี่ยสูงสุดตามลำดับ ในขณะที่เมื่อพิจารณาส่วนของระยะเวลาการค้นหาคำตอบพบว่า ใช้ระยะเวลาในการค้นหาสำหรับปัญหาขนาดกลางโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 230.61 วินาทีต่อรอบการค้นหา โดยมีระยะเวลาการค้นหาต่ำสุดอยู่ที่ 193.18 วินาที และมีระยะเวลาค้นหาสูงสุดคือ 302.31 วินาที

เมื่อตรวจสอบที่ค่าดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพของการค้นหาคำตอบจะพบว่า ปัญหาขนาดกลางมีค่าดัชนีการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่ต่ำ โดยมีค่า GD สูงสุดเพียง 0.0444 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจุดคำตอบที่ฮิวริสติกส์ค้นพบนั้นมีความใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบพาเรโตที่แท้จริงโดยประมาณ ในขณะที่ค่าดัชนีความหลากหลายของคำตอบมีค่าอยู่ระหว่าง 0.7206 จนถึง 0.8630 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่อยู่ในเกณฑ์ปานกลางถึงแย่มาก หรือมีขอบเขตของกลุ่มคำตอบส่วนน้อยที่ครอบคลุมกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงโดยประมาณ ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากขนาดของปัญหาที่ใหญ่ขึ้น ทำให้ขอบเขตของปริภูมิวัตถุประสงค์นั้นกว้างขึ้น

ทั้งนี้ เราสามารถวาดกราฟพื้นผิวบนระนาบ 3 มิติเพื่อแสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ของผลเฉลี่ยที่ได้จากชุดข้อมูลนำเข้าที่ 8 ระหว่างแต่ละวัตถุประสงค์ รวมทั้งหมด 4 ชุดความสัมพันธ์ สำหรับปัญหาขนาดกลางได้ดังรูปภาพที่ 5.5 โดยรูปภาพย่อยที่ 5.5 (1) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุด สัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุด และค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด รูปภาพย่อยที่ 5.5 (2) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุด สัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุด และปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด รูปภาพย่อยที่ 5.5 (3) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุด ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด และปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด และรูปภาพย่อยที่ 5.5 (4) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุประสงค์สัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุด ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด และปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด



รูปภาพที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของผลเฉลยในแต่ละวัตถุประสงค์ของปัญหาขนาดกลาง

จากรูปภาพย่อยที่ 5.5 (1) และ 5.5 (2) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สำหรับปัญหาขนาดกลางแล้ว วัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุดกับสัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุดมีความขัดแย้งกันอย่างมีนัยสำคัญ เราสามารถบรรลุทั้ง 2 วัตถุประสงค์นี้ไปพร้อมกันได้ในช่วงแรกโดยแลกมากับค่าผลเฉลยของวัตถุประสงค์ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด และปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุดที่แยกลง แต่เมื่อค่าผลเฉลยเพิ่มขึ้นจนถึงจุด ๆ หนึ่ง จะไม่มีกลุ่มคำตอบใดที่สามารถตอบสนองกับทั้งสองวัตถุประสงค์ได้อีก และต้องเลือกเพียงวัตถุประสงค์ใดวัตถุประสงค์หนึ่งเช่นเดียวกันกับในปัญหาขนาดเล็ก ซึ่งเป็นผลมาจากความต้องการใช้งานทรัพยากรที่ต่างกัน นอกจากนี้ ถ้าหากค่าของผลเฉลยในวัตถุประสงค์ทั้งสองนี้เพิ่มมากขึ้นถึงจุด ๆ หนึ่ง ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมจะเพิ่มสูงขึ้นเป็นพิเศษ ประมาณ 3.71% ของค่าเสียโอกาสสูงสุด ในขณะที่กำไรต่อแปลงของเกษตรกรเพิ่มขึ้นประมาณ 9.8% (สังเกตได้จากช่วง ผลผลิตน้ำตาล 12,300 – 12,400 ตัน-CCS และกำไร 3,800 - 4,000 บาท/แปลง) ซึ่งจากการวิเคราะห์ตารางทรัพยากร พบว่า มีสาเหตุมาจากการสลับทรัพยากรที่ใช้ในแปลงอ้อยเช่นเดียวกันกับในปัญหาขนาดเล็ก ส่วนรูปภาพย่อยที่ 5.5 (3) และ 5.5 (4) ยังคงแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่คล้ายคลึงกันของค่าผลเฉลยในวัตถุประสงค์ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด และปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด โดยมีผลผลิต

น้ำตาลทรายสูงสุดเป็นปัจจัยหลักที่ขัดแย้งอย่างชัดเจนกับวัตถุประสงค์ทั้งสองเช่นเดียวกันกับในปัญหาขนาดเล็ก

5.4.3 ปัญหาขนาดใหญ่

สำหรับปัญหาขนาดกลาง เราสามารถเขียนตารางแสดงค่าสูงสุด และต่ำสุดของผลเฉลยในแต่ละวัตถุประสงค์ ระยะเวลาการค้นหาคำตอบ และค่าดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบทั้งสองชนิด ของการหาคำตอบจำนวน 10 ชุดข้อมูลนำเข้า ได้ดังตารางที่ 5-10

ตารางที่ 5-10 ตารางแสดงค่าประสิทธิภาพและผลเฉลยแบบหลายวัตถุประสงค์ของปัญหาขนาดใหญ่

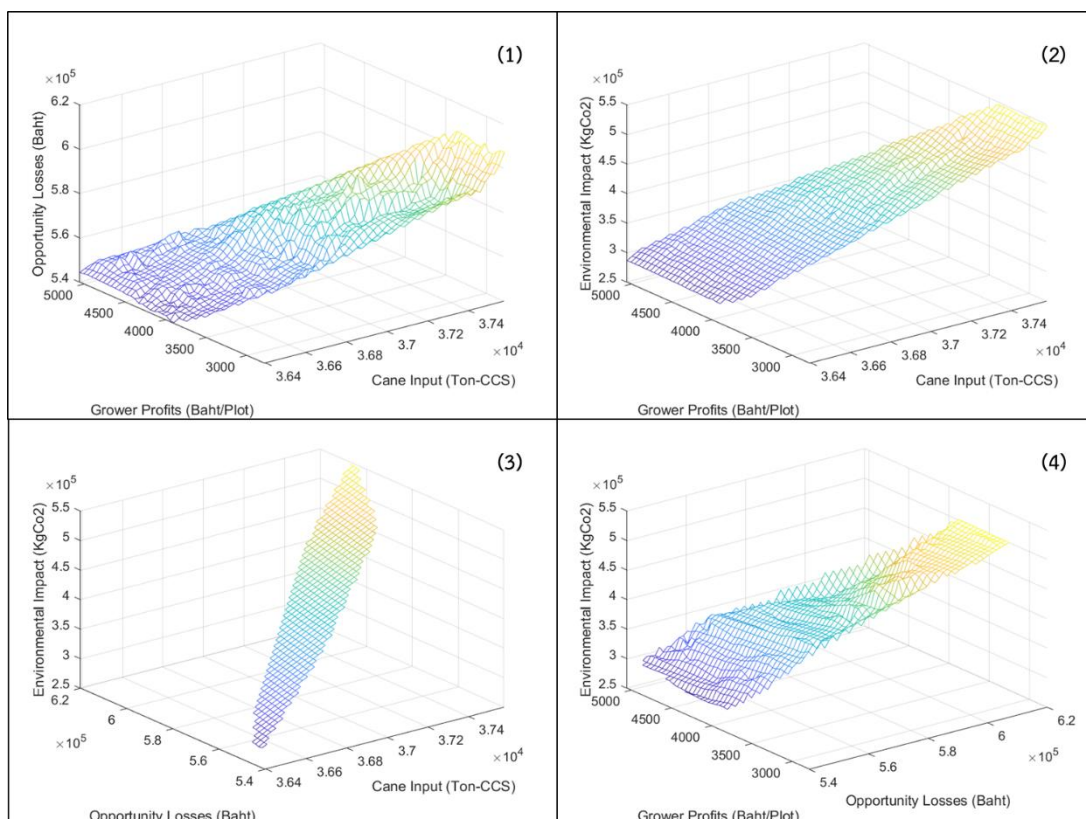
Instances	Values	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	CPU Times	GD	IGD	Spread
1	Max	37,036.74	4,769.47	613,398.71	555,662.06	1,909.58	0.0136	0	1.0627
	Min	35,783.26	2,655.82	531,938.73	270,455.69				
2	Max	36,003.40	4,722.43	610,970.08	555,170.17	2383.74	0.0251	0	0.9972
	Min	34,754.41	2,571.26	537,009.06	276,638.94				
3	Max	34,985.07	4,372.46	608,702.31	555,156.10	2428.34	0.0229	0	1.0073
	Min	33,734.35	2,230.77	536,340.95	276,286.28				
4	Max	35,767.48	5,000.28	615,207.70	557,133.00	2,006.57	0.0124	0	1.0161
	Min	34,538.19	2,960.95	543,303.87	284,640.22				
5	Max	41,202.99	5,676.42	623,885.62	559,006.15	1,768.45	0.0136	0	1.0268
	Min	40,007.27	3,577.85	567,844.92	307,636.59				
6	Max	36,833.73	4,944.78	611,235.51	555,781.11	1,722.26	0.0142	0	0.9668
	Min	35,561.12	2,761.48	531,280.19	269,791.03				
7	Max	38,437.74	5,124.91	610,087.50	557,116.16	1,955.57	0.0138	0	0.973
	Min	37,154.77	3,142.47	530,346.81	269,467.85				
8	Max	35,550.57	4,534.66	609,272.62	557,707.29	1,888.87	0.0236	0	0.9892
	Min	34,248.47	2,431.41	518,664.36	258,915.47				
9	Max	36,385.37	4,794.95	606,482.94	556,362.24	1,750.28	0.0284	0	0.9986
	Min	35,096.41	2,543.89	523,202.70	262,571.17				
10	Max	37,625.17	5,165.44	610,965.76	556,343.95	1,848.13	0.0117	0	1.0627
	Min	36,367.28	2,933.64	539,533.48	279,226.38				

