

แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มสำหรับการจัดการโครงข่ายโซ่อุปทาน หลังการเก็บเกี่ยวผลอินทผลัม

ไวยณวี แก้วดี¹ นัฐพล หอมฉุน¹ ศรุต คงรักษ์¹ และ ชัยมงคล ลิ้มเพียรชอบ^{2*}

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

* Corresponding Author: fengckl@ku.ac.th

¹ นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน และ หน่วยวิจัยวิศวกรรมระบบโซ่อุปทานขนาดใหญ่
คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 2 มิถุนายน 2565

แก้ไข : 21 กรกฎาคม 2566

ตอบรับ : 26 กรกฎาคม 2566

DOI: 10.14456/kmuttrd.2023.16

คำสำคัญ : การวางแผนหลังการเก็บเกี่ยว / การวางแผนโซ่อุปทาน / แบบจำลองเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม

การดำเนินการหลังการเก็บเกี่ยวผลอินทผลัมยังคงเป็นแบบดั้งเดิมและต้องได้รับการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการอย่างเร่งด่วน โดยในปัจจุบัน เกษตรกรส่วนใหญ่ยังคงขาดเทคนิคขั้นสูงเพื่อช่วยในการตัดสินใจในเรื่องการจัดการโครงข่ายโซ่อุปทานหลังการเก็บเกี่ยว การควบคุมและการเก็บรักษาผลอินทผลัมที่เก็บเกี่ยวจากสวน ตลอดจนกลยุทธ์ในการขนส่งผลอินทผลัมสดให้ยังคงคุณภาพสูงที่สุด ซึ่งเป็นหนึ่งในกิจกรรมที่สำคัญที่สุดในการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวผลอินทผลัม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มสำหรับการจัดการโครงข่ายโซ่อุปทานหลังการเก็บเกี่ยวผลอินทผลัม เพื่อช่วยให้เกษตรกรสามารถวางแผนการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวให้มีผลกำไรรวมจากการดำเนินการเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการใช้ข้อมูลจริงของเกษตรกรก่อนการใช้แบบจำลองเปรียบเทียบกับหลังการใช้แบบจำลองแสดงให้เห็นว่าสามารถเพิ่มผลกำไรสุทธิรวมจากการดำเนินการได้ถึงร้อยละ 23.54

A Mixed-Integer Linear Programming Model for Postharvest Supply Chain Network Management of Date Palm

Waisanawee Kaewdee¹, Nathapon Homchun¹, Sarut Khongrak¹
and Chaimongkol Limpianchob^{2*}

Kasetsart University, Kamphaeng Saen campus, Kamphaeng Saen, Nakhonpathom 73140

* Corresponding Author: fengckl@ku.ac.th

¹ Student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen

² Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen and Large Scale Supply Chain Systems Engineering Research Unit, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen.

Article Info

Article History:

Received: June 2, 2022

Revised: July 21, 2023

Accepted: July 26, 2023

DOI: 10.14456/kmuttrd.2023.16

Keywords : Post-harvest

Planning / Supply Chain Planning /
Mixed-Integer Linear Programming
Model

Abstract

At present, the post-harvest operations of date palm are still traditional and need improvement to increase efficiency. Many farmers still operate without advanced techniques for post-harvest planning, controlling storage of date palm and making strategic decisions regarding transportation throughout the supply chain despite the fact that these activities are essential for effective post-harvest management. The present study therefore developed a mixed-integer linear programming model for date palm supply chain network to maximize the total profit of farmers. The computational results demonstrate that the total maximum profit increased by 23.54% compared to the profit before applying the model.

1. บทนำ

อินทผลัม (date palm) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Phoenix dactylifera* L. เป็นพืชชนิดหนึ่งที่อยู่ในตระกูลปาล์มมีการกระจายพันธุ์ในพื้นที่แถบตะวันออกกลางและอเมริกาใต้ อินทผลัมมีหลายสายพันธุ์ทั้งชนิดปลูกเพื่อเป็นไม้ประดับ และชนิดปลูกเพื่อรับประทานผล อินทผลัมจัดเป็นผลไม้ที่ดีต่อสุขภาพ [1] ซึ่งจากการศึกษาและเก็บข้อมูลเกี่ยวกับการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวอินทผลัมของสวนกรณีศึกษาในจังหวัดกาญจนบุรี พบว่า ปัญหาในการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวผลอินทผลัมจะพบอยู่ใน 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ การวางแผนหลังการเก็บเกี่ยวผลอินทผลัม (post-harvest planning) และการเลือกรูปแบบสำหรับการขนส่งผลอินทผลัม (transportation modes) ที่เกษตรกรยังคงขาดประสิทธิภาพในการจัดการโครงข่ายโซ่อุปทานหลังการเก็บเกี่ยวผลอินทผลัม

สำหรับปัญหาการวางแผนหลังการเก็บเกี่ยวผลอินทผลัมในปัจจุบันขาดการวางแผนการกระจายผลผลิตออกไปยังช่องทางต่าง ๆ อย่างมีประสิทธิภาพ โดยช่องทางการจัดจำหน่ายมีอยู่หลายช่องทางและมีราคาขายที่แตกต่างกัน ประกอบด้วย ขายเป็นผลสดหน้าสวน หรือส่งขายที่ศูนย์รับซื้อ หรือส่งขายที่ตลาดไท หรือส่งบริษัทเพื่อคั้นเป็นน้ำอินทผลัม ซึ่งในบางครั้งเกษตรกรเกิดปัญหาเก็บเกี่ยวผลผลิตไม่ทัน ทำให้ผลอินทผลัมเน่าเสียไม่สามารถส่งขายได้ในทางกลับกันบางครั้งเกษตรกรก็เก็บเกี่ยวผลผลิตมากเกินไปจนความจำเป็นที่จะขายได้ ทำให้เกษตรกรต้องเก็บผลผลิตไว้ในคลังสินค้า (ตู้แช่) ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดต้นทุนด้านพัสดุคลังที่ไม่จำเป็น และที่สำคัญคือผลอินทผลัมที่เข้าตู้แช่จะไม่สามารถขายเป็นผลสดหน้าสวนของเกษตรกรได้อีก ทำให้ได้เพียงขนส่งไปขายที่ตลาดไทหรือนำไปคั้นเป็นน้ำเท่านั้น ทำให้ราคาขายของผลอินทผลัมลดลง

ส่วนปัญหาอีกด้าน คือ การเลือกใช้พาหนะในการขนส่งผลอินทผลัม โดยในปัจจุบันเกษตรกรจะต้องทำการจัดหาพาหนะไปขนผลอินทผลัมจากสวนไปยังช่องทางการจำหน่ายต่าง ๆ เองทั้งหมด โดยมีพาหนะให้เลือกหลายรูปแบบ เช่น รถบรรทุกหกล้อ รถกระบะ และรถขนส่งขนาดเล็ก ซึ่งเกษตรกรจะเลือกใช้พาหนะที่ว่างอยู่ในการไปขนผลอินทผลัม โดยไม่มีการวางแผนการเลือกใช้พาหนะแต่ละประเภทให้มีความเหมาะสมกับปริมาณผลอินทผลัมที่ขนส่ง ทำให้เกิดปัญหาด้านต้นทุนการขนส่งที่สูงมาก และในบางครั้งผลอินทผลัมเกิดความเสียหายเนื่องจากขนส่งไม่ทันหรือขนส่งในปริมาณที่มากเกินไปใน

