

การศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยซีลด้วยความร้อนและการ  
หาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยในการปิดผนึกด้วยความร้อนของฟิล์มอ่อน ชนิด PET กับ  
ถ้วยพลาสติกชนิด PP ที่บรรจุผลิตภัณฑ์โยเกิร์ต

An Investigation of Seal Strength Effect on Heat Sealing Factor and  
Optimization Parameter of Heat Sealing of PET Film to PP  
Cup on the yogurt product

นาถนลิน จันลาเศษ (Nadnalin Janlaset)<sup>1\*</sup> เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต (Keatfa Tungjaijit)\*\*

(Received: November 16, 2021; Revised: December 31, 2021; Accepted: January 31, 2022)

บทคัดย่อ

การศึกษาผลของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อกระบวนการปิดผนึกด้วยความร้อนของฟิล์ม Polyethylene Terephthalate (PET) เรียบและถ้วยพลาสติก Polypropylene (PP) ภายในบรรจุผลิตภัณฑ์โยเกิร์ต 150 กรัม โดยศึกษา อุณหภูมิ เวลาและความดันที่ใช้ในกระบวนการปิดผนึก พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิตั้งแต่ 140 °C ขึ้นไปส่งผลให้ความแข็งแรงของซีล เพิ่มขึ้นมากกว่า 10 N/mm. ซึ่งคือความแข็งแรงที่ยอมรับได้ในกระบวนการผลิตนี้ และเวลาการซีลนั้นเมื่อใช้เวลาประมาณ 1 วินาทีพบว่าความแข็งแรงของรอยซีลเริ่มลดลงเล็กน้อยด้วยเหตุนี้การใช้เวลาที่นานเกิน 1 วินาทีจึงไม่ส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยซีลเพิ่มขึ้น การลดระยะเวลาในการซีลนั้นสามารถลดลงได้เพื่อให้กระบวนการซีลมีระยะเวลาที่สั้นลง แต่เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องจักรที่ใช้ปิดผนึกทำให้เวลาที่ต้องใช้มากกว่า 0.1 วินาที และผลของแรงดันที่ใช้กดรอยซีลนั้นมีผลเพียงเล็กน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงของความแข็งแรงของรอยซีลซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา จึงนำผลการทดลองที่ได้จากการวิจัยนี้มาสร้างเป็นกราฟ Process window เพื่อใช้ในการกำหนดพารามิเตอร์ของเครื่องปิดผนึกด้วยความร้อนโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถกำหนดค่าที่เหมาะสม ลดการใช้พลังงานและเพิ่มความเร็วในการผลิต โดย Process window ในงานวิจัยนี้ทำขึ้นเพื่อเป็นตัวอย่างและแนวทาง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างหน้าต่างกระบวนการของการซีลด้วยความร้อนของแต่ละกระบวนการที่มีเงื่อนไขแตกต่างกัน เช่น เครื่องซีล และวัสดุที่ใช้ซีล ต่อไป

ABSTRACT

The effect of parameters affecting the heat-sealing process of PET laminate film and PP plastic cups within 150g of yogurt product was studied with temperature, time, and pressure in the sealing process. It was found that at temperatures uprising from 140°C, the strength of the seal joint was increased by more than 10 N/mm. It was an acceptable heat-sealing strength value in this experiment, and the dwell time due to the limitation of sealer required to be more than 0.1 s. The pressure effect was found to have little on the change in seal marks. It was consistent with the past research. So, the experimental results were used to create a process window graph to determine the heat sealer's parameters to determine the appropriate values, reduce energy consumption, and increase production speed.