จากตารางที่ 5-10 หากเรียงลำดับการกระจายตัวของคำตอบเราจะพบว่า ค่าผลเฉลยในวัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุด และค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุดมีความกว้างของช่วงคำตอบที่ต่ำ ซึ่งสามารถระบุได้จากผลต่างระหว่างค่าผลเฉลยที่ดีที่สุด และแย่ที่สุดที่มีค่าไม่เกิน 4% และ 15% ของผลเฉลยสูงสุดตามลำดับ เช่นเดียวกันกับในปัญหาขนาดกลาง วัตถุประสงค์

สัดส่วนผลกำไรของเกษตรกรสูงสุด และปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด มีค่าผลต่างระหว่างผลเฉลี่ยสูงสุด และต่ำสุดที่ใกล้เคียงกันอยู่ระหว่าง 37% ถึง 49% และ 45% ถึง 54% ของค่าผลเฉลี่ยสูงสุดตามลำดับ ในขณะที่เมื่อพิจารณาส่วนของระยะเวลาการค้นหาคำตอบพบว่า ใช้ระยะเวลาในการค้นหาสำหรับปัญหาขนาดใหญ่โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 1,966.18 วินาทีต่อรอบการค้นหา โดยมีระยะเวลาการค้นหาคำตอบอยู่ที่ 1,722.26 วินาที และมีระยะเวลาค้นหาสูงสุดคือ 2,428.34 วินาที

เมื่อตรวจสอบที่ค่าดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพของการค้นหาคำตอบจะพบว่า ปัญหาขนาดกลางมีค่าดัชนีการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่ต่ำ โดยมีค่า GD สูงสุดเพียง 0.0284 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจุดคำตอบที่ฮิวริสติกส์ค้นพบนั้นมีความใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบพาเรโตที่แท้จริงโดยประมาณ ในขณะที่ค่าดัชนีความหลากหลายของคำตอบมีค่าอยู่ระหว่าง 0.9668 จนถึง 1.0627 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่อยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างแย่ หรือมีขอบเขตของกลุ่มคำตอบไม่ค่อยครอบคลุมกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงโดยประมาณ ซึ่งแนวโน้มที่แย่งลงของดัชนีค่าความหลากหลายของคำตอบนี้ถูกพบว่าเป็นมาตั้งแต่ในปัญหาขนาดกลาง ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากขนาดของปัญหาที่ใหญ่ขึ้น ทำให้ขอบเขตของปริภูมิวัตถุประสงค์นั้นกว้างขึ้น

ทั้งนี้ เราสามารถวาดกราฟพื้นผิวบนระนาบ 3 มิติเพื่อแสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ของผลเฉลี่ยที่ได้จากชุดข้อมูลนำเข้าที่ 10 ระหว่างแต่ละวัตถุประสงค์ รวมทั้งหมด 4 ชุดความสัมพันธ์สำหรับปัญหาขนาดเล็กได้ดังรูปภาพที่ 5.6 โดยรูปภาพย่อยที่ 5.6 (1) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุด สัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุด และค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด รูปภาพย่อยที่ 5.6 (2) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุด สัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุด และปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด รูปภาพย่อยที่ 5.6 (3) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุด ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด และปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด และรูปภาพย่อยที่ 5.6 (4) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุประสงค์สัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุด ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด และปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด



รูปภาพที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของผลเฉลยในแต่ละวัตถุประสงค์ของปัญหาขนาดใหญ่

จากรูปภาพย่อยที่ 5.6 (1) และ 5.6 (2) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สำหรับปัญหาขนาดใหญ่แล้ว วัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุดกับสัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุดมีความขัดแย้งกันอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกันกับในปัญหาขนาดเล็กและขนาดกลาง เรายังสามารถบรรลุทั้ง 2 วัตถุประสงค์นี้ไปพร้อมกันได้ในช่วงต้นโดยแลกมากับค่าผลเฉลยของวัตถุประสงค์ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด และปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุดที่แยกลง แต่เมื่อค่าผลเฉลยเพิ่มขึ้นจนถึงจุด ๆ หนึ่ง จะไม่มีกลุ่มคำตอบใดที่สามารถตอบสนองกับทั้งสองวัตถุประสงค์ได้อีก และต้องเลือกเพียงวัตถุประสงค์ใดวัตถุประสงค์หนึ่ง ซึ่งเป็นผลมาจากความต้องการใช้งานทรัพยากรที่ต่างกัน

หากแต่ในปัญหาขนาดใหญ่นี้กลับไม่พบความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับค่าวัตถุประสงค์ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด อันเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของวัตถุประสงค์สัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุดอย่างชัดเจนเช่นเดียวกันกับในปัญหาขนาดเล็ก และขนาดกลาง โดยเมื่อวิเคราะห์ตารางทรัพยากรพบว่า จำนวนแปลงอ้อยที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลทำให้ค่าสัดส่วนกำไรเฉลี่ยต่อแปลงอ้อยได้รับผลกระทบจากการสลับทรัพยากรระหว่างแปลงอ้อยน้อยลง ส่วนรูปภาพย่อยที่ 5.6 (3) และ 5.6 (4) ยังคงแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของค่าวัตถุประสงค์ที่คล้ายคลึงกันของวัตถุประสงค์ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด และปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด โดยมีผลผลิตน้ำตาล

ทรายสูงสุดเป็นปัจจัยหลักที่ขัดแย้งอย่างชัดเจนกับวัตถุประสงค์ทั้งสองเช่นเดียวกันกับในปัญหาขนาดเล็ก และขนาดกลาง

5.5 การคัดเลือกกลุ่มคำตอบจากขอบเขตที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต

ผลการทดสอบแบบหลายวัตถุประสงค์ในหัวข้อที่ 5.4 ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละวัตถุประสงค์ที่มีความขัดแย้งกัน ด้วยกราฟพื้นผิวที่สร้างขึ้นจากขอบเขตที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Pareto Optimal Frontier) แต่เราจะเห็นได้ว่ากลุ่มคำตอบที่อยู่บนขอบเขตในข้างต้นนั้นมีอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้แม้ว่าเราจะได้กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดมาแล้ว การตัดสินใจเลือกเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียภายในอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลก็ยังเป็นไปได้ยาก ทั้งนี้ ทางผู้วิจัยจึงจะเสนอวิธีการสำหรับคัดเลือกกลุ่มคำตอบ โดยเรียงตามลำดับความสำคัญของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียได้ดังนี้ คือ