แต่ละครั้ง

ดังนั้นการจัดการโซ่อุปทานหลังการเก็บเกี่ยว (post-harvest supply chain management) อย่างมีประสิทธิภาพและมีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว เนื่องจากทุกกระบวนการภายในองค์กร รวมถึงภายนอกองค์กรมีความเกี่ยวข้องเชื่อมโยง และมีผลกระทบซึ่งกันและกัน [2] โดยในงานวิจัยนี้ได้นำหลักการจัดการโซ่อุปทานมาประยุกต์ใช้สำหรับการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวผลอินทผลัม โดยนำเสนอในรูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อให้เกษตรกรมีผลกำไรสุทธิจากการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวผลอินทผลัมที่เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาถึงในด้านการวางแผนหลังการเก็บเกี่ยวให้สอดคล้องกับเวลา และตรงตามปริมาณอุปสงค์ของลูกค้า รวมถึงการเลือกใช้พาหนะให้เหมาะสมกับปริมาณการขนส่ง โดยสร้างเป็นแบบจำลองเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม (Mixed-Integer Linear Programming Model, MILP) เพื่อแก้ไขปัญหาและเป็นเครื่องมือช่วยเกษตรกรในการตัดสินใจสำหรับการวางแผนหลังการเก็บเกี่ยวในโครงข่ายโซ่อุปทานผลอินทผลัมให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทุกวันนี้การวางแผนโครงข่ายโซ่อุปทาน (supply chain network planning) มีความท้าทายอย่างมากในตลาดที่มีการแข่งขันที่สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสินค้าเกษตร (agricultural products) [3] เนื่องจากการผลิตแบบดั้งเดิมไม่สามารถตอบสนองกับอุปสงค์ที่มีความผันผวนและการดำเนินการที่มีความหลากหลายได้ [4] นอกจากนี้การวางแผนโซ่อุปทานของสินค้าเกษตรก็ยังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่ช่วยเกษตรกรในการกำหนดกลยุทธ์และวางแผนการผลิตตลอดทั้งโซ่อุปทานให้มีประสิทธิภาพได้ [5] ดังนั้นการทบทวนงานวิจัยและวรรณกรรมที่มีอยู่อย่างครอบคลุมจึงถูกนำมาเสนอในส่วนนี้ เพื่อสร้างความเข้าใจถึงวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวางแผนโครงข่ายโซ่อุปทานของสินค้าเกษตร ยกตัวอย่างเช่น ในงานวิจัยของ Mula และคณะ [6] ได้มีการนำเสนอการทบทวนวรรณกรรมจำนวนทั้งสิ้น 127 ชิ้นงานที่เกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อช่วยในการวางแผนโครงข่ายโซ่อุปทานสินค้าเกษตร โดยมีวัตถุประสงค์หลักในการวิจัย คือ เพื่อเตรียมพร้อมนักวิจัยที่

สนใจจะเริ่มต้นศึกษาการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อช่วยในการแก้ปัญหาการวางแผนโซ่อุปทานการผลิตสินค้าเกษตร นอกจากนี้ Huang และคณะ [7] ได้อธิบายถึงระบบที่ใช้ในการวางแผนในแต่ละช่วงของโซ่อุปทาน ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างโซ่อุปทาน (supply chain structure) ระดับการตัดสินใจ (decision level) และวิธีการประยุกต์ใช้แบบจำลองโซ่อุปทาน (supply chain analytical modelling approach) รวมถึงการแบ่งปันข้อมูล (shared information) สำหรับงานวิจัยที่ได้ประยุกต์ใช้หลักการการจัดการโครงข่ายโซ่อุปทานสำหรับสินค้าเกษตร ที่ประสบความสำเร็จ ได้แก่ Kazancoglu และคณะ [8] ได้สร้างแบบจำลองโซ่อุปทานการผลิตนมจากฟาร์มปศุสัตว์ไปโรงงานแปรรูปน้ำนมดิบ เพื่อลดความสูญเสีย ส่วนงานวิจัยของ Soto-Silva และคณะ [9] ได้สร้างแบบจำลองในการวางแผนการส่งผลแอปเปิลสดจากสวนไปยังโรงงานแปรรูป Sanjay และ Marcus [10] ได้สร้างแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มในการวางแผนตัดอ้อยเข้าโรงงานผลิตน้ำตาล และ Hu และคณะ [11] สร้างแบบจำลองที่ใช้ในการวางแผนการปลูกและเก็บเกี่ยวข้าวสาลีจากไร่ไปที่โรงสีข้าว

จากการทบทวนงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง รวมถึงความสำเร็จของการนำแบบจำลองโครงข่ายโซ่อุปทานมาประยุกต์ใช้กับสินค้าเกษตรดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น งานวิจัยที่มีความใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้มากที่สุดคือ งานวิจัยของ Soto-Silva และคณะ [9] แต่ในงานวิจัยนี้ยังคงไม่ได้พิจารณารูปแบบการขนส่งผลผลิตจากสวนเข้าสู่โรงงานแปรรูป รวมทั้งการพิจารณาช่องทางการจัดส่งผลผลิตไปยังช่องทางต่าง ๆ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม (Mixed-integer linear programming model, MILP) มาประยุกต์ใช้สำหรับการจัดการโครงข่ายโซ่อุปทานหลังการเก็บเกี่ยวผลอินทผลัม เพื่อให้เกษตรกรได้ใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการกำหนดกลยุทธ์และการตัดสินใจสำหรับการวางแผนหลังการเก็บเกี่ยวผลอินทผลัมให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด นอกจากนี้ยังเป็นเครื่องมือช่วยเกษตรกรในการเลือกรูปแบบการขนส่งผลอินทผลัมเพื่อจัดจำหน่ายในช่องทางต่าง ๆ และเพื่อให้มีผลกำไรจากการดำเนินการรวมเหมาะสมที่สุด (Maximize total profit)

3. โครงสร้างโซ่อุปทานหลังการเก็บเกี่ยวผลอินทผลัม

โครงสร้างโซ่อุปทานหลังการเก็บเกี่ยวผลอินทผลัมจากสวนอินทผลัมกรณีศึกษาในจังหวัดกาญจนบุรีโดยที่ส่วนนี้ปลูกอินทผลัมพันธุ์บาฮี ซึ่งเป็นพันธุ์ที่นิยมปลูกในประเทศไทยเพื่อรับประทานผล จากการศึกษาโครงสร้างโซ่อุปทานดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วย

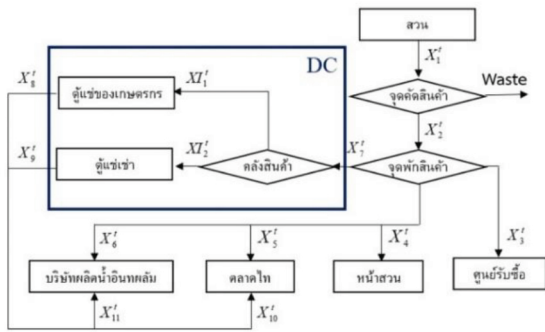
1) เริ่มแรกเมื่อต้นอินทผลัมออกผลแก่พร้อมสำหรับการเก็บเกี่ยว ซึ่งจะอยู่ในช่วงประมาณเดือนกรกฎาคมถึงสิงหาคม เกษตรกรจะทำการเก็บเกี่ยวผลอินทผลัม และจำเป็นต้องเก็บเกี่ยวผลอินทผลัมทั้งหมดให้เสร็จสิ้นภายใน 2 เดือน (8 สัปดาห์) ก่อนที่ผลอินทผลัมจะเสียค่าต้น

2) เมื่อเกษตรกรทำการเก็บเกี่ยวผลอินทผลัม (X_1') แล้วจะนำมาไว้ที่จุดตัดผลผลิตเพื่อทำการคัดเลือกเฉพาะผลอินทผลัมที่ได้ขนาดตามมาตรฐานที่กำหนด (X_2') เท่านั้น ซึ่งผลอินทผลัมที่ไม่ผ่านมาตรฐานก็จะถูกนำออกจากกระบวนการ (waste)

3) หลังจากผ่านกระบวนการคัดเลือกแล้ว ผลอินทผลัมที่ได้มาตรฐานพร้อมสำหรับการจัดจำหน่าย ซึ่งจะมีการแบ่งออกเป็น 4 เส้นทาง คือ การขนส่งไปขายที่ศูนย์รับซื้อ (X_3') หรือนำผลอินทผลัมมาบรรจุใส่กล่องแล้ววางขายที่หน้าสวน (X_4') หรือส่งขายให้กับลูกค้าในตลาดไท (X_5') หรือแปรรูปผลอินทผลัมเป็นน้ำอินทผลัม (X_6') ซึ่งแต่ละช่องทางการจำหน่ายมีราคาขายที่แตกต่างกัน โดยราคาขายหน้าสวนจะมีราคาสูงที่สุด รองลงมาคือ ส่งขายที่ตลาดไท ส่งขายให้บริษัทแปรรูป และส่งขายที่ศูนย์รับซื้อ ตามลำดับ

4) ส่วนผลอินทผลัมที่ส่งไปจัดจำหน่ายไม่หมดในแต่ละสัปดาห์จะถูกเก็บรักษาไว้ที่คลังสินค้ากลางที่อยู่ในบริเวณสวนของกลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกอินทผลัม (X_7') ซึ่งมีลักษณะเป็นตู้แช่เย็นสำหรับเก็บผลอินทผลัมโดยเฉพาะ เพื่อรักษาคุณภาพของผลอินทผลัม

5) หลังจากผลอินทผลัมถูกส่งถึงคลังสินค้ากลางแล้ว เกษตรกรสามารถเลือกตู้แช่เย็นในการแช่ผลอินทผลัมได้ทั้งตู้แช่ของเกษตรกรเอง (X_{11}') หรือตู้แช่เช่า (X_{12}') ซึ่งมีต้นทุนการเก็บรักษาที่แตกต่างกัน ผลอินทผลัมที่แช่ไว้ในตู้แช่ของเกษตรกร (X_8') และตู้แช่เช่า (X_9') จะถูกขนส่งไปขายตลาดไทย (X_{10}') หรือส่งไปคั้นเป็นน้ำอินทผลัม (X_{11}') เท่านั้นไม่สามารถนำมาขายผลสดหน้าสวนได้อีก



รูปที่ 1 โครงสร้างโซ่อุปทานหลังการเก็บเกี่ยวอินทผลัม

4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในงานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลจริงจากสวนอินทผลัมในจังหวัดกาญจนบุรีเป็นกรณีศึกษา โดยมีข้อสมมติ (assumptions) เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

- 1) ผลอินทผลัมทุกสวนมีความพร้อมในการเก็บเกี่ยวตลอดช่วงฤดูการเก็บเกี่ยว (เดือนกรกฎาคมถึงสิงหาคม)
- 2) พาหนะแต่ละประเภทพร้อมใช้งานตลอดเวลา หากเกษตรกรต้องการใช้พาหนะประเภทนั้นในการขนส่ง รวมถึงจำนวนแรงงานที่จำเป็นต้องใช้ในแต่ละกระบวนการมีความพร้อมทุกช่วงเวลาเช่นเดียวกัน
- 3) กำหนดให้เริ่มต้นการคำนวณเพื่อหาผลลัพธ์ในแต่ละกระบวนการไม่มีผลอินทผลัมคงค้าง (WIP) อยู่ในตู้แช่
- 4) กำหนดให้ทุกช่องทางการจำหน่ายผลอินทผลัมลูกค้าจะรับซื้ออินทผลัมทั้งหมดตามปริมาณที่เกษตรกรส่งขายให้ ในส่วนถัดไปจะกล่าวถึงกลุ่มของตัวแปร (sets of Variables) ต่อจากนั้นจะเป็นสมการเป้าหมาย (objective function) และข้อจำกัด (constraints) ต่าง ๆ ตามลำดับ

4.1 ดัชนี (Indices and Sets)

HT กลุ่มเวลาการจัดการหลังการเก็บเกี่ยว

ผลอินทผลัม (สับดาห์), $HT = \{1, 2, \dots, t\}$

Tran กลุ่มพาหนะที่ใช้ในการขนส่งผลอินทผลัม

(ประเภท), $Tran = \{1, 2, \dots, i\}$

4.2 ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables)

คณะผู้วิจัยได้กำหนดตัวแปรเพื่อแสดงถึงปริมาณการไหลของผลอินทผลัมที่ต้องใช้ในแต่ในกระบวนการในโครงข่ายโซ่อุปทานตั้งแต่การเก็บเกี่ยวจากสวนจนถึงส่งผลอินทผลัมไปในช่องทางการจัดจำหน่ายต่าง ๆ ในแต่ละช่วงเวลา $\forall t \in HT$ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

BoT^t ปริมาณน้ำอินทผลัมที่สามารถผลิตขายได้เมื่อเวลา t (ขวด)

$Cool1^t$ ปริมาณอินทผลัมที่คงค้างไว้ที่ตู้แช่ของเกษตรกรเองเมื่อสิ้นสุดเวลา t (กิโลกรัม)

$Cool2^t$ ปริมาณอินทผลัมที่คงค้างไว้ที่ตู้แช่เช่าเมื่อสิ้นสุดเวลา t (กิโลกรัม)

$Lab1^t$ จำนวนแรงงานที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวอินทผลัมเมื่อเวลา t (คน)

$Lab2^t$ จำนวนแรงงานที่ใช้ในการคัดเลือกผลผลิตเมื่อเวลา t (คน)

$Lab3^t$ จำนวนแรงงานที่ใช้ในการบรรจุผลอินทผลัมใส่กล่องเพื่อทำการขายหน้าสวน เมื่อเวลา t (คน)

$Lab4^t$ จำนวนแรงงานที่ใช้ในการผลิตน้ำอินทผลัมเมื่อเวลา t (คน)

$Tran1^t$ จำนวนเที่ยวที่ใช้สำหรับการขนส่งอินทผลัมจากสวนไปยังศูนย์รับซื้อด้วยพาหนะ i เมื่อเวลา t (เที่ยว)

$Tran2^t$ จำนวนเที่ยวที่ใช้สำหรับการขนส่งอินทผลัมจากสวนไปยังคลังสินค้าด้วยพาหนะ i เมื่อเวลา t (เที่ยว)

$Tran3^t$ จำนวนเที่ยวที่ใช้สำหรับการขนส่งอินทผลัมจากสวนไปตลาดไทด้วยพาหนะ i เมื่อเวลา t (เที่ยว)

$Tran4^t$ จำนวนเที่ยวที่ใช้สำหรับการขนส่งอินทผลัมไปบริษัทผลิตน้ำอินทผลัมด้วยพาหนะ i เมื่อเวลา t (เที่ยว)

Xs^t ปริมาณอินทผลัมที่คงค้างจากการเก็บเกี่ยวเมื่อสิ้นสุดเวลา t (กิโลกรัม)

$X1^t$ ปริมาณอินทผลัมที่ถูกเก็บเกี่ยวเมื่อเวลา t (กิโลกรัม)

$X2^t$ ปริมาณอินทผลัมที่ได้มาตรฐานและสามารถนำไปขายได้ เมื่อสิ้นสุดเวลา t (กิโลกรัม)

$X3^t$ ปริมาณอินทผลัมที่ถูกคัดและส่งจากสวนไปยังศูนย์รับซื้อ เมื่อสิ้นสุดเวลา t (กิโลกรัม)

$X4^t$ ปริมาณอินทผลัมที่ถูกคัดใส่บรรจุภัณฑ์เพื่อขายที่หน้าสวน เมื่อสิ้นสุดเวลา t (กิโลกรัม)

$X5^t$ ปริมาณอินทผลัมที่ถูกคัดและส่งจากสวนไปยังตลาดไท เมื่อสิ้นสุดเวลา t (กิโลกรัม)

$X6^t$ ปริมาณอินทผลัมที่ถูกคัดและส่งจากสวนไปยังบริษัทเพื่อคั้นน้ำเป็นน้ำอินทผลัมเมื่อสิ้นสุดเวลา t (กิโลกรัม)

$X7^t$ ปริมาณอินทผลัมที่ขายไม่หมดจะถูกขนส่งจากสวนไปยังคลังสินค้า เมื่อสิ้นสุดเวลา t (กิโลกรัม)

Xs'	ปริมาณอินทผลัมที่ถูกขนส่งออกจากตู้แช่ของเกษตรกรเอง เมื่อเวลา t (กิโลกรัม)
Xs'	ปริมาณอินทผลัมที่ถูกขนส่งออกจากตู้แช่เช่า เมื่อเวลา t (กิโลกรัม)
Xid'	ปริมาณอินทผลัมที่ถูกขนส่งออกจากตู้แช่ไปยังตลาดไท เมื่อเวลา t (กิโลกรัม)
Xit'	ปริมาณอินทผลัมที่ถูกขนส่งออกจากตู้แช่ไปยังบริษัทผลิตน้ำอินทผลัม เมื่อเวลา t (กิโลกรัม)
XIt'	ปริมาณอินทผลัมที่ส่งไปเก็บในตู้แช่ของเกษตรกรเอง เมื่อสิ้นสุดเวลา t (กิโลกรัม)
XIz'	ปริมาณอินทผลัมที่ส่งไปเก็บในตู้แช่เช่า เมื่อสิ้นสุดเวลา t (กิโลกรัม)

นอกจากนี้คณะผู้วิจัยได้กำหนดตัวแปรที่ใช้ตัดสินใจ (Binary Variable) เพื่อบ่งจำนวนสัปดาห์ที่มีการใช้ตู้แช่ของเกษตรกรเองในการเก็บรักษาผลอินทผลัมดังต่อไปนี้

$$Inv' = \begin{cases} 1, & \text{เมื่อเกษตรกรเลือกใช้ตู้แช่ของ} \\ & \text{เกษตรกรเอง} \\ 0, & \text{อื่น ๆ} \end{cases}$$