**คำสำคัญ:** การปิดผนึกด้วยความร้อน ความแข็งแรงของรอยซีล ถ้วยพลาสติกที่ปิดผนึกด้วยฟิล์มเรียบ

การปิดผนึกบรรจุภัณฑ์ถ้วยพลาสติก หน้าต่างกระบวนการ

**Keywords:** Heat sealing, Seal strength, Sealing of laminate Film, Plastic cup heat sealing, Process window

<sup>1</sup>Corresponding author: Nadnalin.j@kkumail.com

\*นักศึกษา หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

\*\*รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

## บทนำ

ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมการส่งออกอาหารและเครื่องดื่มจากแปรรูปของประเทศไทยมีแนวโน้มที่เติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่อง การออกแบบบรรจุภัณฑ์สำหรับอุตสาหกรรมการแปรรูปผลไม้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งทั้งในด้านการดึงดูดใจลูกค้าและการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ภายในบรรจุภัณฑ์ให้คงคุณภาพที่ดี [1] การปิดผนึกของบรรจุภัณฑ์เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก ซึ่งอาหารและเครื่องดื่มจากการแปรรูป นิยมบรรจุในภาชนะที่ผลิตจากวัสดุพลาสติก การปิดผนึกด้วยความร้อนเป็นวิธีการที่ใช้ในการปิดบรรจุภัณฑ์จากพลาสติกที่พบอย่างแพร่หลาย โดยการปิดผนึกนั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อม และยังช่วยรักษาคุณภาพและรสชาติของผลิตภัณฑ์ที่บรรจุอยู่ภายในบรรจุภัณฑ์อีกด้วย [2] อีกทั้งยังช่วยป้องกันสิ่งแวดล้อมภายนอกที่อาจจะสามารถเข้าไปสร้างความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์ด้านในได้ การปิดผนึกของฟิล์มพลาสติกและถ้วยพลาสติกนั้นเป็นการเกิดพันธะกันระหว่างฟิล์มและถ้วยพลาสติกซึ่งการทำให้เกิดพันธะของวัสดุทั้งสองสิ่งนั้นจะต้องอาศัยปัจจัยที่ทำให้โมเลกุลของฟิล์มและพลาสติกเคลื่อนที่มาสัมผัสกันและสร้างพันธะระหว่างกัน เช่น ใช้แรงเชิงกล ความร้อน เป็นต้น [3] ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการปิดผนึกฟิล์มพลาสติกและเทอร์โมพลาสติกในบรรจุภัณฑ์อาหารจะนิยมใช้การปิดผนึกด้วยความร้อนเนื่องจาก รอยปิดผนึกแน่นสนิท แข็งแรง ทำได้ง่าย เครื่องมือที่ใช้จนราคาไม่สูงมาก และการใช้ระยะเวลาในการปิดผนึกนั้นส่งผลในการเพิ่มอัตราการผลิต [3, 8, 10] ฟิล์มที่ใช้ในการปิดผนึกนั้นจะจะมีคุณสมบัติที่สามารถยึดติดกัน สามารถป้องกันและต้านทานการแทรกซึมได้ดี [6] ปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อการปิดผนึกความร้อนของแผ่นฟิล์มและถ้วยพลาสติก ได้แก่ อุณหภูมิของแท่นกด ระยะเวลาที่กดแรงดันที่ใช้กด [6-7, 11] อีกทั้งคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาปิดผนึกเช่น ความหนาของฟิล์ม อุณหภูมิการหลอมเหลว การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของโมเลกุลของพอลิเมอร์ก็ส่งผลต่อคุณภาพของรอยซีลด้วย [2] รวมถึงปัจจัยในการซีลด้วยความร้อนเป็นสิ่งสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของรอยซีลในกระบวนการปิดผนึกด้วยความร้อนนั้น ซึ่งจะช่วยรักษาทั้งคุณภาพ การป้องกันการรั่วซึม และการป้องกันการซึมเข้าสู่ผลิตภัณฑ์ของความชื้น [3, 12] และการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการปิดผนึกด้วยความร้อนที่เหมาะสมยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตอาหารและเครื่องดื่ม เช่น การจัดตารางเวลาที่เหมาะสมในการผลิต การลดระยะเวลาในการผลิต และการใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมยังลดต้นทุนในการใช้พลังงานในการผลิตลงอีกด้วย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาด้วยวิธีการทดลองเพื่อหาผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการปิดผนึกด้วยความร้อนของฟิล์มเรียบชนิด Polyethylene Terephthalate (PET) และถ้วยพลาสติกชนิด Polypropylene (PP) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในกระบวนการปิดผนึกด้วยความร้อน เพื่อช่วยลดการใช้พลังงานและลดระยะเวลาในการผลิต และเพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ของผู้ผลิตอาหารและเครื่องดื่มที่ต้องใช้กระบวนการปิดผนึกด้วยความร้อนเพื่อทดแทนการใช้วิธีการลงมือผลิต

## วัตถุประสงค์การวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการวิจัยดังนี้

1. ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยปิดผนึกด้วยความร้อน ได้แก่ เวลา แรงดัน และอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการปิดผนึกด้วยความร้อน
2. สร้างกราฟ window process เพื่อใช้ในการปรับตั้งค่า เวลา และ อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการปิดผนึกด้วยความร้อนเพื่อให้เลือกค่า เวลา อุณหภูมิ ที่เหมาะสมกับกระบวนการปิดผนึกด้วยความร้อน เพื่อให้เพิ่มความเร็ว ลดระยะเวลา และลดพลังงานที่ใช้ในกระบวนการปิดผนึกด้วยความร้อน

## ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

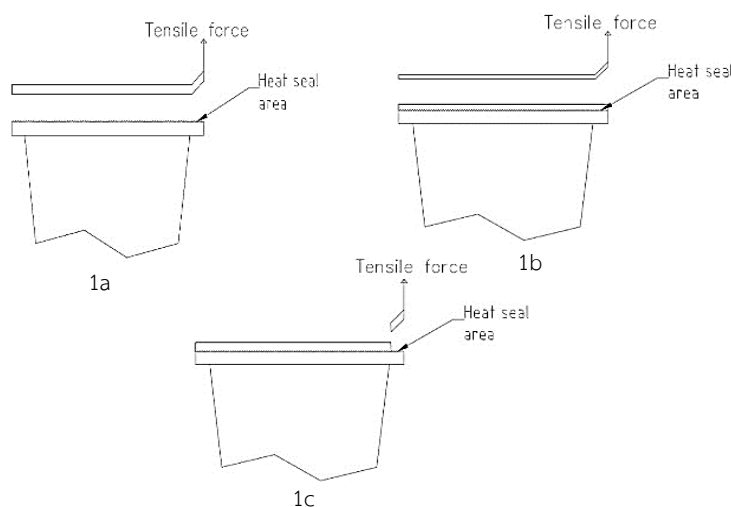
การปิดผนึกของพอลิเมอร์นั้นหมายถึงการทำให้เกิดพันธะกันระหว่างพอลิเมอร์ ซึ่งการทำให้เกิดพันธะระหว่างพอลิเมอร์นั้นมีอยู่หลายวิธี เช่น อาศัยแรงทางกล การให้ความร้อน การใช้ไฟฟ้าความถี่สูง การใช้คลื่นตราโซนิก และการใช้กาว ปัจจุบันวิธีการที่นิยมใช้ในการปิดผนึกนั้นคือวิธีการใช้ความร้อนในการปิดผนึกซึ่งวิธีการนี้จะนิยมใช้กับเทอร์โมพลาสติก โดยการปิดผนึกด้วยความร้อนหรือ heat sealing นั้น จะมีอยู่ 2 แบบ คือ การให้ความร้อนแบบต่อเนื่อง (Thermal heat sealing) และการให้ความร้อนแบบไม่ต่อเนื่อง (Impulse sealing) โดยการให้ความร้อนแบบต่อเนื่องนั้นการให้ความร้อนจากแหล่งความร้อนจะให้อุณหภูมิที่คงที่และส่งผ่านความร้อนต่อไปยังเครื่องมือปิดผนึก (sealing tool) เพื่อนำความร้อนไปสู่พลาสติกหรือฟิล์มที่ต้องการปิดผนึก เครื่องมือโดยส่วนใหญ่แล้วจะมีลักษณะตามการใช้งานที่ต้องการใช้กับลักษณะของฟิล์มที่ต้องการปิดผนึก เมื่อการปิดผนึกด้วยความร้อนสำเร็จแล้ววิธีการที่ช่วยทดสอบความแข็งแรงของรอยปิดผนึกนั้นแบ่งได้ดังนี้ 1) การทดสอบความแข็งแรงรอยผนึก (Seal strength) หมายถึงแรงที่ใช้แยกรอยปิดผนึกออกจากกันต่อความกว้างของรอยผนึก ด้วยปกติแล้วจะใช้หน่วย นิวตัน/ซม. 2) การทนต่อการลอก (peel strength) หมายถึง ค่าเฉลี่ยของแรงต่อความกว้างของรอยผนึกที่ต้องใช้แยกวัสดุที่ยึดหยุ่นออกจากวัสดุแข็งหรือออกจากวัสดุอ่อน 3) ความแข็งแรงของรอยผนึกขณะร้อน (Hot tack) หมายถึงความต้านทานต่อการแยกของรอยผนึกทันทีที่นำชิ้นงานที่ปิดผนึกเสร็จแล้วไปทดสอบในขณะที่ยังไม่เย็นตัว ปัจจัยที่มีผลต่อการปิดผนึกนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ปัจจัย คือ 1) ปัจจัยจากเครื่องจักรที่ใช้ปิดผนึก 2) ปัจจัยจาก เรซิน และ 3) ปัจจัยจากฟิล์ม [3]