- **โรงงานน้ำตาล:** การจัดการทรัพยากรนี้จะสามารถเป็นไปได้ ต้องอาศัยการบริหารจัดการจากส่วนกลาง ทั้งในส่วนของ การจัดคิวรถ และทรัพยากรอื่น ๆ การคัดเลือกกลุ่มคำตอบจึงต้องให้ความสำคัญกับโรงงานน้ำตาลก่อนเป็นลำดับแรก ทั้งนี้ ทางผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบเพื่อหาตำแหน่งเปอร์เซ็นต์ไทล์ (Percentile) ของวัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุดจากกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้ ที่เหมาะสมกับการเป็นเกณฑ์การคัดเลือก โดยผู้วิจัยได้ผลว่า ตำแหน่งเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 70 เป็นตำแหน่งที่มากที่สุด ที่ยังทำให้วัตถุประสงค์อื่น ๆ มีความยืดหยุ่นของการเลือกคำตอบเหลืออยู่
- **เกษตรกรไร่อ้อย:** เกณฑ์ลำดับถัดมาในการคัดเลือกกลุ่มคำตอบคือ วัตถุประสงค์สัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุด เนื่องจากในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยมุ่งเน้นที่การเพิ่มผลผลิตอ้อยในระบบไปพร้อม ๆ กับการเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกร โดยตำแหน่งเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 85 จากกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้ เป็นตำแหน่งที่มากที่สุดที่ยังทำให้อีกสองวัตถุประสงค์ที่เหลือยังมีความยืดหยุ่นในการเลือกคำตอบ
- **สิ่งแวดล้อม และอุตสาหกรรมน้ำตาลไทย:** ผลการทดสอบในหัวข้อที่ 5.4 ได้แสดงให้เห็นแล้วว่า วัตถุประสงค์ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด และปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุดนั้นมีแนวโน้มของค่าผลเฉลยที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งหากผ่านการคัดเลือกกลุ่มคำตอบในสองส่วนก่อนหน้ามาแล้ว จะทำการเลือกกลุ่มคำตอบสุดท้ายโดยมีสองวัตถุประสงค์นี้เป็นคู่สำหรับช่วยเปรียบเทียบ

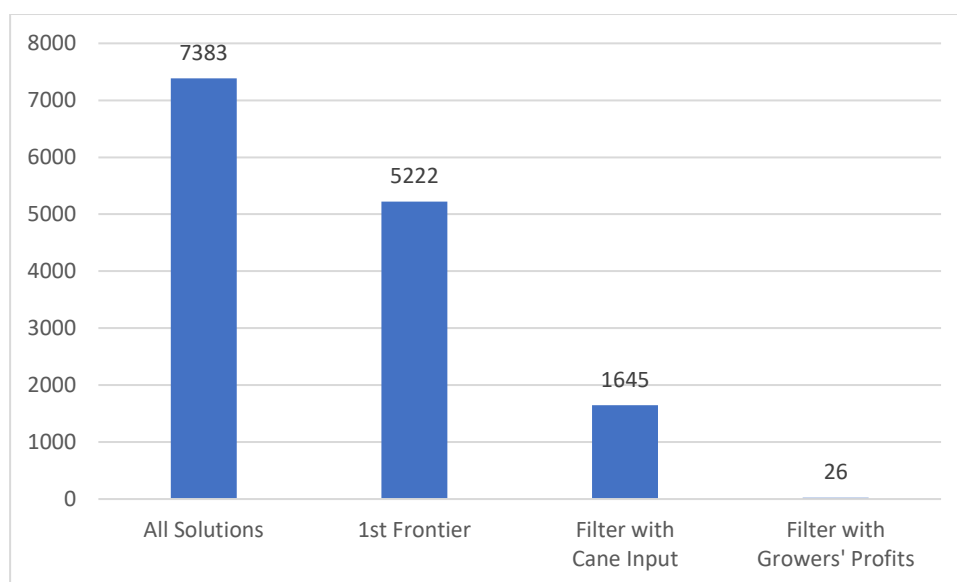
อย่างไรก็ดี ในส่วนของการอภิปรายผลนี้ ผู้วิจัยจะยกตัวอย่างเพียงในส่วนของปัญหาขนาดใหญ่เท่านั้น เนื่องจากเป็นขนาดของปัญหาที่มีความใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมการปฏิบัติงานจริงในอุตสาหกรรม และจะสามารถเห็นผลจากการคัดเลือกกลุ่มคำตอบตามลำดับข้างต้นได้อย่างชัดเจน โดยหากอ้างอิงจากชุดข้อมูลนำเข้าที่ 10 ของผลการทดสอบแบบหลายวัตถุประสงค์สำหรับปัญหาขนาดใหญ่ ในหัวข้อที่ 5.4.3 จะได้ว่า มีกลุ่มคำตอบที่อยู่บนขอบเขตที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต เป็นจำนวนทั้งหมด 5,222 กลุ่มคำตอบ เมื่อผ่านการคัดเลือกโดยใช้วัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุดเป็นเกณฑ์ จะเหลือกลุ่มคำตอบจำนวน 1,645 กลุ่มคำตอบ ดังแสดงได้ในตารางที่ 5-11

ตารางที่ 5-11 ตารางแสดงกลุ่มคำตอบที่ถูกคัดเลือกโดยใช้ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุดเป็นเกณฑ์

Solutions	Cane Input	Growers' Profits	Opportunity Losses	Environmental Impact
1	37,602.61	2,946.74	608,043.51	552,077.92
2	37,602.61	2,945.74	608,045.21	552,045.11
3	37,602.57	2,947.19	608,053.77	552,053.47
4	37,602.57	2,945.40	608,048.42	552,039.38
5	37,602.54	2,947.97	608,059.24	552,092.23
6	37,602.53	2,947.71	608,060.07	552,067.52
.
.
.
1,642	36,843.66	4,088.06	561,151.15	378,888.57
1,643	36,843.65	4,134.11	561,173.15	378,895.87
1,644	36,843.62	4,144.02	561,162.34	378,879.02
1,645	36,843.62	3,798.81	558,572.11	377,035.59

จากตารางที่ 5-11 ซึ่งแสดงกลุ่มคำตอบที่ผ่านการคัดเลือกโดยใช้เปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 70 ของวัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุดเป็นเกณฑ์ โดยเรียงลำดับของผลเฉลยจากมากไปหาน้อย ผู้วิจัยพบว่า วัตถุประสงค์ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุดจากกลุ่มคำตอบที่ได้ มีขอบเขตล่างที่มากขึ้นกว่าค่าผลเฉลยที่ดีที่สุดจากการค้นหาคำตอบแบบวัตถุประสงค์เดียวที่ 539,533.48 เพียง 3.53% เท่านั้น ในขณะที่ขอบเขตล่างของวัตถุประสงค์ปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุดนั้นสูงขึ้นกว่าค่าผลเฉลยที่ดีที่สุดจากการค้นหาคำตอบแบบวัตถุประสงค์เดียวที่ 279,226.38 ถึง 35% และเมื่อนำกลุ่มคำตอบในข้างต้นนี้ไปผ่านการคัดเลือกอีกครั้งโดยใช้วัตถุประสงค์สัดส่วนกำไรเกษตรกรสูงสุดเป็นเกณฑ์ จะเหลือกลุ่มคำตอบเพียง 26 กลุ่มคำตอบ ซึ่งคิดเป็นจำนวน 0.5% ของ

กลุ่มคำตอบทั้งหมดบนขอบเขตที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต โดยเราสามารถสรุปจำนวนผลเฉลยที่เหลืออยู่จากการคัดเลือกกลุ่มคำตอบในแต่ละขั้นตอนให้อยู่ในรูปของแผนภาพ ได้ดังแสดงในรูปภาพที่ 5.7 และสามารถแสดงกลุ่มคำตอบทั้งหมดที่ผ่านการคัดเลือกรอบที่สอง ได้ดังตารางที่ 5-12



รูปภาพที่ 5.7 แผนภาพแสดงจำนวนผลเฉลยจากการคัดเลือกกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 5-12 ตารางแสดงกลุ่มคำตอบที่ถูกคัดเลือกโดยใช้สองวัตถุประสงค์เป็นเกณฑ์

Solutions	Cane Input	Growers' Profits	Opportunity Losses	Environmental Impact
1	36,898.10	4,383.52	568,986.58	396,113.02
2	36,888.97	4,397.03	566,320.00	391,963.73
3	36,888.94	4,400.49	566,323.85	391,891.94
4	36,888.78	4,409.76	566,273.73	391,853.19
5	36,887.31	4,428.71	565,299.85	390,451.98
6	36,887.25	4,428.22	565,316.30	390,450.60
7	36,883.93	4,402.48	565,417.18	390,260.46
8	36,881.34	4,308.66	565,229.56	389,593.92
9	36,881.26	4,324.44	565,223.68	389,618.67
10	36,881.19	4,311.11	565,246.99	389,608.17
11	36,881.10	4,321.12	565,259.18	389,581.24
12	36,880.07	4,320.47	564,741.60	388,924.99

