การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปด้วยระบบสุญญากาศ สำหรับพลาสติกชนิดโพลิไวนิลคลอไรด์

A Study of Optimal Factor in Vacuum Thermoforming Process for Polyvinyl Chloride Plastic

ประเสริฐ ชุมปัญญา[1]* ชลิดา ชาญวิจิตร[2]

[1]อาจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตเครื่องมือและแม่พิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพฯ 10800

[2]นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

บทคัดย่อ

ปัญหาหลักที่พบในชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยระบบสุญญากาศ คือ มีความหนาไม่สม่ำเสมอ จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาของชิ้นงาน ได้แก่ อุณหภูมิในการให้ความร้อน ระยะเวลาในการให้ความร้อน ระยะเวลาในการสุญญากาศ ระยะเวลาในการให้ลมเป่า และระยะเวลาในการให้ลมเย็นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาระดับปัจจัยที่เหมาะสม สำหรับการขึ้นรูปพลาสติกชนิดโพลิไวนิลคลอไรด์ที่มีความหนา 0.4 มิลลิเมตร ผู้วิจัยได้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^5 (2^k Factorial Design) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยทดลองซ้ำเพียง 1 ครั้ง (single replicate) จากผลการทดลอง พบว่า อุณหภูมิในการให้ความร้อน 190°C ระยะเวลาในการให้ความร้อน 34 วินาที ระยะเวลาสุญญากาศ 36 วินาที ให้ลมเป่า 19 วินาที และให้ลมเย็น 9 วินาที จะส่งผลให้ความหนาของชิ้นงานที่ตำแหน่งที่ 7, 9 และ 13 ซึ่งมีความหนาน้อยกว่า 0.1 ม.ม. (ต่ำกว่าค่าที่ยอมรับได้) มีความหนาเพิ่มขึ้นเป็น 0.13, 0.11 และ 0.14 ม.ม. ตามลำดับ

Abstract

A main problem of this technique is the uneven thickness of material after processing. Based on the previous research, there are many factors affecting the thickness namely, temperature, heating time, vacuum time, air-blow time, and cooling time. The objective of this research is to determine the factors and their optimal settings affecting to the thickness of 0.4 mm. polyvinyl chloride (PVC). The research uses a 2^k factorial designed at 95% confident level with single replicate. The result shows that setting the temperature at 190°C, heating time at 34 seconds, vacuum time at 36 seconds, air-blow time for 19 seconds, and cooling time for 9 seconds, can increase the thickness of the 0.1 mm. workpiece (less than the acceptable specification) at the points 7, 9, and 13 to 0.13, 0.11 and 0.14 mm. respectively.

คำสำคัญ : การขึ้นรูปด้วยความร้อนระบบสุญญากาศ การทดลองเชิงแฟกทอเรียล

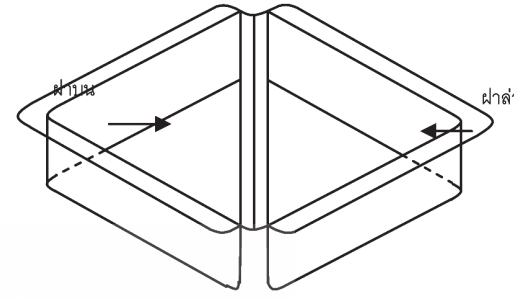
Keywords : Vacuum Thermoforming Process, Factorial Design

ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ prasert.c@rmutp.ac.th โทร. 02-913-2424 ต่อ141

1. บทนำ

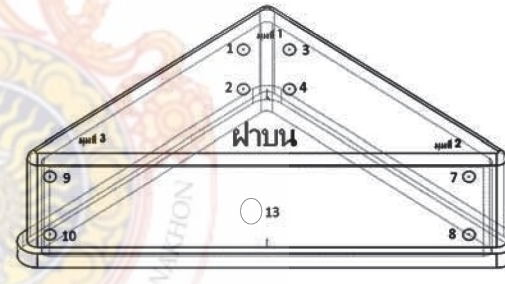
ปัจจุบันวัสดุประเภทพลาสติกเป็นวัตถุดิบที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมผลิตบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่น คือ มีน้ำหนักเบา สามารถขึ้นรูปได้ง่าย อีกทั้งยังมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุประเภทแก้ว หรือโลหะ กระบวนการขึ้นรูปพลาสติกจะมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น การขึ้นรูปด้วยการฉีด (Injection Molding) การขึ้นรูปด้วยการเป่า (Blow Molding) และการขึ้นรูปด้วยความร้อนระบบสุญญากาศ (Vacuum Thermoforming) เป็นต้น การพิจารณาวิธีการขึ้นรูปพลาสติกจะขึ้นอยู่กับลักษณะของผลิตภัณฑ์ วิธีการขึ้นรูปด้วยความร้อนระบบสุญญากาศเป็นวิธีการที่ง่าย ไม่ซับซ้อน อีกทั้งยังสามารถผลิตชิ้นงานได้จำนวนหลายชิ้นงานต่อการผลิตหนึ่งครั้ง จึงเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์ชนิดบางที่มีรูปทรงไม่ซับซ้อน แต่ในการผลิตชิ้นงานด้วยวิธีนี้จะมีปัญหาหลักอยู่ที่ชิ้นงานที่ได้มีความหนาไม่สม่ำเสมอ และมีความหนาน้อยมากบริเวณมุมของชิ้นงาน ทำให้บรรจุภัณฑ์ที่ผลิตได้ไม่สมบูรณ์[1]

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ใส่แซนด์วิช โดยใช้เครื่องขึ้นรูปด้วยความร้อนระบบสุญญากาศของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร รุ่น SB 4060 ของบริษัท BOSCO และใช้พลาสติกชนิดโพลิไวนิลคลอไรด์ที่มีความหนา 0.4 มิลลิเมตร เป็นวัสดุทดสอบ บรรจุภัณฑ์ใส่แซนด์วิชที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นที่เรียบร้อยแล้วจะมีลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 1

