# การเพิ่มประสิทธิภาพโลจิสติกส์โซ่ความเย็น: ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการรักษาอุณหภูมิของกล่องเก็บความเย็นแบบพกพา

# Enhancing Cold Chain Logistics: Key Factors Influencing Temperature Retention in Portable Cold Storage Boxes

รามาวดี นัยวรรณ์ และ อัครนันท์ พงศธรวิวัฒน์*

โลจิสติกส์อัจฉริยะและการจัดการห่วงโซ่อุปทาน คณะสถิติประยุกต์ สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์
E-mail: akkaranan.pon@nida.ac.th*

Ramawadee Naiyawan and Akkaranan Pongsathornwiwat*

Smart Logistics and Supply Chain Management, Graduate School of Applied Statistics,
National Institute of Development Administration
E-mail: akkaranan.pon@nida.ac.th*

Received 25 Apr 2025; Revised 13 Jun 2025
Accepted 7 Aug 2025; Available online 30 Dec 2025

**บทคัดย่อ**

โลจิสติกส์โซ่ความเย็นมีบทบาทสำคัญในการขนส่งสินค้าไวต่ออุณหภูมิ เช่น วัคซีน ยารักษาโรค และผลิตภัณฑ์อาหารสด โดยหนึ่งในองค์ประกอบที่สำคัญคือ กล่องเก็บความเย็นแบบพกพา ซึ่งใช้ในการรักษาอุณหภูมิของสินค้าให้คงที่ตลอดกระบวนการขนส่ง งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกักเก็บอุณหภูมิของกล่องเก็บความเย็น รวมถึงพัฒนา ตัวแบบพยากรณ์ ระยะเวลาการรักษาอุณหภูมิโดยใช้ การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments: DOE) การทดลองดำเนินการโดยใช้ แผนการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design) และ การวิเคราะห์ตัวแปรผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) เพื่อระบุปัจจัยที่มีผลต่อระยะเวลาการรักษาอุณหภูมิ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ประเภทของกล่องเก็บความเย็น (B-Box), จำนวนและชนิดของวัสดุเปลี่ยนสถานะ (PCMs), รวมถึงลักษณะของผนังด้านบนของกล่อง เป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการกักเก็บอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มปริมาณ PCM อย่างเหมาะสมสามารถช่วยยืดระยะเวลาการรักษาอุณหภูมิได้อย่างมีนัยสำคัญ จากผลการศึกษา สามารถพัฒนาสมการพยากรณ์เพื่อช่วยคาดการณ์ระยะเวลาการรักษาอุณหภูมิของกล่องเก็บความเย็นแบบพกพา ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงกระบวนการขนส่งสินค้าในโลจิสติกส์โซ่ความเย็น เพื่อลดการสูญเสียสินค้า เพิ่มประสิทธิภาพการขนส่ง และลดต้นทุนการดำเนินงาน

**คำหลัก**: โลจิสติกส์โซ่ความเย็น กล่องเก็บความเย็น วัสดุเปลี่ยนสถานะ (PCM) ปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาการรักษาอุณหภูมิ การพยากรณ์ระยะเวลาการรักษาอุณหภูมิ

**Abstract**

Cold chain logistics play a crucial role in transporting temperature-sensitive goods such as vaccines, pharmaceuticals, and fresh food products. One of the key components in this process is portable cold storage boxes, which help maintain stable temperatures throughout transportation. This research aims to investigate the factors influencing temperature retention efficiency in portable cold storage boxes and develop a predictive model for temperature retention duration using Design of Experiments (DOE). The experiment was conducted using Factorial Design and Response Surface Methodology (RSM) to identify significant factors affecting temperature retention time. The results indicate that the type of cold storage box (B-Box), the quantity and type of Phase Change Materials (PCMs), and the structure of the top wall insulation are the most critical factors influencing cooling performance. Additionally, findings show that optimizing PCM placement and quantity can significantly extend temperature retention time. From this study, a predictive model was developed to forecast the duration of temperature retention in portable cold storage boxes. This model can be applied to improve cold chain logistics efficiency, minimize product losses, and reduce operational costs in temperature-controlled transportation.

**Keywords:** Cold Chain Logistics, Portable Cold Storage Box, Phase Change Materials (PCM), Factors Affecting Temperature Retention Duration Temperature Retention Prediction

## 1. บทนำ

จากรายงานการเติบโตของเศรษฐกิจไทยพบว่าอัตราการเติบโตเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 3 ปีข้างหน้า โดยคาดการณ์ว่าจะเติบโตเฉลี่ย 4% ต่อปีระหว่างปี 2565-2567 ซึ่งนำมาสู่ความท้าทายใหม่ในระบบโลจิสติกส์ ปัจจุบันกระบวนการโลจิสติกส์ด้านการขนส่งสินค้าและบริการมีบทบาทสำคัญเพิ่มขึ้น โดยได้รับผลกระทบจากการแพร่ระบาดของโรค COVID-19 ที่เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมผู้บริโภคและทำให้มีการใช้บริการขนส่งเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับช่วงก่อนการแพร่ระบาด ประเทศไทยมีความหลากหลายและการเติบโตอย่างต่อเนื่องในบริบทของเศรษฐกิจที่กำลังขยายตัวในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ จึงจำเป็นต้องแก้ไขปัญหาและปรับปรุงระบบการขนส่งในรูปแบบต่างๆ ทั้งการขนส่งทางบก ทางน้ำ ทางราง รวมถึงการขนส่งสินค้าแบบควบคุมอุณหภูมิที่มีแนวโน้มเติบโตขึ้นอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมและรูปแบบการดำเนินชีวิต จากรายงานโลจิสติกส์ของประเทศไทยประจำปี 2565 โดยกองยุทธศาสตร์การพัฒนาระบบโลจิสติกส์ สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ [1] พบว่าแนวโน้มสัดส่วนต้นทุนโลจิสติกส์ต่อ GDP มีทิศทางที่ดีขึ้น โดยคาดการณ์ว่าสัดส่วนต้นทุนโลจิสติกส์จะลดลงอยู่ที่ร้อยละ 13.3-13.8 ต่อ GDP อันเป็นผลมาจากการฟื้นตัวของภาคบริการการท่องเที่ยว การอุปโภคบริโภค และการลงทุนของภาคเอกชน