4.3 ข้อมูลค่าคงที่ (Parameters)

$CapBT$	ปริมาณน้ำอินทผลัมที่สามารถรองรับในการขายได้ (ขวด)
$CapCO$	ความจุของตู้แช่ของเกษตรกรเอง (กิโลกรัม)
$CapTi$	ความสามารถในการขนส่งของพาหนะ i ที่ใช้ในการขนส่งอินทผลัม (กิโลกรัม)
$CosBT$	ต้นทุนขวดที่ใช้สำหรับบรรจุภัณฑ์ (บาทต่อขวด)
$CosCO$	ต้นทุนค่าไฟฟ้าสำหรับตู้แช่ของเกษตรกรเอง (บาทต่อครั้ง)
$CosCOA$	ต้นทุนค่าตู้แช่เช่า (บาทต่อกิโลกรัม)
$CosLB$	ต้นทุนค่าแรงงาน (บาทต่อคน)
$CosPA$	ต้นทุนกล่องที่ใช้สำหรับบรรจุผลอินทผลัม (บาทต่อกิโลกรัม)
$CosT1i$	ต้นทุนค่าขนส่งผลอินทผลัมจากสวนไปศูนย์รับซื้อ เมื่อเลือกใช้พาหนะ i (บาทต่อเที่ยว)
$CosT2i$	ต้นทุนค่าขนส่งผลอินทผลัมจากจุดพักสินค้าไปคลังสินค้า เมื่อเลือกใช้พาหนะ i (บาทต่อเที่ยว)
$CosT3i$	ต้นทุนค่าขนส่งอินทผลัมไปตลาดไท เมื่อเลือกใช้พาหนะ i (บาทต่อเที่ยว)

$CosT4i$	ต้นทุนค่าขนส่งผลอินทผลัมไปบริษัทผลิตน้ำอินทผลัม เมื่อเลือกใช้พาหนะ i (บาทต่อเที่ยว)
Dem'	ปริมาณอุปสงค์จากลูกค้าในตลาดไท เมื่อเวลา t (กิโลกรัม)
$Onsell'$	ปริมาณอินทผลัมที่หน้าสวนสามารถรองรับในการขายได้ (กิโลกรัม)
$PHar'$	ปริมาณอินทผลัมที่ออกผลผลิต เมื่อเวลา t (กิโลกรัม)
$RoB1$	ความสามารถในการเก็บเกี่ยวผลอินทผลัมของแรงงาน (กิโลกรัมต่อคน)
$RoB2$	ความสามารถในการคัดผลอินทผลัมที่ผ่านมาตรฐานของแรงงาน (กิโลกรัมต่อคน)
$RoB3$	ความสามารถในการบรรจุผลอินทผลัมใส่กล่องส่งขายหน้าสวนของแรงงาน (กิโลกรัมต่อคน)
$RoB4$	ความสามารถในการแปรรูปน้ำอินทผลัมของบริษัท (ขวดต่อคน)
$RoBT$	ปริมาณผลอินทผลัมที่สามารถคั้นเป็นน้ำได้ (ขวดต่อกิโลกรัม)
RoL	อัตราปริมาณผลอินทผลัมที่ได้มาตรฐาน
$SellDC'$	ราคาขายอินทผลัมที่ศูนย์รับซื้อ เมื่อเวลา t (บาทต่อกิโลกรัม)
$SellON'$	ราคาขายอินทผลัมที่หน้าสวน เมื่อเวลา t (บาทต่อกิโลกรัม)
$SellTH'$	ราคาขายอินทผลัมที่ตลาดไท เมื่อเวลา t (บาทต่อกิโลกรัม)
$SellBT$	ราคาขายน้ำอินทผลัม (บาทต่อขวด)

4.4 สมการเป้าหมาย (Objective Function)

สมการเป้าหมายสำหรับในงานวิจัยนี้ คือ เพื่อให้เกษตรกรมีกำไรสุทธิจากการดำเนินการรวมเหมาะสมที่สุด (profit maximization) โดยแบบจำลองจะต้องสามารถวางแผนหลังการเก็บเกี่ยว การกระจายสินค้า รวมถึงการขนส่งผลอินทผลัมให้เกิดประสิทธิภาพมากที่สุด และยังสามารถตอบสนองอุปสงค์ของลูกค้าให้เป็นที่ยังพอใจได้ โดยกำไรสุทธิในการดำเนินการในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่คณะผู้วิจัยสร้างขึ้นนั้นสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

$$\text{Max Profit } z = \text{Revenue} - \text{Operation cost} \quad (1)$$

โดยเทอมแรกคือ รายได้จากการขายอินทผลัม (Revenue) ซึ่งรายได้จะเชื่อมโยงกับราคาขายอินทผลัมในแต่ละช่วงเวลา ประกอบด้วย รายได้จากการขายอินทผลัมจากศูนย์รับซื้อ รายได้จากการวางขายหน้าสวน รายได้จากการส่งขายให้กับลูกค้าในตลาดไท และรายได้จากการขายน้ำอินทผลัม ดังนั้น รายได้ที่เกิดขึ้นทั้งหมดในกระบวนการสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$\text{Revenue} = \sum_{i \in HT} X_3^t \cdot \text{SellDC}^t + \sum_{i \in HT} X_4^t \cdot \text{SellON}^t + \sum_{i \in HT} (X_5^t + X_{10}^t) \cdot \text{SellTH}^t + \sum_{i \in HT} \text{BoT}^t \cdot \text{SellBT}$$

ส่วนในเทอมที่สองคือต้นทุนการดำเนินงาน (Operation cost) ซึ่งคำนวณได้จากต้นทุนการขนส่ง (C^{Trans}) ต้นทุนค่าแรงงาน (C^{Labor}) ต้นทุนค่าวัสดุคงคลัง (C^{Inven}) และต้นทุนค่าบรรจุภัณฑ์ (C^{Pack})

$$\text{Operation cost} = C^{\text{Trans}} + C^{\text{Labor}} + C^{\text{Inven}} + C^{\text{Pack}}$$

ต้นทุนค่าขนส่ง (Transportation Cost, C^{Trans}) เป็นต้นทุนที่เกิดขึ้นเมื่อมีการขนส่งอินทผลัมไปตามสถานที่ต่าง ๆ ในโครงข่ายโซ่อุปทาน ดังนั้นต้นทุนที่เกิดขึ้นทั้งหมดในการขนส่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$C^{\text{Trans}} = \sum_{i \in \text{Tran}} \sum_{t \in HT} \text{Tra}_{1i}^t \cdot \text{CosT}_{1i} + \sum_{i \in \text{Tran}} \sum_{t \in HT} \text{Tra}_{2i}^t \cdot \text{CosT}_{2i} + \sum_{i \in \text{Tran}} \sum_{t \in HT} \text{Tra}_{3i}^t \cdot \text{CosT}_{3i} + \sum_{i \in \text{Tran}} \sum_{t \in HT} \text{Tra}_{4i}^t \cdot \text{CosT}_{4i}$$

ต้นทุนค่าแรงงาน (Labor Cost, C^{Labor}) เป็นต้นทุนที่เกิดขึ้นจากการใช้แรงงาน สำหรับการดำเนินงานในกระบวนการต่าง ๆ ซึ่งต้นทุนค่าแรงงานรวมสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$C^{\text{Labor}} = \sum_{i \in HT} (\text{Lab}_1^t + \text{Lab}_2^t + \text{Lab}_3^t + \text{Lab}_4^t) \cdot \text{CosLB}$$

ต้นทุนค่าจัดเก็บวัสดุคงคลัง (Inventory Holding Cost, C^{Inven}) ประกอบด้วยต้นทุนค่าไฟฟ้าสำหรับการใช้ตู้แช่ของเกษตรกรเองในการเก็บรักษาผลอินทผลัม และต้นทุนการเก็บรักษาผลอินทผลัมที่ถูกเก็บรักษาในตู้แช่สำหรับเช่าเพื่อใช้บริการ ดังนั้นต้นทุนค่าวัสดุคงคลังสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$C^{\text{Inven}} = \sum_{i \in HT} \text{Inv}^t \cdot \text{CosCO} + \sum_{i \in HT} \text{XI}_2^t \cdot \text{CosCOA}$$

สุดท้ายคือต้นทุนค่าบรรจุภัณฑ์ (Packaging Cost, C^{Pack}) โดยค่าบรรจุภัณฑ์จะเกิดขึ้นเมื่อมีการวางขายที่หน้าสวน ผลอินทผลัมจะต้องทำการบรรจุใส่บรรจุภัณฑ์ในรูปแบบกล่อง และนำอินทผลัมคันจะต้องทำการบรรจุใส่บรรจุภัณฑ์ในรูปแบบขวด ดังนั้นต้นทุนค่าบรรจุภัณฑ์ทั้งหมดสามารถอธิบายได้ดังนี้

4.5 ข้อจำกัด (Constraints)

ข้อจำกัดสำหรับการวางแผนหลังการเก็บเกี่ยวและขนส่งอินทผลัมไปขายในช่องทางต่าง ๆ ตามอุปสงค์ของลูกค้า เป็นดังนี้

ผู้วิจัยได้กำหนดให้การออกผลแก่ของอินทผลัมที่พร้อมต่อการเก็บเกี่ยว ($PHar^t$) เป็นไปตามค่าเฉลี่ยขั้นต่ำจากข้อมูลของแบบสอบถามที่ถูกเก็บจากกลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกอินทผลัมกรณีศึกษาในจังหวัดกาญจนบุรี ในช่วงฤดูกาลเก็บเกี่ยวประมาณเดือนกรกฎาคมถึงสิงหาคม โดยปริมาณอินทผลัมที่ถูกเก็บเกี่ยวจากสวนในแต่ละช่วงเวลา (X_1^t) แสดงในข้อจำกัด (2)

$$X_S^t = X_S^{t-1} + PHar^t - X_1^t; \forall t \in HT, t \leq 8 \quad (2)$$

สำหรับผลอินทผลัมที่พร้อมเก็บเกี่ยว เกษตรกรจะสามารถทำการเก็บเกี่ยวได้เพียง 8 สัปดาห์ (เดือนกรกฎาคมถึงสิงหาคม) ก่อนที่ผลอินทผลัมจะเสียหายแล้วร่วงลงจากต้น ดังนั้นเพื่อให้เกษตรกรสามารถเก็บเกี่ยวปริมาณผลอินทผลัมในแต่ละช่วงเวลาให้ได้ปริมาณมากที่สุด โดยให้เหลือผลค้างต้นให้น้อยที่สุดคณะผู้วิจัยได้กำหนดข้อจำกัดนี้ โดยแสดงในข้อจำกัด (3)

$$X_1^t \geq X_S^{t-1}; \forall t \in HT, t \leq 8 \quad (3)$$

ส่วนข้อจำกัด (4) นั้นแสดงจำนวนแรงงานที่เกษตรกรต้องใช้ในการเก็บเกี่ยวผลอินทผลัมในแต่ละช่วงเวลา

$$\text{Lab}_1^t \cdot \text{RoB}_1 \geq X_1^t; \forall t \in HT \quad (4)$$

หลังจากที่เกษตรกรเก็บเกี่ยวผลอินทผลัมเรียบร้อยแล้ว อินทผลัมจะถูกคัดเลือกผลที่ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานเท่านั้นสำหรับขายให้กับลูกค้าในช่องทางต่าง ๆ ดังแสดงในข้อจำกัด (5) และส่วนข้อจำกัด (6) แสดงจำนวนแรงงานที่ใช้ในการคัดผลอินทผลัม

$$X_2^t = X_1^t \cdot \text{RoL}; \forall t \in HT \quad (5)$$

และ

$$Lab'_2 \bullet RoB_2 \geq X'_2; \forall t \in HT \quad (6)$$

ผลอินทผลัมที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานและสามารถขายให้กับลูกค้าได้จะถูกแบ่งออกไปตามช่องทางการจำหน่ายต่างๆ ตั้งแต่ส่งไปขายที่ศูนย์รับซื้อ ($X3'$) วางขายที่หน้าสวน ($X4'$) ส่งไปขายที่ตลาดไท ($X5'$) หรือถูกนำไปแปรรูปเป็นน้ำอินทผลัมคั้นสด ($X6'$) โดยข้อจำกัด (7) แสดงการจัดสมดุล (balancing constraint) ปริมาณผลผลิตอินทผลัมที่จุดพักสินค้า

$$X'_7 = X'_2 - (X'_3 + X'_4 + X'_5 + X'_6); \forall t \in HT \quad (7)$$

ข้อจำกัด (8) แสดงประเภทรถและจำนวนเที่ยวรถที่เกษตรกรต้องใช้ในการขนปริมาณอินทผลัมจากสวนไปที่ศูนย์รับซื้อ

$$\sum_{i \in Tran} Tra'_{2i} \bullet CapT_i \geq X'_3; \forall t \in HT \quad (8)$$

สำหรับปริมาณผลอินทผลัมที่ถูกนำมาขายหน้าสวนของเกษตรกรนั้น เกษตรกรจะนำผลอินทผลัมบรรจุใส่กล่องตามปริมาณที่กำหนด โดยขายให้กับลูกค้าโดยตรงที่หน้าสวน ซึ่งเกษตรกรจะกำหนดปริมาณการขายหน้าสวนในแต่ละช่วงเวลาขึ้นอยู่กับราคาขายหน้าสวน ดังแสดงในข้อจำกัด (9) ส่วนข้อจำกัด (10) แสดงจำนวนแรงงานที่ใช้ในการบรรจุผลอินทผลัมใส่กล่องเพื่อทำการขายหน้าสวน

$$X'_4 \leq OnSell'; \forall t \in HT \quad (9)$$

และ

$$Lab'_3 \bullet RoB_3 \geq X'_4; \forall t \in HT \quad (10)$$

ถ้าหากในแต่ละช่วงเวลาเกษตรกรไม่สามารถส่งขายผลอินทผลัมได้หมด ปริมาณอินทผลัมที่เหลืออยู่ ($X7'$) จะถูกเก็บไว้ในตู้แช่เพื่อรักษาคุณภาพของผลอินทผลัม ซึ่งตู้แช่ผลผลิตที่ให้แก่ตรเลือกใช้มีสองประเภท คือ ตู้แช่ที่เป็นของเกษตรกรเอง ($XI1'$) และตู้แช่สำหรับเช่าไว้เก็บผลผลิต ($XI2'$) ซึ่งแสดงในข้อจำกัด (11)

$$X'_7 = XI'_1 + XI'_2; \forall t \in HT \quad (11)$$

ส่วนข้อจำกัด (12) แสดงประเภทรถและจำนวนเที่ยวรถที่เกษตรกรต้องใช้ในการขนปริมาณอินทผลัมเหลือจากจุดพักสินค้าไปที่ตู้แช่ผลอินทผลัม

$$\sum_{i \in Tran} Tra'_{2i} \bullet CapT_i \geq X'_7; \forall t \in HT \quad (12)$$

การเก็บรักษาคุณภาพผลอินทผลัม เกษตรกรจะเลือกใช้ตู้แช่ของตนเองก่อนเป็นลำดับแรก เนื่องจากมีต้นทุนการเก็บรักษาที่ต่ำกว่าการใช้ตู้แช่เช่า แต่มีข้อจำกัดด้านประมาณความจุของตู้แช่ที่เกษตรกรสามารถใช้แช่ผลอินทผลัมได้ ซึ่งในข้อจำกัด (13) – (15) นั้นแสดงการจัดสมดุล (balancing constraint) ปริมาณผลอินทผลัมที่เข้าและออกตู้แช่เมื่อสิ้นสุดในแต่ละช่วงเวลา t

$$CoolL'_1 = CoolL'^{-1}_1 + XI'_1 - X'_8; \forall t \in HT \quad (13)$$

$$CoolL'_1 \leq CapCO \bullet Inv'; \forall t \in HT \quad (14)$$

และ

$$CoolL'_2 = CoolL'^{-1}_2 + XI'_2 - X'_9; \forall t \in HT \quad (15)$$

เมื่อปริมาณผลอินทผลัมที่ออกมาจากตู้แช่แต่ละประเภทจะถูกส่งไปขายที่ตลาดไท ($XI0'$) และส่งยังบริษัทคั้นน้ำอินทผลัม ($XI1'$) เท่านั้นแสดงในข้อจำกัด (16)

$$X'_8 + X'_9 = X'_{10} + X'_{11}; \forall t \in HT \quad (16)$$

ปริมาณผลอินทผลัมที่ส่งขายตลาดไทจะเป็นผลอินทผลัมที่เก็บสดจากสวน ($X5'$) รวมกับปริมาณผลอินทผลัมที่ส่งมาจากตู้แช่ ($XI0'$) ซึ่งต้องมีปริมาณเพียงพอต่อความต้องการของลูกค้าในตลาดไท ซึ่งแสดงในข้อจำกัด (17)

$$(X'_5 + X'_{10}) \geq Dem'; \forall t \in HT \quad (17)$$

ข้อจำกัด (18) แสดงประเภทรถและจำนวนเที่ยวรถที่เกษตรกรต้องใช้ในการขนปริมาณอินทผลัมไปที่ตลาดไท

$$\sum_{i \in Tran} Tra'_{3i} \bullet CapT_i \geq (X'_5 + X'_{10}); \forall t \in HT \quad (18)$$

ในการทำงานเดียวกัน ปริมาณผลอินทผลัมส่วนหนึ่งจะถูกส่งเข้าบริษัทคั้นน้ำ เพื่อคั้นและบรรจุใส่ขวดขายเป็นน้ำอินทผลัมโดยผลอินทผลัมที่สามารถคั้นเป็นน้ำได้สามารถมาจากทั้งสวนโดยตรง (X_6^t) รวมกับปริมาณผลอินทผลัมที่ส่งมาจากตู้แช่ (X_{11}^t) ซึ่งต้องไม่เกินกำลังการผลิตน้ำอินทผลัมของบริษัทฯ แสดงในข้อจำกัด (19) และ (20)

$$(X_6^t + X_{11}^t) \bullet RoBT \geq BoT^t; \forall t \in HT \quad (19)$$

และ

$$BoT^t \leq CapBT; \forall t \in HT \quad (20)$$

ส่วนข้อจำกัด (21) และ (22) แสดงจำนวนแรงงานที่ต้องใช้ในการผลิตน้ำอินทผลัม และจำนวนเที่ยวรถที่ต้องใช้ในการขนส่งปริมาณผลอินทผลัมไปยังบริษัทผลิตน้ำอินทผลัม ตามลำดับ

$$Lab_4^t \bullet RoB_4 \geq BoT^t; \forall t \in HT \quad (21)$$

และ

$$\sum_{i \in Tran} Tra_{4i}^t \bullet CapT_i \geq (X_6^t + X_{11}^t); \forall t \in HT \quad (22)$$

$$Inv^t \in \{0,1\}; \forall t$$

$$Cool_1^t, Cool_2^t, X_s^t, XI_1^t, XI_2^t, X_1^t, X_2^t, X_3^t \geq 0; \forall t$$

$$X_4^t, X_5^t, X_6^t, X_7^t, X_8^t, X_9^t, X_{10}^t, X_{11}^t \geq 0; \forall t$$

$$BoT^t \geq 0 \text{ and integer}; \forall t$$

$$Lab_1^t, Lab_2^t, Lab_3^t, Lab_4^t \geq 0 \text{ and integer}; \forall t$$

$$Tra_{1i}^t, Tra_{2i}^t, Tra_{3i}^t, Tra_{4i}^t \geq 0 \text{ and integer}; \forall i, \forall t$$

5. ผลลัพธ์การคำนวณ (Numerical Results)

จากหัวข้อที่ผ่านมาในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยใช้โปรแกรม CPLEX Solver ซึ่งเขียนด้วยภาษา GAMS Studio (Version 27.3.0) ในการหาผลลัพธ์คำตอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่คณะผู้วิจัยสร้างขึ้น โดยในรูปที่ 2 แสดงตัวอย่างการเขียนแบบจำลองด้วยโปรแกรม CPLEX Solver ในส่วนของข้อมูลค่าคงที่ (Parameters)

```

3 parameter RoB1 'Production capacity in 1 week per person I' /2500/
4           RoB2 'Production capacity in 1 week per person II' /500/
5           RoB3 'Production capacity in 1 week per person III' /500/
6           RoB4 'Production capacity in 1 week per person IV' /250/
7           CosLB 1 'cost of customer' /2200/
8           CosCOA 'rent Freezer cost' /14/
9           CosCO 'electricity bill private Freezer cost per week' /130/
10          Cost(i) 'cost of transportation 1' /11 3750
11              12 1575
12              13 1125
13              14 745/
14          CosPA 'cost of packaging box' /20/
15          CosBT 'cost of packaging bottle' /5/
16          OnSell 'capacity of selling date palm front plantation' /420/
17          CapBT 'capacity of selling water front plantation' /420/
18          CapCO 'capacity private Freezer' /3000/
19          RoL 'The probability that the date will pass the assessment' /0.95/
20          RoBT 'The quantity of bottles that can contain date palm juice' /30/
21          CapT(i) 'capacity of vehicle 1' /11 15000
22              12 4000
23              13 1250
24              14 150/
25          FHar(t) 'The number of date palms produced' /t1 1300
26              t2 1000
27              t3 1200
28              t4 1400
29              t5 2000
30              t6 1400
31              t7 2500
32              t8 2300
33              t9 4300
34              t10 3900
35              t11 4800
36              t12 3000
37              t13 4800
38              t14 4500
39              t15 4300
40              t16 1500
41              t17 3200
42              t18 1600
43              t19 0
44              t20 0

```

รูปที่ 2 ตัวอย่างการเขียนแบบจำลองด้วยโปรแกรม CPLEX Solver

ในการเขียนแบบจำลองการจัดการโครงข่ายโซ่อุปทานหลังการเก็บเกี่ยวผลอินทผลัม เพื่อใช้ในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด โดยมีขนาดของปัญหาแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดของปัญหากรณีศึกษา (The size of the test problem)

จำนวนสวนอินทผลัม (สวน)	11
จำนวนตู้แช่ของเกษตรกร (ตู้)	5
จำนวนตู้แช่เช่า (ตู้)	16
ประเภทพาหนะที่ใช้ในการขนส่ง (ประเภท)	4
จำนวนหน่วยเวลาที่ใช้ในแบบจำลอง (สัปดาห์)	52
จำนวนตัวแปร (Number of Variables)	1,977
จำนวนข้อจำกัด (Number of Constraints)	1,093
เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (วินาที) (Solution time in CPU)	216.02
ค่าความเผื่อ (Gap tolerance)	0.05

5.1 ผลลัพธ์จากกรณีศึกษา (Basic case study)

ในส่วนนี้คณะผู้วิจัยจะนำเสนอผลลัพธ์การคำนวณของแบบจำลองจากข้อมูลจริงในรอบการเก็บเกี่ยว พ.ศ.2564 ของสวนอินทผลัมกรณีศึกษาในจังหวัดกาญจนบุรี ซึ่งผลลัพธ์ของแบบจำลองเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มเพื่อใช้ในการวางแผนโครงข่ายโซ่อุปทานหลังการเก็บเกี่ยว รวมถึงการขนส่งผลอินทผลัมตั้งแต่การเก็บเกี่ยว การคัดเลือกผลอินทผลัมที่ผ่านมาตรฐาน รวมถึงไปการกระจายผลผลิตไปยังช่องทางการจำหน่ายต่าง ๆ โดยสามารถตอบสนองต่ออุปสงค์ของลูกค้าให้เป็นที่ยอมรับพอใจได้

ผลลัพธ์ของแบบจำลองมีผลกำไรสุทธิของการดำเนินการที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 15,303,145 บาท โดยมีค่าความเผื่อ (gap tolerance) อยู่ที่ 0.05% และใช้เวลาในการคำนวณ 216.02 วินาที แสดงให้เห็นถึงคุณภาพของผลลัพธ์จำนวนเต็มที่ได้จากการคำนวณสูงมาก ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์กำไรสุทธิการดำเนินการทั้งหมดก่อนการใช้แบบจำลอง (Manual Planning) จะมีกำไรสุทธิอยู่ที่ 12,387,025 บาท ซึ่งเกษตรกรจะใช้ประสบการณ์ที่เคยทำมาในอดีตในการเก็บเกี่ยวผลอินทผลัม โดยไม่มีการวางแผนการจัดการหลังการเก็บเกี่ยว และการวางแผนการจ้างแรงงาน รวมถึงการเลือกใช้พาหนะในการขนส่งให้มีความเหมาะสมกับปริมาณผลผลิต แต่เมื่อนำ

แบบจำลองที่คณะผู้วิจัยได้สร้างขึ้นมานั้นสามารถเพิ่มผลกำไรสุทธิจากการดำเนินการรวมได้ถึง 2,916,120 บาท หรือสามารถเพิ่มผลกำไรสุทธิได้ถึงร้อยละ 23.54 ซึ่งผลลัพธ์ของคำตอบจากแบบจำลองสามารถวางแผนโครงข่ายโซ่อุปทานหลังการเก็บเกี่ยวผลอินทผลัมได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถวางแผนการจ้างแรงงานที่เคยเกินความจำเป็นให้มีปริมาณที่เหมาะสม ช่วยลดการจ้างแรงงาน และลดต้นทุนที่ไม่จำเป็นลงได้

นอกจากนี้แบบจำลองยังสามารถเลือกใช้พาหนะในการขนส่งอินทผลัมตามน้ำหนักที่ต้องขนส่งได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ สามารถตอบสนองต่ออุปสงค์ของลูกค้าได้อย่างเป็นที่ยอมรับพอใจ ซึ่งแต่เดิมเกษตรกรจะเลือกใช้พาหนะในการขนส่งที่ว่างอยู่โดยไม่คำนึงถึงปริมาณของผลผลิตที่จะขนส่ง ทำให้เกิดต้นทุนการขนส่งที่เกินความจำเป็น ซึ่งจากผลลัพธ์ของแบบจำลองดังกล่าว สามารถลดต้นทุนการขนส่งได้เหลือเพียง 198,135 บาท จากเดิมอยู่ที่ 253,435 บาท หรือสามารถลดต้นทุนค่าขนส่งได้ร้อยละ 21.82 โดยค่าผลลัพธ์ของตัวแปรตัดสินใจแต่ละตัวของแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มที่ได้จากการคำนวณ แสดงในตารางที่ 2 ถึงตารางที่ 4

ตารางที่ 2 แสดงตัวอย่างปริมาณอินทผลัมที่ออกผลผลิต ($PHar^t$) ปริมาณอินทผลัมที่คงค้างจากการเก็บเกี่ยว (X_s^t) ปริมาณอินทผลัมที่ถูกเก็บเกี่ยว (X_I^t) และปริมาณอินทผลัมที่ได้มาตรฐานและสามารถนำไปขายได้ (X_2^t) ปริมาณอินทผลัมที่ถูกคัดและส่งจากสวนไปยังศูนย์รับซื้อ (X_3^t) ปริมาณอินทผลัมที่ถูกคัดใส่บรรจุภัณฑ์เพื่อขายที่หน้าสวน (X_4^t) เมื่อเวลา $t=1,...,6$

สัปดาห์	ปริมาณอินทผลัม (กิโลกรัม)					
	$PHar^t$	X_s^t	X_I^t	X_2^t	X_3^t	X_4^t
สัปดาห์ที่ 1	1,300	52	1,248	1,185.6	0	420
สัปดาห์ที่ 2	1,000	0	1,052	999.4	0	420
สัปดาห์ที่ 3	1,200	6	1,194	1,134.3	0	420
สัปดาห์ที่ 4	1,400	100	1,306	1,240.7	0	420
สัปดาห์ที่ 5	2,000	0	2,100	1,995.0	0	420
สัปดาห์ที่ 6	1,400	100	1,300	1,235.0	0	420

จากตารางที่ 2 ปริมาณผลอินทผลัมที่ถูกเก็บเกี่ยว (X_I^t) ในสัปดาห์ที่ 1 มีปริมาณ 1,248 กิโลกรัม ซึ่งจะถูกส่งไปที่จุดคัดผลผลิต เหลือปริมาณผลอินทผลัมที่ได้มาตรฐาน (X_2^t)

จำนวน 1,185.6 กิโลกรัม และจะถูกส่งไปที่จุดพักสินค้าเพื่อขนส่งไปจำหน่ายตามช่องทางต่างๆ โดยไม่มีปริมาณอินทผลัมที่ถูกคัดและส่งจากสวนไปยังศูนย์รับซื้อ (X_3^t) เนื่องจากการ

ขายอินทผลัมให้กับศูนย์รับซื้อมีราคาขายที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับ
กับการขายในช่องทางอื่น ๆ โดยปริมาณอินทผลัมที่ถูกคัดใส่
บรรจุภัณฑ์เพื่อขายที่หน้าสวน (X_7') มีจำนวน 420 กิโลกรัม
ปริมาณอินทผลัมที่ถูกคัดและส่งไปยังตลาดไท (X_5') จำนวน
601.6 กิโลกรัม ส่งไปยังบริษัทเพื่อคั้นน้ำ (X_6') จำนวน 14
กิโลกรัม เหลือเข้าไปเก็บไว้ที่คลังสินค้า (X_7') เพื่อรอเข้าสู่
แช่จำนวน 150 กิโลกรัม ตามลำดับ

ตารางที่ 3 แสดงตัวอย่างปริมาณอินทผลัมที่ถูกคัดและส่งจากสวนไปยังตลาดไท (X_5') และปริมาณอินทผลัมที่ถูกคัดและ
ส่งจากสวนไปยังบริษัทเพื่อคั้นน้ำเป็นน้ำอินทผลัม (X_6') ปริมาณอินทผลัมที่ขายไม่หมดจะถูกขนส่งจากสวนไปยังคลังสินค้า
(X_7') ปริมาณอินทผลัมที่ถูกขนส่งออกจากตู้แช่ของเกษตรกรเอง (X_8') ปริมาณอินทผลัมที่ถูกขนส่งออกจากตู้แช่เช่า (X_9')
และปริมาณอินทผลัมที่ถูกขนส่งออกจากตู้แช่ไปยังตลาดไท (X_{10}') เมื่อเวลา $t=1,...,6$

สัปดาห์	ปริมาณอินทผลัม (กิโลกรัม)					
	X_5'	X_6'	X_7'	X_8'	X_9'	X_{10}'
สัปดาห์ที่ 1	601.6	14	150	98.4	0	98.4
สัปดาห์ที่ 2	579.4	0	0	0	51.6	37.6
สัปดาห์ที่ 3	700.0	14	0	0	0	0
สัปดาห์ที่ 4	700.0	14	0	0	0	0
สัปดาห์ที่ 5	700.0	875	0	0	0	0
สัปดาห์ที่ 6	700.0	115	0	0	0	0

จากตารางที่ 3 ปริมาณอินทผลัมที่รอเข้าสู่แช่จำนวน 150 กิโลกรัม จะถูกแบ่งเข้าสู่แช่ของเกษตรกรเอง (X_{11}') จำนวน 98.4 กิโลกรัม และตู้แช่เช่า (X_{12}') จำนวน 51.6 กิโลกรัม และเหลือคงค้างเมื่อสิ้นสุดสัปดาห์ที่ 1 จำนวน 51.6 กิโลกรัม ตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงตัวอย่างปริมาณอินทผลัมที่ถูกขนส่งออกจากตู้แช่ไปยังบริษัทเพื่อคั้นน้ำเป็นน้ำอินทผลัม (X_{11}') ปริมาณ
อินทผลัมที่ส่งไปเก็บในตู้แช่ของเกษตรกรเอง (X_{11}') ปริมาณอินทผลัมที่ส่งไปเก็บในตู้แช่เช่า (X_{12}') ปริมาณอินทผลัมที่คง
ค้างไว้ที่ตู้แช่ของเกษตรกรเอง ($Cool_1'$) ปริมาณอินทผลัมที่คงค้างไว้ที่ตู้แช่เช่า ($Cool_2'$) และปริมาณน้ำอินทผลัมที่ต้องการ
ขายหน้าสวน (BoT') เมื่อเวลา $t=1,...,6$

สัปดาห์	ปริมาณอินทผลัม (กิโลกรัม)					
	X_{11}'	X_{12}'	X_{12}'	$Cool_1'$	$Cool_2'$	BoT'
สัปดาห์ที่ 1	0	98.4	51.6	0	51.6	420
สัปดาห์ที่ 2	14	0	0	0	0	420
สัปดาห์ที่ 3	0	0	0	0	0	420
สัปดาห์ที่ 4	0	0	0	0	0	420
สัปดาห์ที่ 5	0	0	0	0	0	420
สัปดาห์ที่ 6	0	0	0	0	0	420

5.2 การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity analysis)

สำหรับการตรวจสอบผลกระทบของค่าคงที่ (Parameters) ต่าง ๆ ต่อแบบจำลองในกรณีศึกษาครั้งนี้ คณะผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ความไว โดยพิจารณาความแปรผันต่าง ๆ ของแบบจำลอง ในขอบเขตของค่าคงที่ที่กำหนด [12]

การวิเคราะห์ความไวจากแบบจำลองกรณีศึกษาเพื่อดูเงื่อนไขความเปลี่ยนแปลงของต้นทุนที่มีต่อผลกำไรสุทธิรวม

ซึ่งต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับโซ่อุปทานหลังการเก็บเกี่ยวอินทผลัมจะประกอบไปด้วยต้นทุน 4 ประเภท คือ ต้นทุนในการจ้างแรงงานต่างๆ ต้นทุนการเก็บรักษาอินทผลัม ต้นทุนการขนส่งอินทผลัม และต้นทุนด้านบรรจุภัณฑ์ โดยคณะผู้วิจัยจะเพิ่มต้นทุนแต่ละประเภทครั้งละ 10% จนถึง 50% [13] โดยผลลัพธ์ของกำไรรวมสุทธิ และเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของต้นทุนแต่ละประเภทแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความไวในกรณีที่ต้นทุนมีการเพิ่มขึ้น

เปอร์เซ็นต์ เปลี่ยนแปลง	ต้นทุนในการจ้างแรงงาน		ต้นทุนการเก็บรักษาอินทผลัม	
	ผลรวมกำไรสุทธิ	เปลี่ยนแปลง (%)	ผลรวมกำไรสุทธิ	เปลี่ยนแปลง (%)
10	15,250,961.3	0.341	15,291,820.7	0.074
20	15,171,231.9	0.862	15,290,749.5	0.081
30	15,072,751.7	1.227	15,289,984.3	0.086
40	15,044,368.8	1.691	15,289,066.1	0.092
50	14,974,892.5	2.145	15,288,760.0	0.094
เปอร์เซ็นต์ เปลี่ยนแปลง	ต้นทุนการขนส่งอินทผลัม		ต้นทุนด้านบรรจุภัณฑ์	
	ผลรวมกำไรสุทธิ	เปลี่ยนแปลง (%)	ผลรวมกำไรสุทธิ	เปลี่ยนแปลง (%)
10	14,864,556.9	2.866	15,293,504.0	0.063
20	14,824,003.5	3.131	15,292,585.8	0.069
30	14,716,881.5	3.831	15,291,973.7	0.073
40	14,660,872.0	4.197	15,290,902.5	0.080
50	14,550,842.4	4.916	15,290,137.3	0.085

6. สรุป

ในงานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นในโครงข่ายโซ่อุปทานหลังการเก็บเกี่ยวผลอินทผลัมจากสวนกรณีศึกษาในจังหวัดกาญจนบุรี ซึ่งจากการเก็บรวบรวมข้อมูลพบว่าเกษตรกรประสบปัญหาอยู่ 2 ด้านใหญ่ ๆ คือ 1) การวางแผนหลังการเก็บเกี่ยวผลอินทผลัมที่ขาดประสิทธิภาพทำให้ผลอินทผลัมเน่าเสียเกิดความเสียหาย และไม่สามารถตอบสนองตามอุปสงค์ของลูกค้าได้ และ 2) การเลือกใช้พาหนะในการขนส่งอินทผลัม โดยเกษตรกรจะใช้เลือกพาหนะที่ว่างอยู่ในการไปขนผลอินทผลัม ซึ่งไม่มีการวางแผนจัดการการเลือกใช้พาหนะในแต่ละประเภทให้มีความเหมาะสมกับปริมาณอินทผลัมที่ขนส่ง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็มมาใช้ในการวางแผนโครงข่ายโซ่อุปทานหลังการเก็บเกี่ยวผลอินทผลัม ซึ่งโปรแกรม CPLEX Solver โดยใช้ภาษา GAMs Studio (Version 27.3.0) ถูกนำมาใช้ในการหาผลลัพธ์ของแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด โดยมีค่าความเผื่อจากค่าที่เหมาะสมที่สุดเพียง 0.05% เท่านั้น นอกจากนี้ผลลัพธ์ของแบบจำลองยังสามารถจัดการโครงข่ายโซ่อุปทานหลังการเก็บเกี่ยวผลอินทผลัมได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถเพิ่มผลกำไรสุทธิรวมมากกว่าก่อนการใช้แบบจำลองได้ถึงร้อยละ 23.54 และสามารถลดต้นทุนค่าขนส่งลงได้ถึงร้อยละ 21.82

สำหรับงานวิจัยในอนาคตที่คณะผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาเพิ่มเติม เพื่อให้การจัดการโครงข่ายโซ่อุปทานหลังการเก็บเกี่ยวผลอินทผลัมสามารถครอบคลุมการตัดสินใจและตรงกับสถานการณ์ปัจจุบันมากยิ่งขึ้น คือ การจัดการก่อนการเก็บเกี่ยว (Pre-harvest) โดยศึกษาตั้งแต่การหาจัดหาดันพันธุ์ การปลูกอินทผลัม การบำรุงรักษาดันอินทผลัมให้สามารถมีผลผลิตในช่วงที่ราคาขายผลอินทผลัมนี้อาจสูง เนื่องจากการขายผลอินทผลัมนี้อาจมีราคาที่สูงกว่าการนำไปคั้นเป็นน้ำขาย

7. เอกสารอ้างอิง

1. Khenaitip, J., 2015, Research and Development of Date Palm Varieties, Department of Agriculture, Bangkok.
2. Beamon, B.M., 1998, "Supply Chain Design and Analysis: Models and Methods," *International Journal of Production Economics*, 55 (3), pp. 281-294.
3. Selcuk Erenguc, S., Simpson, N.C. and Vakharia, A.J., 1999, "Integrated production/ distribution planning in supply chains: An invited review," *European Journal of Operational Research*, 115 (2), pp. 219-236.
4. Tsolakis, N.K., Keramydas, C.A., Toka, A.K., Aidonis, D.A. and Lakovou, E.T., 2014, "Agi-food Supply Chain Management: A Comprehensive Hierarchical Decision-making Framework and Critical taxonomy," *Biosystems Engineering*, 120 (1), pp. 46-64.
5. Ahumad, O. and Villalobos, J.R., 2009, "Application of Planning Models in the Agri-food Supply Chain: A Review," *European Journal of Operational Research*, 195 (1), pp. 1-20.
6. Mula, J., Peodro, D., Diaz-Madronero, M. and Vicens, E., 2010, "Mathematical Programming Models for Supply Chain Production and Transport Planning," *European Journal of Operational Research*, 204 (3), pp. 377-390.
7. Huang, G.Q., Lau, J.S.K. and Mak, K.L., 2003, "The Impacts of Sharing Production Information on Supply Chain Dynamics: A Review of the Literature," *International Journal of Production Research*, 41 (7), pp. 1483-1517.
8. Kazancoglu, Y., Yesim, D.O. and Ozbiltekin, M., 2018, "Minimizing Losses in Milk Supply Chain with Sustainability: An Example from Emerging Economy," *Resources, Conservation and Recycling*, 139 (3), pp. 270-279.
9. Soto-Silva, W.E., Gonzalez-Araya, M., Oli-va-Fernandez, M.A. and Pla-Aragones, L.M., 2017, "Optimizing Fresh Food Logistics for Processing: Application for Large Chilean Apple Supply Chain," *Computers and Electronics in Agriculture*, 136 (1), pp. 42-57.
10. Sanjay, D.J. and Marcus, P., 2013, "Harvest Planning in the Brazilian Sugar Cane Industry via Mixed Integer Programming," *European Journal of Operational Research*, 230 (2), pp. 374-384.
11. Hu, Y., Liu, Y., Wang, Z., Wen, J., Li, J. and Lu, J., 2020, "A Two-stage Dynamics Capacity Planning Approach for Agricultural Machinery Maintenance Service with Demand Uncertainty," *Biosystems Engineering*, 190 (4), pp. 201-217.
12. Yousefi, B.A., Tavakkoli, M.A., Bozorgi, A.A. and Seifi, S., 2017, "Designing a Reliable multi-objective Queuing Model of a Petrochemical Supply Chain Network Underuncertainty: A Case Study," *Computers and Chemical Engineering*, 100, pp.177-197.
13. Bilgen, B. and Ozkarahan, I., 2007, "A Mixed-integer Linear Programming Model for Bulk Grain Blending and Shipping," *International Journal of Production Economics*, 107 (2), pp. 555-571.