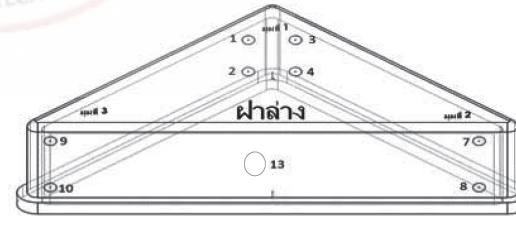


รูปที่ 1 บรรจุภัณฑ์ใส่แซนด์วิช

จากรูปที่ 1 แสดงลักษณะบรรจุภัณฑ์ใส่แซนด์วิชที่ใช้เป็นกรณีศึกษา ซึ่งประกอบไปด้วยฝาบนและฝาล่าง ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปและมีรูปร่างที่สมบูรณ์จะถูกนำมาวัดความหนาตามตำแหน่งต่าง ๆ ทั้งหมด 13 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 2 และรูปที่ 3

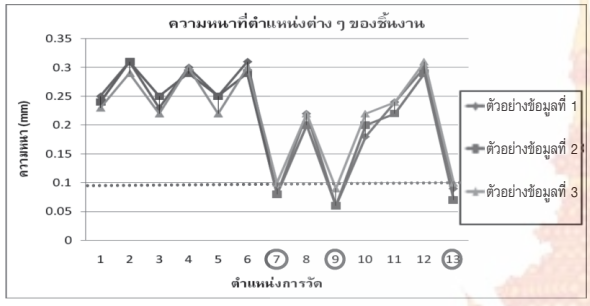


รูปที่ 2 ตำแหน่งการวัดความหนาของฝาบน



รูปที่ 2 และ 3 ตำแหน่งการวัดความหนาของฝาบนและฝาล่าง

เมื่อพิจารณาปัญหาที่เกิดขึ้นจากการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ใส่แซนด์วิชด้วยวิธีดังกล่าว พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปที่มีรูปทรงสมบูรณ์จะมีความหนาบริเวณมุมต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนด (ต่ำกว่า 0.1 มิลลิเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 4 แสดงความหนาของชิ้นงานทั้ง 13 ตำแหน่ง จากการวัดชิ้นงานที่มีรูปทรงสมบูรณ์จำนวน 3 ตัวอย่าง



รูปที่ 4 ความหนาของชิ้นงานที่ตำแหน่งต่าง ๆ

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าตำแหน่งที่ 7 ตำแหน่งที่ 9 และตำแหน่งที่ 13 จะมีความหนาต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนด คือ ต่ำกว่า 0.1 มิลลิเมตร ผู้วิจัยจึงได้ทำการวิเคราะห์ร่วมกับนักวิจัยที่ควบคุมเครื่องขึ้นรูปด้วยความร้อนระบบสุญญากาศ พบว่า สาเหตุที่ทำให้ความหนาของชิ้นงานที่ได้ต่ำกว่ามาตรฐาน เนื่องจากการควบคุมสภาวะการทำงานของเครื่องจักรจะอาศัยประสบการณ์ของผู้ควบคุมเป็นหลัก ทำให้ไม่มีหลักการที่ถูกต้องในการกำหนดสภาวะการทำงาน ส่งผลให้ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปมีปัญหาในด้านความหนาต่ำกว่ามาตรฐานคิดเป็น 40% ของชิ้นงานที่ผลิตได้ทั้งหมด จากการศึกษา พบว่า ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความหนาของชิ้นงาน ประกอบไปด้วย ปัจจัยทั้งหมด 5 ปัจจัย คือ อุณหภูมิในการให้ความร้อน (Temperature) ระยะเวลาในการให้ความร้อน (Heating time) ระยะเวลาในการให้สุญญากาศ (Vacuum time) ระยะเวลาในการให้ลมเป่า (Air-blow time) และระยะเวลาในการให้ลมเย็น (Cooling time) ปัจจัยทั้งหมดจะเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ขณะที่ทำการทดลอง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ใส่แซนด์วิชโดยใช้เครื่องขึ้นรูปด้วยความร้อนระบบสุญญากาศ เพื่อให้ความหนาของชิ้นงานที่ได้เป็นไปตามมาตรฐานทั้งหมด 13 ตำแหน่ง ซึ่งจะส่งผลให้สามารถลดสัดส่วนชิ้นงานที่มีความหนาไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดได้ จากการทดลองเบื้องต้น ผู้วิจัยได้เลือกช่วงระดับปัจจัยดังต่อไปนี้ คือ กำหนดอุณหภูมิในการให้ความร้อนระหว่าง 190 ถึง 200 องศาเซลเซียส กำหนดระยะเวลาในการให้ความร้อนระหว่าง 28 ถึง 34 วินาที กำหนดระยะเวลาในการให้สุญญากาศระหว่าง 24 ถึง 36 วินาที กำหนดระยะเวลาในการให้ลมเป่าระหว่าง 19 ถึง 31 วินาที และกำหนดระยะเวลาในการให้ลมเย็นระหว่าง 3 ถึง 9 วินาที เมื่อทำการทดลองเบื้องต้น พบว่า ระดับปัจจัยที่ถูกกำหนดในข้างต้นจะทำให้ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว มีรูปทรงที่สมบูรณ์

1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากปัจจัยที่ทำการทดลองมีอยู่ด้วยกันหลายปัจจัย ผู้วิจัยจึงได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสำหรับการทดลองกรณีหลายปัจจัย ในการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยจะแบ่งงานวิจัยออกเป็น 2 ประเภท คือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูปและงานวิจัย ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ บรรยงค์ [2] ศึกษาวิธีการขึ้นรูปพลาสติกด้วยความร้อนแบบสุญญากาศ โดยศึกษาตัวแปรต่าง ๆ