อย่างไรก็ตาม ยังคงต้องประเมินปัจจัยเสี่ยงที่อาจส่งผลกระทบในอนาคต โดยเฉพาะความผันผวนของราคาน้ำมันดิบในตลาดโลกซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการขนส่งสินค้าและบริการที่เป็นปัจจัยพื้นฐาน เช่น อาหาร เครื่องดื่ม ของใช้ และยารักษาโรค การแพร่ระบาดของโควิด-19 และโอกาสในการอุบัติของโรคใหม่ในอนาคต ส่งผลให้อุตสาหกรรมยาขยายตัวตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างประชากรที่กำลังเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุ จึงต้องคำนึงถึงคุณภาพและความปลอดภัยในการขนส่งมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะการจัดส่งวัคซีน ยา และเวชภัณฑ์ ที่ต้องอาศัยกระบวนการโลจิสติกส์โซ่ความเย็นที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อให้สามารถขนส่งถึงผู้รับได้อย่างรวดเร็วและคงคุณภาพตลอดห่วงโซ่อุปทาน โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่ต้องควบคุมอุณหภูมิ เช่น เซรุ่มและวัคซีน นอกจากนั้นการขนส่งที่มีความท้าทายนี้ส่งผลให้ต้นทุนของกระบวนการโลจิสติกส์โซ่ความเย็นสูงขึ้น เนื่องจากจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการควบคุมอุณหภูมิ อาทิ กล่องสำหรับการขนย้ายและแผ่น Phase

Change Material (PCM) ที่ทำหน้าที่รักษาอุณหภูมิให้คงที่ การใช้วัสดุที่มีคุณภาพและเหมาะสมช่วยยืดระยะเวลาในการรักษาอุณหภูมิได้นานขึ้น โดยแผ่นเจลสำหรับการรักษาอุณหภูมิก็เป็นองค์ประกอบสำคัญในกระบวนการนี้ [2] นอกจากนี้ กล่องที่สามารถคงอุณหภูมิได้นานยังเป็นสิ่งจำเป็นในการขนส่งสินค้า ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ล้วนส่งผลให้ต้นทุนในการขนส่งเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้ PCM เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษในการกักเก็บและปล่อยพลังงานความร้อนในรูปแบบของความร้อนแฝงระหว่างกระบวนการเปลี่ยนสถานะ [2]

คุณสมบัติทางความร้อน กายภาพ และเคมีที่หลากหลายของ PCMs ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ โดยคุณสมบัติเหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการใช้งาน ดังนั้น การเลือกใช้ PCMs ที่เหมาะสมกับการใช้งานจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ความท้าทายหลักคือการรักษาอุณหภูมิให้คงที่เพื่อคงประสิทธิภาพของยาให้ได้นานที่สุดก่อนการส่งมอบให้ลูกค้า จึงจำเป็นต้องจัดหาอุปกรณ์ที่สามารถรักษาและควบคุมอุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพในขณะที่ยังคงควบคุมต้นทุนไม่ให้สูงเกินไป เนื่องจากอาจส่งผลกระทบต่อผลกำไรของบริษัท อีกหนึ่งความท้าทายคือในกระบวนการส่งมอบสินค้าอาจมีปัจจัยหลายประการที่ทำให้การส่งมอบไม่สำเร็จและจำเป็นต้องตีกลับสินค้าไปยังต้นทาง ในขณะที่การควบคุมและรักษาอุณหภูมิยังคงต้องดำเนินการอย่างต่อเนื่อง จึงต้องออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิให้สามารถทำงานได้ยาวนานที่สุด อาจสูงถึง 72 ชั่วโมง เพื่อให้สินค้าที่ถูกตีกลับยังคงมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่ปัญหาสำคัญของการควบคุมอุณหภูมิในการขนส่งยาภายใต้ระบบโซ่ความเย็น ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนและได้รับผลกระทบจากหลากหลายปัจจัยและข้อจำกัด เพื่อให้การศึกษาเป็นไปอย่างเป็นระบบและสามารถระบุปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างแท้จริง ผู้วิจัยจึงได้นำระเบียบวิธีวิจัยเชิงทดลองมาประยุกต์ใช้ โดยอาศัยเครื่องมือทางสถิติ Design of Experiments (DOE) ในการวางแผนและดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลอย่างมีหลักเกณฑ์

ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีศักยภาพในการส่งผลกระทบต่อการควบคุมอุณหภูมิ ผู้วิจัยได้เลือกใช้เทคนิค Factorial Design เป็นหลัก เนื่องจากเป็นระเบียบวิธีที่ทรงประสิทธิภาพในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรอิสระหลายตัวที่มีต่อตัวแปรตาม พร้อมทั้งสามารถตรวจจับปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านั้นได้อย่างชัดเจน การทำเช่นนี้จะช่วยให้เข้าใจถึงผลกระทบของแต่ละปัจจัยอย่างแท้จริง รวมถึงผลกระทบร่วมกันที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการระบุปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการควบคุมอุณหภูมิในการขนส่งยา ควบคู่ไปกับการใช้ Response Surface Methodology เพื่อสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและผลลัพธ์ นอกจากนี้เทคนิคทางสถิติ One-way ANOVA ยังถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล เพื่อยืนยันความมีนัยสำคัญทางสถิติของปัจจัยที่ระบุได้

ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อสร้างความเข้าใจอย่างลึกซึ้งถึงกลไกและตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการขนส่งยาในระบบโซ่ความเย็น ซึ่งจะนำไปสู่แนวทางการแก้ไขปัญหาที่ตรงจุด การตัดสินใจเลือกใช้อุปกรณ์และวิธีการขนส่งเวชภัณฑ์ยาที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ตลอดจนการบริหารจัดการต้นทุนในการดำเนินงานให้เกิดความคุ้มค่า

**1.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย**

1.1.1 เพื่อจะได้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการคงอยู่ของอุณหภูมิเย็น

1.1.2 เพื่อจะได้สมการพยากรณ์ที่ใช้ทำนายระยะเวลาในการกักเก็บความเย็น

**1.2 ขอบเขตการศึกษา**

1.2.1 ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลของการทดลองในการขนส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิ กรณีศึกษาบริษัทแห่งหนึ่ง ระยะเวลาตั้งแต่ เดือนมกราคม 67- เดือนธันวาคม 67

**2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง**

**2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Anova Analysis)**

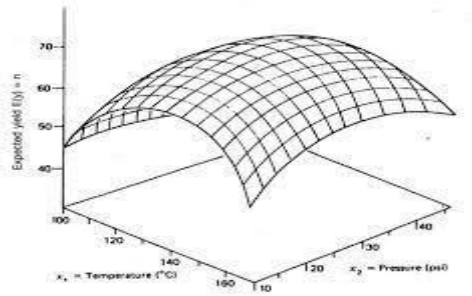
การวิเคราะห์ความแปรปรวน(Anova Analysis) เป็นเทคนิคทางสถิติที่ใช้เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลตั้งแต่สองกลุ่มขึ้นไป เพื่อตรวจสอบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ [3] หลักการสำคัญของ ANOVA คือการเปรียบเทียบความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Between-group variance) กับความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Within-group variance) โดย