ตารางที่ 5-12 (ต่อ) ตารางแสดงกลุ่มคำตอบที่ถูกคัดเลือกโดยใช้สองวัตถุประสงค์เป็นเกณฑ์

Solutions	Cane Input	Growers' Profits	Opportunity Losses	Environmental Impact
13	36,879.81	4,335.50	564,787.75	388,932.89
14	36,879.60	4,327.59	564,829.12	388,906.74
15	36,878.20	4,295.03	564,345.82	388,226.86
16	36,878.16	4,295.45	564,354.62	388,209.14
17	36,877.81	4,293.74	564,401.56	388,177.35
18	36,849.11	4,499.09	564,065.32	382,681.57
19	36,848.95	4,499.81	564,100.53	382,695.37
20	36,848.56	4,355.77	562,664.04	381,135.37
21	36,848.26	4,322.48	562,721.63	381,106.52
22	36,847.80	4,453.62	563,811.01	382,202.59
23	36,847.80	4,453.40	563,808.19	382,205.08
24	36,845.15	4,402.01	561,706.87	379,622.19
25	36,845.13	4,353.32	561,679.12	379,513.71
26	36,843.95	4,367.65	561,339.48	378,998.92

จากตารางที่ 5-12 ซึ่งแสดงกลุ่มคำตอบที่ผ่านการคัดเลือกโดยใช้เปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 85 ของวัตถุประสงค์สัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุดเป็นเกณฑ์ โดยเรียงลำดับของผลเฉลี่ยจากมากไปหาน้อย ด้วยวัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทราย และสัดส่วนกำไรของเกษตรกร ตามลำดับ ซึ่งผู้วิจัยพบว่า ทั้งวัตถุประสงค์ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด และวัตถุประสงค์ปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด มีขอบเขตบนที่น้อยลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การคัดเลือกในส่วนก่อนหน้า โดยลดลง 6.42% และ 28.25% ตามลำดับ โดยเราสามารถนำค่าเฉลี่ยของผลเฉลี่ยจากกลุ่มคำตอบที่เหลือในข้างต้น มาเปรียบเทียบกับผลเฉลี่ยจากการค้นหาคำตอบแบบวัตถุประสงค์เดียวของชุดปัญหาเดียวกันได้ ดังแสดงในตารางที่ 5-13

ตารางที่ 5-13 ตารางเปรียบเทียบผลเฉลี่ยแบบหลายวัตถุประสงค์โดยเฉลี่ยกับผลเฉลี่ยจากการค้นหา
คำตอบแบบวัตถุประสงค์เดียวสำหรับปัญหาขนาดใหญ่

	Cane Input	Growers' Profits	Opportunity Losses	Environmental Impact
Cane Input (Ton-C.C.S)	37,602.61	2,946.74	608,043.51	552,077.92
Growers' Profits (Baht/Field)	36,402.00	5,098.05	544,842.07	288,171.91
Opportunity Losses (Baht)	36,384.30	3,932.59	539,744.22	281,622.18
Environmental Impact (KgCO ₂)	36,368.14	4,164.01	541,864.75	279,329.73
Average Output from Multi-Objective	36,871.02	4,372.71	564,548.21	387,035.62

จากตารางที่ 5-13 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบผลเฉลี่ยระหว่างการหาคำตอบแบบวัตถุประสงค์เดียว และหลายวัตถุประสงค์ จะสังเกตได้ว่าหากโรงงานน้ำตาลยอมเสียสละค่าวัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุดลงระหว่าง 1.87% ถึง 2.02% ซึ่งคิดเป็นปริมาณน้ำตาล 7.59 ตัน หรือแปลงเป็นเงินได้ 122,393.48 บาท จะส่งผลทำให้วัตถุประสงค์อื่น ๆ มีค่าที่ดีขึ้น สำหรับวัตถุประสงค์สัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุด 48.39% หรือแปลงเป็นเงินสดในมือของเกษตรกรได้ 213,895.56 บาท สำหรับวัตถุประสงค์ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด 7.15% หรือ 43,495.30 บาท และสำหรับวัตถุประสงค์ปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด 29.89% หรือแปลงเป็นเงินตามอัตราการซื้อขายคาร์บอนเครดิตในราคาตันละ 200 บาท (TGO, 2563) จะสามารถคิดเป็นเงินได้ 33,008.46 บาท รวมแล้วเป็นเงินที่หมุนเวียนกลับเข้ามาในระบบกว่า 290,399.32 บาท ซึ่งมากขึ้น 146% จากเงินที่สูญเสียไป และเพื่อเป็นการยืนยันแนวโน้มดังกล่าว โดยใช้เกณฑ์การคัดเลือกกลุ่มคำตอบเดียวกัน เราแสดงการเปรียบเทียบผลเฉลี่ยระหว่างการหาคำตอบแบบวัตถุประสงค์เดียว และหลายวัตถุประสงค์ของปัญหาขนาดกลาง (ข้อมูลนำเข้าที่ 8) และขนาดเล็ก (ข้อมูลนำเข้าที่ 1) ไว้ดังตารางที่ 5-14 และ 5-15

ตารางที่ 5-14 ตารางเปรียบเทียบผลเฉลยแบบหลายวัตถุประสงค์โดยเฉลี่ยกับผลเฉลยจากการค้นหา
คำตอบแบบวัตถุประสงค์เดียวสำหรับปัญหาขนาดกลาง

	Cane Input	Growers' Profits	Opportunity Losses	Environmental Impact
Cane Input (Ton-C.C.S)	12,453.30	3,150.13	203,154.52	184,981.08
Growers' Profits (Baht/Field)	12,088.52	5,019.70	183,782.62	105,182.68
Opportunity Losses (Baht)	12,039.66	3,802.70	179,510.71	92,915.32
Environmental Impact (KgCo ₂)	12,034.93	4,130.54	180,148.38	92,470.34
Average Output from Multi-Objective	12,259.89	4,448.45	187,959.46	137,922.29

ตารางที่ 5-15 ตารางเปรียบเทียบผลเฉลยแบบหลายวัตถุประสงค์โดยเฉลี่ยกับผลเฉลยจากการค้นหา
คำตอบแบบวัตถุประสงค์เดียวสำหรับปัญหาขนาดเล็ก

	Cane Input	Growers' Profits	Opportunity Losses	Environmental Impact
Cane Input (Ton-C.C.S)	5,886.71	5,862.74	85,733.29	51,625.91
Growers' Profits (Baht/Field)	5,686.04	6,756.62	81,180.21	13,782.46
Opportunity Losses (Baht)	5,678.77	5,946.33	79,465.19	11,036.51
Environmental Impact (KgCo ₂)	5,678.07	6,280.57	79,591.60	10,958.73
Average Output from Multi-Objective	5,823.37	6,233.14	85,260.57	40,664.28

จากตารางที่ 5-14 และ 5-15 แสดงให้เห็นว่า ไม่มีความแตกต่างมากนักในส่วนของการเสียสละค่าวัตถุดิบประสงคผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุดจากการคัดเลือกกลุ่มคำตอบ โดยอยู่ที่ 1.55% สำหรับปัญหาขนาดกลาง และ 1.07% สำหรับปัญหาขนาดเล็ก หากแต่วัตถุดิบประสงคสัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุด และค่าสูญเสียวโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด กลับไม่เพิ่มสูงขึ้นเท่าไรนักสำหรับปัญหาขนาดเล็กที่ 6.32% และ 0.55% ตามลำดับ ซึ่งจากการตรวจสอบพบว่า ส่วนหนึ่งมีสาเหตุมาจากตัวข้อมูลนำเข้าเองที่คุณภาพของอ้อยในไร่ค่อนข้างสูง และด้วยจำนวนของแปลงอ้อยรวมถึงทรัพยากรเก็บเกี่ยวที่น้อยทำให้เราไม่เห็นผลจากการกระจายตัวของทรัพยากรจากกลุ่มคำตอบแบบหลายวัตถุดิบประสงคได้ดีเท่ากับในปัญหาที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนวัตถุดิบประสงคปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุดนั้นปัญหาขนาดกลาง และขนาดเล็กมีค่าที่ดีขึ้น 25.44% และ 21.23% ตามลำดับ ซึ่งโดยภาพรวมแล้วยังสามารถกล่าวได้ว่าโรงงานน้ำตาลเป็นผู้ที่เสียประโยชน์ให้กับระบบ