ที่ส่งผลต่อการแผ่ความร้อนของแผ่นพลาสติก จากการศึกษา พบว่า ช่องว่างระหว่างตัวให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกจะเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูป ตติยา [3] ศึกษาการพัฒนาบรรจุภัณฑ์สำหรับใส่ไอศกรีม โดยเลือกแผ่นพลาสติกชนิด LDPE, PP, และ APET ที่มีความหนา 1.0 มิลลิเมตร มาทำการทดลอง และใช้เครื่องขึ้นรูปด้วยความร้อนแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส จากผลการทดลอง พบว่า การขึ้นรูปพลาสติกชนิด LDPE จะกำหนดระยะเวลาในการให้ความร้อน 33 วินาที ระยะเวลาในการให้สุญญากาศ 15 วินาที และระยะเวลาในการเป่าลมเย็น 3 วินาที พลาสติกชนิด PP จะกำหนดระยะเวลาในการให้ความร้อน 30 วินาที ระยะเวลาในการให้สุญญากาศ 15 วินาที และระยะเวลาในการเป่าลม 3 วินาที สุดท้ายพลาสติกชนิด APET จะกำหนดระยะเวลาในการให้ความร้อน 20 วินาที ระยะเวลาในการให้สุญญากาศ 12 วินาที และระยะเวลาการให้ลมเย็น 2 วินาที วันฉัตร [4] ศึกษาการออกแบบและทดลองสร้างแม่พิมพ์ประเภทตัวเมียที่มีลักษณะรูปทรงเรขาคณิตเพื่อใช้ในการขึ้นรูปด้วยความร้อน โดยศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้สูตรคำนวณสำหรับนำไปใช้ในการทำงานจริง อุดมพร [5] วิเคราะห์ตัวแปรสำหรับการออกแบบหลอดพรีฟอร์มที่มีผลกระทบต่อคุณภาพในการเป่ายืดภาชนะกลวงจากหลอดพรีฟอร์ม PET และหาความสัมพันธ์เชิงตัวเลขของการออกแบบกับคุณภาพการเป่ายืด ผลการวิเคราะห์ พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างการออกแบบหลอดพรีฟอร์มกับคุณภาพการเป่ายืดจะขึ้นอยู่กับความยาวและความหนาของหลอดพรีฟอร์มและภาชนะกลวง โดยมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือ $G1 = 1.55 + 0.62G_2$ แทนความสัมพันธ์ของความหนา และสมการ $L_1 = -23.36 + 0.66L_2$ แทนความสัมพันธ์ของความยาว ผลจากการวิจัยนี้จะช่วยลดระยะเวลาในการผลิตแม่พิมพ์ และของเสียในกระบวนการผลิต ประเสริฐ [6] ศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปพลาสติกด้วยความร้อนระบบสุญญากาศ เพื่อให้ความหนาของวัตถุดิบลดลงไม่เกิน 15% โดยวัสดุที่ใช้ทดลองจะเป็นพลาสติกชนิดโพลิพอพีลีนที่มีความหนา 0.5 มิลลิเมตร ผู้วิจัยได้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 32 จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนจะส่งผลให้ความหนาของชิ้นงานแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการให้ความร้อน 29 วินาที จะเป็นสภาวะการทำงานที่เหมาะสม สภาวะดังกล่าวจะทำให้ความหนาของชิ้นงานมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.421 มิลลิเมตร คิดเป็นความหนาเฉลี่ยที่ลดลงจากความหนาเริ่มต้นเพียง 12.29%

2. วิธีการทดลอง

2.1 การออกแบบการทดลอง

ในการออกแบบการทดลอง ผู้วิจัยได้แบ่งตัวแปรการทดสอบออกเป็น 2 ตัวแปร ได้แก่ ตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ซึ่งจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.1 ตัวแปรอิสระ

ในส่วนของตัวแปรอิสระที่ผู้วิจัยได้ศึกษาในงานวิจัยนี้จะเป็นปัจจัยที่ใช้ในการปรับตั้งค่าเครื่องขึ้นรูป และเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้

ประกอบไปด้วยปัจจัยทั้งหมด 5 ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยจะแบ่งระดับออกเป็น 2 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย (Factor)	ระดับ (Level)	รหัส
อุณหภูมิในการให้ความร้อน (Temperature, T)	200 องศาเซลเซียส	1
	190 องศาเซลเซียส	-1
ระยะเวลาในการให้ความร้อน (Heating time, H)	34 วินาที	1
	28 วินาที	-1
ระยะเวลาในการให้สุญญากาศ (Vacuum time, V)	36 วินาที	1
	24 วินาที	-1
ระยะเวลาในการให้ลมเป่า (Air-blow, A)	31 วินาที	1
	19 วินาที	-1
ระยะเวลาในการให้ลมเย็น (Cooling, time C)	9 วินาที	1
	3 วินาที	-1

* รหัส 1, -1 ใช้สำหรับโปรแกรมคำนวณ Minitab
1 หมายถึง ตำแหน่ง High
-1 หมายถึง ตำแหน่ง Low

2.1.2 ตัวแปรตาม

ตัวแปรตามที่กำหนดในงานวิจัยนี้ คือ ความหนาของชิ้นงานหลังจากผ่านการขึ้นรูป โดยชิ้นงานที่นำมาวัดความหนาจะต้องเป็นชิ้นงานที่มีรูปทรงสมบูรณ์ งานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^5 โดยทดลองซ้ำเพียง 1 ครั้ง (2^k with single replicate) เนื่องจากมีข้อจำกัดด้านวัตถุดิบในการทดลอง การจัดลำดับการทดลองจะเป็นแบบสุ่ม (Random) ตามหลักการออกแบบการทดลอง