แนวคิดพื้นฐานคือ หากความแปรปรวนระหว่างกลุ่มมีค่ามากกว่าความแปรปรวนภายในกลุ่มอย่างมีนัยสำคัญ จะสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มแตกต่างกันและหากความแปรปรวนทั้งสองไม่แตกต่างกันมากนัก ก็แสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มที่ศึกษาและในการวิเคราะห์ ANOVA จะใช้ค่า F-Statistic ซึ่งเป็นตัวชี้วัดว่าความแตกต่างระหว่างกลุ่มมีมากพอที่จะสรุปว่าไม่ได้เกิดจากความบังเอิญหรือไม่ หากค่า F มีค่าสูงและค่า P-Value ต่ำกว่า 0.05 จะบ่งบอกว่าความแตกต่างที่พบมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ ANOVA ยังสามารถแบ่งออกเป็นหลายประเภทขึ้นอยู่กับจำนวนปัจจัยที่ศึกษา เช่น One-Way ANOVA ใช้เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มที่มีตัวแปรอิสระเพียงหนึ่งตัว ขณะที่ Two-Way ANOVA ใช้สำหรับการเปรียบเทียบที่มีตัวแปรอิสระสองตัวขึ้นไป และ Factorial ANOVA ใช้เมื่อมีหลายปัจจัยที่อาจมีปฏิสัมพันธ์กัน

**2.2 การวิเคราะห์ตัวแปรผิวสะท้อน (Response Surface Methodology)**

การวิเคราะห์ตัวแปรผิวสะท้อนผิวตอบหรือผลตอบสะท้อนผิว (Response Surface Methodology เป็นวิธีการที่ใช้หาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Condition) ของระบบหรือกระบวนการผลิต โดยอาศัยการสร้างแบบจำลอง (Mathe metical Model) และการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีอยู่ผลตอบสนอง (Response) ของปัญหาเป็นความสัมพันธ์หรือ

ฟังก์ชันของหลายปัจจัยหรือตัวแปรอิสระโดยมีเป้าหมายเพื่อหาระดับ ของปัจจัยต่าง ๆ ที่ทำให้ผลตอบสนองมีค่าเหมาะสมที่สุด [3-4] เป็นการรวบรวมเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปรและมีวัตถุประสงค์ ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบ เช่นผลตอบสนอง y เป็นฟังก์ชันของปัจจัย $X_1$และ$X_2$ ดังนั้นจะสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้ $y = f(x1, x1) + \varepsilon$ เมื่อ $\varepsilon$ คือสิ่งรบกวน(Noise หรือ Error) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการและมีผลกระทบต่อผลตอบ y และ $f(x1, x1) = E(y)$ คือ ค่าความคาดหวังของผลตอบสนอง y (Expected Response) [5] ดังนั้นพื้นผิวสะท้อน (Response Surface) สำหรับระบบที่มีจำนวนปัจจัย 2 ปัจจัยสามารถแทนด้วย $\eta = F(x1, x2)$ และพื้นผิวสะท้อนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 โดยพล็อตค่า $\eta$ กับแต่ละระดับของปัจจัย $X_1$และ$X_2$




*รูปที่ 1 เส้นระดับพื้นผิวสะท้อน*

**2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**

[3] ได้ออกแบบการทดลองเพื่อลด ของเสียในกระบวนการฉีดพลาสติกของชินส่วนอิเล็กทรอนิกส์ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือการลดของเสียในกระบวนการฉีดพลาสติกของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment : DOE) งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการลดของเสียในกระบวนการฉีดพลาสติกของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง (DOE) โดยพบว่าปัญหาหลักคือชิ้นงานฉีดไม่เต็ม ซึ่งเกิดจากการตั้งค่าของเครื่องฉีดพลาสติกที่ไม่เหมาะสม นักวิจัยใช้ 2k Full Factorial Design วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบ และใช้ Response Optimization เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ผลการทดลองช่วยลดของเสียและปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ

[6] ได้จัดทำงานวิจัย A comprehensive review of portable cold storage: Technologies, applications and future trends วัตถุประสงค์วิเคราะห์เชิงลึกเกี่ยวกับเทคโนโลยีการเก็บรักษาความเย็นแบบพกพา แอปพลิเคชัน และแนวโน้มในอนาคตและครอบคลุมถึงความต้องการวิธีการเก็บรักษาความเย็นแบบพกพา (cold storage box) ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์เชิงลึกเกี่ยวกับเทคโนโลยีการเก็บรักษาความเย็นแบบพกพา โดยครอบคลุมประเภทของหน่วยเก็บความเย็น เช่น ตู้คอนเทนเนอร์เย็น ตู้เย็นพกพา

และห้องเย็น พร้อมเปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัดของแต่ละระบบ นอกจากนี้ยังศึกษาวิธีการทำความเย็น เช่น การบีบอัดและการดูดซับความเย็น รวมถึงการใช้วัสดุเปลี่ยนเฟส (PCMs) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมอุณหภูมิและประหยัดพลังงาน งานวิจัยนี้ช่วยให้เข้าใจแนวโน้มและศักยภาพของระบบเก็บความเย็นแบบพกพา ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาให้ตอบโจทย์ความต้องการของตลาดได้อย่างยั่งยืน

[7] ได้จัดทำ Properties and encapsulation forms of phase change material and various types of cold storage box for cold chain logistics: A review ปัญหาเนื่องจากโลจิสติกส์แบบเย็นได้กลายเป็นส่วนสำคัญและมีการนิยมใช้ในการขนส่งมากยิ่งขึ้นจึงต้องการพัฒนาวัสดุที่มีส่วนสำคัญในการขนส่งอย่างวัสดุเปลี่ยนเฟส (PCMs)โดยวัตถุประสงค์คือการรวบรวมข้อมูลและหาทางพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการขนส่ง PCMs มีศักยภาพในการรักษาอุณหภูมิที่คงที่และยืดอายุการเก็บรักษาสินค้า กล่องเก็บความเย็นที่ใช้ PCMs ยังช่วยลดการใช้พลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพในการขนส่ง ซึ่งมีโอกาสในการพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นในอนาคต

[9] ได้จัดทำ Comparison of Insulation Materials for Cold Storage Boxes การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุฉนวนกันความร้อนสำหรับกล่องเก็บความเย็น) ปัญหาเนื่องจากความต้องการด้านโลจิสติกส์แบบเย็นที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ต้องพัฒนาวัสดุฉนวนกันความร้อน(PCMs) ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้ศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุฉนวนกันความร้อนที่ใช้ในกล่องเก็บความเย็น เพื่อรองรับความต้องการที่เพิ่มขึ้นของโลจิสติกส์แบบเย็น โดยนำวัสดุ XPS, PU, VIP และอะโรเจล มาทดสอบด้านการรักษาอุณหภูมิ ราคา และความเหมาะสมต่อสินค้าต่าง ๆ ผลการศึกษาพบว่า PU และ XPS เป็นวัสดุที่นิยมใช้เนื่องจากต้นทุนต่ำ แต่มีข้อจำกัดด้านการเก็บความร้อน ขณะที่ VIP และอะโรเจล มีประสิทธิภาพในการกักเก็บความร้อนสูงกว่า แต่มีข้อจำกัดด้านความแข็งแรงและราคาสูง