อย่างไรก็ตาม เมื่อวันที่ 7 พ.ย. 2562 สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย ได้มีมติให้โรงงานน้ำตาลรับอ้อยไฟไหม้ไม่เกิน 50% ของปริมาณอ้อยขาเข้า โดยทางโรงงานจะต้องเสียค่าปรับให้กับปริมาณอ้อยที่เกินมาในราคาตันละ 12 บาท โดยมีแนวโน้มที่สัดส่วนของอ้อยไฟไหม้ที่อนุญาตให้รับได้นี้จะลดลงเหลือ 20% และต่ำกว่า ในปีการผลิตถัด ๆ ไป เนื่องด้วยความต้องการแก้ไขปัญหามลพิษของ PM 2.5 และพัฒนาคุณภาพน้ำตาลทรายของทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องในอุตสาหกรรม อย่างเช่นในกรณีของข้อมูลนำเข้าที่ 10 ของปัญหาขนาดใหญ่ในตารางที่ 5-13 นี้ หากมองในมุมมองของโรงงานน้ำตาลซึ่งเป็นผู้มีอำนาจตัดสินใจแล้ว อาจจะดูเหมือนโรงงานเป็นฝ่ายที่เสียเปรียบ แต่ผู้วิจัยพบว่าปริมาณอ้อยไฟไหม้ที่ถูกส่งเข้าโรงงานน้ำตาลของปัญหาขนาดใหญ่ที่ใช้ผลเฉลยวัตถุดิบประสงคผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุดเป็นเกณฑ์นี้ คือประมาณ 2,475 ตันอ้อย จากอ้อยขาเข้าทั้งหมดจำนวน 3,454.52 ตัน ค่ารวมเป็นเงินค่าปรับที่สัดส่วนอ้อยไฟไหม้ขาเข้า 50% แล้วประมาณ $(2,475 - 3,454.52 / 2) = 8,972.88$ บาท ซึ่งตัวเลขดังกล่าวจะเพิ่มสูงขึ้นเป็น 21,409.15 บาท ที่การอนุมัติสัดส่วนอ้อยไฟไหม้ขาเข้า 20% ในปีถัดไป นอกจากนี้เงินที่ได้จากการซื้อขายคาร์บอนเครดิตนั้น ในความเป็นจริงแล้วก็ควรตกเป็นของโรงงานน้ำตาลเช่นกัน ส่งผลทำให้โรงงานน้ำตาลเหลือยอดสูญเสยต่อวันอยู่ประมาณ 80,412.14 บาท ซึ่งลดลงไปกว่า 1 ใน 3 และหากเรามองไปที่อุตสาหกรรมจริง จะพบว่าเกษตรกรรายย่อยส่วนใหญ่นั้นมีการกั๊ยืมเงินเพาะปลูกอ้อยมาจากโรงงานน้ำตาลที่ทำสัญญาซื้อขายอ้อย ด้วยภาวะราคาอ้อยตกต่ำในหลายปีที่ผ่านมาส่งผลอย่างยิ่งให้เกษตรกรเป็นหนี้เรื้อรัง โดยหนี้ก้อนนี้อาจมีมูลค่ามากกว่าทรัพย์สินที่เกษตรกรครอบครองอยู่ การที่โรงงานน้ำตาลยอมให้เกษตรกรได้กำไรเพิ่มมากขึ้นก็จะส่งผลต่อสภาพคล่องสำหรับการลงทุนโครงการต่าง ๆ ในอนาคต

ของโรงงานน้ำตาลเอง ทั้งนี้ สาเหตุทั้งหมดที่ได้กล่าวมา จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่อาจใช้ในการโน้มน้าวโรงงานน้ำตาลให้มองผลประโยชน์ของส่วนรวมมากขึ้นได้

โดยสรุปแล้ว ผลการดำเนินงานวิจัยในข้างต้นนี้นอกจากจะแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการค้นหาคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์ของปัญหาการจัดตารางทรัพยากรด้วยฮิวริสติกส์ที่ออกแบบขึ้นแล้ว ยังแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเลือกผลเฉลยที่สามารถตอบสนองผู้มีส่วนได้ส่วนเสียหลักทั้งสองราย คือ โรงงานน้ำตาล และเกษตรกรไร่อ้อย ซึ่งเป็นสองกลุ่มแรกที่จะพิจารณาเพื่อตอบรับและนำแผนการจัดตารางทรัพยากรนี้ไปดำเนินการ โดยยังคงค่าที่ค่อนข้างดีของวัตถุประสงค์ค่าเสียโอกาสอุตสาหกรรมต่ำสุด และปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุดเอาไว้ได้ แต่ทั้งนี้ การแปลงค่าวัตถุประสงค์ต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปของตัวเงินนั้น แม้ว่าจะทำให้เราสามารถเข้าใจการแลกเปลี่ยนผลประโยชน์ในมุมมองของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียได้ดียิ่งขึ้น แต่ค่าที่ผู้วิจัยใช้ในการแปลงหน่วยนั้นเป็นเพียงค่ากลาง หรือค่าเฉลี่ย ณ ช่วงเวลาหนึ่ง ๆ เท่านั้น ซึ่งอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ตามสภาพของตลาดน้ำตาล หากผู้อ่านวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจ และต้องการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง ผู้วิจัยแนะนำให้ทำการศึกษาพฤติกรรมของระบบในแต่ละพื้นที่เพิ่มเติมเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ตรงตามความต้องการมากยิ่งขึ้น

5.6 สรุป

ในบทนี้ผู้วิจัยได้ทำการจำลองแปลงเพาะปลูกอ้อยสำหรับทดสอบปัญหา 3 ขนาด โดยอ้างอิงจากข้อมูลทางสถิติของพื้นที่ปลูกอ้อยในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย และเพื่อการสังเกตพฤติกรรมการจัดสรรทรัพยากรสำหรับในแต่ละวัตถุประสงค์ ผู้วิจัยได้กำหนดจำนวนทรัพยากรที่ใช้ในระบบให้มีอัตราการทำงานรวมสูงสุดของทรัพยากรเป็น 125% ของปริมาณอ้อยในแต่ละขนาดปัญหา ซึ่งหลังจากทำการทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบของฮิวริสติกส์เป็นจำนวนทั้งสิ้น 10 ชุดข้อมูล ชุดข้อมูลละ 10 รอบ ผู้วิจัยพบว่าการค้นหาคำตอบด้วยฮิวริสติกส์แบบวัตถุประสงค์เดียวนั้นมีความรวดเร็ว และให้ค่าผลเฉลยโดยภาพรวมที่ดีกว่าวิธีแมนตรงในทุกขนาดปัญหา โดยในปัญหาขนาดใหญ่ ฮิวริสติกส์ที่ออกแบบขึ้นใช้เวลาประมาณ 12 นาที ต่อหนึ่งรอบการค้นหาคำตอบ ส่วนในการค้นหาคำตอบด้วยฮิวริสติกส์แบบหลายวัตถุประสงค์ ผู้วิจัยพบว่า ตัวชี้วัดประสิทธิภาพการค้นหา GD, IGD ให้ค่าที่ดีมากสำหรับทุกขนาดปัญหา ซึ่งแสดงว่าจุดคำตอบที่หาได้มีความใกล้เคียงอย่างมากกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงโดยประมาณ ในขณะที่ตัวชี้วัด Spread ให้ค่าที่ดีปานกลางสำหรับปัญหาขนาดเล็ก และค่อย ๆ แล่งตามขนาดของปัญหาที่เพิ่มขึ้น ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละวัตถุประสงค์ที่ถูก

แสดงออกมาทางกราฟพื้นผิวขอบเขตคำตอบที่เหมาะสมที่สุดนั้นมีความคล้ายคลึงกันกับที่ระบุไว้ในประเด็นปัญหา โดยวัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุด กับสัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุด มีทิศทางการเพิ่มขึ้นของผลเฉลยในช่วงแรกที่ไม่แตกต่างกัน หากแต่เมื่อถึงจุดหนึ่งผลเฉลยทั้งสองจะเริ่มมีความขัดแย้งเนื่องจากความต้องการใช้ทรัพยากรที่แตกต่างกัน ในขณะที่วัตถุประสงค์ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด และปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุดมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกัน โดยทั้งสองวัตถุประสงค์นี้将有ความขัดแย้งอย่างชัดเจนกับวัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุด หากแต่วัตถุประสงค์สัดส่วนกำไรของเกษตรกรสูงสุดกลับไม่มีความขัดแย้งกับวัตถุประสงค์ปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุดอย่างที่คาดการณ์เอาไว้ ซึ่งคาดว่าสาเหตุมาจากจำนวนทรัพยากรการเก็บเกี่ยวที่มากเกินไปส่งผลทำให้ไม่เกิดการเลือกใช้ทรัพยากรแรงงานตัดอ้อยไฟไหม้เท่าที่ควร แต่อย่างไรก็ดี ในส่วนท้ายทางผู้วิจัยได้เสนอวิธีการคัดเลือกกลุ่มคำตอบโดยใช้ผลประโยชน์ของโรงงานน้ำตาล และเกษตรกรไร้อ้อยเป็นเกณฑ์ และพบว่ามีแนวโน้มในการเลือกผลเฉลยที่สามารถตอบสนองกับทั้งสองฝ่ายได้ โดยที่ยังให้ค่าที่ค่อนข้างดีสำหรับวัตถุประสงค์อื่น ๆ