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

การวิเคราะห์ผลการทดลอง จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง การวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัย และการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

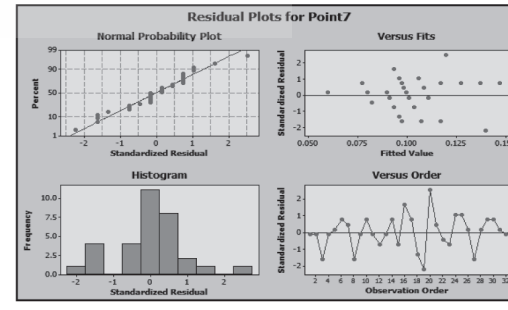
Montgomery [7] กล่าวไว้ว่า ก่อนการวิเคราะห์ความแปรปรวน ค่าส่วนตกค้างของข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะต้องเป็นไปตามสมมติฐานทั้งหมด 3 ข้อ ดังต่อไปนี้

1. ค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)

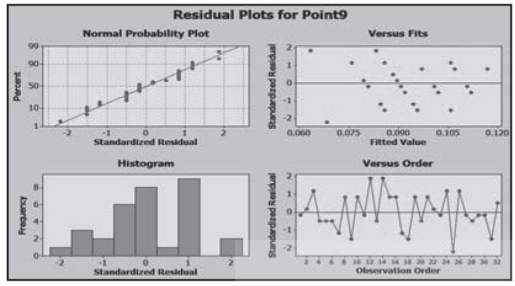
2. ค่าความแปรปรวนมีเสถียรภาพ (Constant Variance, σ^2)

3. ค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน (Independently Distributed)

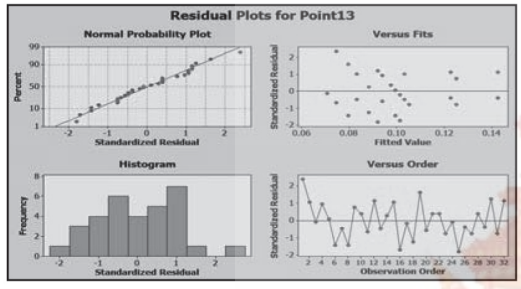
ถ้าหากค่าส่วนตกค้างเป็นไปตามสมมติฐานทั้งหมด 3 ข้อ ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะถือได้ว่ามีความถูกต้องและเหมาะสมสำหรับการนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน



รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์ค่าส่วนตกค้างของตำแหน่งที่ 7



รูปที่ 6 ผลการวิเคราะห์ค่าส่วนตกค้างของตำแหน่งที่ 9



รูปที่ 7 ผลการวิเคราะห์ค่าส่วนตกค้างของตำแหน่งที่ 13

จากรูปที่ 5 ถึงรูปที่ 7 เป็นกราฟแสดงผลการวิเคราะห์ค่าส่วนตกค้าง (Residual) ของตำแหน่งที่ 7 ตำแหน่งที่ 9 และตำแหน่งที่ 13 เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง ซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

1. จากการตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง พบว่า ค่าส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง จึงสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

2. จากการตรวจสอบความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน พบว่า การกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการแบบจำลองการถดถอย (Fitted Value) ไม่มีการกระจายตัวที่มีลักษณะผิดปกติ จึงสรุปได้ว่า ค่าส่วนตกค้างมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

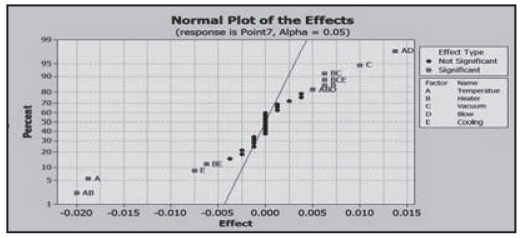
3. จากการตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าส่วนตกค้าง พบว่า การกระจายตัวค่าส่วนตกค้างเทียบกับลำดับการทดลอง (Observation order) ไม่มีลักษณะที่เป็นแนวโน้ม จึงสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน

จากการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง พบว่า ค่าส่วนตกค้างของข้อมูลที่ได้จากการทดลองเป็นไปตามสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ สรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองชุดนี้มีความถูกต้องและเหมาะสมสำหรับการนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

3.2 การวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัย

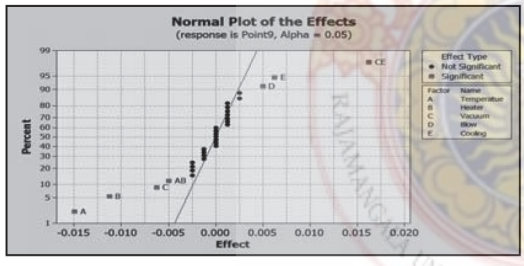
ปารเมศ [8] ได้กล่าวไว้ว่า การวิเคราะห์การทดลองเชิงแฟกทอเรียลชนิดที่มีการทำซ้ำเพียง 1 ครั้งจะต้องทำการวิเคราะห์ผลกระทบจากแต่ละปัจจัย เพื่อกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองสำหรับนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งผลการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัย จะแสดงดังในรูปที่ 8 ถึงรูปที่ 10

จากรูปที่ 8 พบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาของชิ้นงานที่ตำแหน่งที่ 7 ประกอบไปด้วย ปัจจัยหลัก คือ อุณหภูมิในการให้ความร้อน ระยะเวลาในการให้ความร้อน ระยะเวลาในการให้สุญญากาศ และระยะเวลาในการให้ลมเย็น ปัจจัยร่วม 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิในการให้ความร้อนกับระยะเวลาในการให้ความร้อน อุณหภูมิในการให้ความร้อนกับระยะเวลาในการให้ลมเป่า ระยะเวลาในการให้ความร้อนกับระยะเวลาในการให้สุญญากาศ และระยะเวลาในการให้ความร้อนกับระยะเวลาในการให้ลมเย็น โดยงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะพิจารณาปัจจัยร่วม 2 ปัจจัยเท่านั้น เนื่องจากปัจจัยร่วม 3 ปัจจัยจะมีอิทธิพลน้อยมาก



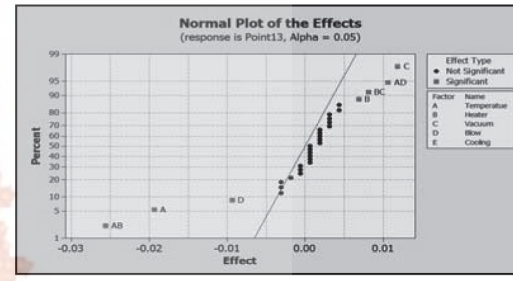
รูปที่ 8 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบปัจจัยของตำแหน่งที่ 7

จากรูปที่ 9 พบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาของชิ้นงานที่ตำแหน่งที่ 9 ประกอบไปด้วย ปัจจัยหลัก คือ อุณหภูมิในการให้ความร้อน ระยะเวลาในการให้ความร้อน ระยะเวลาในการให้สุญญากาศระยะเวลาในการให้ลมเป่า และระยะเวลาในการให้ลมเย็น ปัจจัยร่วม 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิในการให้ความร้อนกับระยะเวลาในการให้ความร้อน และระยะเวลาในการให้สุญญากาศกับระยะเวลาในการให้ลมเย็น



รูปที่ 9 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบปัจจัยของตำแหน่งที่ 9

จากรูปที่ 10 พบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาของชิ้นงานที่ตำแหน่งที่ 13 ประกอบไปด้วย ปัจจัยหลัก คือ อุณหภูมิในการให้ความร้อน ระยะเวลาในการให้ความร้อน ระยะเวลาในการให้สุญญากาศ และระยะเวลาในการให้ลมเป่า ปัจจัยร่วม 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิในการให้ความร้อนกับระยะเวลาในการให้ความร้อน อุณหภูมิในการให้ความร้อนกับระยะเวลาในการให้ลมเป่า และระยะเวลาในการให้ความร้อนกับระยะเวลาในการให้สุญญากาศ



รูปที่ 10 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบปัจจัยของตำแหน่งที่ 13

3.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผู้วิจัยจะเลือกปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาของชิ้นงานที่ตำแหน่งที่ 7 ตำแหน่งที่ 9 และตำแหน่งที่ 13 อย่างมีนัยสำคัญ มาวิเคราะห์ซึ่งจะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2 ถึงตารางที่ 4

จากตารางที่ 2 ถึงตารางที่ 4 เป็นการเปรียบเทียบค่า P-Value กับค่านัยสำคัญ (0.05) โดยที่ค่า P-Value ของแต่ละปัจจัยจะมีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญ จึงสรุปได้ว่าปัจจัยที่ผู้วิจัยทดสอบมีอิทธิพลต่อความหนาของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญเมื่อพิจารณาอิทธิพลร่วมของปัจจัย 2 ปัจจัย ดังแสดงในรูปที่ 11 ถึงรูปที่ 13 พบว่าอิทธิพลร่วมทั้งหมดมีอิทธิพลต่อความหนาอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ตำแหน่งที่ 7

Factors	P-value	ค่าสัมประสิทธิ์
Constant	0.002*	-2.48722
Temperature (T)	0.000*	0.01344
Heating time (H)	0.005*	0.12878
Vacuum time (V)	0.000*	-0.00049
Cooling time (C)	0.001*	-0.00035
T*H	0.000*	-0.00067
T*A	0.000*	0.00023
H*V	0.005*	0.00017
H*C	0.005*	-0.00035

* มีนัยสำคัญ S = 0.00703078 R-sq = 89.93% R-sq (adj.) = 85.81%

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ตำแหน่งที่ 9

Factors	P-value	ค่าสัมประสิทธิ์
Constant	0.011*	-0.876424
Temperature (T)	0.000*	0.005437
Heating time (H)	0.000*	0.031736
Vacuum time (V)	0.000*	0.004687
Air-blow time (A)	0.003*	0.007257
Cooling time (C)	0.000*	-0.012083
T*H	0.003*	-0.000167
V*C	0.000*	0.000451

* มีนัยสำคัญ S = 0.00426956 R-sq = 93.15% R-sq (adj.) = 91.15%

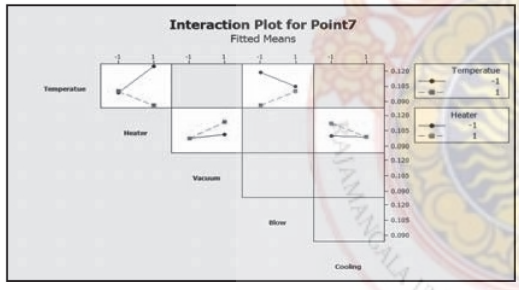
ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ตำแหน่งที่ 13

Factors	P-value	ค่าสัมประสิทธิ์
Constant	0.000*	-3.99611
Temperature (T)	0.000*	0.02155
Heating time (H)	0.007*	0.16241
Vacuum time (V)	0.000*	0.00489
Air-blow time (A)	0.001*	-0.03503
T*H	0.000*	-0.00085
T*A	0.000*	0.00018
H*V	0.002*	0.00023

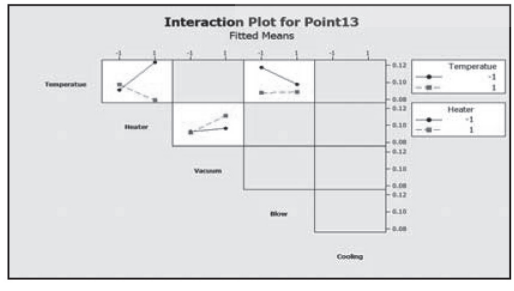
* มีนัยสำคัญ S = 0.00673146 R-sq = 94.40% R-sq (adj.) = 89.15%

เนื่องจากอิทธิพลร่วมของปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนาของชิ้นงานที่ตำแหน่งที่ 7 และตำแหน่งที่ 13 จะคล้ายคลึงกัน ดังนั้น ผู้วิจัยสามารถที่จะสรุปอิทธิพลร่วมของปัจจัยทั้งสองตำแหน่งได้ดังต่อไปนี้ จากรูปที่ 11 และรูปที่ 12 เมื่อพิจารณาอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิในการให้ความร้อนกับระยะเวลาในการให้ความร้อน พบว่า ที่อุณหภูมิในการให้ความร้อน 190 องศาเซลเซียส การเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อนจะส่งผลให้ความหนาของชิ้นงานที่ตำแหน่งที่ 7 และตำแหน่งที่ 13 เพิ่มขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิในการให้ความร้อน 200 องศาเซลเซียส การเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อนจะส่งผลให้ความหนาของชิ้นงานที่ตำแหน่งที่ 7 และตำแหน่งที่ 13 ลดลง เมื่อพิจารณาอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิในการให้ความร้อนกับระยะเวลาในการให้ลมเป่า พบว่า ที่อุณหภูมิในการให้ความร้อน 190 องศาเซลเซียส การเพิ่มระยะเวลาในการให้ลมเป่าจะส่งผลให้ความหนาของชิ้นงานที่ตำแหน่งที่ 7 และตำแหน่งที่ 13 ลดลง

ในขณะที่อุณหภูมิในการให้ความร้อน 200 องศาเซลเซียส การเพิ่มระยะเวลาในการให้ลมเป่าจะส่งผลให้ความหนาของชิ้นงานที่ตำแหน่งที่ 7 เพิ่มขึ้น ในขณะที่ตำแหน่งที่ 13 จะมีความหนาเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อพิจารณาอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยระยะเวลาในการให้ความร้อนกับระยะเวลาในการให้สุญญากาศ พบว่า ทุกช่วงของระยะเวลาในการให้ความร้อนควรกำหนดระยะเวลาการให้สุญญากาศที่ 36 วินาที เพราะจะส่งผลให้ความหนาของชิ้นงานที่ตำแหน่งที่ 7 และตำแหน่งที่ 13 เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยระยะเวลาในการให้ความร้อนกับระยะเวลาในการให้ลมเย็น พบว่า ทุกช่วงของระยะเวลาในการให้ความร้อนควรกำหนดระยะเวลาในการให้ลมเย็นที่ 3 วินาที เพราะจะส่งผลให้ความหนาของชิ้นงานที่ตำแหน่งที่ 7 เพิ่มขึ้น

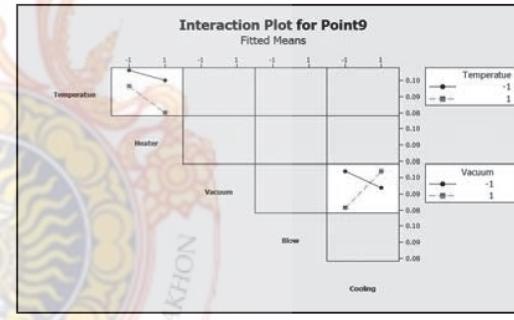


รูปที่ 11 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตำแหน่งที่ 7



รูปที่ 12 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตำแหน่งที่ 13

จากรูปที่ 13 เมื่อพิจารณาอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิในการให้ความร้อนกับระยะเวลาในการให้ความร้อน พบว่า ทุกช่วงของอุณหภูมิในการทดลอง การเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อนจะส่งผลให้ความหนาของชิ้นงานที่ตำแหน่งที่ 9 ลดลง เมื่อพิจารณาอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยระยะเวลาในการให้สุญญากาศกับระยะเวลาในการให้ลมเย็น พบว่า ที่ระยะเวลาในการให้สุญญากาศที่ 24 วินาที ควรลดระยะเวลาการให้ลมเย็น เพราะจะส่งผลให้ความหนาของชิ้นงานที่ตำแหน่งที่ 9 เพิ่มขึ้น ในขณะที่ระยะเวลาในการให้สุญญากาศที่ 36 วินาที ควรเพิ่มระยะเวลาการให้ลมเย็น เพราะจะส่งผลให้ความหนาของชิ้นงานที่ตำแหน่งที่ 9 เพิ่มขึ้น



รูปที่ 13 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของตำแหน่งที่ 9

เนื่องจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ผู้วิจัยต้องการให้ความหนาของชิ้นงานที่ตำแหน่งที่ 7 ตำแหน่งที่ 9 และตำแหน่งที่ 13 มีความหนาเพิ่มขึ้น และต้องเป็นไปตามมาตรฐาน คือ มีความหนามากกว่า 0.1 มิลลิเมตร ดังนั้น จึงต้องมีการหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัย จากค่าสัมประสิทธิ์ในตารางที่ 2 ถึงตารางที่ 4 ผู้วิจัยสามารถเขียนสมการแบบจำลองการถดถอย (Regression) เพื่อพยากรณ์ค่าความหนา (Y) แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

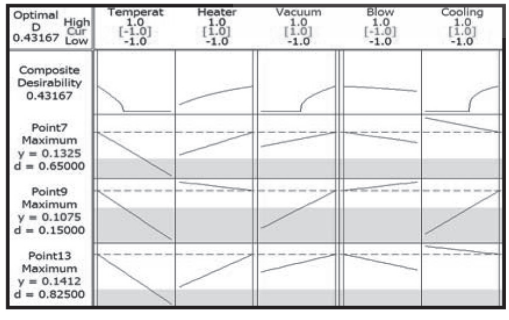
Y_7 = *-2.487 + 0.013(T) + 0.128(H) - 0.00049(V) - 0.00035(C) - 0.00067(T*H) + 0.00023(T*A) + 0.00017(H*V) - 0.00035(H*C)*

Y_9 = *-0.876 +0.0054(T) + 0.031(H) + 0.0046(V) + 0.007257(A) - 0.012083(C) - 0.000167(T*H) + 0.000451(V*C)*

Y_{13} = *-3.99611 + 0.02155(T) + 0.16241(H) + 0.00489(V) - 0.03503(A) - 0.00085(T*H) + 0.00018(T*A) + 0.00023(H*V)*

3.4 การวิเคราะห์หาระดับที่เหมาะสมของปัจจัย

ในการวิเคราะห์หาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะต้องการให้ความหนาของชิ้นงานที่ตำแหน่งที่ 7 ตำแหน่งที่ 9 และตำแหน่งที่ 13 เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด คือ มากกว่า 0.1 มิลลิเมตร และจะต้องไม่ส่งผลกระทบต่อความหนาของชิ้นงานที่ตำแหน่งอื่น ๆ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงทำการวิเคราะห์หาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยสำหรับการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ใส่แซนด์วิช โดยใช้เครื่องขึ้นรูปด้วยความร้อนระบบสุญญากาศ ผลการวิเคราะห์ระดับที่เหมาะสมของปัจจัยแสดงได้ ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ผลการวิเคราะห์ระดับที่เหมาะสมของปัจจัย

ในการวิเคราะห์ระดับที่เหมาะสมของปัจจัย ผู้วิจัยจะกำหนดเป้าหมาย (Goal) ที่ค่าสูงสุด (Maximize) หมายถึง ต้องการให้ความหนาของชิ้นงานมีค่ามากที่สุด และกำหนดค่าเป้าหมาย (Target) ที่ 0.15 มิลลิเมตร กำหนดช่วงต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Lower) ที่ 0.1 มิลลิเมตร เนื่องจากเป็นค่าความหนาต่ำที่สุดของชิ้นงานที่ได้มาตรฐาน

ผลการวิเคราะห์ระดับที่เหมาะสมของปัจจัย ดังแสดงในภาพที่ 14 พบว่า การปรับตั้งอุณหภูมิในการให้ความร้อน 190 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการให้ความร้อน 34 วินาที ระยะเวลาในการให้สุญญากาศ 36 วินาที ระยะเวลาในการให้ลมเป่า 19 วินาที และระยะเวลาในการให้ลมเย็น 9 วินาที จะทำให้ความหนาของชิ้นงานที่ตำแหน่งที่ 7 เท่ากับ 0.13 มิลลิเมตร ตำแหน่งที่ 9 เท่ากับ 0.11 มิลลิเมตร และตำแหน่งที่ 13 เท่ากับ 0.14 มิลลิเมตร ความหนาทั้งหมดจะเป็นความหนาของชิ้นงานที่ได้มาตรฐาน คือ มากกว่า 0.1 มิลลิเมตร

3.5 การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง

ในส่วนของการทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง ผู้วิจัยจะทดสอบเพื่อยืนยันว่าเมื่อทำการขึ้นรูปโดยใช้ระดับที่เหมาะสมของปัจจัย ความหนาของชิ้นงานที่ตำแหน่งที่ 7 ตำแหน่งที่ 9 และตำแหน่งที่ 13 จะเป็นไปตามมาตรฐาน คือ มากกว่า 0.1 มิลลิเมตร หรือไม่ และจะต้องไม่ส่งผลกระทบต่อตำแหน่งอื่น ๆ ของชิ้นงาน

ผู้วิจัยทำการทดสอบการขึ้นรูปโดยปรับตั้งเครื่องตามสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรมจำนวน 10 ตัวอย่าง แล้วตรวจสอบความหนาของชิ้นงานทั้ง 13 ตำแหน่งอีกครั้ง

ผลการทดสอบความหนาของชิ้นงานหลังจากการขึ้นรูปแสดงได้ดังตารางที่ 5

จากตารางที่ 5 ผู้วิจัยจะนำความหนาของชิ้นงานทั้ง 13 ตำแหน่งมาทดสอบทางสถิติด้วยวิธี t-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เพื่อทดสอบว่าความหนาของชิ้นงานเมื่อทำการขึ้นรูปโดยใช้ระดับที่เหมาะสมของปัจจัย จะเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่ กล่าวคือ ตำแหน่งที่ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 11 และ 12 จะต้องมีความหนาไม่น้อยกว่าความหนาเดิม และตำแหน่งที่ 7, 9, และ 13 จะต้องมีความหนาไม่น้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร ผลจากการวิเคราะห์ พบว่า ค่า P-Value ของทั้ง 13 ตำแหน่ง มากกว่าค่านัย-สำคัญ (0.05) ดังนั้น การปรับตั้งค่าของเครื่องขึ้นรูปที่ได้โดยใช้ระดับที่เหมาะสมของปัจจัยจะเป็นการปรับตั้งค่าที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากความหนาของชิ้นงานที่ได้เป็นไปตามที่ต้องการ

ตารางที่ 5 แสดงความหนาของแต่ละจุดของชิ้นงาน

จุดวัด	จำนวนตัวอย่าง										ความหนาเฉลี่ย	ความหนาเฉลี่ย (เดิม)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	0.24	0.24	0.25	0.24	0.24	0.24	0.25	0.25	0.24	0.24	0.24	0.24
2	0.32	0.32	0.32	0.33	0.33	0.32	0.33	0.33	0.33	0.32	0.33	0.32
3	0.26	0.27	0.27	0.26	0.26	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.24
4	0.31	0.32	0.29	0.32	0.31	0.31	0.30	0.31	0.29	0.31	0.31	0.30
5	0.27	0.25	0.26	0.23	0.25	0.24	0.25	0.26	0.26	0.25	0.25	0.24
6	0.30	0.29	0.31	0.30	0.30	0.31	0.31	0.30	0.29	0.30	0.30	0.30
7	0.13	0.14	0.14	0.12	0.14	0.14	0.14	0.13	0.14	0.13	0.13	0.07
8	0.23	0.23	0.24	0.24	0.23	0.23	0.22	0.23	0.20	0.23	0.23	0.20
9	0.14	0.15	0.13	0.15	0.14	0.14	0.12	0.13	0.13	0.15	0.14	0.07
10	0.20	0.19	0.21	0.20	0.21	0.20	0.21	0.18	0.21	0.19	0.20	0.20
11	0.25	0.24	0.24	0.25	0.24	0.24	0.25	0.24	0.25	0.24	0.24	0.24
12	0.32	0.33	0.32	0.31	0.32	0.32	0.33	0.32	0.31	0.32	0.32	0.32
13	0.16	0.14	0.15	0.15	0.15	0.21	0.15	0.15	0.14	0.13	0.14	0.07

4. สรุป

4.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระดับปัจจัยที่จะกำหนดเป็นมาตรฐานสำหรับการใช้งานเครื่องจักรสำหรับผู้ปฏิบัติงานในการขึ้นรูปพลาสติกชนิดโพลิไวนิลคลอไรด์ ที่มีความหนา 0.4 มิลลิเมตร โดยมีปัจจัยที่ศึกษาทั้งหมด 5 ปัจจัย ประกอบด้วย อุณหภูมิในการให้ความร้อน ระยะเวลาการให้ความร้อน ระยะเวลาในการให้สุญญากาศ ระยะเวลาในการให้ลมเป่า และระยะเวลาในการให้ลมเย็น

ผู้วิจัยได้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^5 โดยทดลองซ้ำ 1 ครั้ง เนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องของวัสดุที่ใช้ทดสอบ ผลจากการทดลอง พบว่า อุณหภูมิในการให้ความร้อนที่ 190 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการให้ความร้อนที่ 34 วินาที ระยะเวลาในการให้สุญญากาศ 36 วินาที ระยะเวลาในการให้ลมเป่า 19 วินาที และระยะเวลาในการให้ลมเย็น 9 วินาที จะเป็นระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการปรับตั้งค่าเครื่องจักรที่เหมาะสมที่สุด ส่งผลให้ความหนาของชิ้นงานที่ตำแหน่งที่ 7 ตำแหน่งที่ 9 และตำแหน่งที่ 13 มีความหนาเพิ่มขึ้นเป็น 0.13, 0.11 และ 0.14 มิลลิเมตร สูงกว่ามาตรฐานที่กำหนด คือ ต้องมีความหนามากกว่า 0.1 มิลลิเมตร ซึ่งการปรับตั้งค่าเครื่องจักรที่สภาวะดังกล่าวจะไม่ทำให้ความหนาของชิ้นงานที่ตำแหน่งอื่น ๆ ลดลง อีกทั้งสภาวะดังกล่าวจะไม่พบชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมบูรณ์ ทำให้สามารถลดปัญหาเรื่องชิ้นงานมีรูปทรงไม่สมบูรณ์ และมีความหนาต่ำกว่า 0.1 มิลลิเมตร ได้

4.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาขั้นต้นในการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์พลาสติกด้วยความร้อนระบบสุญญากาศ ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ ที่ผู้วิจัยทำการศึกษานั้นเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ แต่อาจมีบางปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนาของชิ้นงานอีก จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนอื่น ๆ ดังนี้

1. การกำหนดแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปโดยการใช้หัวกดช่วย (Matched-mould forming)

2. วัสดุโลหะที่ใช้ทำแม่พิมพ์ เช่น อะลูมิเนียมเกรดสูงที่ผสมกับสังกะสี ทองเหลือง หรือเหล็ก เป็นต้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้ทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลสนับสนุนการแปลผลในการทำวิจัย สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ธีรเดช วุฒิพรพันธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนการทำวิจัยนี้เป็นอย่างดี

6. เอกสารอ้างอิง

ชวลิต แสงสวัสดิ์. 2551. **กระบวนการผลิตเทอร์โมพลาสติก เล่ม 2".** มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

บรรยงค์ รุ่งเรืองด้วยบุญ. 2547. **"The Developments and Utilization of a Numerical Model for Non-Homogeneous Sheet Heating time During Thermoforming Processes.** เอกสารการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18. ชลบุรี.

ตติยา กองกิจ, อำไพ เอกกันหา, และเจิมขวัญ สังข์สุวรรณ. 2547. **โครงการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ไอศกรีม.** เอกสารรวบรวมผลงานโครงการที่ได้รับทุน IRPUS ประจำปี 2547. กรุงเทพฯ: 152-153.

วันฉัตร สุวรรณพยัคฆ์ และทศพล ท่าพริก. 2551. **ความสัมพันธ์ระหว่างแม่พิมพ์เทอร์โมฟอร์มกับวัสดุโพลิเมอร์.** ปริญญานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

อุดมพร มะเกลี้ยง และคนอื่น ๆ. 2551. **ผลของการออกแบบหลอดพรีฟอร์มต่อคุณภาพการเป่ายืดภาชนะกลวง.** ปริญญานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

ประเสริฐ ชุมปัญญา. 2552. **การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปพลาสติกด้วยความร้อน: กรณีศึกษาในสาขาเทคโนโลยีผลิตเครื่องมือและแม่พิมพ์.** สารนิพนธ์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

Montgomery, D.C. **Design and Analysis of Experiments.** 5th edition, The United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 2001.

ปารเมศ ชุติมา, 2545. **การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรมศาสตร์.** แผนตำรา สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PHRA NAKHON