ความแข็งแรงของรอยซึลนั้นสามารถทดสอบได้จากการดึงแยกแผ่นฟิล์มออกจากกันหลังจากรอยซึลเย็นตัวลงแล้ว แรงสูงสุดที่ใช้ดึงแยกฟิล์มเป็นสิ่งที่ได้จากการทดลองหาความแข็งแรงของรอยซึลนี้ ในงานวิจัยที่ผ่านมา [5] พบว่าความเสียหายของรอยฟิล์มนั้นสามารถแยกออกได้ 3 ประเภท

1) การซึลโดยใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุที่ใช้ซึล เมื่อทำการทดสอบความแข็งแรงของรอยซึลจะพบว่าความเสียหายพบว่าความเสียหายจะเกิดจากการหลุดและคลายตัวออกจากกันของโซโม่เลกุลของวัสดุที่สัมผัสกัน โดยลักษณะของความเสียหายแสดงไว้ในภาพที่ 1a ความเสียหายรูปแบบนี้เกิดขึ้นเพราะการซึลที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าโครงสร้างของแผ่นพอลิเมอร์ที่ใช้ในการซึล ดังนั้น ในการทดลองรูปแบบนี้จะมีค่าความแข็งแรงของรอยซึลที่น้อยกว่ารูปแบบอื่นๆที่ทำการศึกษา

2) ความแข็งแรงของรอยซึลด้วยความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆเมื่อเราทำการเพิ่มอุณหภูมิในการซึล เหตุผลเนื่องจาก thermal motion (micro-Brownian movement) ของโซโม่พอลิเมอร์ที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลให้การติดกันของโซโม่พอลิเมอร์เกิดขึ้นลึกกว่าชั้นผิว ความแข็งแรงของรอยซึลจึงเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อถึงทดสอบ จะพบว่าความแข็งแรงของรอยซึลจะเพิ่มขึ้น จากการทดลองโดยใช้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวของวัสดุที่ใช้ในการซึลจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของรอยซึลเพิ่มขึ้นทันที ความเสียหายรูปแบบนี้เมื่อทำการทดสอบความแข็งแรงของรอยซึลความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนตำแหน่งโดยจะเกิดตามตำแหน่งและลักษณะในการทดสอบคือการทดสอบแบบการดึง การลอก และการฉีก โดยแสดงในภาพที่ 1b

3) เมื่อการซึลสิ้นสุดลงโดยใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุจะพบว่า จะเกิดการหลอมรวมกันของแผ่นฟิล์มและขอบด้วยพลาสติกทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยซึลมากกว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุ เมื่อทำการทดสอบพบว่าลักษณะความเสียหายจะเกิดได้ตามภาพที่ 1c คือเกิดการขาดของวัสดุเนื่องจากแข็งแรงน้อยกว่ารอยซึล

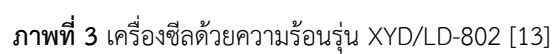
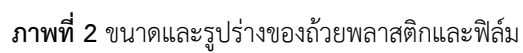


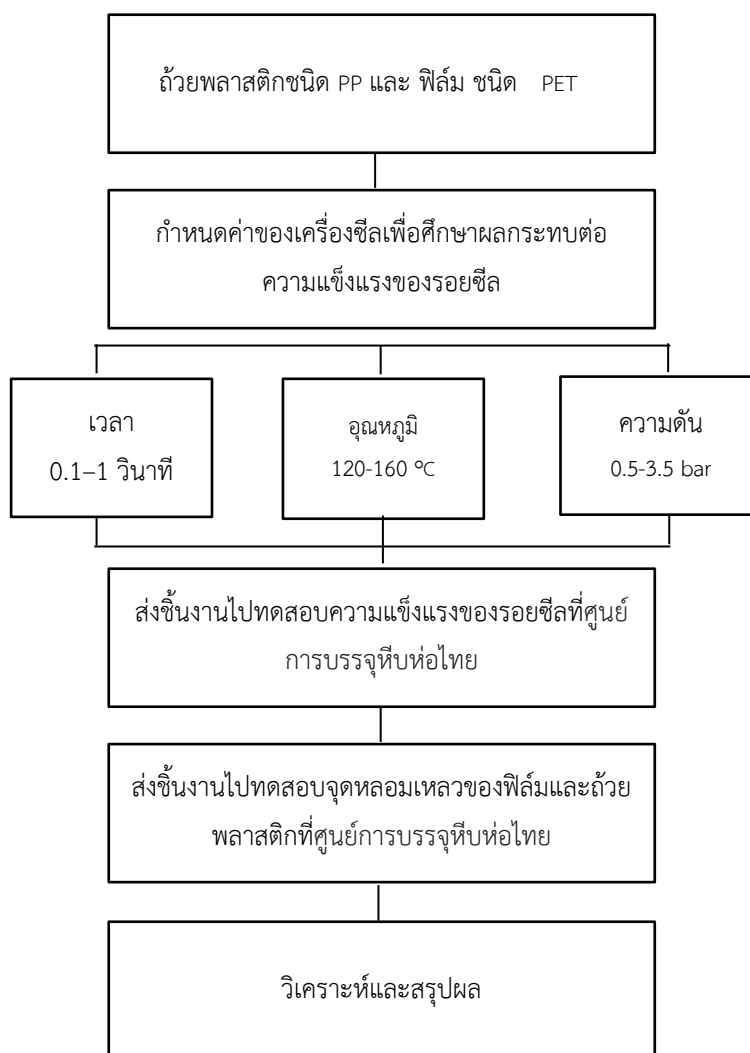
ภาพที่ 1a, 1b และ 1c รูปแบบความเสียหายในแต่ละเงื่อนไขในกระบวนการซีล

การเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของความแข็งแรงของรอยซีลในการทดลองนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการลดลงของ amorphousness ใน พิล์ม PET ที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลให้โซพอลิเมอร์เกิดการเกี่ยวพันและยึดติดกันมากขึ้นส่งผลให้เกิดความเป็นผลึกที่สูงขึ้นในโครงสร้างของโมเลกุล สรุปคือเมื่อความเป็นผลึก (crystallinity) เพิ่มขึ้นค่าความแข็งแรงของรอยซีลก็จะเพิ่มสูงขึ้นไปด้วย ลักษณะความเสียหายของรอยซีลจะเกี่ยวข้องกับค่าความแข็งแรงของรอยซีลที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น ปัจจัยในกระบวนการซีลที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยซีลที่สำคัญคือ เวลาในการซีล แรงดันที่ใช้ในการซีล และอุณหภูมิที่ใช้ในการซีล

## วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองด้วยเครื่องปิดผลึกด้วยความร้อนรุ่น XYD/LD-802 ซึ่งสามารถปรับตั้งค่า อุณหภูมิ, แรงดัน และเวลาที่ใช้ในการซีลได้ ตามภาพที่ 3 วัสดุที่ใช้ในการทดลองตามภาพที่ 2 จะใช้ฟิล์มอ่อนชนิดเรียบที่ใช้สำหรับซีลด้วยความร้อนชนิด PET (Polyethylene Terephthalate) และถ้วยพลาสติกชนิด PP (polypropylene) ถ้วยพลาสติกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกขนาด 72.5 มม. ขนาดขอบของถ้วยพลาสติกที่ใช้ในการซีลนั้นมีความกว้าง 4 มม. ความแข็งแรงของรอยซีลนั้นทดสอบด้วยเครื่องทดสอบชนิด Universal testing machine ยี่ห้อ Instron รุ่น 1123 ค่าการดึงสำหรับทดสอบความแข็งแรงของรอยซีลใช้ความเร็ว 300 มม./นาที และการหาจุดหลอมเหลวของฟิล์มและถ้วยพลาสติกทำโดยใช้ The Differential Scanning Calorimetry (DSC) รุ่น TP-701-B ซึ่งการทดสอบดังกล่าวได้ส่งทดสอบที่ศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย โดยตัวอย่างผลการทดสอบได้แสดงไว้ในภาพที่ 4 ขั้นตอนการทดลองในงานวิจัยนี้แสดงไว้ตามภาพที่ 5





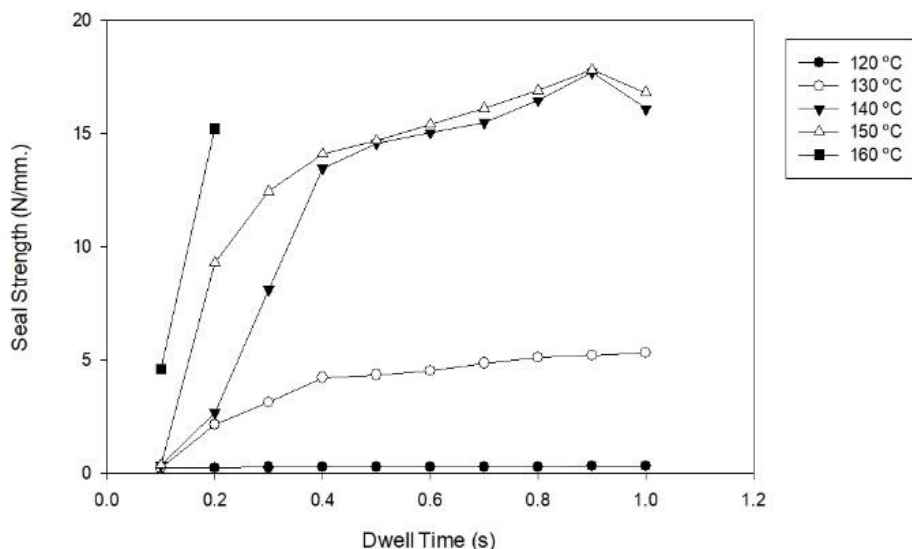
ภาพที่ 5 แผนภาพกระบวนการในการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุและข้อมูลของวัสดุ

| ข้อมูลคุณสมบัติ |      | คุณสมบัติของวัสดุ            |                 |           |
|-----------------|------|------------------------------|-----------------|-----------|
| ถ้วยพลาสติก     |      |                              | ถ้วยพลาสติก, PP | ฟิล์ม PET |
| Height (H), mm  | 98   | Density, kg/m <sup>3</sup>   | 900             | 1350      |
| diameter, mm    | 72.5 | Modulus of elasticity E, GPa | 1.95            | 2.8       |
| Lid size, mm    | 4    | Poission's ratio             | 0.38            | 0.36      |
| Thickness, mm.  | 0.01 | Melting point (°C)           | 144             | 140       |

## ผลการวิจัย

### 1. ผลกระทบของอุณหภูมิและเวลา



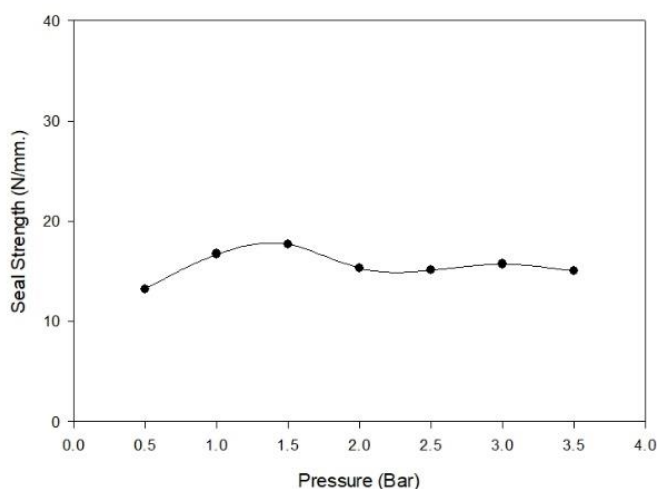
ภาพที่ 6 ผลกระทบของเวลาและอุณหภูมิ

จากการทดลองผลกระทบของเวลาและอุณหภูมิที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมในงานวิจัยนี้แสดงในภาพที่ 6 พบว่าที่อุณหภูมิก่อนถึงจุดหลอมเหลวของวัสดุที่ใช้ในการเชื่อมระยะเวลาในการเชื่อมจะไม่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมโดยจากภาพที่ 4 การทดลองที่อุณหภูมิ 120 °C แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่น้อยมากและเมื่อทำการเพิ่มระยะเวลาในการเชื่อมจาก 0.1 วินาที ไปที่ 1 วินาที ที่อุณหภูมิที่ใกล้เคียงหรือมากกว่าจุดหลอมเหลวพบว่าค่าความแข็งแรงจะเพิ่มสูงขึ้นจาก 0.13 ไปยัง 15.3 นิวตัน/มม. (โดยในการทดลองจะสมมติให้บริเวณที่ทำการเชื่อมเป็น steady-state interfacial temperature) โดยกราฟแสดงให้เห็นว่าควรใช้อุณหภูมิในการเชื่อมตั้งแต่ 130 °C ขึ้นไป

ลักษณะที่สำคัญจากตัวอย่างที่ทดลองคือความแข็งแรงของรอยเชื่อมเริ่มมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อใช้เวลาในการเชื่อมมากกว่า 1 วินาทีเนื่องจากที่ประมาณ 0.9 วินาทีนั้นกระบวนการเชื่อมด้วยความร้อนได้สมบูรณ์แล้วหากใช้ระยะเวลาที่มากเกินไปจะส่งผลให้ขนาดของรอยเชื่อมแผ่นฟิล์มที่ใช้เชื่อมนั้นลดลงจากแรงกดของเครื่องเชื่อมและอุณหภูมิที่เกิดจุดหลอมเหลวของแผ่นฟิล์มส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมลดลงเล็กน้อย แต่สิ่งที่เกิดขึ้นนี้ทำให้ทราบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อมไม่ควรเกิน 1 วินาที แต่ถึงอย่างไรก็ตามในกระบวนการผลิตจริงที่ใช้กระบวนการเชื่อมนี้ เครื่องจักรอาจจะมีข้อจำกัดด้านระยะเวลาในการเชื่อม