บทที่ 6

สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้ทางผู้วิจัยจะกล่าวถึงบทสรุปของงานวิจัย ซึ่งเริ่มต้นจากปัญหาในระบบโลจิสติกส์ขาเข้าของอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลไทย ลักษณะของปัญหา แนวคิดและอัลกอริทึมที่นำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวทั้งแบบวัตถุประสงค์เดียว และหลายวัตถุประสงค์ ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของอัลกอริทึม และท้ายที่สุด ข้อเสนอแนะของงานวิจัย โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.1 บทสรุปงานวิจัย

ผู้วิจัยได้กำหนดวัตถุประสงค์ที่ต้องการบรรลุจากการจัดตารางทรัพยากรในระบบโลจิสติกส์ขาเข้าของโรงงานน้ำตาลไว้ทั้งหมด 4 วัตถุประสงค์ คือ ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุด สัดส่วนกำไรจากการขายอ้อยเฉลี่ยรายคนของเกษตรกรสูงสุด ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด และปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด โดยการจัดตารางทรัพยากรในกรอบเวลาที่จำกัดนี้ สามารถนับได้ว่าเป็นปัญหาการจัดลำดับงาน ความซับซ้อนของปัญหาจึงถูกจัดอยู่ในกลุ่มของปัญหาเอ็นพีแบบยาก ผู้วิจัยจึงตัดสินใจนำฮิวริสติกส์เข้ามาช่วยในการหาผลเฉลยของปัญหา

สำหรับฮิวริสติกส์ที่ออกแบบขึ้นนี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้ทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (PSO) และการจัดกลุ่มแบบ k-means เข้ามาเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการจัดกลุ่มของทรัพยากรรถตัดอ้อย และใช้ PSO ร่วมกับโมดูลการค้นหาเฉพาะที่ อันได้แก่ โมดูล *CHANGERS* โมดูล *JOBSWAP* และโมดูล *SEQSWAP* รวมไปถึงการทำ Multi-Start ในการขยายขอบเขตการค้นหาและพัฒนาคำตอบ ซึ่งกลุ่มของผลเฉลยที่ดีที่สุดที่ได้ จะถูกนำมาพิจารณาคัดเลือกโดยใช้วัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุด และสัดส่วนกำไรจากการขายอ้อยเฉลี่ยรายคนของเกษตรกรสูงสุด เป็นเกณฑ์ เพื่อจะใช้ในการกำหนดชุดคำตอบที่เหมาะสมต่อไป

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของฮิวริสติกส์ ทั้งในส่วนของ การหาคำตอบโดยใช้วัตถุประสงค์เดียว และหลายวัตถุประสงค์เป็นเกณฑ์ โดยใช้ปัญหาในการทดสอบทั้งหมด 3 ขนาด คือ 20 50 และ 150 คันรถบรรทุก ตามลำดับ ซึ่งปัญหาแต่ละขนาดจะถูกทำการทดสอบประสิทธิภาพการค้นหาจากข้อมูลนำเข้า เป็นจำนวน 10 ชุดข้อมูล ชุดข้อมูลละ 10 รอบ โดยจากการทดสอบผู้วิจัยพบว่า การค้นหาคำตอบด้วยฮิวริสติกส์ที่ออกแบบขึ้นสำหรับปัญหาแบบวัตถุประสงค์เดียวนั้นมีความรวดเร็ว และให้ค่าผลเฉลยโดยเฉลี่ยที่ดีกว่าวิธีแมนตรงในทุกขนาดปัญหา (ปัญหาขนาดกลาง และขนาดใหญ่ วิธีแมนตรงไม่สามารถหาผลเฉลยได้) ซึ่งฮิวริสติกส์ใช้เวลาโดยเฉลี่ย

ประมาณ 12 นาที สำหรับการค้นหาคำตอบของปัญหาขนาดใหญ่ ส่วนในกรณีของการค้นหาคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์ ผู้วิจัยพบว่าค่าตัวชี้วัดประสิทธิภาพการค้นหา GD และ IGD มีค่าใกล้เคียงกับ 0 มาก แสดงถึงประสิทธิภาพที่ดีในการลู่เข้าหากลุ่มคำตอบที่แท้จริงโดยประมาณ ในขณะที่ค่า Spread แสดงถึงการกระจายตัว ตั้งแต่ตีปานกลางที่ 0.5344 ในปัญหาขนาดเล็กไปจนถึงค่อนข้างแย่มากที่ 1.0627 ในปัญหาขนาดใหญ่

กราฟพื้นผิวที่สร้างขึ้นจากขอบเขตคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละวัตถุประสงค์ไว้ค่อนข้างใกล้เคียงกันกับที่คาดการณ์เอาไว้ คือ วัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุด มีความขัดแย้งกับทุกวัตถุประสงค์เนื่องจากความต้องการทรัพยากรแรงงานตัดอ้อยไฟไหม้ซึ่งแตกต่างจากวัตถุประสงค์อื่น หากแต่วัตถุประสงค์สัดส่วนกำไรจากการขายอ้อยเฉลี่ยรายคนของเกษตรกรสูงสุดกลับไม่มีความขัดแย้งกับวัตถุประสงค์ปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด ทั้งนี้ คาดว่ามีสาเหตุมาจากทรัพยากรการเก็บเกี่ยวที่มีในระบบมากเกินไป จึงยังไม่เห็นผลของการเลือกใช้ทรัพยากรแรงงานตัดอ้อยไฟไหม้เพื่อให้เกษตรกรมีกำไรเพิ่มขึ้นในกรณีที่เก็บเกี่ยวอ้อยไม่ทันเท่าที่ควร

อย่างไรก็ดี ผู้วิจัยได้พบว่า กลุ่มคำตอบบนขอบเขตคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์สามารถนำมาคัดเลือกให้ตอบสนองกับความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียหลักในระบบ คือ โรงงานน้ำตาล และเกษตรกรไร่อ้อย โดยกลุ่มคำตอบที่ผ่านคัดเลือกขึ้นมา นี้ ให้ผลเฉลี่ยสำหรับวัตถุประสงค์ผลผลิตน้ำตาลทรายสูงสุด และสัดส่วนกำไรจากการขายอ้อยเฉลี่ยรายคนของเกษตรกรสูงสุดที่ค่อนข้างสูง ในขณะที่ค่าสูญเสียโอกาสของอุตสาหกรรมต่ำสุด และปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุดที่แยกกว่าค่าเฉลี่ยเพียงเล็กน้อย ซึ่งกลุ่มคำตอบนี้จะเป็นไปได้ก็ต่อเมื่อ โรงงานน้ำตาลยอมเสียสละผลผลิตน้ำตาลทรายบางส่วน เพื่อแลกกับประโยชน์โดยรวมที่มากขึ้นจากผู้มีส่วนได้ส่วนเสียรายอื่น ๆ เท่านั้น แต่ทั้งนี้ การแปลงค่าวัตถุประสงค์ต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปของตัวเงินนั้น แม้ว่าจะทำให้สามารถเข้าใจการแลกเปลี่ยนผลประโยชน์ในมุมมองของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียได้ง่ายยิ่งขึ้น แต่การที่จะโน้มน้าวโรงงานน้ำตาลด้วยมุมมองของตัวเงินที่ระบบจะได้กลับไปเพียงอย่างเดียวอาจจะเป็นไปได้ยาก เนื่องจากถ้าดูเพียงผิวเผินโรงงานน้ำตาลเป็นผู้เสียประโยชน์จากการตัดสินใจดังกล่าว โดยต้องให้ทางโรงงานน้ำตาลเองลองพิจารณาถึงด้านอื่น ๆ ที่สามารถชดเชยรายได้ในส่วนนั้น เช่น ในแง่ของคาร์บอนเครดิต หรือภาพลักษณ์ต่อสังคมรอบข้างของโรงงาน ศักยภาพในการปลดหนี้ของเกษตรกรที่ทำสัญญา รวมไปถึงกฎระเบียบที่เปลี่ยนแปลงไปในอุตสาหกรรมน้ำตาล ที่