[10] ได้จัดทำ Influencing factors of cooling perfor- mance of portable cold storage box for vaccine supply chain: An experimental study โดยมีปัญหางานวิจัยเนื่องจากการระบาดของโควิด-19 ส่งผลต่อห่วงโซ่อุปทานวัคซีนและวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการทำความเย็นของกล่องเก็บความเย็นแบบพกพาสำหรับห่วงโซ่อุปทานวัคซีน วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการทำความเย็นของกล่องเก็บความเย็นแบบพกพาสำหรับห่วงโซ่อุปทานวัคซีน โดยเน้นการประเมินผลของการจัดวางวัสดุเปลี่ยนเฟส (PCMs) และรูปทรงของกล่องต่อประสิทธิภาพการทำความเย็น ผลการทดลองพบว่า การวาง PCMs บนผนังทั้ง 6 ด้านของกล่องมีประสิทธิภาพดีที่สุด และกล่องทรงลูกบาศก์แสดงประสิทธิภาพที่ดีกว่ากล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยอุณหภูมิแวดล้อมที่สูงมีผลต่อการทำความเย็นมากกว่าอุณหภูมิของวัคซีนเอง

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงกระบวนการผลิตและการรักษาอุณหภูมิในระบบโลจิสติกส์แบบควบคุมอุณหภูมิได้ถูกทบทวนอย่างครอบคลุม โดยมีการประยุกต์ใช้เทคนิค DOE ในภาคการผลิตเพื่อลดของเสียและเพิ่มประสิทธิภาพ ซึ่งประสบผลสำเร็จในการระบุปัจจัยสำคัญ สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์แบบ full-factorial design เพราะต้องการดูระดับของปัจจัยในทุกระดับของปัจจัยและยังสนใจศึกษาผลของปัจจัยร่วมอีกด้วย

อย่างไรก็ตาม บริบทเหล่านี้อาจแตกต่างจากความท้าทายในการขนส่งยาที่ควบคุมอุณหภูมิ งานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุฉนวนและเทคโนโลยีการเก็บความเย็นได้ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการเลือกใช้ แต่ยังขาดการพิจารณาถึงสภาพแวดล้อมการขนส่งจริง การศึกษาเกี่ยวกับ PCMs แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการรักษาอุณหภูมิ แต่ต้องการการศึกษาเพิ่มเติมในบริบทของการขนส่งยาโดยเฉพาะ งานวิจัยเกี่ยวกับกล่องเก็บความเย็นสำหรับวัคซีนได้ให้ข้อมูลเชิงปฏิบัติ แต่ยังจำกัดอยู่ในเงื่อนไขเฉพาะเจาะจง ดังนั้น การศึกษาเพิ่มเติมจึงควรพิจารณาปัจจัยที่ซับซ้อนและหลากหลายมากขึ้นในบริบทของการขนส่งยา เพื่อให้ได้แนวทางที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพและครอบคลุม

**3. วิธีวิจัย**

ผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนและวิธีการดำเนิน จำนวน 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย
2. เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล
3. การวิเคราะห์ข้อมูล

โดยรูปแบบการดำเนินการได้ทำการประยุกต์ใช้แนวคิด DMAIC [11] ในการพัฒนากรอบการวิจัยให้เป็นระบบ มีรายละเอียด ดังนี้

**1.การระบุปัญหา (Problem Identification)**

ในขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนที่ระบุปัญหาที่เกิดขึ้นกับภายในองค์กรมีวัตถุประสงค์เพื่อนำข้อมูลปัญหาที่ได้มานั้นนำมาวิเคราะห์และหาสาเหตุตลอดจนวิธีการในการแก้ปัญหาต่อไปโดยผู้วิจัยได้ทำ การการระดมสมอง (Brainstorming)และทำการจดบันทึกการประชุมเพื่อนำข้อมูลปัจจัยและปัญหาทั้งหมดเพื่อนำมาวิเคราะห์ โดยได้ใช้แผนผังก้างปลา (Fish born diagram) ทำการสรุปและวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยที่จะส่งผลต่อการขนส่งสินค้า (cold chain) ประเภทยานั้นเอง

**2.การวัด (Measure)**

ในส่วนของขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ โดยการเน้นหลักจากปัญหาที่ได้ทำการระบุไว้ในขั้นตอนแรกและจะรวมไปถึงขั้นตอนการวางแผนเพื่อทำการเก็บข้อมูลเพิ่มเติมที่จะใช้เป็นข้อมูลการสนับสนุนงานวิจัยและกำหนดข้อมูลในการวัดระดับเพื่อใช้ในการตรวจสอบประสิทธิภาพในงานวิจัย

**3.การวิเคราะห์ปัญหา (Analyze)**

ในส่วนขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหาจะเป็นการนำข้อมูลที่ผู้วิจัยได้รับจากการระดมสมอง (Brainstorming) และการทำแผนผังก้างปลา(Frish born ) นำมาวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือ DOE (Design of experiment) Full Factorial Design และ One-way Analysis, Two-way Analysisและ Regression และดำเนินการออกแบบการทดลองโดยโปรแกรมทางสถิติ และใช้ในหลายๆ เครื่องมือเพื่อนำมาทำการวิเคราะห์และออกแบบการทดลองในหลายๆปัจจัย เพื่อให้ได้มาซึ่งปัจจัยที่ส่งผลและมีความสำคัญต่อกระบวนการขนส่งสินค้า หลังจากการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ ทางผู้วิจัยจะทำการกำหนดสมการที่ได้จากการออกแบบการทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งสมการที่จะเป็นตัวกำหนดถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการขนส่งสินค้านั้นเอง

**4.การปรับปรุง (Improve)**

หลังจากนั้นจะนำสมการและตารางการทดลองที่ได้จากการออกแบบนั้น นำมาทำการทดสอบว่าสามารถใช้จริงตามการออกแบบการทดลอง โดยจะทำการทดลองจริงในพื้นที่จริงและตรวจสอบว่าสามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ของการทดลองหรือไม่ หากในตารางการออกแบบยังไม่สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ได้นั้นทางผู้วิจัยจัดทำได้ออกแบบและสร้างตารางการทดลองซ้ำและทำการทดสอบใหม่

**5. การควบคุม (Control)**

หลังจากการทำการทดลองแล้วนั้นได้ได้ในสมการสำหรับปัจจัยที่ส่ งผลต่อกระบวนการขนส่งเพื่อให้บริษัทสามารถกำหนดวิธีการและทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการขนส่งจริงเพื่อจะได้กำหนดแนวทางในการขนส่งและสามารถลดปัจจัยหรืออุปสรรคในการขนส่งและทำการสร้างแผนกำหนดในการขนส่งสินค้าใน Cold chain ต่อไป

*ตารางที่ 1 ตารางปัจจัยที่ส่งผลต่อการขนส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิ*

| ลำดับ | ปัจจัยที่ส่งผล | ลักษณะของปัจจัย |
|---|---|---|
| 1 | ชนิดของแผ่น PCMs | ชนิดของPCM ที่ต่างกันออกไปส่งผลมากน้อยเท่าใด |
| 2 | จำนวนของแผ่น PCMs | จำนวนของPCM ส่งผลต่อการรักษาอุณหภูมิ |
| 3 | ระดับอุณหภูมิของการแพค | ระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการแพ็คระดับใดที่เหมาะสมมากที่สุด |
| 4 | ระดับอุณหภูมิบริเวณด้านบนของกล่องB-Box | ระดับอุณหภูมิที่เพิ่ม-ลดมากขึ้นระดับใดที่ส่งผลต่อการรักษาอุณหภูมิ |
| 5 | ระดับอุณหภูมิบริเวณด้านล่างของกล่องB-Box | ระดับอุณหภูมิที่เพิ่ม-ลดมากขึ้นระดับใดที่ส่งผลต่อการรักษาอุณหภูมิ |

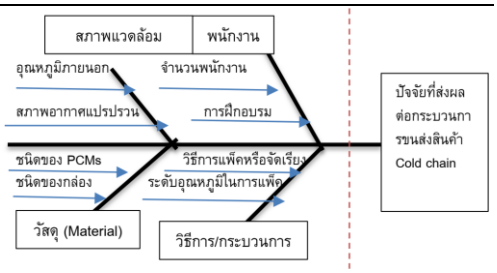
จากตารางที่ 1 แสดงถึงปัจจัยที่มีผลต่อการขนส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งการเลือกใช้วัสดุและการควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการบรรจุสินค้าจะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการรักษาอุณหภูมิในระหว่างการขนส่ง โดยชนิดและจำนวนของแผ่นวัสดุเปลี่ยนเฟส (PCMs) ที่ใช้ในกล่องสามารถส่งผลต่อการเก็บและปล่อยความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากน้อยแค่ไหน รวมถึงการควบคุมระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการแพคที่เหมาะสมเพื่อให้ PCM ทำงานได้ดีที่สุด การควบคุมอุณหภูมิทั้งบริเวณด้านบนและด้านล่างของกล่องก็มีบทบาทสำคัญในการรักษาอุณหภูมิที่คงที่ โดยอุณหภูมิที่สูงหรือต่ำเกินไปในส่วนต่างๆ ของกล่องอาจทำให้การกระจายความเย็นไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการขนส่งลดลง การพิจารณาปัจจัยเหล่านี้จึงเป็นสิ่งสำคัญในการพัฒนา

**3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล**

ในการเก็บข้อมูลทางผู้วิจัยจะทำการเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการตั้งแต่ต้นทางคือการแพคสินค้าชนิดและจำนวนของกล่องที่เลือกใช้ อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับสินค้าแต่ละประเภทและรวมถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการแพคระยะทางในการเคลื่อนย้ายสินค้าไปจนถึงรถสำหรับการขนส่งโดยมีรายละเอียดและขั้นตอน ดังต่อไปนี้

3.1.1 การระดมสมอง (Brainstorming) เป็นการระดมความคิดจากทุกๆมุมมองของผู้เข้าร่วมการประชุมทั้งหมด 7 คนโดยจะใช้การระดมสมองเพื่อระดมความคิดจากพนักงาน 4 คนเพื่อให้ทราบถึงข้อมูลและปัญหาที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการขนส่งสินค้าในการควบคุมอุณหภูมิ

3.1.2 แผนผังก้างปลา (Fish born diagram) เป็นอีกขั้นตอนสำคัญที่ระบุปัจจัยต่างๆที่เกิดขึ้นกับการขนส่งมีวัตถุประสงค์เพื่อนำข้อมูลปัญหาที่ได้มานั้นนำมาวิเคราะห์และหาสาเหตุได้ทำการจัดทำแผนผังก้างปลาเพื่อจะระบุถึงสาเหตุปัจจัยหลักที่มีผลต่อกระบวนการขนส่งได้สามารถแบ่งออกมาได้เป็น 4 ปัจจัยหลัก คือ พนักงาน อุปกรณ์ สภาพแวดล้อมและวิธีการและกระบวนการ




*รูปที่ 2 แผนผังก้างปลาแสดงปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการขนส่งสินค้า Cold chain*

จากรูปที่ 2 แผนผังก้างปลานี้แสดงถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการขนส่งสินค้าแบบควบคุมอุณหภูมิ (Cold chain) ปัจจัยหลัก ประกอบด้วย สภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิภายนอกและสภาพอากาศแปรปรวน พนักงานในเรื่องจำนวนและการฝึกอบรม วัสดุ ที่เกี่ยวข้องกับชนิดของ PCM และชนิดของกล่องที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิ รวมถึงวิธีการ/กระบวนการ ที่ครอบคลุมถึงวิธีการแพ็คหรือจัดเรียง และระดับอุณหภูมิในการแพ็ค ปัจจัยเหล่านี้ล้วนมีอิทธิพลต่อการรักษาคุณภาพของสินค้าที่ต้องควบคุมอุณหภูมิระหว่างการขนส่งกล่องเก็บความเย็นให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในการขนส่งสินค้าที่ต้องการการควบคุมอุณหภูมิจึงใช้ Basic performance indexes และ Extended performance indexes เป็นตัวชี้วัดในกระบวนการทดลองถือเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อช่วยประเมินประสิทธิภาพในการขนส่งสินค้าได้อย่างแม่นยำและครอบคลุมมากยิ่งขึ้น ตัวชี้วัดเหล่านี้จะส่งผลให้เข้าใจถึงการทำงานของระบบต่างๆ เช่น ประสิทธิภาพของวัสดุเปลี่ยนเฟส (PCMs) และอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่ออุณหภูมิภายในกล่องเก็บความเย็น โดย Basic performance indexes จะเน้นที่การวัดประสิทธิภาพในแง่พื้นฐาน เช่น ความสามารถในการรักษาอุณหภูมิและเวลาในการทำความเย็น ขณะที่ Extended performance indexes จะพิจารณาปัจจัยที่ซับซ้อนมากขึ้น เช่น การประเมินผลกระทบของอุณหภูมิแวดล้อมและการจัดวาง PCM ภายในกล่อง ซึ่งจะช่วยให้ได้ข้อมูลที่ละเอียดและครบถ้วนในการพัฒนาโมเดลและสมการพยากรณ์ที่สามารถควบคุมและเพิ่มประสิทธิภาพของการขนส่งสินค้าให้เหมาะสมที่สุด

*ตารางที่ 2 ตารางข้อมูลเบื้องต้นในส่วนปัจจัยที่ส่งผลต่อการขนส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิ*

| Protocol | Type B-Box | PCM Weight | Lead time | Top wall | Bottom wall | Q. PCM | Result |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 | 84 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 5 | 101 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 5 | 80 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 | 59 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | -1 | -1 | 5 | 75 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 | 76 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 | 75 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 70 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 69 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 69 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 | 93 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 | 93 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 | 86 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 | 97 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 69 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 2 | 61 |
| 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 2 | 67 |
| -1 | 0 | 1 | 1 | -1 | -1 | 2 | 66 |
| -1 | 0 | 1 | 1 | -1 | -1 | 2 | 64 |
| 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 3 | 72 |
| 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 3 | 72 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 3 | 67 |
| -1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 3 | 112 |
| -1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 | 94 |
| -1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 | 76 |
| -1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 | 76 |
| -1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 | 90 |
| -1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 | 86 |
| -1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 3 | 101 |
| -1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 3 | 107 |
| -1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 3 | 96 |
| -1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 3 | 105 |

**4. ผลการวิจัยและการอภิปรายการทดลอง**

ตารางข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลในโปรแกรมทางสถิติ Minitab โดยผู้วิจัยได้กำหนดรายละเอียดของตัวแปรและระดับของตัวแปร ดังแสดงในตารางที่ 3

*ตารางที่ 3 ตารางแสดงการกำหนดค่าปัจจัย*

| ปัจจัย (Factor) | รายละเอียด (Detail) | กำหนดค่า (Coded Value) |
|---|---|---|
| **Protocol** | 2°C - 8°C | 1 |
| | 15°C - 25°C | -1 |
| **Type (B-Box)** | B40 | 0 |
| | BC5 | 1 |
| | B80 | -1 |
| **Top wall** | Max V10 | 1 |
| | Max V16 | 0 |
| | Max V12 | -1 |
| **Bottom wall** | Max V10 | 1 |
| | Max V16 | 0 |
| | Max V12 | -1 |
| **Q. PCM** | 4 * 480 | 1 |
| | 6 * 480 | 2 |
| | 8 * 480 | 3 |
| | 10 * 480 | 4 |
| | 16 * 480 | 5 |
| | 20 * 480 | 6 |

หลังจากนั้นผู้วิจัยได้กำหนดโดยการแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นช่วง 2 อุณหภูมิโดยกำหนด 2-8 องศาเซลเซียส และ15-25 องศาเซลเซียสและข้อมูลทั้ง 2 ช่วงนั้นเอง โดยได้ผลการทดลองในช่วงอุณหภูมิ ในส่วนตารางผลการทดลองข้างต้น คือทั้ง 2 ช่วงอุณหภูมินั้นเอง โดยได้ผลการทดลองในช่วงอุณหภูมิดังตารางที่ 4

*ตารางที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิทั้ง 2 ช่วงการทดลอง*

| Analysis of Variance | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Source | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F | P |
| Regression | 2 | 266.72 | 226.72 | 113.350 | 0.4471 | 0.000 |
| Top Of wall (mm.) | 1 | 12.56 | 27.21 | 27.266 | 0.1470 | 0.764 |
| Quantity of PCM per Box | 1 | 214.16 | 214.16 | 214.159 | 0.0446 | 0.372 |
| Error | 14 | 4056.37 | 4056.37 | 253.361 | | |
| Total | 18 | 4260.60 | | | | |
| S=16.9236 | R-Sq=5.26% | | | R-sq(adj)=6.55 % | | |

จึงได้สมการผลการทดลอง คือ Result = 71.1745 + 8.77437 Type of B-Box - 1.12133 Top Of Wall (mm.) + 2. 12253 Quantity of PCM per Box และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) บ่งชี้ว่า โดยรวมมีความสำคัญทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.001$) อย่างไรก็ตาม โมเดลนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนองได้เพียง 5.26% (R-Sq = 5.26%) และมีค่า R-Sq(adj) เป็นลบ (-6.55%) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโมเดลปัจจุบันยังไม่สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้อย่างชัดเจนเนื่องจากข้อจำกัดของข้อมูล เมื่อพิจารณาอิทธิพลของแต่ละปัจจัย พบว่าทั้ง "Top Of wall (mm.)" ($p = 0.764$) และ "Quantity of PCM per Box" ($p = 0.372$) ไม่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อตัวแปรตอบสนองภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้ ($\alpha = 0.05$) ค่า F-statistic ที่ต่ำสำหรับทั้งสองปัจจัย (0.1470 และ 0.0446 ตามลำดับ) สนับสนุนข้อสรุปนี้ค่า Standard error of the estimate (S = 16.9236) บ่งชี้ถึงการกระจายตัวของข้อมูลโดยรวมแล้ว แม้ว่าโมเดลจะมีความสำคัญทางสถิติ แต่ความสามารถในการอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนองยังอยู่ในระดับต่ำ และปัจจัยที่ศึกษาในครั้งนี้ไม่พบว่ามีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจบ่งชี้ถึงความจำเป็นในการพิจารณาปัจจัยเพิ่มเติม และผู้วิจัยได้กำหนดช่วงอุณหภูมิในการทดลอง 15-25 องศาเซลเซียสและผลการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 15-25 องศาเซลเซียส ในส่วนตารางผลการทดลองข้างต้น 15-25 องศาเซลเซียส

*ตารางที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิ 15-25 องศาเซลเซียส*

| Analysis of Variance | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Source | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F | P |
| Regression | 2 | 2410.92 | 36.61 | 1205.46 | 0.07316 | 0.030 |
| Type of B-Box | 1 | 1430.82 | 3.02 | 537.66 | 0.01000 | 0.00 |
| Quantity of PCM per Box | 1 | 26.60 | 900.10 | 900.10 | 0.15947 | 0.001 |
| Error | 9 | 416.00 | 416.00 | 46.22 | | |
| Total | 11 | 2826.92 | | | | |
| S=6.79869 | R-Sq=85.28% | | | R-sq(adj)=-62.01% | | |

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากตารางที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิ 15-25 องศาเซลเซียส พบว่าโมเดลการถดถอย โดยรวมมีความสำคัญทางสถิติ ($F=0.07316$, $p=0.030$) โดยสามารถอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรตามได้ 85.28% (R-Sq) อย่างไรก็ตาม เมื่อปรับแก้สำหรับจำนวนตัวแปรและขนาดตัวอย่าง ค่า Adjusted R-squared ลดลงเหลือ 62.01%เมื่อพิจารณาปัจจัยรายตัว พบว่าทั้งประเภทของ B-Box ($F=0.01000$, $p=0.000$) และปริมาณ PCM ต่อกล่อง ($F=0.15947$, $p=0.001$) มีผลต่อตัวแปรตามอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยประเภทของ B-Box มีระดับนัยสำคัญที่สูงกว่าค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่า (S) เท่ากับ 6.79869 บ่งชี้ถึงขนาดความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการทำนายโดยสรุป ทั้งประเภทของ B-Box และปริมาณ PCM ต่อกล่องเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อตัวแปรตาม แม้ว่าโมเดลจะอธิบายความแปรปรวนได้ในระดับหนึ่ง แต่ค่า F-statistic ที่ค่อนข้างต่ำอาจบ่งชี้ถึงขนาดอิทธิพลที่ไม่มากนัก และสมการผลการทดลอง คือ Result = 25.4 + 19.4 Type of B-Box + 19.8 Quantity of PCM per Box (PCS)

จากตารางแสดงผลที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิ 15-25 องศาเซลเซียสผลลัพธ์แสดงว่าเห็นว่าปัจจัยที่มีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิ คือ ประเภทของกล่องPCM และ Quantity of PCM per Box จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แสดงให้เห็นว่าโมเดล Regression โดยรวมมีความสำคัญทางสถิติ ($p=0.030$) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq) เท่ากับ 85.28% บ่งชี้ว่าตัวแปรอิสระสามารถอธิบาย

ความแปรปรวนของตัวแปรตามได้ในระดับสูงเมื่อพิจารณาแต่ละปัจจัย พบว่าทั้งประเภทของ B-Box (p=0.000) และปริมาณ PCM ต่อกล่อง (p=0.001) มีผลต่อตัวแปรตามอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยประเภทของ B-Box มีความสำคัญอย่างยิ่งยวดค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่า (S) เท่ากับ 6.79869 และค่า Adjusted R-squared เท่ากับ 62.01% ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถในการอธิบายความแปรปรวนของโมเดลเมื่อปรับแก้สำหรับจำนวนตัวแปรและขนาดตัวอย่างโดยสรุป ทั้งประเภทของ B-Box และปริมาณ PCM ต่อกล่องเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อตัวแปรตามอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ดังนั้นผู้วิจัยได้กำหนดช่วงอุณหภูมิในการทดลองในช่วง 2-8 องศาเซลเซียสโดยได้ผลการทดลองในช่วงอุณหภูมิดังตารางแสดงผล

*ตารางที่ 6 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิ 2-8 องศาเซลเซียส*

| Analysis of Variance | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Source | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F | P |
| Regression | 3 | 36.61 | 36.61 | 12.204 | 0.07316 | 0.000 |
| Type of B-Box | 1 | 2.97 | 3.02 | 3.016 | 0.01000 | 0.895 |
| Top Of wall (mm.) | 1 | 7.04 | 3.04 | 3.037 | 0.01700 | 0.895 |
| Quantity of PCM per Box | 1 | 26.60 | 26.40 | 24.603 | 0.15947 | 0.495 |
| Error | 16 | 2469.14 | 2669.14 | 163.821 | | |
| Total | | 2705.75 | | | | |
| S=12.9159 | R-Sq=1.35% | | | R-sq(adj)=17.14% | | |

สมการผลการทดลอง Result = 74.1248 + 0.614639 Type of B-Box + 0.521343 Top Of Wall (mm.) +0.804906 Quantity of PCM per Box (PCS) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่าโมเดลการถดถอยโดยรวมมีความสำคัญทางสถิติ (F=0.4471, p<0.001) อย่างไรก็ตาม ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq) มีค่าต่ำเพียง 5.26% และค่า Adjusted R-squared อยู่ที่ 6.55% บ่งชี้ว่าโมเดลนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรตามได้น้อยมาก เมื่อพิจารณาถึงจำนวนตัวแปรและขนาดตัวอย่างเมื่อพิจารณาแต่ละปัจจัย พบว่าทั้งความหนาของผนังด้านบน (Top Of wall (mm.)) (F=0.1470, p=0.764) และปริมาณ PCM ต่อกล่อง (Quantity of PCM per Box) (F=0.0446, p=0.372) ไม่มีผลต่อตัวแปรตามอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากค่า p-value มีค่าสูงกว่าระดับนัยสำคัญที่ยอมรับโดยทั่วไปค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่า (S) เท่ากับ 16.9236 แสดงถึงความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการทำนายที่ค่อนข้างสูง และหลังจากนั้นผู้วิจัยได้กำหนดโดยการRUN โดยกำหนดช่วงข้อมูลเป็นอุณหภูมิทั้งสองช่วง และ แบ่งPCM เป็น B40,BC5,B80 และจะสมการผลการทดลอง คือ B40 Result = 73.7601 + 0.780405 Top Of Wall (mm.) + 1.15878 Quantity of PCM per Box (PCS)

BC5 Result = 77.8183 - 2.57869 Top of Wall (mm.) + 3.11937 Quantity of PCM per Box (PCS)

B80 Result = 57 + 5 Quantity of PCM per Box (PCS)จากผลResult แสดงว่าเห็นว่าปัจจัยที่มีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิ คือ ประเภทของผนังบริเวณด้านบนของกล่องควบคุมอุณหภูมิ และ Quantity of PCM per Box (PCS) นั้นเอง

จากการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิในช่วง 15-25 องศาเซลเซียส พบว่าประเภทของผนังกล่องควบคุมอุณหภูมิและปริมาณ PCM ต่อกล่อง (Quantity of PCM per Box) เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการควบคุมอุณหภูมิอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม จากการวิเคราะห์ข้อมูลในช่วงอุณหภูมิ 2-8 องศาเซลเซียส ยังไม่พบปัจจัยที่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ส่งผลต่อการควบคุมอุณหภูมิเมื่อพิจารณาการแบ่งประเภทของ PCMs ออกเป็นสามช่วง (B40, BC5, B80) ผลการวิเคราะห์บ่งชี้ว่าประเภทของผนังบริเวณด้านบนของกล่องควบคุมอุณหภูมิ และปริมาณ PCM ต่อกล่อง (Quantity of PCM per Box (PCS)) เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น รวมถึงการพัฒนาโมเดลที่มีความสามารถในการอธิบายปรากฏการณ์ได้ดียิ่งขึ้น ขอเสนอแนะให้มีการเก็บรวบรวมข้อมูลเพิ่มเติมและดำเนินการทดลองวิเคราะห์ซ้ำ โดยอาจพิจารณาถึงปัจจัยอื่นๆ ที่อาจมีอิทธิพลต่อการควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้ได้โมเดลที่มีค่า R-squared สูงขึ้นและสามารถนำไปใช้ในการคาดการณ์และปรับปรุงประสิทธิภาพของการควบคุมอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำต่อไป

**5. ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม**

ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาต่อไปคือควรทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความละเอียดมากขึ้น ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลงานวิจัยนี้มีประโยชน์อย่างมากต่อการพัฒนาระบบโลจิสติกส์โซ่ความเย็นในประเทศไทย โดยเฉพาะในช่วงที่มีการเติบโตของการขนส่งสินค้าที่ต้องควบคุมอุณหภูมิ เช่น วัคซีน ยา และผลิตภัณฑ์อาหารสด การเข้าใจและประยุกต์ใช้สมการพยากรณ์จากผลการวิจัยนี้จะช่วยให้ผู้ประกอบการสามารถเลือกใช้กล่องและจำนวน PCM ที่เหมาะสม ซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียสินค้า เพิ่มคุณภาพการขนส่ง และลดต้นทุนการดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

**6. สรุปผล**

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการรักษาอุณหภูมิของกล่องเก็บความเย็นแบบพกพาในระบบโลจิสติกส์โซ่ความเย็น โดยใช้การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ตัวแปรที่สำคัญ ผลการวิจัยพบว่าประเภทของกล่อง B-Box (B40, BC5, B80) จำนวนของวัสดุเปลี่ยนสถานะ (PCM) ต่อกล่อง และโครงสร้างผนังด้านบนของกล่อง เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการรักษาอุณหภูมิ การวิเคราะห์ทางสถิติได้นำไปสู่การพัฒนาสมการพยากรณ์ที่มีความแม่นยำ ได้แก่ สมการรวมทั้งสองช่วงอุณหภูมิ คือ Result = 71.1745 + 8.77437 Type of B-Box - 1.12133 Top Of Wall (mm.) + 2.12253 Quantity of PCM per Box ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประเภทของกล่องมีอิทธิพลเชิงบวกสูงสุด ขณะที่โครงสร้างผนังด้านบนมีอิทธิพลเชิงลบเล็กน้อย และจำนวน PCM มีอิทธิพลเชิงบวกปานกลางนอกจากนี้เมื่อแยกวิเคราะห์ตามช่วงอุณหภูมิและประเภทกล่องพบสมการที่น่าสนใจ เช่น ในช่วง 15-25°C ได้สมการ Result = 25.4 + 19.4 Type of B-Box + 19.8 Quantity of PCM per Box ซึ่งแสดงอิทธิพลของจำนวน PCM ที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน สำหรับกล่องแต่ละประเภท มีสมการเฉพาะที่แตกต่างกัน เช่น กล่อง B40 มีสมการ Result = 73.7601 + 0.780405 Top Of Wall (mm.) + 1.15878 Quantity of PCM per Box ขณะที่กล่อง BC5 มีสมการ Result = 77.8183 - 2.57869 Top of Wall (mm.) + 3.11937 Quantity of PCM per Box ซึ่งน่าสนใจที่ผนังด้านบนมีผลเชิงลบมากกว่า และกล่อง B80 มีสมการที่เรียบง่ายคือ Result = 57 + 5 Quantity of PCM per Box แสดงว่าจำนวน PCM เป็นปัจจัยเดียวที่มีนัยสำคัญสำหรับกล่องประเภทนี้ สมการเหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบบรรจุภัณฑ์สำหรับขนส่งสินค้าควบคุมอุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพ

**เอกสารอ้างอิง**

[1] Praornpit Katchwattana. (2023).” ชี้โอกาสเพิ่มมูลค่าธุรกิจโลจิสติกส์ไทย ด้วยเทคโนโลยี Cold Chain Logistics .สืบค้น 16 พฤษภาคม 2024,จาก https://www.salika.co/ 2023/04/1 5/cold-chain-logistics-thailand/

[2] ชัยวัฒน์ โควาวิสารัช. (2017). “PCM” นวัตกรรมผลิตภัณฑ์ชีวภาพไทยแลนด์4.0. สืบค้นวันที่ 16 พฤษภาคม 2024, จาก https://www.bangkokbiz news .com/blogs/ columnist/115641

[3] เพียงดาว ป้องแดง. การปรับปรุงกระบวนการประกอบแกนหมุนของฮาร์ดดิสก์โดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง. 2018: 13-14. สืบค้นจาก https://ethesisarchive.library.tu.ac.th/thesis/2018 /TU_2018_6010037015_10142_10735.

[4] ปาพจนี ปาลกะวงศ์ ณ อยุธยา. ออกแบบการทดลองเพื่อลดของเสียในกระบวนการฉีดพลาสติกของชิ้นส่วนอิ เล็กทรอนิกส์งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือการลดของเสียในกระบวนการฉีดของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง ( Design of Experiment: DOE)/มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2561. สืบค้นจาก http://ithesis-ir.su.ac.th/dspace /bitstream /

[5] ศุทธินี คุ้มครองทรัพย์. การสร้างตัวแบบการถดถอยเพื่อพยากรณ์ค่าความเข้มข้นของ NO2 ในจังหวัดชลบุรี REGRESSION MODELING FOR NO2 PREDICTION IN CHON BURI PROVINCE /

มหาวิทยาลัยบูรพา. 2555. สืบค้นจาก https://www.lib.buu.ac.th/st/ST0002618.pdf

[6] Raju R. Yenare และคณะ. A comprehensive review of portable cold storage: Technologies, applications and future trends. 2024. สืบค้นจาก https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1

[7] Yishun Sha และคณะ. Properties and encapsulation forms of phase change material and various types of cold storage box for cold chain logistics: A review. 2022. สืบค้น 16 พฤษภาคม 2024 จาก https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X22014189

[9] Yuexia Dong และคณะ. Comparison of Insulation Materials for Cold Storage Boxes: A review. 2023. สืบค้น 16 พฤษภาคม 2024, จาก https://www.researchgate.net/publication/377503435_Research_and_Application_Progress_of_Insulation_Materials_in_Cold_Chain_Logistics/fulltext/

[10] Qiang Gan. Influencing factors of cooling performance of portable cold storage box for vaccine supply chain: An experimental study. 2023. สืบค้น 27 พฤษภาคม 2024 จาก https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X23016092.

[11] De Mast, J., & Lokkerbol, J. An analysis of the Six Sigma DMAIC method from the perspective of problem solving. International Journal of Production Economics. 2012; 139(2): 604-614.