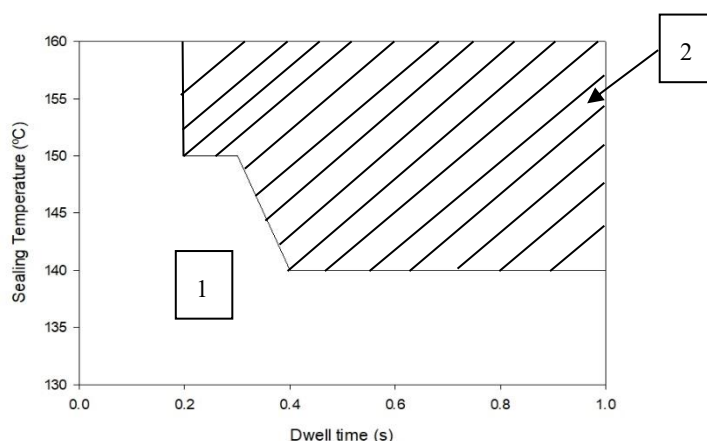
### 2. ผลกระทบจากแรงดัน

จากการทดลองพบว่าผลกระทบจากแรงดันหรือแรงที่ใช้กดลงบนบริเวณที่ทำการเชื่อมด้วยความร้อนนั้นส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมเล็กน้อยโดยจากกราฟภาพที่ 7 ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 150 °C และเวลา 0.9 s โดยสาเหตุที่ทำให้การทดสอบที่อุณหภูมิและเวลาค่าเดียวนั้นเนื่องด้วยจากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าแรงดันมีผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมเล็กน้อย MEKA และ Stehling [5] จึงทำการทดสอบที่อุณหภูมิและเวลาในการเชื่อมค่าเดียว ซึ่งผลการทดสอบพบว่าแรงดันที่ใช้แทบจะไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมเลยซึ่งตรงกับงานวิจัยที่ผ่านมาได้รายงานว่าแรงดันของแผ่นแพลทที่กดลงบนรอยเชื่อมไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมเพียงแต่ช่วยให้แผ่นฟิล์มทั้งสองแผ่นติดกันเท่านั้น



ภาพที่ 7 ผลกระทบของแรงดัน

### 3. Process windows of bar sealing application



ภาพที่ 8 Process window

ผลจากการทดลองได้นำมาสร้างกราฟแสดงพื้นที่ที่เหมาะสมในการกำหนดค่าปัจจัยในกระบวนการซีลด้วยความร้อนเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตที่ต้องใช้กระบวนการซีลด้วยความร้อน หรือ Process window โดยการสร้าง process window นั้น เป็นการนำผลที่ได้จากการทดลองมากำหนดพื้นที่ในกราฟเพื่อกำหนดช่วงที่เหมาะสมในการซีลด้วยความร้อนซึ่ง process window ของเครื่องจักรและวัสดุที่ใช้ซีลด้วยความร้อนแต่ละชนิดจะแตกต่างกันซึ่งประโยชน์ของ process window นั้นคือช่วยในการเลือกกำหนดค่า อุณหภูมิ เวลา ที่เหมาะสมกับกระบวนการซีลด้วยความร้อน โดยผลจากการทดลองในงานวิจัยนี้สามารถอธิบายกราฟจากภาพที่ 8 ได้ดังนี้

1) พื้นที่บริเวณด้านซ้าย (พื้นที่หมายเลข 1) ที่มีเส้นในแนวดิ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นช่วงที่ใช้ระยะเวลาสั้นเกินไปในการซีลระยะเวลาที่สั้นที่สุดควรจะอยู่ด้านขวาของเส้นแนวดิ่ง อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้เป็นต้นแบบและแนวทางในการกำหนดค่าในกระบวนการซีลเท่านั้นแต่ในกระบวนการผลิตจริงอาจมีข้อจำกัดด้านเครื่องจักรที่ไม่สามารถกำหนดระยะเวลาที่ต่ำกว่า 0.1 วินาทีได้

2) พื้นที่ในขอบเขตที่แรงงา (พื้นที่หมายเลข 2) นั้นเป็นพื้นที่ที่เหมาะสมในการบวกรวมการซีลด้วยความร้อนจากการทดลองในงานวิจัยนี้ซึ่งในบางกรณีการใช้อุณหภูมิที่ต่ำจะช่วยลดพลังงานในการซีล แต่หากการปิดผนึกของบรรจุภัณฑ์บางประเภทอาจมีข้อกำหนดที่แตกต่างกันเช่นการใช้อุณหภูมิในการซีลที่สูงเกินไปเพื่อลดระยะเวลาในการซีล แต่อุณหภูมินั้นอาจส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่อยู่ด้านในบรรจุภัณฑ์ได้ ดังนั้นการเลือกเวลา และอุณหภูมิควรเลือกให้เหมาะสมกับการผลิตทั้งในด้านคุณภาพของรอยซีล ความเร็ว และผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ภายใน

## อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของ อุณหภูมิ เวลา และความดันที่ใช้ในกระบวนการซีลที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของการซีลด้วยพลาสติกชนิด PP และ พลาสติกชนิด PET โดยเพิ่มอุณหภูมิจาก 130 °C ไปที่ 160 °C พบว่าผลของการเพิ่มขึ้นของเวลา และอุณหภูมิส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงของรอยซีล และได้นำผลจากการทดลองมาสร้าง process window ที่ใช้ในการเลือกใช้ค่า เวลา และอุณหภูมิในกระบวนการซีล เพื่อให้รอยซีลอยู่ในค่าที่รับได้และเหมาะสมต่อกระบวนการซีลด้วยความร้อน ทั้งยังสามารถลดการใช้พลังงาน และเวลาในการผลิตลงได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามการเลือกใช้วัสดุในการซีล เครื่องจักรในการซีลจะส่งผลต่อการสร้าง process window ดังนั้นการนำแนวทางจากงานวิจัยนี้ไปสร้าง Process window ของเครื่องจักรแต่ละเครื่องเพื่อใช้ในกระบวนการซีลทดแทนการลองผิดลองถูกเป็นแนวทางที่น่าสนใจและนำไปใช้เป็นอย่างยิ่ง โดยงานวิจัยนี้ได้ทำ process window ขึ้นเพื่อเป็นต้นแบบให้กับผู้ที่สนใจสามารถนำไปเป็นแนวทางในการจัดทำและใช้งานจริงในอนาคตต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

1. Suteerapot W. The report on export result of canned fruits and processed fruits in 2017. Department of International Trade Promotion, Ministry of Commerce. 2017.
2. Ponnambalam D, Loong Tak Lim, Manickavasagan A. Effect of heat-sealing parameter on the thermal profile and seal strength of multilayer films and non-woven. Packaging Technology and science., 2021;34(10), 623-639.
3. Euapitaksakul N. Heat sealing of polypropylene film in flexible packaging. [Thesis of Master of Science, Department of Materials Science] Bangkok: Chulalongkorn University; 2539.
4. Morris BA. The science and Technology of flexible Packaging; Multilayer Film from Resin and Process to End Use. Elsevier;2017.
5. Meka P, Stehing FC. Heat sealing of Semicrystalline Polymer Films. Calculation and Measurement of Interfacial Temperature: Effect of Process Variables on Seal Properties." Journal of Applied Polymer Science 1994; 51 (1): 89-103.
6. NAJARZADEH Z. Control and optimization of sealing layer in films. Doctoral thesis in Chemical engineering, University of DE MONTREAL. 2014.
7. Theller HW. Heat seal ability of Flexible Web Materials in Hot-Bar Sealing Application. Journal of plastic film sheeting 5, 1989; 66-93.
8. Selke SEM, Culter JD, Hernandez RJ. Plastics packaging Properties, Processing, Applications, And Regulations, 2<sup>nd</sup> ed. Hanser Gardner Publications. 2004.



9. Tetsuya T, Ishiaku US, Mizoguchi MH. The effect of heat-sealing temperature on the properties of OPP/CPP heat seal. I. Mechanical properties. Journal of Apply polymer science. 2005;97, 753-760.
10. Stoke VK. Joining methods for plastics and plastic composite: an overview. Polymer engineering science. 1989; 29, 1310-1324.
11. Hassan A. seal strength. Express Effect of bar sealing parameter on OPP/MCPP heat polymer. 1, 2007;733-799.
12. Suramya DM, Loong-Tak Lim. Heat sealing of LLDPE films: Heat transfer modeling with liquid presence at the film-film interface. Journal of Food Engineering. 2013;116, 532-540.
13. website.; <https://extra.shopklub.com/index.php/4-xy-ld-802-paper-plastic-foil-cup-sealing-machine.html>