ในอนาคตการรับอ้อยไฟไหม้ในปริมาณมากจะเป็นไปไม่ได้อีกต่อไป ซึ่งจะมีส่วนช่วยให้โรงงานน้ำตาล ตัดสินใจได้ดียิ่งขึ้น

6.2 ข้อเสนอแนะ

- เนื่องจากผู้ที่ให้นำผลการจัดตารางทรัพยากรในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไปปรับใช้จริง คือโรงงานน้ำตาล และเกษตรกรไร่อ้อย ซึ่งเป็นผู้มีส่วนได้ส่วนเสียหลักของระบบ การสำรวจและจัดทำแบบสอบถามเพิ่มเติมเพื่อหาจุดกึ่งกลางที่ทั้งสองฝ่ายยอมรับผลประโยชน์ร่วมกันได้นั้นเป็นหัวข้อที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง โดยนอกจากจะทำให้เราสามารถเข้าใจอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลได้ดียิ่งขึ้นแล้ว ยังทำให้เราสามารถกำหนดวิธีการคัดเลือกคำตอบการจัดตารางทรัพยากรที่เหมาะสมกับพื้นที่หนึ่ง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
- แม้ว่าผลเฉลยจากการค้นหาคำตอบด้วยฮิวริสติกส์ที่ออกแบบขึ้นจะมีค่าที่ค่อนข้างสูง ทั้งกับปัญหาแบบวัตถุประสงค์เดียว และปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ หากแต่ระยะเวลาในการค้นหาคำตอบในปัจจุบันยังเป็นประเด็นที่น่ากังวลใจในกรณีที่ขนาดของปัญหานั้นใหญ่ขึ้น (โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของโรงงานน้ำตาลขนาดใหญ่ที่รับรถบรรทุกอ้อยมากกว่า 500 คันต่อวัน) การหาทางพัฒนาประสิทธิภาพของอัลกอริทึมในการค้นหาคำตอบและเพิ่มความเร็วให้มากขึ้นจึงเป็นประเด็นที่ยังควรค่าแก่การศึกษา
- เพื่อการศึกษาพฤติกรรมที่ตัดสินใจเลือกใช้ทรัพยากรอย่างละเอียดถี่ถ้วนมากยิ่งขึ้น ควรทำการทดลองเพื่อปรับสัดส่วนของทรัพยากรการเก็บเกี่ยว และรถบรรทุกอ้อยที่มีภายในระบบเพื่อหาสัดส่วนการจัดสรรทรัพยากรที่เหมาะสมในอุตสาหกรรมน้ำตาล
- เพื่อความสมจริงในการจำลองระบบ ควรทดลองเพิ่มความหลากหลายของทรัพยากรการเก็บเกี่ยวและขนส่ง เช่น การใช้แรงงานคนร่วมกับรถคืบอ้อย การใช้รถบรรทุกพ่วง
- เนื่องจากสภาพแวดล้อมในอุตสาหกรรมจริงมักจะมีโรงงานน้ำตาลในพื้นที่มากกว่า 1 โรง จึงควรทำการทดสอบเพิ่มจำนวนโรงงานน้ำตาล หรือจุดรับอ้อยลงไปภายในระบบที่สนใจเพื่อจำลองการตัดสินใจของเกษตรกรในการเลือกโรงงานน้ำตาลที่จัดส่งอ้อย รวมไปถึงการทดสอบความเป็นไปได้ในการใช้ฮิวริสติกส์เดียวเพื่อจัดตารางทรัพยากรทั่วทั้งเขตพื้นที่ส่งเสริมอ้อย
- เกษตรกรชากรที่ไม่ได้ทำสัญญาซื้อขายอ้อยล่วงหน้ากับโรงงานน้ำตาล หรือเกษตรกรที่ไม่สามารถปฏิบัติงานได้ตามแผน เป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ควบคุมไม่ได้ ซึ่งทำให้เกิดความแปรปรวนของคิวรถเข้าโรงงานน้ำตาล การพัฒนาฮิวริสติกส์ให้สามารถรองรับกับความไม่แน่นอนดังกล่าวเป็นประเด็นที่น่าศึกษาต่อ

- พันธุ์อ้อยในพื้นที่เพาะปลูกหนึ่ง ๆ อาจมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับราคาของต้นกล้าในแต่ละปี สภาพอากาศ หรือโรคระบาดต่าง ๆ การคำนวณเวลาเก็บเกี่ยว หรือปริมาณอ้อยจึงควรทำการทดลองเพิ่มปัจจัยความแตกต่างของพันธุ์อ้อย และอ้อยตกลงไปในการคำนวณ
- เพื่อความสามารถในการจำลองผลกำไรภายในอุตสาหกรรมน้ำตาลได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น ควรทำการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการนำเข้าอ้อยไฟไหม้ต่อกระบวนการผลิตภายในโรงงานน้ำตาล และการขายผลิตภัณฑ์พลอยได้ของโรงงานน้ำตาล เช่น กากน้ำตาล
- ควรทำการทดลองโดยใช้อัลกอริทึมอื่น ๆ ในการค้นหาคำตอบ แล้วเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับฮิวริสติกส์ในปัจจุบัน



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บรรณานุกรม

- ABOUT SUGAR: THE SUGAR MARKET - PRODUCTION. 2016. Available:
<https://www.isosugar.org/sugarsector/sugar> [Accessed 10 Jan 2020].
- BLUM, C. & ROLI, A. 2003. Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison. *ACM Computing Surveys*, 35, 268-308.
- BOŽENA, B. 2017. An Improved Particle Swarm Optimization Algorithm with Repair Procedure. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer.
- BUAPHUAN, K. 2010. *Rate of change model for sugar content in sugarcane*. Master of Science Program in Computational Science, Chulalongkorn University.
- COELLO, C. A. C. & CORTÉS, N. C. 2005. Solving multiobjective optimization problems using an artificial immune system. *Genetic programming and evolvable machines*, 6, 163-190.
- DA SILVA, A. F. & MARINS, F. A. S. 2014. A Fuzzy Goal Programming model for solving aggregate production-planning problems under uncertainty: A case study in a Brazilian sugar mill. *Energy Economics*, 45, 196-204.
- EBERHART, R. C. & SHI, Y. Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization. Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation. CEC00 (Cat. No.00TH8512), 16-19 July 2000 2000. 84-88 vol.1.
- GLOBAL INDUSTRIAL SUGAR MARKET WAS VALUED AT USD 39.52 BILLION IN 2017 ACCORDING TO NEW RESEARCH REPORT. 2018. Available:
<https://www.chinimandi.com/global-industrial-sugar-market-was-valued-at-usd-39-52-billion-in-2017-according-to-new-research-report/> [Accessed 28 Feb 2018].
- GOLDBERG, D. E. 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.
- GUNNULA, W., KOSITTRAKUN, M., RIGHETTI, T., WEERATHAWORN, P., PRABPAN, M., CALDWELL, J. & SUKCHAN, S. 2012. Evaluating sugarcane growth and maturity using ground-based measurements and remote sensing data. *Thai Journal of Agricultural Science*, 45, 17-28.
- KADWA, M. & BEZUIDENHOUT, C. N. 2015. Modelling sugarcane supply consistency at a

- sugar mill. *Computers and Electronics in Agriculture*, 111, 107-111.
- KAEWTRAKULPONG, K. 2008. *Multi-objective optimization for cost reduction of mechanical sugarcane harvesting and transportation in Thailand*. Degree of Doctor of Philosophy in Agricultural Science, University of Tsukuba.
- KENNEDY, J. & EBERHART, R. Particle swarm optimization. Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks, 1995. IEEE, 1942-1948.
- KENNEDY, J. & MENDES, R. Population structure and particle swarm performance. Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation. CEC'02 (Cat. No.02TH8600), 12-17 May 2002 2002. 1671-1676 vol.2.
- KITTILERTPAISAN, K. & PATHUMNAKUL, S. 2017. Integrating a multiple crop year routing design for sugarcane harvesters to plant a new crop. *Computers and Electronics in Agriculture*, 136, 58-70.
- LARRAHONDO, J. E., BRICENO, C. O., ROJAS, M. & PALMA, M. 2006. An Assessment of After Harvest Sucrose Losses from Sugarcane Field to Factory. *Sugar Tech*, 8, 233-238.
- NEALE, C. M. U., MALTESE, A., ZHAO, Y., JUSTINA, D. D., KAZAMA, Y., ROCHA, J. V., GRAZIANO, P. S. & LAMPARELLI, R. A. C. 2016. Dynamics modeling for sugar cane sucrose estimation using time series satellite imagery. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVIII*.
- PAGANI, V., STELLA, T., GUARNERI, T., FINOTTO, G., VAN DEN BERG, M., MARIN, F. R., ACUTIS, M. & CONFALONIERI, R. 2017. Forecasting sugarcane yields using agro-climatic indicators and Canegro model: A case study in the main production region in Brazil. *Agricultural Systems*, 154, 45-52.
- PARSOPOULOS, K. & VRAHATIS, M. N. 2010. *Particle Swarm Optimization and Intelligence: Advances and Applications*, Information Science Publishing (IGI Global).
- PIEWTHONGNGAM, K., PATHUMNAKUL, S. & SETTHANAN, K. 2009. Application of crop growth simulation and mathematical modeling to supply chain management in the Thai sugar industry. *Agricultural Systems*, 102, 58-66.
- SARAPIROME, S., AUNPHOKLANG, W. & LITTIDEJ, P. Sugarcane transportation allocation using multi-objective decision analysis, northeast region of Thailand.

- Proceedings of the 34th Asian Conference on Remote Sensing, 2013. 20-24.
- SATIDNUWAT, K. & PRICHANONT, S. 2005. *The operation system for farm-to-mill sugarcane supply*. Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering Theses, Chulalongkorn University.
- SETHANAN, K. & NEUNGMATCHA, W. 2016. Multi-objective particle swarm optimization for mechanical harvester route planning of sugarcane field operations. *European Journal of Operational Research*, 252, 969-984.
- SHARATH KUMAR REDDY, Y., SUDHAKAR, P., ESWARA REDDY, G., NAGENDRA REDDY, B. & NAGA MADHURI, K. V. 2015. DETERIORATION OF SUGARCANE DUE TO DE LAYED HARVEST AND CRUSH: A REVIEW. *Progressive Research-An International Journal*, 10, 97-102.
- SOM-ARD, J., HOSSAIN, M. D., NINSAWAT, S. & VEERACHITT, V. 2018. Pre-harvest Sugarcane Yield Estimation Using UAV-Based RGB Images and Ground Observation. *Sugar Tech*, 20, 645-657.
- THUANKAEWSING, S., KHAMJAN, S., PIEWTHONGNGAM, K. & PATHUMNAKUL, S. 2015. Harvest scheduling algorithm to equalize supplier benefits: A case study from the Thai sugar cane industry. *Computers and Electronics in Agriculture*, 110, 42-55.
- US SUGAR #11 FUTURES OVERVIEW. 2020. Available: https://www.investing.com/commodities/us-sugar-no11?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=10926036408&utm_content=458990704236&utm_term=dsa-19959388920_&GL_Ad_ID=458990704236&GL_Campaign_ID=10926036408&gclid=CjwKCAjwkJj6BRA-EiwA0ZVPViG0q9m5CzVs68prg0mleEL-9raSlveYUU6HI8cjsGqEMB3OWh2dPBBoCLGgQAvD_BwE [Accessed 10 Jan 2020].
- YU, Z., WU, W. & WU, L. An Improved Particle Swarm Optimization Algorithm Based on Two Sub-swarms. *In*: JIN, D. & LIN, S., eds. *Advances in Computer Science and Information Engineering*, 2012 Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg, 443-448.
- เชษฐชูดา เชื้อสุวรรณ 2561. แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2561-63 อุตสาหกรรมน้ำตาล. วิจัยกรุงศรี. *โรจน์ลักษณ์ ปรีชา, มนัสชัย จึงตระกูล, คมสันต์ ศรีคงเพชร & วัชรพงศ์ รัชตเวชกุล 2560. ก้าวสู่บริบท*

- ใหม่ของอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลไทย. ธนาคารแห่งประเทศไทย.
- ไทยชูการ์มิลเลอร์. 2561. สมาคมโรงงานน้ำตาลไทย (*The Thai Sugar Producers Association: TSPA*) [Online]. Available: <https://thaisugarmillers.com/tsmc-01-05.html> [Accessed 8 มกราคม 2563].
- กระทรวงพาณิชย์. 2561. ข้อมูลสถิติ มูลค่าการส่งออกสินค้าสำคัญของไทย [Online]. Available: <https://www.moc.go.th/index.php/palmoil-service-all-4/category/category-product010-copy-3.html> [Accessed 7 มกราคม 2563].
- กาญจนา เศรษฐนันท์ 2558. เมตะฮิวริสติกส์ และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม, คลังนานาวิทยา. คณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย 2560. การกำหนดปริมาณมาตรฐานในการผลิตน้ำตาลทรายของโรงงาน. /n: สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย (ed.). ราชกิจจานุเบกษา.
- ทศพล นภาสวัสดิ์. 2556. การศึกษาอัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของรถบรรทุก. ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ปตท. 2562. ราคาน้ำมัน: ราคาขายปลีก กทม. และปริมณฑล [Online]. Available: <https://www.pttor.com/oilprice-capital.aspx> [Accessed 11 มกราคม 2563].
- พงษ์ศักดิ์ อยู่หุ่น 2548. อ้อย (Sugarcane). คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. ภัทรียา นวลใย. 2562. ทำไมต้องเผาอ้อย ? [Online]. Available: https://www.bot.or.th/Thai/ResearchAndPublications/articles/Pages/Article_27Mar2019.aspx [Accessed 10 มกราคม 2563].
- มิตรผลกรุ๊ป. 2561. ฝ่าความจริง เมื่ออ้อยถูกเผาไปก่อนตัด [Online]. Available: <http://www.mitrpholmodernfarm.com/news> [Accessed 10 มกราคม 2563].
- มิตรผลกรุ๊ป. 2563. หยุดเผา!!! ใบอ้อยมีค่า มิตรผลรับซื้อใบอ้อย ฟางข้าว ต้นละ 1,000 บาท [Online]. Available: <http://www.mitrpholmodernfarm.com/news> [Accessed 14 กุมภาพันธ์ 2563].
- วิชัย โอบานุกุล, สันธาร นาควัฒนานุกุล, คทาจุจ จงสุขไวย, มงคล ตุ่นเฮ้า, บาลทิติย์ ทองแดง, ดนัย ศารทูลพิทักษ์ & สุชาติ สุขนิยม 2555. ศีษาสภาพการใช้เครื่องเก็บเกี่ยวอ้อยในประเทศไทย. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13. จังหวัดเชียงใหม่.
- วิริยะ คล้ายแดง 2561. การปรับโครงสร้างราคาน้ำตาลทรายในประเทศ. สำนักงานเลขาธิการสภาผู้แทนราษฎร.
- ศิลา จำเนียรสุข. 2562. การวิเคราะห์ต้นทุนในการปฏิบัติตามมาตรฐานการผลิตอ้อยอย่างยั่งยืน. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ธุรกิจการเกษตร) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร 2557. การศึกษาการใช้เทคโนโลยีเครื่องจักรกลการเกษตร กรณีศึกษา: รถตัดอ้อยโรงงาน. วารสารเศรษฐกิจการเกษตร.
- สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย 2553. รวมประกาศ และระเบียบ: ออกตามความในพระราชบัญญัติอ้อยและน้ำตาลทราย. *In*: สำนักงานคณะกรรมการกฤษฎีกา (ed.).
- สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย 2561. รายงานการผลิตอ้อยของประเทศไทย ประจำปี การผลิต 2560/61. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- สุภาพร พงศ์ธรพฤกษ์ & เสวียน เปรมประสิทธิ์ 2560. การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาผลาญชีวมวลในพื้นที่บริเวณแอ่งเชียงใหม่-ลาพูน. *KKU Science Journal*, 45, 818-826.
- องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก. 2562. *Emission Factor* [Online]. Available: <http://thaicarbonlabel.tgo.or.th/index.php?lang=TH&mod=Y0hKdlpIVmpkSE5mWlcxcGMzTnBiMjQ9> [Accessed 20 มกราคม 2563].
- อดิศักดิ์ คำนวนศิลป์ 2558. การจัดการความรู้ เทคโนโลยีการผลิตอ้อยในเขตภาคกลางและภาค ตะวันตก. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ธารินทร์ โชติวณิช
วัน เดือน ปี เกิด	19 สิงหาคม 2536
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	ปริญญาบัณฑิต: คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2555 - 2559
ที่อยู่ปัจจุบัน	144/81 หมู่บ้านจันทรานีเวศน์ ซ.จันทน์16 ถนนจันทน์ แขวงทุ่งวัดดอน เขต สาทร กทม. 10120



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY