

การปรับปรุงพารามิเตอร์สำหรับกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งของพลาสติกโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เจษฎาสุภา สารคุณ

TNI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

บัณฑิตวิทยาลัย สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ปีการศึกษา 2560

IMPROVEMENT OF PARAMETERS FOR THERMOFORMING PROCESS OF
PLASTICS BY FINITE ELEMENT METHOD

Jessupa Sarakhun

TNI

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

Graduate School

Thai-Nichi Institute of Technology

Academic Year 2017

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การปรับปรุงพารามิเตอร์สำหรับกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง
ของพลาสติกโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

โดย

เจษฎา สุภา

สาขาวิชา

เทคโนโลยีวิศวกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ดร. เอกุ ธรรมกรบัญญัติ

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. พิชิต สุขเจริญพงษ์)

วัน.....เดือน.....พ.ศ.....

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ดร. สุธี โอฟารฤทธินันท์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดำรงเกียรติ รัตนอมรพิน)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิภาวดี วงษ์สุวรรณ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ดร. เอกุ ธรรมกรบัญญัติ)

เชษฐสุภา สารคุณ : การปรับปรุงพารามิเตอร์สำหรับกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งของ
พลาสติกโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. อาจารย์ที่ปรึกษา : ดร. เอกอุ ธรรมกรบัญญัติ, 49 หน้า.

ที่ผ่านมาทีมงานวิจัยเกี่ยวกับการขึ้นรูปภาชนะพลาสติกด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งอยู่พอสมควร งานวิจัยส่วนแรกจะแสดงวิธีการทำนายการกระจายความหนาของผนังบรรจุภัณฑ์พลาสติกเนื่องจากการกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในขณะทำงานวิจัยที่นิยมทำในภายหลังจะเป็นการกำหนดพารามิเตอร์ให้เหมาะสมเพื่อให้การกระจายความหนาเป็นไปอย่างสม่ำเสมอมากขึ้น สามารถควบคุมความหนาน้อยสุดของบรรจุภัณฑ์ได้ พารามิเตอร์ส่วนใหญ่ที่นิยมศึกษากันคือ อุณหภูมิของแผ่นพลาสติก ผลของการใช้ปลั๊กช่วยกด ความเร็วของปลั๊ก และขนาดของความดัน เป็นต้น โดยมักกำหนดความหนาของบรรจุภัณฑ์เอาไว้โดยไม่เคยมีการวิเคราะห์ที่มาของความหนาที่กำหนดให้ใช้งาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะแบ่งการพิจารณาออกเป็นสองส่วนคือ ในส่วนของกระบวนการผลิตจะพิจารณาผลของความเร็วยกช่วยกดร่วมกับระยะทางในการกดของปลั๊กต่อการกระจายความหนาของถ้วยพลาสติก และอีกส่วนจะวิเคราะห์ผลของความหนาของถ้วยต่อความแข็งแรงและการเสียรูปเมื่อรับภาระขนาดต่าง ๆ โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อเป็นแนวทางให้กับบริษัทผู้ผลิตในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ต่อไป

จากผลการคำนวณในส่วนแรกพบว่า ความเร็วของปลั๊ก และระยะทางในการกดของปลั๊กมีผลต่อการขึ้นรูปถ้วยพลาสติกทั้งคู่ ขนาดความเร็วและระยะกดที่เหมาะสมของปลั๊กต้องพิจารณาเป็นกรณี ๆ ไป แต่สามารถระบุเจาะจงได้ว่า ไม่ควรกำหนดให้ความเร็วและระยะกดของปลั๊กมีค่าสูงทั้งคู่ เพราะจะทำให้การกระจายความหนาของผนังไม่ดี และอาจทำให้ก้นถ้วย หรือผนังด้านข้างของถ้วยบางเป็นบริเวณกว้าง

จากผลการคำนวณในส่วนที่สองพบว่า ความหนาของถ้วยที่เพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งแรงและความแข็งแรงของถ้วยมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มความหนาของถ้วยที่ค่าน้อย ๆ เช่น จาก 0.2 มม. ไปเป็น 0.25 มม. ความแข็งแรงจะมีค่าเพิ่มขึ้นสูง แต่การเพิ่มความหนาของถ้วยจาก 0.25 มม. ไปเป็น 0.3 มม. หรือจาก 0.3 มม. ไปเป็น 0.35 มม. การเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงที่ได้กลับน้อยลงหรือกล่าวได้ว่า การใช้ถ้วยที่ความหนาลดลงเพียงเล็กน้อย ความแข็งแรงกลับลดลงไม่มาก รวมทั้งความแข็งแรงยังเพียงพอต่อการใช้งาน ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดวัสดุและพลังงานในการผลิตลงได้มาก

บัณฑิตวิทยาลัย
สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรม
ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

JESSUPA SARAKHUN : IMPROVEMENT OF PARAMETERS FOR
THERMOFORMING PROCESS OF PLASTICS BY FINITE ELEMENT METHOD.
ADVISOR : DR. EK-U THAMMAKORNBUNJUT, 49 PP.

In the past, many research about forming of plastic sheets, especially with thermoforming process, have been carried out to predict wall thickness of containers and effects of forming parameters to the thickness distribution. The minimum wall thickness can be controlled. The interested parameters, for example, are plastic sheet temperature, effect of using an assisted plug, plug velocity and vacuum pressure. In addition, the required wall thicknesses are specified without reasonable source. To help improve this, this research consists of two parts. The first one is process improvement which considers the combined effect of plug velocity and its stroke to the distribution of wall thickness of a plastic cup. And the second part will concern about the effect of wall thickness of a cup to its strength and stiffness. Both parts are analyzed by finite element program in order to demonstrate a way to improve manufacturing process to plastic companies.

From numerical results, both plug velocity and stroke have effects to plastic cup forming. Optimum values should be considered on a case by case basis. We can only conclude that in the thermoforming process one must neglect to use high value of these parameters at the same time. The Thinnest wall thickness may be found at the bottom and side of a cup.

In the second part, the results show that the strength and stiffness of a cup increase as the wall thickness increase. However the rate of stiffness increase will be reduced as the thickness of a cup increase.

Graduate School

Student's Signature.....

Field of Engineering of Technology Advisor's Signature

Academic Year 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้กระทำให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี อันเนื่องมาจากความกรุณาของ ดร. เอกอุ ธรรมกรบัญญัติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลามาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษา แนวทางและการพัฒนาในการทำวิจัย ตลอดจนสอนขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยตลอดการทำ วิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณ ดร. สุธี โอฟารฤทธินันท์ (MTEC) ที่คอยให้ความช่วยเหลือในส่วนของการ ใช้งานโปรแกรม ANSYS และกรุณาเสียสละเวลาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดำรงเกียรติ รัตนอมรพิน และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิภาวดี วงษ์สุวรรณ (สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น) ที่กรุณาเสียสละเวลาเป็นคณะกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ดร. สมบัติ ทำนา ที่คอยให้ความช่วยเหลือในส่วนของการใช้งานโปรแกรม ANSYS

และท้ายที่สุดขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่ให้โอกาสในการศึกษาและ ขอบคุณอาจารย์ เพื่อนๆ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

เจษฎ์สุภา สารคุณ

TNI

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญรูป	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.5 แผนการดำเนินงาน	4
2 หลักการพื้นฐาน เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 กระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง	6
2.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	21
2.3 การออกแบบการทดลอง	22
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	26
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	26
3.2 การกำหนดปัจจัยที่มีอิทธิพล	29
3.3 วิธีการออกแบบการทดลอง	30

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
4	ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล	32
	4.1 ผลของความเร็วและระยะกวดของปลั๊กต่อการกระจายความหนาของถั่ว 32	
	4.2 ความหนาของถั่วต่อความแข็งแรงและการเสียรูปเมื่อรับภาระกวด..... 37	
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	43
	5.1 สรุปผลการทดลอง	43
	5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	43
	บรรณานุกรม	45
	ประวัติย่อผู้วิจัย	49

TNI

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แนวโน้มการใช้วัสดุเพื่อผลิตบรรจุภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วง 3 ทศวรรษที่ผ่านมา	2
1.2 แผนการดำเนินงาน.....	5



สารบัญรูป

รูป	หน้า
1.1 ประเภทของบรรจุภัณฑ์ จำแนกตามวัสดุหลักที่นำมาใช้ผลิต.....	1
1.2 ภาพตัวอย่างเครื่อง Magnetic Thickness Gauge.....	5
2.1 ขั้นตอนการทำงานโดยรวมของกระบวนการขึ้นรูปแผ่นพลาสติกแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง..	6
2.2 ตารางแสดงแนวโน้มผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งจากทั่วโลก ตั้งแต่ปี ค.ศ.2015-2021.....	8
2.3 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นพลาสติกแบบเป็นม้วนสอดเข้าสู่เครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่ง	9
2.4 ตัวยึดแผ่นพลาสติก (Sheet Clamping หรือ Clamp) เพื่อยึดแผ่นพลาสติกให้ตึง.....	9
2.5 ลักษณะการให้ความร้อนแผ่นพลาสติกในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง	10
2.6 การทำงานของตัวช่วยยึดแผ่นพลาสติกในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง.....	11
2.7 ลักษณะการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ตัวผู้ และแม่พิมพ์ตัวเมีย	11
2.8 ตัวอย่างชุดแม่พิมพ์ตัวเมีย (Cavity Mold หรือ Negative mold) และ Plug Assist...	12
2.9 ขั้นตอนการตัดชิ้นงานให้ขาดออกจากแผ่นพลาสติก (Trimming).....	13
2.10 การขึ้นรูปแบบ Vacuum Forming	13
2.11 แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปแบบใช้แรงลมช่วย.....	14
2.12 แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปแบบ Coining	14
2.13 แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปแบบ Three-Step Forming	15
2.14 ขั้นตอนการขึ้นรูปแบบ Twin-Sheet Forming แบบใช้แรงลมช่วยยึดแผ่นพลาสติก.....	15
2.15 ขั้นตอนการขึ้นรูปแบบ Twin-Sheet Forming แบบแม่พิมพ์ประกบ.....	16
2.16 ลักษณะการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง เพื่อเปรียบเทียบความหนาบาง ของแผ่นพลาสติกที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ตัวเมีย และแม่พิมพ์ตัวผู้.....	18
2.17 ภาพการทดลองการขึ้นรูปเทอร์โมฟอร์มมิ่งเพื่อเปรียบเทียบการขยายตัวของแผ่น พลาสติกระหว่างแม่พิมพ์ตัวเมีย และแม่พิมพ์ตัวผู้.....	19
2.18 ภาพชิ้นงานเพื่อเปรียบเทียบการขยายตัวของแผ่นพลาสติกที่ขึ้นรูปจากแม่พิมพ์ตัวเมีย และแม่พิมพ์ตัวผู้.....	20

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
2.19 ตัวอย่างถ้วยพลาสติกที่ก้นถ้วยบาง และถ้วยพลาสติกที่ก้นถ้วยบางแบบไม่สม่ำเสมอที่ ขึ้นรูปด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง.....	21
2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการหรือระบบที่สนใจ.....	23
3.1 ตัวอย่างบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่ใช้ในการทดลอง.....	26
3.2 ภาพตัวอย่างของถ้วยพลาสติกสมบูรณ์ ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ถ่าย จากกล้องถ่ายภาพที่อาศัยแสงผ่านจากก้นถ้วย.....	27
3.3 ภาพตัวอย่างของถ้วยพลาสติกที่ไม่สมบูรณ์ (ก้นถ้วยบาง) ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ เทอร์โมฟอร์มมิ่ง ถ่ายจากกล้องถ่ายภาพที่อาศัยแสงผ่านจากก้นถ้วย.....	27
3.4 ภาพตัวอย่างของถ้วยพลาสติกที่เกิดการยุบตัวที่ก้นถ้วย หลังจากบรรจุอาหาร และ นำเข้าเครื่องอบฆ่าเชื้อด้วยความดัน (Sterilizing Retort Machine).....	28
3.5 ขนาดของถ้วยตัวอย่าง.....	30
3.6 ภาระที่กระทำและเงื่อนไขขอบเขต.....	30
3.7 เส้นทางที่จะวัดระยะโค้งในแนวตั้ง.....	31
4.1 การกระจายความหนาของถ้วยที่ความเร็วปลีกลีต่าง ๆ กันเมื่อระยะกตของปลีกลีเป็น 11 มม.....	32
4.2 การกระจายความหนาของถ้วยที่ความเร็วปลีกลีต่าง ๆ กันเมื่อระยะกตของปลีกลีเป็น 15 มม.....	33
4.3 การกระจายความหนาของถ้วยที่ความเร็วปลีกลีต่าง ๆ กันเมื่อระยะกตของปลีกลีเป็น 20 มม.....	33
4.4 การกระจายความหนาของถ้วยที่ความเร็วปลีกลีต่าง ๆ กันเมื่อระยะกตของปลีกลีเป็น 30 มม.....	34
4.5 การกระจายความหนาของถ้วยที่ความเร็วปลีกลีต่าง ๆ กันเมื่อระยะกตของปลีกลีเป็น 40 มม.....	34
4.6 การกระจายความหนาของถ้วยที่ระยะกตของปลีกลีต่าง ๆ กันเมื่อความเร็วของปลีกลี เป็น 0.25 เมตรต่อวินาที.....	35
4.7 การกระจายความหนาของถ้วยที่ระยะกตของปลีกลีต่าง ๆ กันเมื่อความเร็วของปลีกลี เป็น 0.5 เมตรต่อวินาที.....	35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.8 การกระจายความหนาของถ้วยที่ระยะกตของปลั๊กต่าง ๆ กันเมื่อความเร็วของปลั๊ก เป็น 0.75 เมตรต่อวินาที.....	36
4.9 การกระจายความหนาของถ้วยที่ระยะกตของปลั๊กต่าง ๆ กันเมื่อความเร็วของปลั๊ก เป็น 1 เมตรต่อวินาที.....	36
4.10 การกระจายความหนาของถ้วยที่ระยะกตของปลั๊กต่าง ๆ กันเมื่อความเร็วของปลั๊ก เป็น 1.25 เมตรต่อวินาที.....	37
4.11 การกระจายความหนาของถ้วยที่ระยะกตของปลั๊กต่าง ๆ กันเมื่อความเร็วของปลั๊ก เป็น 1.5 เมตรต่อวินาที.....	37
4.12 ความเค้นวอนมิเสสของถ้วยหนา 0.25 มม.....	38
4.13 ระยะโค้งของถ้วยหนา 0.2 มม.....	39
4.14 ระยะโค้งของถ้วยหนา 0.25 มม.....	39
4.15 ระยะโค้งของถ้วยหนา 0.3 มม.....	40
4.16 ระยะโค้งของถ้วยหนา 0.35 มม.....	40
4.17 ระยะโค้งของถ้วยขนาดต่าง ๆ ที่รับแรงขนาด 3 N.....	41
4.18 ระยะโค้งของถ้วยขนาดต่าง ๆ ที่รับแรงขนาด 9 N.....	42

TNI

TAHITI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอดีตอุตสาหกรรมอาหารส่วนใหญ่มักนิยมการบรรจุอาหารด้วยกระป๋องและขวดแก้ว เนื่องจากสามารถเก็บถนอมอาหารภายในบรรจุภัณฑ์ไว้ได้เป็นเวลานาน แต่ในปัจจุบันบรรจุภัณฑ์พลาสติกถูกนำมาใช้มากขึ้นดังแสดงในตารางที่ 1.1 เนื่องจากการผลิตบรรจุภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ จากพลาสติกมีกระบวนการที่ไม่ซับซ้อนเมื่อเทียบกับการผลิตกระป๋องและแก้ว และพลาสติกยังเป็นวัสดุที่หาง่ายและราคาถูกกว่าโลหะและแก้ว อีกทั้งมีจุดหลอมตัวที่ต่ำกว่าจึงทำให้สามารถลดพลังงานจากกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นการช่วยลดต้นทุนการผลิตได้อีกด้วย

บรรจุภัณฑ์พลาสติกมีปริมาณการผลิตเพิ่มขึ้น และมีการนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ อย่างหลากหลายเนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น ขึ้นรูปง่าย น้ำหนักเบา มีลักษณะใสสามารถมองเห็นผลิตภัณฑ์ภายในได้ กระบวนการผลิตใช้ต้นทุนต่ำ และการผลิตเป็นจำนวนมากสามารถทำได้ง่าย เป็นต้น อีกทั้งในปัจจุบันกระบวนการผลิตพลาสติกมีการพัฒนาให้สามารถป้องกันความชื้นและอากาศซึมผ่านได้ดีขึ้น ทำให้สามารถถนอมอาหารไว้ภายในบรรจุภัณฑ์ได้เป็นเวลานานขึ้นเทียบเท่ากับบรรจุภัณฑ์ประเภทกระป๋อง นอกจากนี้บรรจุภัณฑ์พลาสติกบางประเภทยังสามารถใช้เป็นภาชนะสำหรับอุ่นอาหารด้วยไมโครเวฟได้ (Microwaveable packaging)

ตารางที่ 1.1 แนวโน้มการใช้วัสดุเพื่อผลิตบรรจุภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วง 3 ทศวรรษที่ผ่านมา [1]

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์	วัสดุดั้งเดิมที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์	วัสดุใหม่ที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์
นม	แก้ว โลหะ	ฟิล์มสำหรับผลิตถุง (Pouch)
เครื่องดื่ม	แก้ว	PET
ยาและเภสัชภัณฑ์	แก้ว กระดาษ	PVC, HDPE, PP, แก้ว
หลอดยาสีฟัน	โลหะ	HDPE, LLDPE, PP
สบู่	กระดาษ	Polyester Film, PVC
ถุงปุ๋ย	ปอกระเจา	ถุงสาน (PP woven)
ถุงซัฟฟิง	กระดาษ	LDPE, HDPE

กระบวนการขึ้นรูปพลาสติกมีหลายกระบวนการขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของลักษณะชิ้นงาน เช่น การรีด เป็นกระบวนการผลิตแผ่นฟิล์มหรือพลาสติกแผ่น การหลอมอัดรีด ใช้ผลิต

ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ได้ออกมายาวต่อเนื่องกันจากวัตถุดิบที่เป็นผงหรือเม็ด การเป่า ใช้ในการผลิตถุงพลาสติก การเป่าภาชนะกลวง (Blow Molding) ใช้ในการผลิตภาชนะกลวง เช่น ขวด ถัง แกลลอน การฉีด (Injection Molding) เป็นกรรมวิธีการผลิตโดยใช้การฉีดพลาสติกเหลวเข้าไปในแม่พิมพ์เพื่อให้ได้พลาสติกที่มีรูปทรงตามต้องการ และเทอร์โมฟอร์มมิ่ง (Thermoforming) เป็นการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกที่มีขนาดใหญ่ หรือขนาดเล็กแต่ต้องการผลิตจำนวนมาก ซึ่งสามารถเพิ่มปริมาณการผลิตขึ้นได้ในเวลาที่สั้นลง

กระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งปัจจุบันมีปริมาณการผลิตเพิ่มขึ้น เนื่องจากรูปแบบการดำเนินชีวิตที่เปลี่ยนแปลงไปของสังคม เป็นแบบวิถีคนเมืองที่ใช้ชีวิตอย่างเร่งรีบและมีวิถีการบริโภคแบบรับประทานคนเดียว ทำให้ผู้คนต้องการความสะดวกสบายมากขึ้น ดังนั้นบรรจุภัณฑ์ที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และเปิดใช้ง่าย แบบใช้ครั้งเดียว (Single-serve Packaging) บรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารพร้อมรับประทาน (Ready-to-eat Packs) หรืออาหารที่ใส่มาในถาดพลาสติกที่พร้อมอุ่นด้วยไมโครเวฟ รวมถึงกล่องใส่อาหารที่มีการนำมาใช้แทนกล่องโฟม จึงถูกนำมาใช้มากขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค ซึ่งบรรจุภัณฑ์ดังกล่าวเหล่านี้ถูกผลิตขึ้นจากกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งเป็นส่วนใหญ่

ถึงแม้ว่าการผลิตบรรจุภัณฑ์จากกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ดังกล่าวจะมีปริมาณมากขึ้น แต่ปริมาณการผลิตก็ยังน้อยกว่าการผลิตแบบฉีด (Injection) มาก เนื่องจากการผลิตแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ยังมีข้อจำกัดและข้อเสียอยู่หลายประการ โดยเฉพาะชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง มักประสบปัญหาของการกระจายตัวของเนื้อพลาสติกที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้ความหนาของชิ้นงานไม่ได้ขนาดที่เหมาะสมตามต้องการ

การฉีดพลาสติก (Injection Molding) เป็นกระบวนการการผลิตชิ้นงานโดยการเติมเม็ดพลาสติกเข้าไปในเครื่องฉีด โดยให้เม็ดพลาสติกผ่านความร้อนจนหลอมละลายเป็นของเหลว จากนั้นเครื่องจะทำการฉีดพลาสติกเหลวเข้าแม่พิมพ์ ทำให้ชิ้นงานเย็นและแข็ง หลังจากชิ้นงานปลดออกจากแม่พิมพ์ก็จะได้ชิ้นงานตามแบบแม่พิมพ์ ในกระบวนการของการฉีดนั้นสามารถปรับตั้งค่าในการฉีด เช่น อุณหภูมิกระบอกฉีด แรงดัน ความเร็วในการฉีดพลาสติกเหลว เวลาและระยะในการดันย้ำ เป็นต้น ซึ่งค่าต่าง ๆ ในการปรับตั้งนั้น เป็นการปรับเพื่อควบคุมพลาสติกเหลวเพื่อให้ชิ้นงานมีความสมบูรณ์ถูกต้องตามที่ต้องการแบบไว้ รวมถึงความแข็งแรง และความหนาแน่นของชิ้นงาน

ในขณะเดียวกัน การผลิตด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งเป็นการขึ้นรูปชิ้นงานโดยเริ่มจากให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกเพื่อให้พลาสติกอ่อนตัวและสามารถยืดตัวได้ แล้วดูดอากาศภายในแม่พิมพ์ (Mold) ออก ซึ่งจะทำให้แผ่นพลาสติกถูกดูดให้ยึดติดกับแม่พิมพ์ จนมีลักษณะของรูปร่างตามที่ได้ออกแบบแม่พิมพ์ไว้ โดยทั่วไปกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งมีความซับซ้อนในการควบคุม

ความสมบูรณ์ของชิ้นงานมากกว่าการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดอยู่มาก เนื่องจากต้องควบคุมการยึดตัวของแผ่นพลาสติกให้สม่ำเสมอ ไม่ทำให้การกระจายความหนาไม่ดีหรือสัดส่วนของชิ้นงานเสียรูปไป

นอกจากนั้นกระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ยังต้องอาศัยแม่พิมพ์เป็นตัวช่วยในการกำหนดรูปร่างของชิ้นงานที่ต้องการ ซึ่งแม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งนี้ แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ แม่พิมพ์ตัวผู้ (Plug mold) และแม่พิมพ์ตัวเมีย (Cavity mold) ซึ่งมีความเหมาะสมในการใช้งานต่างกัน โดยส่วนใหญ่พิจารณาจากสัดส่วนของชิ้นงานที่ต้องการเป็นหลัก ปัญหาที่พบจากการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ตัวผู้คือ บริเวณขอบถ้วยด้านบนมักมีความหนาน้อยกว่าบริเวณอื่น ๆ ส่วนปัญหาที่พบจากการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ตัวเมียคือ บริเวณก้นถ้วยมักมีความหนาที่น้อยกว่าบริเวณอื่น ๆ แต่เมื่อเปรียบเทียบความหนาของชิ้นงานทั้ง 2 ที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ทั้ง 2 แบบ พบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ชนิดตัวเมียมีความหนาในอัตราส่วนที่มากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ตัวผู้ ปัญหาการกระจายตัวของเนื้อพลาสติกและความบางของชิ้นงานดังกล่าว ทำให้บรรจุภัณฑ์พลาสติกที่ขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง มักมีความหนาที่ไม่สม่ำเสมอ และมีความหนาน้อยกว่ามาตรฐานที่ต้องการ โดยเฉพาะบรรจุภัณฑ์ที่ขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ตัวเมียที่มีอัตราส่วนของการยึดตัวบริเวณก้นถ้วยมากกว่า ทำให้เกิดของเสียจากการผลิตเป็นจำนวนมาก เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้แม่พิมพ์ตัวเมียและแม่พิมพ์ตัวผู้ในการผลิตแบบกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง การใช้แม่พิมพ์ตัวเมียมีข้อได้เปรียบมากกว่าการใช้แม่พิมพ์ตัวผู้ เนื่องจากมีองศาการขึ้นรูปต่ำ สามารถทำงานต่อเนื่องได้ง่าย เกิดรอยพับรอยย่น (Wrinkle) น้อยกว่า และการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์หลังจากขึ้นรูปแล้วทำได้ง่ายกว่าการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ตัวผู้ ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการปรับตั้งเครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ที่ใช้แม่พิมพ์ตัวเมียในการขึ้นรูป เพื่อลดปัญหาการยึดตัวของพลาสติกที่ไม่สม่ำเสมอที่เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลทำให้เกิดปัญหาความบางของชิ้นงาน และทำให้เกิดปัญหาอื่น ๆ ตามมา

ปัจจุบันอุตสาหกรรมผลิตเทอร์โมพลาสติกขึ้นอยู่กัวิธีทดลองและแก้ไขข้อผิดพลาดกลับไปกลับมาในกระบวนการผลิต ทำให้การออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ ทำได้ยากเนื่องจากขั้นตอนในกระบวนการผลิตเหล่านี้จะส่งผลให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายค่อนข้างมาก ทางออกหนึ่งที่มีประโยชน์มากคือการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในงานวิศวกรรม เช่น LS Dyna MSC Marc และ Ansys Polyflow เป็นต้น ซึ่งโปรแกรมเหล่านี้ช่วยให้สามารถระบุพฤติกรรมของวัสดุพลาสติกได้เนื่องจากการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ในกระบวนการผลิต ทำให้สามารถกำหนดค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการขึ้นรูปได้ ช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่าย และหากต้องการปรับปรุงรูปร่างของผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้น หรือเปลี่ยนชนิดของผลิตภัณฑ์ การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำให้สามารถจำลองการขึ้นรูปเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้ก่อนการขึ้นรูปจริง ช่วยลดเวลาในการลองผิดลองถูกและลดปริมาณการใช้วัตถุดิบในการขึ้นรูปจริงลงได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการขึ้นรูปถ้วยของแผ่นพลาสติกด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

1.3 ขอบเขตการศึกษาและวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เพื่อลดปัญหากันถ้วยบางของบรรจุภัณฑ์พลาสติก โดยขึ้นงานทดลองมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 95 มม. สูง 38 มม. ความหนาตั้งต้นของแผ่นพลาสติก 1.4 มม. ขึ้นรูปด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งแบบแรงดันลม ใช้ปลั๊กช่วยกด (Assisted Plug) เป็นตัวช่วยในการยืดแผ่นพลาสติก ใช้แม่พิมพ์ตัวเมียในการขึ้นรูป และอาศัยการดูดอากาศออกจากแม่พิมพ์ตัวเมีย เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีความหนาที่กันถ้วยสมบูรณ์ที่สุด โดยไม่ส่งผลกระทบต่อขนาดและรูปร่างอื่นๆ ของชิ้นงาน

งานวิจัยนี้มีการดำเนินการวิจัยโดยการออกแบบการทดลอง (DOE : Design of Experiment) กำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 และใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ เพื่อช่วยกำหนดปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปของชิ้นงาน และช่วยลดปัจจัยที่ไม่เกี่ยวข้องในการทำการทดลอง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถหาค่าพารามิเตอร์ในการขึ้นรูปแผ่นพลาสติกด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งที่ดีขึ้นกว่าเดิมได้
2. สามารถเพิ่มผลผลิต และลดจำนวนของเสีย อันนำไปสู่การลดต้นทุนการผลิตได้
3. ช่วยลดเวลาในกระบวนการผลิตได้
4. ได้ระเบียบวิธีในการออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่าวิธีการออกแบบการทดลอง

1.5 แผนการดำเนินงาน

บทที่ 2

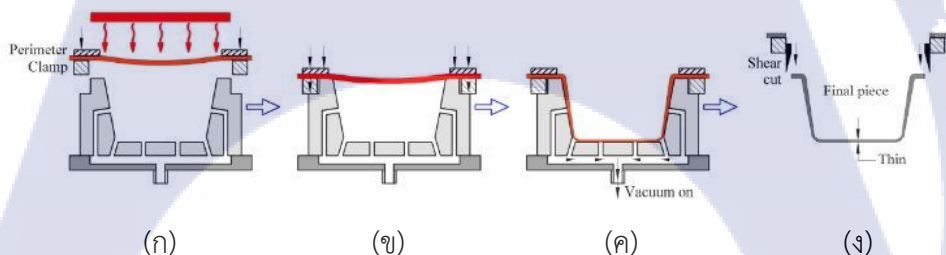
หลักการพื้นฐาน เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยเรื่อง “การปรับปรุงพารามิเตอร์สำหรับกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งของพลาสติกโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์” ผู้วิจัยได้ศึกษาแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 กระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

2.1.1 หลักการพื้นฐาน

เทอร์โมฟอร์มมิ่งถือเป็นคำเรียกโดยรวมของการขึ้นรูปแผ่นพลาสติกโดยใช้ความร้อนโดยอาศัยแม่พิมพ์เป็นตัวกำหนดรูปร่าง วิธีการขึ้นรูปนั้นเป็นการขึ้นรูปจากแผ่นพลาสติกที่โดนให้ความร้อนโดยวิธีการต่างๆ จนทำให้แผ่นพลาสติกนั้นอยู่ในสถานะอ่อนตัวและสามารถยืดหยุ่นจนทำให้พลาสติกนั้นเกิดเป็นรูปร่างตามแม่พิมพ์ที่กำหนดโดยอาศัยแรงกลหรือแรงลม ซึ่งเมื่อแผ่นพลาสติกอ่อนสัมผัสผิวแม่พิมพ์ที่ถูกหล่อเลี้ยงด้วยความเย็น ทำให้แผ่นพลาสติกแข็งตัวและคงตัวตามรูปร่างของแม่พิมพ์ตามต้องการ



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการทำงานโดยรวมของกระบวนการขึ้นรูปแผ่นพลาสติกแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง (ก)

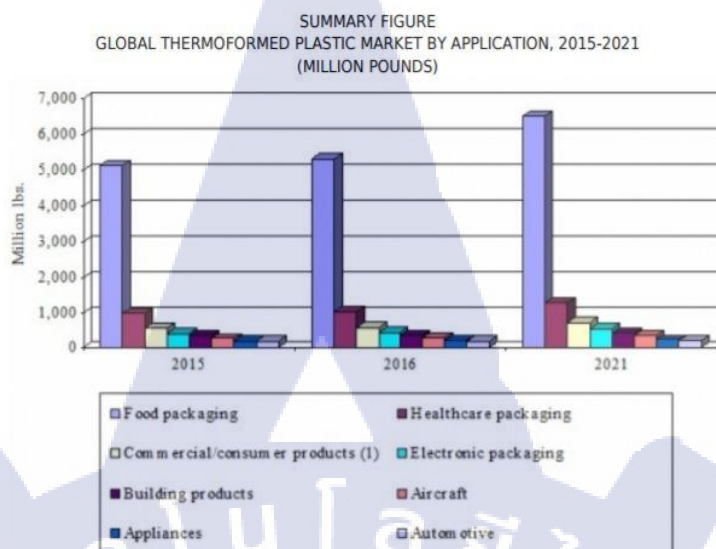
กระบวนการให้ความร้อนแผ่นพลาสติก (ข) การช่วยยืดแผ่นพลาสติก (Pre-stretching) (ค)

ขั้นตอนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ (ง) การตัดชิ้นงานออกจากแผ่นพลาสติก (Edge Trimming) [2]

เทอร์โมฟอร์มมิ่งเป็นกรรมวิธีขึ้นรูปที่มีมายาวนานมากวิธีหนึ่งสำหรับการขึ้นรูปพลาสติก วิธีการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่งจึงถูกคิดค้นและมีวิวัฒนาการมาหลายยุคสมัย และหลากหลายตามประเภทของพลาสติกที่ถูกพัฒนาขึ้น และตามวัตถุประสงค์การใช้งาน เพื่อให้ได้ชิ้นงานตามรูปแบบและวัตถุประสงค์ตามที่ต้องการ การขึ้นรูปเทอร์โมฟอร์มมิ่งนั้นได้รับความนิยมเป็นอย่างสูงตั้งแต่ช่วงต้นศตวรรษที่ 20 เป็นต้นมา เนื่องจากมีการพัฒนาการใช้งานพลาสติกประเภท PVC, PS, CA และ

PMMA และมีการใช้งานอย่างต่อเนื่องเรื่อยมาจนถึงช่วงหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 จนกระทั่งถึงยุคที่อุตสาหกรรมกำลังเติบโตอย่างมากในช่วงทศวรรษ 1960 ซึ่งเป็นยุคที่เทอร์โมฟอร์มมิ่งได้รับความนิยมอย่างสูงในวงการอุตสาหกรรมการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์อาหารและบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุยา (blister) ทำให้ช่วงหลังทศวรรษที่ 1970 เป็นต้นมา มีการพัฒนาเครื่องจักรและกรรมวิธีการผลิตหลากหลายมากขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการด้านปริมาณของสินค้าที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก และในขณะเดียวกันก็สามารถลดต้นทุนการผลิตและลดของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตด้วย ช่วงหลังทศวรรษที่ 1980 นอกจากการเพิ่มปริมาณในการผลิตแล้ว การผลิตแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่งยังมุ่งให้ความสำคัญกับการพัฒนาโดยนำเทคโนโลยีใหม่ๆ เข้ามาช่วยเพื่อควบคุมคุณภาพของชิ้นงานให้ดีขึ้นและลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น [3]

จากพัฒนาการดังกล่าวทำให้กระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งเป็นกรรมวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน โดยเฉพาะการขึ้นรูปพลาสติกสำหรับการผลิตแบบอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นกรรมวิธีการผลิตที่ผลิตได้ครั้งละจำนวนมาก (ขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงาน ลักษณะของแม่พิมพ์ที่ใช้ คุณลักษณะของพลาสติกที่ใช้ และ cycle time ของเครื่องจักรแต่ละประเภท) และนอกจากบรรจุภัณฑ์อาหารและบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุยา (blister) ที่เคยเป็นที่นิยมในการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ปัจจุบันขอบเขตของผลิตภัณฑ์มีการพัฒนาไปหลากหลาย เช่น บรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารสด ผลไม้สด แผลงไข่ กล่อง/ถาดสำหรับใส่อาหาร บรรจุภัณฑ์สำหรับใช้กับไมโครเวฟ ถ้วยใส่เครื่องดื่มร้อน แก้วใส่เครื่องดื่มเย็น กล่องสำหรับใส่อุปกรณ์ของใช้ต่างๆ บรรจุภัณฑ์สำหรับใส่อุปกรณ์ทางการแพทย์ ยิ่งไปกว่านั้นส่วนประกอบต่างๆ สำหรับเครื่องมือ เครื่องใช้ เครื่องไฟฟ้า ส่วนประกอบยานยนต์และเครื่องบิน ที่ทำมาจากพลาสติก ล้วนแล้วแต่เป็นชิ้นส่วนที่ผ่านกรรมวิธีการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่งทั้งสิ้น เช่น ตู้เย็น เครื่องล้างจาน เครื่องซักผ้า โทรทัศน์ คอมพิวเตอร์ เครื่องมือแพทย์ เรือพลาสติก โครงเบาะรถยนต์ ด้ามจับประตู โครงผนังภายในเครื่องบิน ถาดสำหรับวางอาหารบนเครื่องบิน เป็นต้น อีกทั้งบรรจุภัณฑ์และผลิตภัณฑ์ที่เดิมเคยใช้ไม้ แก้ว และโฟม เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต ปัจจุบันผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งดังกล่าว มีบทบาทอย่างมากและกำลังจะมาแทนที่การใช้ไม้ แก้ว โฟม และวัสดุอื่นๆ เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ

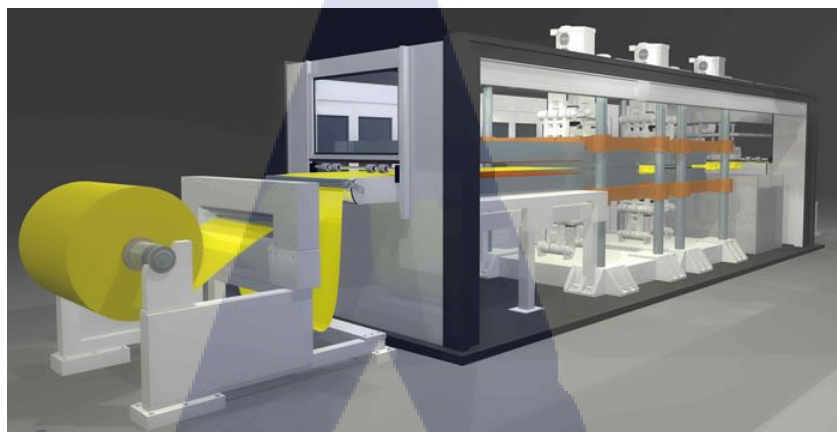


รูปที่ 2.2 ตารางแสดงแนวโน้มผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งจากทั่วโลก ตั้งแต่ปี ค.ศ.2015-2021 [4]

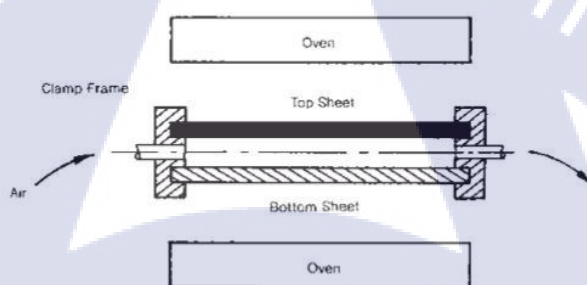
2.1.2 รูปแบบของการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

แม้ว่าการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่งจะมีวิวัฒนาการมายาวนาน จนมีหลากหลายรูปแบบ และหลากหลายเทคนิคตามวัตถุประสงค์และตามลักษณะรูปร่างของชิ้นงานที่ขึ้นรูป เช่น ขึ้นรูปแบบ ขั้นตอนเดียว ขึ้นรูปแบบหลายขั้นตอน ขึ้นรูปด้วยระบบสุญญากาศ ขึ้นรูปโดยใช้ตัวกดช่วย (Plug Assist) ขึ้นรูปโดยใช้แผ่นพลาสติก 2 แผ่น ฯลฯ แต่โดยทั่วไปแล้วการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่งมีหลักการที่สำคัญ ได้แก่

(1) ขั้นตอนการเตรียมแผ่นพลาสติก (ม้วนพลาสติก) ที่ผ่านกระบวนการรีด (Extrusion) มาแล้ว แผ่นพลาสติกที่ผ่านกระบวนการรีด (Extrusion) จะอยู่ในรูปแบบม้วนพลาสติก ซึ่งแผ่นพลาสติกแบบเป็นม้วนจะถูกนำมาร้อยหรือสอดเข้าสู่เครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่ง เพื่อเตรียมเข้าสู่ขั้นตอนการให้ความร้อน แผ่นพลาสติกดังกล่าวจะถูกจับยึดไว้ให้อยู่คงที่และถูกซิงให้ตึงโดยตัวยึด (Sheet Clamping หรือ Clamp) ซึ่งทำหน้าที่จับขอบของแผ่นพลาสติกไว้ โดยทั่วไป clamp จะยึดแผ่นพลาสติกไว้ 2 ด้าน เพื่อซิงแผ่นพลาสติกให้ตึง สำหรับเตรียมพร้อมในขั้นตอนการให้ความร้อน และขั้นตอนการขึ้นรูปต่อไป

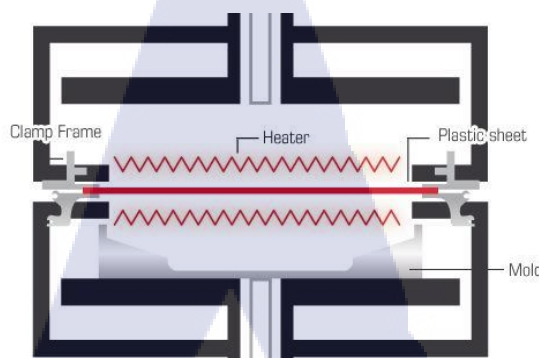


รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นพลาสติกแบบเป็นม้วนสอดเข้าสู่เครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่ง [5]



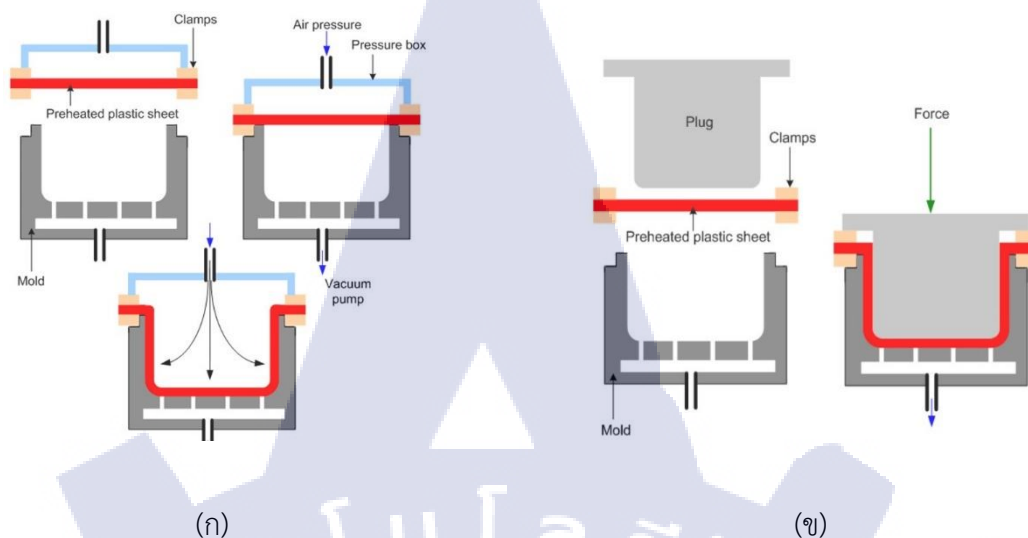
รูปที่ 2.4 ตัวยึดแผ่นพลาสติก (Sheet Clamping หรือ Clamp) เพื่อชิงแผ่นพลาสติกให้ตึง [6]

(2) การให้ความร้อนแผ่นพลาสติก เป็นการเตรียมความพร้อมเพื่อให้พลาสติกอ่อนตัวและยืดหยุ่นได้จนสามารถเปลี่ยนรูปร่างไปได้ตามลักษณะแม่พิมพ์ ซึ่งความร้อนที่ให้นั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การให้ความร้อนโดยใช้ไฟฟ้า ใช้ตู้อบ Hot air gun ใช้แผ่นเซรามิก แผ่นเหล็ก ขดลวด ใช้น้ำ Hot-Oil เป็นต้น [6] อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ขึ้นอยู่กับความหนาและชนิดของพลาสติกที่นำมาใช้ขึ้นรูป โดยทั่วไปแล้วขั้นตอนการให้ความร้อนนี้ควรมีพื้นที่หรือเครื่องจักรที่ออกแบบมาลักษณะปิดมิดชิด เนื่องจากต้องป้องกันความผันแปรของอุณหภูมิ และการออกแบบควรคำนึงถึงน้ำหนักของแผ่นพลาสติก โดยทั่วทั้งแผ่นต้องได้รับอุณหภูมิอย่างทั่วถึงและสามารถควบคุมอุณหภูมิได้เท่าๆ กันทุกจุด เนื่องจากมีผลกับการยืดขยายของพลาสติกซึ่งส่งผลถึงการขึ้นรูปที่ไม่สมบูรณ์ได้ การให้ความร้อนแผ่นพลาสติกนั้นสามารถให้ความร้อนเพียงด้านเดียวของแผ่นพลาสติกหากแผ่นพลาสติกมีความหนาไม่มากนัก แต่หากแผ่นพลาสติกมีความหนาค่อนข้างมาก การให้ความร้อนทั้งด้านบนและด้านล่างจะทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ดีกว่า ส่งผลทำให้สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้ดีและสามารถลดเวลาในการให้ความร้อนได้อีกด้วย



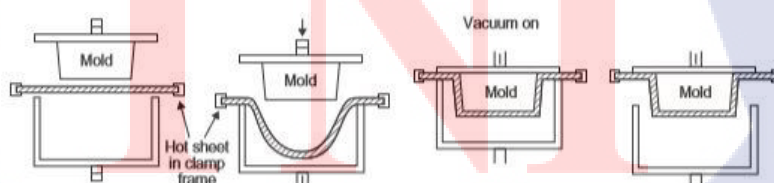
รูปที่ 2.5 ลักษณะการให้ความร้อนแผ่นพลาสติกในกระบวนการเรอริโมฟอร์มมิง [7]

(3) ขั้นตอนการช่วยยืดแผ่นพลาสติก (Pre-stretching) เป็นขั้นตอนที่มีไว้เพื่อช่วยยืดแผ่นพลาสติกให้สามารถขยายตัวในเบื้องต้น เพื่อให้แผ่นพลาสติกสัมผัสกับแม่พิมพ์ในขั้นตอนต่อไป ซึ่งการยืดแผ่นพลาสติกนั้นสามารถใช้ได้ทั้งแรงกล (Mechanical Pre-stretching) และแรงลม (Pneumatical Pre-stretching) และอาศัยสุญญากาศทำให้แผ่นพลาสติกที่ยืดตัวสัมผัสกับแม่พิมพ์ ในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความลึกไม่มากสามารถใช้เพียงแรงลมช่วยในการยืดแผ่นพลาสติก แต่หากชิ้นงานมีความลึกค่อนข้างมาก ตัวช่วยยืดแผ่นพลาสติกแบบใช้แรงกล (Plug Assist) มีบทบาทสำคัญอย่างมากในการช่วยยืดแผ่นพลาสติก Plug Assist ดังกล่าว สามารถผลิตมาจากวัสดุหลายประเภท เช่น ไม้ อีพ็อกซี โลหะ อลูมิเนียม ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของการใช้งานและชนิดของพลาสติกที่นำมาใช้ขึ้นรูป เช่น Plug Assist ที่ทำมาจากไม้ มีการนำพาความร้อนต่ำ เหมาะสำหรับใช้กับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่หรือมีน้ำหนักมาก และเหมาะสำหรับใช้กับพลาสติกประเภท HDPE, HIPS, PA, PVC, PO, PP สำหรับ Plug Assist ที่ทำมาจากอลูมิเนียมเหมาะสำหรับใช้กับพลาสติกประเภท CPET, OPS, LDPE เป็นต้น นอกจากนี้วัสดุในการนำมาใช้ Plug Assist ที่ต้องคำนึงถึงแล้ว ลักษณะรูปร่างของ Plug Assist ก็มีส่วนสำคัญที่จะส่งผลให้ชิ้นงานมีการขึ้นรูปได้สวยงามและสมบูรณ์มากขึ้นเพียงใด โดยต้องอาศัยการออกแบบให้สอดคล้องกับรูปทรงของชิ้นงาน เพื่อช่วยเตรียมแผ่นพลาสติกให้ยืดตัวไปในลักษณะที่ต้องการ ตามรูปทรงของแม่พิมพ์ [6]



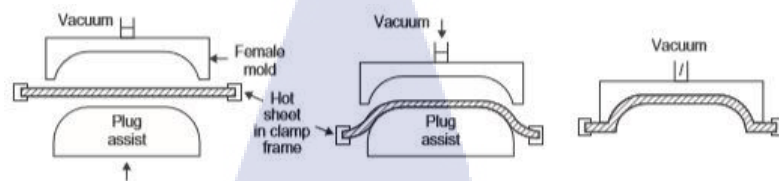
รูปที่ 2.6 การทำงานของตัวช่วยยืดแผ่นพลาสติกในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง [8] (ก) แบบใช้แรงลม (Pneumatically Pre-stretching) (ข) แบบใช้แรงกล (Mechanical Pre-stretching)

(4) แม่พิมพ์ (Mold) เป็นตัวรองรับแผ่นพลาสติกเพื่อกำหนดชิ้นงานให้เป็นรูปร่างต่างๆ ตามแม่พิมพ์ที่ถูกออกแบบมา โดยแม่พิมพ์จะถูกหล่อด้วยความเย็นอยู่ตลอดเวลา ทำให้เมื่อแผ่นพลาสติกร้อนสัมผัสกับแม่พิมพ์ที่มีความเย็น พลาสติกเกิดการแข็งตัวเป็นรูปทรงตามแม่พิมพ์ และคงรูปจนได้ชิ้นงานตามต้องการในที่สุด แม่พิมพ์สามารถทำมาจากวัสดุประเภทโลหะหรืออาจจะเป็นเซรามิคตามความเหมาะสม โดยทั่วไปแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปมีอยู่ 2 ประเภท คือ แม่พิมพ์ตัวผู้ (Plug Mold หรือ Positive mold) และแม่พิมพ์ตัวเมีย (Cavity Mold หรือ Negative mold) ซึ่งลักษณะการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์ทั้งสองแบบนี้แตกต่างกัน การเลือกใช้แม่พิมพ์ที่เหมาะสมจึงควรพิจารณาจากลักษณะรูปร่างของชิ้นงาน



(ก) ลักษณะการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ตัวผู้

รูปที่ 2.7 ลักษณะการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ตัวผู้ (ก) และแม่พิมพ์ตัวเมีย (ข) [3]



(ข) ลักษณะการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ตัวเมีย

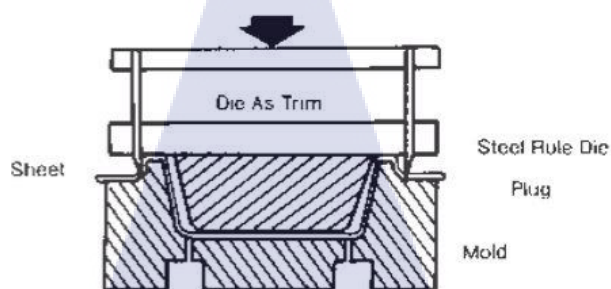
รูปที่ 2.7 ลักษณะการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ตัวผู้ (ก) และแม่พิมพ์ตัวเมีย (ข) (ต่อ) [3]



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างชุดแม่พิมพ์ตัวเมีย (Cavity Mold หรือ Negative mold) และ Plug Assist [9]

(5) เมื่อแผ่นพลาสติกสัมผัสกับแม่พิมพ์จนแข็งตัวเป็นรูปร่างตามต้องการแล้ว กระบวนการตัดชิ้นงานออกจากแผ่นพลาสติก (Edge Trimming หรือ Cutting) ถือเป็นกระบวนการสุดท้ายของการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง เนื่องจากเมื่อตัดชิ้นงานออกมาแล้วทำให้ได้ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปที่สมบูรณ์ตามต้องการ การตัดเป็นการแยกชิ้นงานดีและส่วนของเศษพลาสติกออกจากกัน ใบบิดตัดชิ้นงานจึงมีความเอียงหลายรูปแบบ การเลือกใช้งานควรเลือกให้เหมาะสมกับลักษณะชิ้นงานที่ขึ้นรูป เนื่องจากมีผลกับขอบของชิ้นงาน

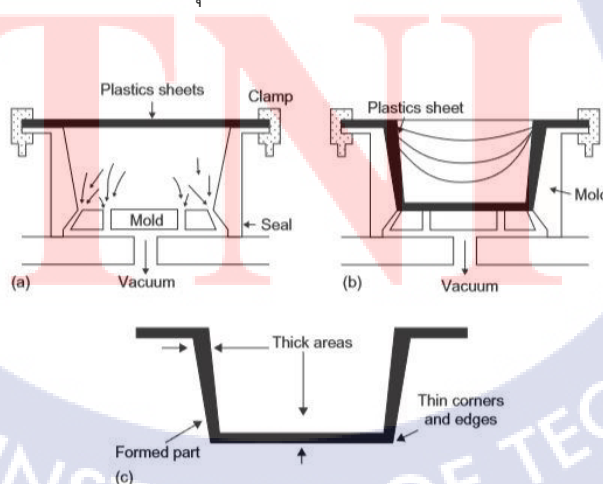
สำหรับเศษพลาสติกที่เหลือจากการตัดชิ้นงานออกไปแล้ว (Skeleton) สามารถนำกลับมาบด (Grind) เพื่อนำกลับมาใช้ในกระบวนการรีดพลาสติก (Extrusion) ได้อีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการตัดชิ้นงานให้ขาดออกจากแผ่นพลาสติก (Trimming) [6]

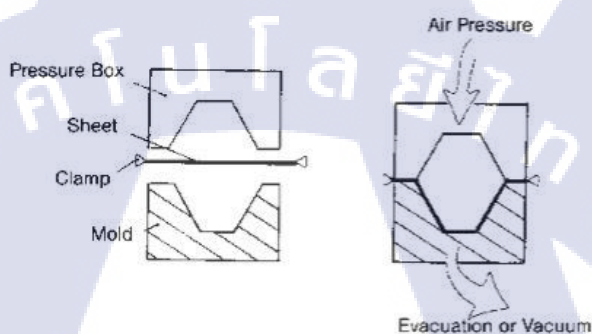
จากความหลากหลายของวัตถุประสงค์การใช้งานผลิตภัณฑ์ ทำให้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งมีรูปร่างลักษณะและขนาดแตกต่างกันออกไป และด้วยข้อดีของการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่งที่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้ทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เพื่อให้ง่ายต่อการขึ้นรูป และทำให้ได้ผลผลิตให้ได้มากที่สุด มีคุณภาพดีที่สุดใน การพัฒนาเทคนิควิธีการในการขึ้นรูปให้เหมาะสมกับรูปร่างลักษณะชิ้นงานจึงมีหลากหลายรูปแบบ ได้แก่

(1) One-Step Forming – การขึ้นรูปแบบขั้นตอนเดียว เป็นการขึ้นรูปที่ไม่มีความซับซ้อน โดยใช้แรงดันลมในการยืดแผ่นพลาสติกเพื่อให้แผ่นพลาสติกสัมผัสกับแม่พิมพ์ การขึ้นรูปลักษณะนี้ มีอยู่ 3 ประเภท ได้แก่ Drap Forming เป็นการขึ้นรูปแบบมีแม่พิมพ์ตัวอยู่ด้านล่าง และแผ่นพลาสติกอยู่ด้านบน Vacuum Forming เป็นการขึ้นรูปแบบใช้แม่พิมพ์ตัวอยู่ด้านล่าง และแผ่นพลาสติกอยู่ด้านบน และ Free Forming เป็นการขึ้นรูปโดยไม่อาศัยแม่พิมพ์ โดยทั้ง 3 ประเภท ใช้แรงดันลมเป็นตัวช่วย การขึ้นรูปแบบ One-Step Forming มักใช้ขึ้นรูปชิ้นงานที่ไม่มีความซับซ้อนมากนัก เนื่องจากการควบคุมความหนาของผนังของชิ้นงานทำได้ไม่ دقیق

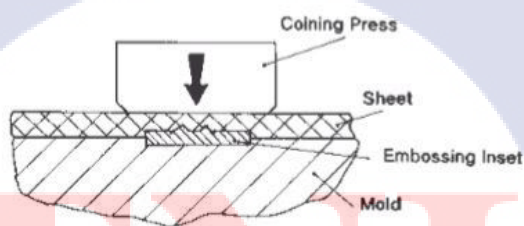


รูปที่ 2.10 การขึ้นรูปแบบ Vacuum Forming [3]

(2) Two-Step Forming – การขึ้นรูปแบบสองขั้นตอน ถูกพัฒนามาจากการขึ้นรูปขั้นตอนเดียวสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อนมากขึ้น และต้องการควบคุมความหนาของชิ้นงานให้มีความสม่ำเสมอยิ่งขึ้น การขึ้นรูปแบบสองขั้นตอนเพิ่มขั้นตอนในการช่วยยืดแผ่นพลาสติกก่อนการขึ้นรูป (Pre-Stretching) ขั้นตอนในการช่วยยืดแผ่นพลาสติกนั้นสามารถใช้แรงลม (Pneumatic Preforming) สำหรับการขึ้นรูปแผ่นพลาสติกที่ไม่มีความหนามากนัก หรือใช้แรงกล (Mechanical Preforming หรือ Plug Assisted) สำหรับการขึ้นรูปแผ่นพลาสติกที่ค่อนข้างหนา หรือการขึ้นรูปแบบใช้แม่พิมพ์เย็นสองตัวบีบอัดแผ่นพลาสติก (Coining)

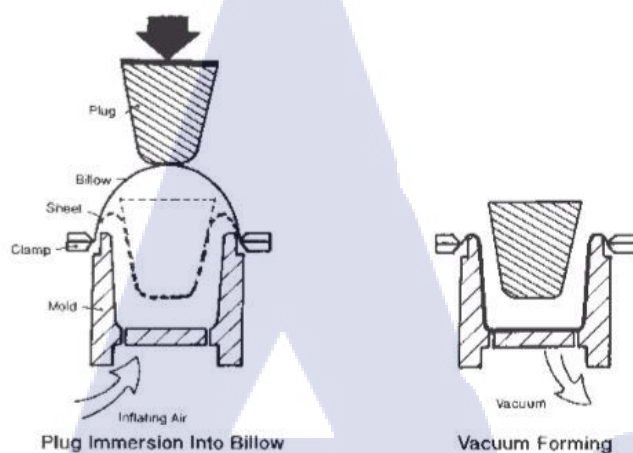


รูปที่ 2.11 แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปแบบใช้แรงลมช่วย [6]



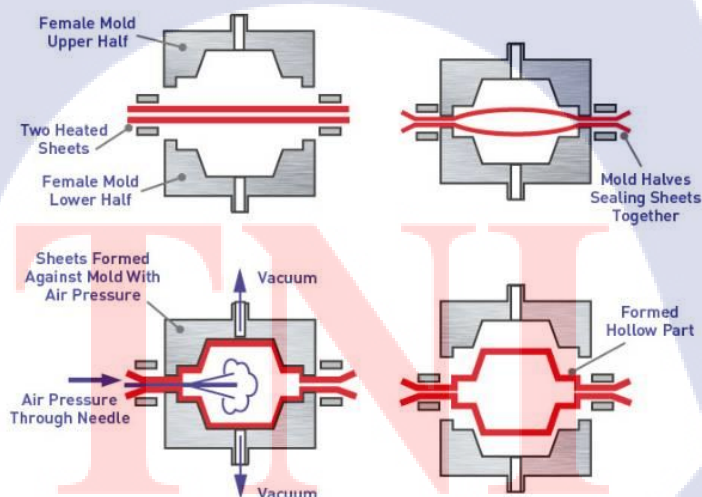
รูปที่ 2.12 แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปแบบ Coining [6]

(3) Three-Step Forming – การขึ้นรูปแบบสามขั้นตอน เป็นขึ้นรูปที่เหมาะสมสำหรับขึ้นรูปแผ่นพลาสติกที่มีความหนามาก เนื่องจากมีการใช้ตัวช่วยในการยืดแผ่นพลาสติกหลายขั้นตอน ทั้งการใช้แรงลม แรงกล และแรงดันลม เพื่อช่วยยืดพลาสติกก่อนการขึ้นรูปตามแม่พิมพ์

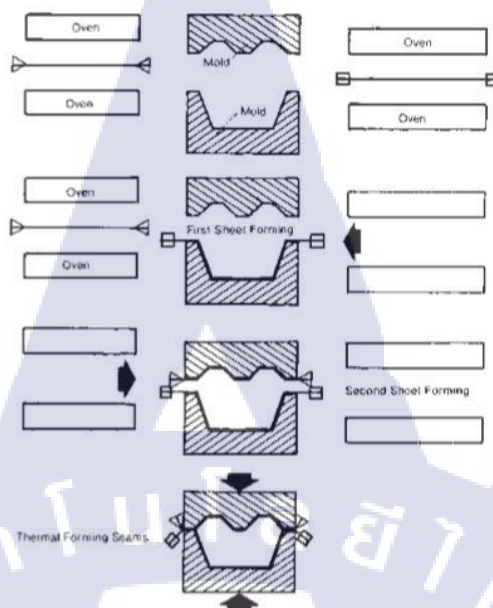


รูปที่ 2.13 แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปแบบ Three-Step Forming [6]

(4) Twin-Sheet Forming – การขึ้นรูปแบบใช้แผ่นพลาสติก 2 แผ่น ใช้ขึ้นรูปสำหรับชิ้นงานที่มีลักษณะกลวงด้านใน โดยให้แผ่นพลาสติกทั้ง 2 แผ่นประกบด้านบนและด้านล่าง สามารถใช้แรงลมในการช่วยยึดแผ่นพลาสติก หรืออาจไม่ใช้ก็ได้ การขึ้นรูปในลักษณะนี้มีขั้นตอนคล้ายกระบวนการขึ้นรูปแบบเป่า (Blow Molding)



รูปที่ 2.14 ขั้นตอนการขึ้นรูปแบบ Twin-Sheet Forming แบบใช้แรงลมช่วยยึดแผ่นพลาสติก [10]



รูปที่ 2.15 ขั้นตอนการขึ้นรูปแบบ Twin-Sheet Forming แบบแม่พิมพ์ประกบ [4]

นอกจากข้อดีของการขึ้นรูปพลาสติกแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่งคือการขึ้นรูปได้ครั้งละจำนวนมากแล้วนั้น ยังมีสาเหตุอีกหลายประการที่การขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่งมีความได้เปรียบมากกว่าการขึ้นรูปพลาสติกด้วยวิธีการอื่นๆ ที่ยังมีข้อจำกัดไม่สามารถทำได้ เช่น สามารถขึ้นรูปชิ้นงานขนาดใหญ่ สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีน้ำหนักมาก สามารถขึ้นรูปจากแผ่นพลาสติกที่มีความหนาหลากหลาย สามารถขึ้นรูปจากแผ่นพลาสติกหลายชั้น (Multi-Layers) ที่มีคุณสมบัติพิเศษป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนได้ดี เป็นต้น แต่แม้ว่าการขึ้นรูปพลาสติกแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่งนั้นจะเป็นกรรมวิธีที่ได้รับความนิยม และมีข้อดีหลายประการ แต่การขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่งก็ยังมีข้อจำกัดอยู่ที่แผ่นพลาสติกที่นำมาขึ้นรูปนั้นต้องผ่านกระบวนการรีดพลาสติก (Extrusion) มาก่อน ซึ่งกระบวนการรีดดังกล่าวทำให้มีของเสียในกระบวนการผลิตเพิ่มมากขึ้นจากขั้นตอนการผลิตและจากเศษเหลือขอบพลาสติก (Trim) ที่ต้องถูกตัดออกระหว่างกระบวนการ ถึงแม้ว่าเศษเหลือขอบพลาสติก (Trim) เหล่านี้จะสามารถนำกลับมาใช้ในกระบวนการรีดพลาสติกได้อีก แต่ก็ยังเป็นกระบวนการพิเศษที่ต้องเพิ่มเข้ามาอีกกระบวนการหนึ่ง และยังเป็นการเพิ่มต้นทุนในการผลิตให้สูงขึ้นอีกด้วย [9]

เนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปเทอร์โมฟอร์มมิ่งนั้นต้องอาศัยแผ่นพลาสติกที่ผ่านกระบวนการรีดพลาสติก (Extrusion) ในการขึ้นรูปชิ้นงาน การที่จะควบคุมกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งให้ชิ้นงานที่ออกมามีคุณภาพดี ต้องอาศัยแผ่นพลาสติกที่มีความเรียบสม่ำเสมอจากกระบวนการก่อนหน้า รวมถึงการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่งให้เหมาะสมกับแผ่นพลาสติกและชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย เนื่องจากระหว่างการขึ้นรูปเทอร์โมฟอร์มมิ่ง แผ่นพลาสติกจะถูกยึดตัวออก

หลังจากโดนให้ความร้อนจนแผ่นพลาสติกอ่อนตัวจนสามารถยืดหยุ่นและเปลี่ยนรูปร่างได้ ดังนั้น นอกจากแผ่นพลาสติกที่มีคุณภาพดีแล้ว การปรับตั้งพารามิเตอร์ให้เหมาะสมจึงมีส่วนสำคัญอย่างมาก ต่อคุณภาพของชิ้นงาน โดยเฉพาะความหนา-บางของชิ้นงานที่มักจะเป็นปัจจัยแรกที่ได้รับผลกระทบ เมื่อมีการตั้งพารามิเตอร์เครื่องจักรที่ไม่เหมาะสม ซึ่งความหนา-บางของชิ้นงานนี้เองที่นอกจากจะทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่สวยงาม ยังมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์สูญเสียคุณสมบัติที่สำคัญบางประการไป เช่น ใน บริเวณที่มีความบางผิดปกติมักทำให้ผลิตภัณฑ์ร้าว แตกหักง่าย หรือสูญเสียคุณสมบัติพิเศษในการซึม ผ่านของออกซิเจนในกรณีใช้แผ่นพลาสติกแบบ Multi-Layers ดังนั้นการปรับตั้งพารามิเตอร์ เครื่องจักรให้เหมาะสมกับชิ้นงานและเหมาะสมกับคุณสมบัติของพลาสติก จึงมีส่วนสำคัญอย่างมากที่ จะส่งผลให้ชิ้นงานสุดท้ายมีความสมบูรณ์มากที่สุด

2.1.3 การขึ้นรูปโดยอาศัยแม่พิมพ์

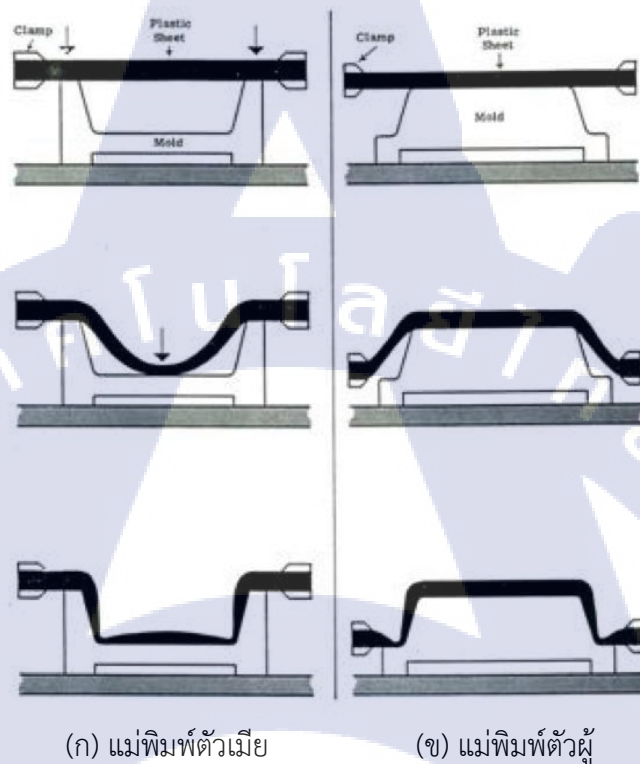
กระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง เป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกจากแผ่นพลาสติก จำพวกเทอร์โมพลาสติก โดยการให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกที่จะใช้ในการขึ้นรูปจนอยู่ในสถานะ อ่อนตัวและยืดหยุ่น (Thermoelastic) แล้วจึงทำการขึ้นรูปซึ่งอาจใช้แรงกลหรือลมก็ได้ แรงที่ใช้ไม่ มากนักและเป็นการขึ้นรูปแบบมีการเสียเศษ เนื่องจากความจำเป็นในการจับยึดขอบขณะยืดขึ้นรูป ชิ้นงาน ดังนั้น จึงต้องทำการตัดขอบของชิ้นงานออกมาจากแผ่นพลาสติกทำให้อ่อนพลาสติกบริเวณ ด้านนอกของตัวชิ้นงานกลายเป็นเศษซึ่งประมาณ 10-20% ของพื้นที่แผ่นพลาสติกทั้งหมด หลังจาก ทำการขึ้นรูปแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างตามแบบที่ต้องการ [11]

แม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปมีอยู่ 2 แบบคือ แม่พิมพ์ตัวผู้ (Plug mold) และแม่พิมพ์ตัวเมีย (Cavity mold) โดยชิ้นงานที่ผลิตมาจากแม่พิมพ์ 2 ประเภทนี้มีข้อแตกต่างกันคือ ชิ้นงานที่ผลิตจาก แม่พิมพ์ตัวผู้ (Plug mold) ความหนาของกันชิ้นงานจะหนากว่าบริเวณปากของชิ้นงาน ส่วนชิ้นงานที่ ผลิตจากแม่พิมพ์ตัวเมีย (Cavity mold) กันชิ้นงานจะบางกว่าบริเวณปากชิ้นงาน [12]

หลักการพื้นฐานที่ควรคำนึงถึงของการขยายตัวของวัตถุเมื่อสัมผัสกับแม่พิมพ์ คือ พื้นที่ของ แผ่นพลาสติกส่วนที่สัมผัสกับแม่พิมพ์ก่อนจะมีความหนามากที่สุด เนื่องจากวัตถุเกิดการขยายตัว และพื้นที่ของแผ่นพลาสติกส่วนที่สัมผัสกับแม่พิมพ์หลังสุดจะมีความหนาน้อยที่สุดเนื่องจากวัตถุมีการ ขยายตัวมากที่สุด [13]

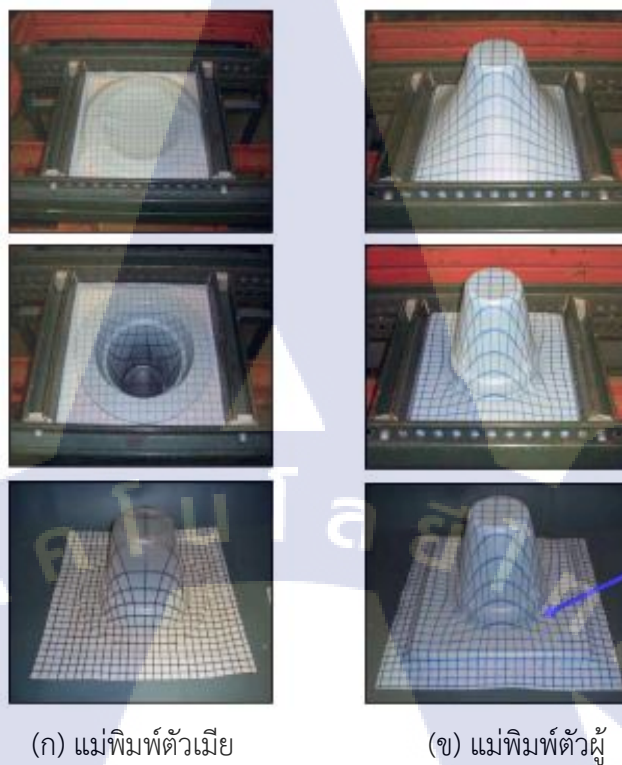
การขึ้นรูปเทอร์โมฟอร์มมิ่งแบบ Draw-Down หรือ drape forming เป็นการขึ้นรูปแบบใช้ แม่พิมพ์ตัวผู้ (Plug mold) กดแผ่นพลาสติกจากด้านบนลงด้านล่าง ส่วนของแผ่นพลาสติกที่สัมผัสกับ แม่พิมพ์จะไม่มีการขยายตัว จึงทำให้ชิ้นงานมักมีความหนาที่ด้านล่างของชิ้นงาน และมีความบางกว่า บริเวณรอบๆ ชิ้นงาน ส่วนการขึ้นรูปเทอร์โมฟอร์มมิ่งแบบ vacuum forming เป็นการขึ้นรูปแบบใช้ แม่พิมพ์ตัวเมีย (Cavity mold) และใช้ระบบสุญญากาศเป็นตัวช่วยในการทำให้แผ่นพลาสติกแนบติด

กับผิวแม่พิมพ์ เพื่อให้ได้พลาสติกตามรูปทรงที่ต้องการ ลักษณะชิ้นงานที่ขึ้นรูปเทอร์โมฟอร์มมิ่งแบบ vacuum forming นี้ จึงมีความหนาบริเวณขอบชิ้นงาน และมักจะบางบริเวณด้านล่าง หรือก้นของชิ้นงาน [6]



รูปที่ 2.16 ลักษณะการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง เพื่อเปรียบเทียบความหนา-บางของแผ่นพลาสติกที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ตัวเมีย (ก) และแม่พิมพ์ตัวผู้ (ข) [14]

นอกจากนั้น Peter W. Klein ยังได้ทำการทดลองการขึ้นรูปเทอร์โมฟอร์มมิ่งด้วยแผ่นพลาสติกขนาด 0.22 นิ้ว เพื่อเปรียบเทียบการขยายตัวของแผ่นพลาสติกระหว่างการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ตัวผู้และแม่พิมพ์ตัวเมีย และนำผลที่ได้มาหาสมการคำนวณการขยายตัวของแผ่นพลาสติกโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจเลือกใช้แม่พิมพ์ให้เหมาะสมกับอัตราส่วนของชิ้นงานในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง [14]

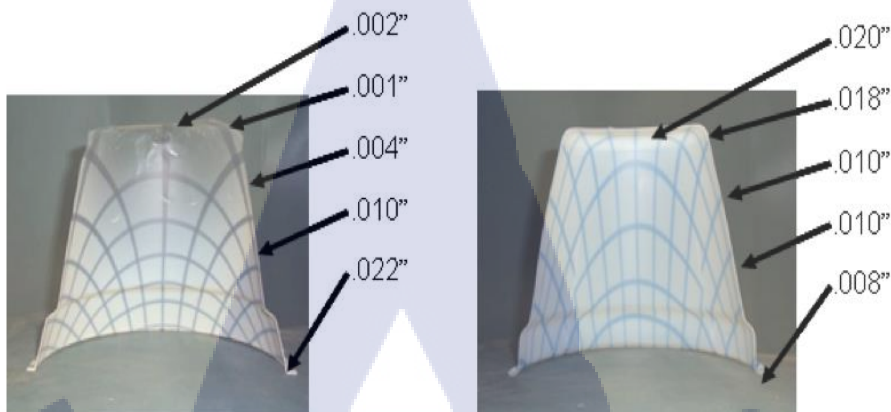


(ก) แม่พิมพ์ตัวเมีย

(ข) แม่พิมพ์ตัวผู้

รูปที่ 2.17 ภาพการทดลองการขึ้นรูปเรอร์โมฟอร์มมิ่ง เพื่อเปรียบเทียบการขยายตัวของแผ่นพลาสติกระหว่างแม่พิมพ์ตัวเมีย (ก) และแม่พิมพ์ตัวผู้ (ข) [14]

การทดลองของ Klein พบว่าบริเวณที่บางที่สุดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปเรอร์โมฟอร์มมิ่งด้วยแม่พิมพ์ตัวเมียคือบริเวณขอบกันถ้วยของชิ้นงาน โดยมีความหนาเท่ากับ 0.001 นิ้ว หรือคิดเป็น 4.55% ของความหนาของแผ่นพลาสติกก่อนขึ้นรูป (0.22 นิ้ว) ซึ่งมีอัตราการขยายตัวของแผ่นพลาสติกมากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ตัวผู้ ซึ่งมีบริเวณที่บางที่สุดคือขอบปากถ้วย โดยวัดได้ 0.08 นิ้ว หรือคิดเป็น 36.36% ของความหนาของแผ่นพลาสติกก่อนขึ้นรูป (0.22 นิ้ว) [14]



(ก) ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากแม่พิมพ์ตัวเมีย

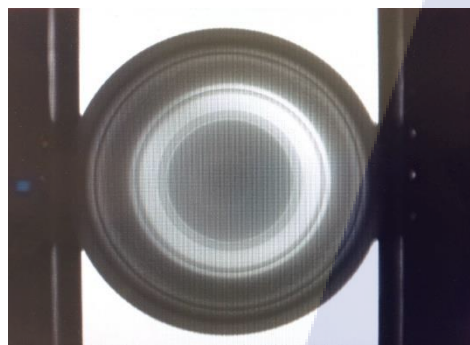
(ข) ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากแม่พิมพ์ตัวผู้

รูปที่ 2.18 ภาพชิ้นงานเพื่อเปรียบเทียบการขยายตัวของแผ่นพลาสติกที่ขึ้นรูปจากแม่พิมพ์ตัวเมีย (ก) และแม่พิมพ์ตัวผู้ (ข) [14]

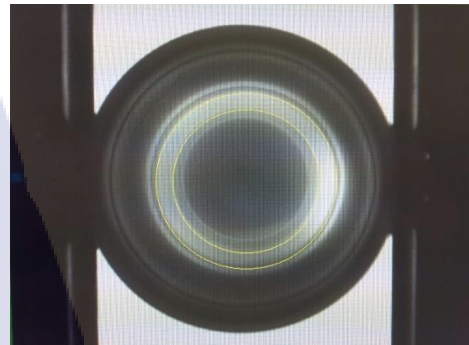
จากการทดลองสามารถเห็นได้ว่าความหนาของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ตัวเมียมีความหนาน้อยกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ตัวผู้มาก เนื่องจากแผ่นพลาสติกมีการขยายตัวในอัตราส่วนที่มากกว่า แต่อย่างไรก็ดี การขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ตัวเมียก็ได้รับความนิยมในการผลิตแบบเรอโมฟอร์มมิ่ง เพราะมีข้อดีอยู่หลายประการ เช่น มีองศาการขึ้นรูปต่ำ สามารถทำงานต่อเนื่องได้ง่าย เกิดรอยพับ รอยย่น (Wrinkle) น้อยกว่า และการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์หลังจากขึ้นรูปแล้วทำได้ง่ายกว่า การขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ตัวผู้ ดังนั้นการปรับปรุงพารามิเตอร์เรอโมฟอร์มมิ่งที่เหมาะสมในการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ตัวเมียเพื่อลดปัญหาความหนาของชิ้นงานบริเวณวิกฤตจึงมีความสำคัญต่อการขึ้นรูปดังกล่าว

2.1.4 ผลกระทบของกันถ้วยบาง

ในการขึ้นรูปของกระบวนการเรอโมฟอร์มมิ่งนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการปรับตั้งค่าการขึ้นรูปให้เหมาะสมเพื่อให้ได้รูปทรงของชิ้นงานที่สมบูรณ์ตามต้องการ เนื่องจากการยึดตัวของแผ่นพลาสติกจากการปรับตั้งค่าที่ไม่เหมาะสมเป็นสาเหตุของการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอของแผ่นพลาสติก มีผลทำให้กันถ้วยหนา-บางไม่สม่ำเสมอ ซึ่งมีผลกระทบต่อการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งาน และถือเป็นข้อเสียที่ไม่สามารถนำไปใช้งานได้



(ก) ถ้วยพลาสติกที่ก้นถ้วยบาง



(ข) ถ้วยพลาสติกที่ก้นถ้วยบางแบบไม่สม่ำเสมอ

รูปที่ 2.19 ตัวอย่างถ้วยพลาสติกที่ก้นถ้วยบาง (ก) และถ้วยพลาสติกที่ก้นถ้วยบางแบบไม่สม่ำเสมอ (ข) ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

2.1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ

เทอร์โมฟอร์มมิ่ง (Thermoforming) หมายถึง การขึ้นรูปชิ้นงานโดยการให้ความร้อนที่แผ่นพลาสติกจนถึงอุณหภูมิที่พลาสติกอ่อนตัว และสามารถยืดตัวโดยใช้แรงลมดูดหรือเป่า พร้อมกับอุปกรณ์ทางกลช่วย เพื่อให้ได้รูปร่างที่ต้องการตามแบบแม่พิมพ์

Assisting plug หมายถึง อุปกรณ์ช่วยในการยืดแผ่นพลาสติกในขั้นตอนการเตรียมขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกของกระบวนการขึ้นรูปเทอร์โมฟอร์มมิ่ง โดยมีขนาดและผลิตจากวัสดุหลากหลายชนิด เช่น ไม้ อลูมิเนียม อะคริลิก ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการใช้งาน

2.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์ทางวิศวกรรมมักพบปัญหาที่มีความซับซ้อนเกี่ยวกับกับขนาดรูปร่าง การรับแรง และความซับซ้อนเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุมากขึ้น โดยทั่วไปแล้วเป็นการยากที่จะสามารถวิเคราะห์หรือแก้ปัญหามาจากการคำนวณหรือการตอบโต้ทางคณิตศาสตร์ เราจึงจำเป็นต้องอาศัยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ปัญหา หรือแก้ปัญหามีความซับซ้อนเหล่านั้น โดยการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปแบบของระบบสมการผลต่างสืบเนื่อง (system of difference equation) ใช้วิธีจำลองรูปร่างที่ต้องการศึกษาและแบ่งสัดส่วนให้เล็กลงออกเป็นรูปทรงต่างๆ แล้วเชื่อมโยงแต่ละส่วนให้มีความสัมพันธ์กัน เพื่อแก้ปัญหาและหาผลเฉลยโดยประมาณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น [15]

ผลเฉลยแม่นยำตรงจะประกอบด้วยค่าต่างๆ ทั้งหมดนับเป็นจำนวนอนันต์ค่า แทนที่จะทำการหาผลเฉลยแม่นยำตรงที่ประกอบด้วยค่าต่างๆ จำนวนมากมาย ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นเป็นไปได้ หลักการก็คือทำการลดค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณในจำนวนที่นับได้ (finite) ด้วย

การแทนรูปร่างลักษณะของปัญหด้วยเอลิเมนต์ (elements) ซึ่งมีขนาดต่างๆ กัน โดยหลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น จะต้องเริ่มจากการพิจารณาเอลิเมนต์ที่ละเอลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่พิจารณาอยู่ จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นได้มาประกอบกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการรวม ซึ่งในความหมายทางกายภาพคล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมเข้าด้วยกัน ก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง แล้วจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ลงไปในระบบสมการรวมก่อนทำการแก้ทั้งระบบสมการ เพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการตามตำแหน่งต่างๆ ของปัญหานั้น [16]

เนื่องจากรูปแบบผลิตภัณฑ์ทั่วไปมักมีรูปร่างซับซ้อน ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงมีบทบาทเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์ใช้วิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ในปัจจุบัน เช่น ปัญหาการยืดหยุ่นของของแข็ง การถ่ายเทความร้อนในวัตถุ การใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ควบคู่ไปกับการวิวัฒนาการและประสิทธิภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์ ทำให้เราสามารถคำนวณหาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้โดยสะดวก และในขณะเดียวกันยังช่วยลดค่าใช้จ่ายที่เคยต้องใช้ไปในการทดลองได้อีกด้วย [16]

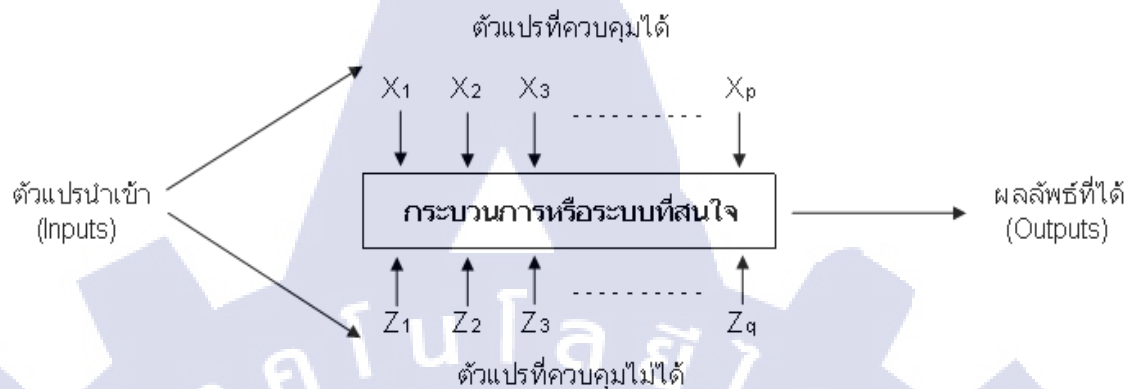
2.3 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

ในทางปฏิบัติทางอุตสาหกรรม การทดลองที่ได้รับการออกแบบมา จะมีการทำงานอย่างเป็นระบบในการสืบค้นตัวแปรในกระบวนการ (Process variable) หรือตัวแปรของผลิตภัณฑ์ (Product variable) หลังจากทำการกำหนดเงื่อนไขของกระบวนการ หรือองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ ที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ จึงจะสามารถทำการปรับปรุงเพื่อเพิ่มความสามารถในการผลิต ความน่าเชื่อถือ คุณภาพ และ ประสิทธิภาพ

เนื่องด้วยทรัพยากรมีจำนวนจำกัด ดังนั้นการทดลองแต่ละครั้งจะต้องให้สาระข้อมูลที่สำคัญที่สุด ซึ่งการทดลองที่มีการวางแผนที่ดีจะทำให้ได้สาระข้อมูลที่สำคัญและมีคุณภาพมากกว่าการทดลองที่เกิดขึ้นจากงานที่ไม่ได้รับการวางแผนมาก่อน และโดยเฉพาะการทดลองตามแผนที่วางไว้จะสามารถวิเคราะห์เกี่ยวกับอิทธิพลของปัจจัยที่ต้องการศึกษาได้ดีกว่าด้วย วิธีการออกแบบการทดลอง หรือ DOE (Design of Experiment) จึงถูกนำมาใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ผลในงานวิจัยนี้

การออกแบบการทดลอง คือ การทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่องโดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input Variables) ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะทำให้สามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่างๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Output or Responses) จากกระบวนการหรือระบบนั้น โดยตัวแปรนำเข้าจะถูกจัดแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ควบคุมได้ เรียกว่า “ตัวแปร (หรือปัจจัย) ที่ควบคุมได้ (Controllable Variables or Factors) หรือ

ตัวแปร (หรือปัจจัย) ที่รบกวนระบบ (Uncontrollable or Noise Variables (Factors)) [17] ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการหรือระบบที่สนใจ [17]

วิธีการออกแบบการทดลองจึงมีความสำคัญมากในการวางแผนและดำเนินการทดลองตามแผน เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความชัดเจน แน่นนอน และมีความน่าเชื่อถือ เพราะมีการใช้วิธีทางคณิตศาสตร์และสถิติเป็นตัวช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากปัญหาหลักที่พบในชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง คือ มีความหนาไม่สม่ำเสมอเป็นบางส่วน จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนาของชิ้นงาน ได้แก่ อุณหภูมิในการให้ความร้อน ระยะเวลาในการให้ความร้อน ระยะเวลาในการดูดด้วยสุญญากาศ ระยะเวลาในการให้ลมเป่า และระยะเวลาในการให้ลมเย็น

ประเสริฐ ชุมปัญญา และชลิดา ชาญวิจิตร ได้ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปด้วยระบบสุญญากาศสำหรับพลาสติกชนิดโพลีไวนิลคลอไรด์ ที่มีความหนา 0.4 มม. โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 25 (2k Factorial Design) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยทดลองซ้ำเพียง 1 ครั้ง (Single replicate) จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิในการให้ความร้อน 190 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการให้ความร้อน 34 วินาที ระยะเวลาสุญญากาศ 36 วินาที ให้ลมเป่า 19 วินาที และให้ลมเย็น 9 วินาที จะส่งผลให้ความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้น [18]

จักรพันธ์ ดันศรีวงษ์ พบว่าชิ้นงานที่ได้จากเครื่องขึ้นรูปพลาสติกด้วยความร้อนแบบสุญญากาศ (Thermoforming) มักมีรูปทรงไม่สมบูรณ์ และมีความหนาบริเวณด้านข้างของชิ้นงาน

น้อยกว่า 85% ของความหนาวัตถุดิบตั้งต้น จึงได้ศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนสำหรับเครื่องขึ้นรูปแบบสูญญากาศโดยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเศษส่วน โดยทดสอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ผลการทดลองพบว่าควรปรับตั้งค่าอุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เวลาในการให้ความร้อน 22 วินาที เวลาในการให้สูญญากาศ 17 วินาที และเวลาในการให้ลมเป่า 12 วินาที จะทำให้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปมีรูปทรงที่สมบูรณ์ทั้งหมด และมีความหนาไม่น้อยกว่า 85% ของความหนาตั้งต้นตามที่กำหนดไว้ [19]

การศึกษาการพัฒนาบรรจุภัณฑ์สำหรับใส่ไอศกรีม โดยตติยา กองกิจ และคณะ ได้เลือกแผ่นพลาสติกที่มีความหนา 1.0 มิลลิเมตร หลายชนิดมาทำการทดลอง และใช้เครื่องขึ้นรูปด้วยความร้อนแบบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่า การขึ้นรูปพลาสติกชนิด Polypropylene จะกำหนดระยะเวลาในการให้ความร้อน 30 วินาที ระยะเวลาในการให้สูญญากาศ 15 วินาที และระยะเวลาในการให้ลมเป่า 3 วินาที [20]

ประเสริฐ ชุมปัญญา ศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปพลาสติกด้วยความร้อนระบบสูญญากาศ เพื่อให้ความหนาของวัตถุดิบลดลงไม่เกิน 15% โดยวัสดุที่ใช้ทดลองจะเป็นพลาสติกชนิดโพลีพรีลีนที่มีความหนา 0.5 มม. ผู้วิจัยได้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 32 จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิและระยะเวลาให้ความร้อนจะส่งผลให้ความหนาของชิ้นงานแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการให้ความร้อน 29 วินาที จะเป็นสภาวะการทำงานที่เหมาะสม สภาวะดังกล่าวจะทำให้ความหนาของชิ้นงานมีค่าเฉลี่ย 0.421 มิลลิเมตร คิดเป็นความหนาเฉลี่ยที่ลดลงจากความหนาเริ่มต้นเพียง 12.29% [21]

ภักจิรา พิงสุข และ วิชัย รุ่งเจริญอนันต์ ศึกษาการลดสัดส่วนในกระบวนการฉีดพลาสติกโดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง กรณีศึกษาโรงงานผลิตเครื่องซักผ้าที่มีของเสียเกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตถึง 4.29% โดยพบว่าการฉีดพลาสติกเพื่อขึ้นรูปตัวถังเครื่องซักผ้า ก่อให้เกิดของเสียที่มีลักษณะเป็นฟองอากาศบริเวณผิวชิ้นงาน 61.1% จากของเสียทั้งหมด จึงได้นำสาเหตุที่เกิดขึ้นมาวิเคราะห์ด้วย Why-Why Analysis จากนั้นนำปัจจัยที่เกิดขึ้นมาทำการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2k แบบ 1 ซ้ำ เพราะมีข้อจำกัดเรื่องวัตถุดิบ เมื่อนำค่าระดับปัจจัยไปใช้จริงในกระบวนการผลิตเครื่องซักผ้า พบว่าสัดส่วนของเสียลดลงเหลือเพียง 2.02% [22]

วิภาส นิตวิธกร วิเคราะห์ความสามารถต่อการรับน้ำหนักการวางซ้อนทับด้านบน (Top Load) ที่กระทำต่อขวดพลาสติกใส PET (Poly Ethylene Terephthalate) โดยใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) เพื่อศึกษาระการซ้อนทับด้านบนหรือแรงโก่งงอ (Bulking Load) ของขวดพลาสติกใส PET โดยแบ่งการทดสอบเป็นสามกรณี คือ กรณีแรกเพื่อดูผลการยุบตัวเมื่อได้รับภาระด้านบน แบบสถิตเชิงเส้น (Linear Static Load) กรณีที่สองเป็นการวิเคราะห์ค่าแรงโก่งงอ เพื่อหาแรงสูงสุดที่ทำให้ขวดพลาสติกใส PET เกิดการโก่งงอ และ

กรณีที่สามการวิเคราะห์การเสียรูปแบบสถิตไม่เชิงเส้น (Nonlinear Static Analysis) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบและผลจากการวิเคราะห์การรับแรงแบบสถิตเชิงเส้นพบว่า มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 12.84% โดยค่าจากการจำลองมีค่าสูงกว่าการทดลอง ส่วนผลการวิเคราะห์แรงโก่งงอ มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 7.93% โดยค่าจากการทดลองมีค่าสูงกว่าการจำลอง และการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น แรงที่ทำให้เกิดการโก่งงอมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 7.52% โดยค่าจากการทดลองมีค่าสูงกว่าแบบจำลอง [23]

Hsiao และ Kikuchi ตีพิมพ์ผลงานในปีค.ศ.1999 เรื่อง Numerical analysis and optimal design of composite thermoforming process โดยได้ทำการจำลองและออกแบบกระบวนการ Thermoforming โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ วิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุและจำลองการขึ้นรูปแบบ 3 มิติ เพื่อใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เบื้องต้นเพื่อการปรับตั้งกระบวนการที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเทอร์โม-ฟอร์มมิ่ง

งานวิจัยของ ธนสาร อินทรกำธรชัย และคณะ เรื่อง “FEA based optimization of blank holder force and pressure for hydromechanical deep drawing of parabolic cup using 2-D interval halving and RSM methods” ศึกษาหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแรงดัน (linear pressure) และแรงจับยึด (blank holder force) ที่คงที่ สำหรับกระบวนการลากขึ้นรูปด้วยแรงดันน้ำ (Hydromechanical deep drawing) ของถ้วยทรงพาราโบลา (parabola) โดยใช้การวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยประยุกต์ใช้ 2-D interval halving method และ Response surface method (RSM) ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ของแรงดันและผลของความหนาของชิ้นงาน [24]

TNI

TAHITI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1.1 การศึกษาข้อมูลปัจจุบัน

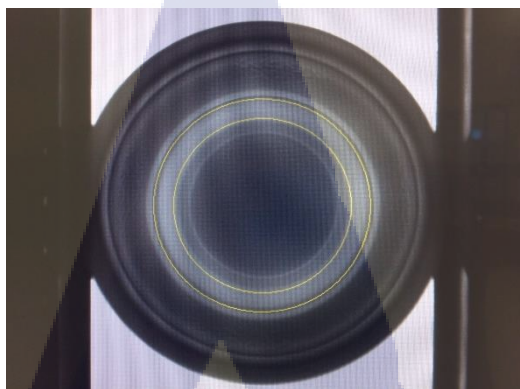
กรณีศึกษาโรงงานผลิตถ้วยพลาสติก ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งแบบแรงดันลม โดยใช้แม่พิมพ์ตัวเมีย (Cavity mold) และใช้ Assisting plug เป็นตัวช่วยในการยึดแผ่นพลาสติกในขั้นตอนการเตรียมขึ้นรูป

ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ บรรจุภัณฑ์พลาสติก (รูปที่ 3.1) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (วัดจากขอบปากถ้วย) 95 มม. สูง 38 มม. ที่ขึ้นรูปจากแผ่นพลาสติกที่มีความหนาดั้งเดิมเฉลี่ยรวม 1.4 มม.

โดยปัญหาที่มักพบระหว่างการขึ้นรูป และนำมาศึกษา ได้แก่ปัญหากันถ้วยบาง ที่เกิดจากการปรับตั้งค่าเครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่งไม่เหมาะสม ทำให้เกิดปัญหาการยึดตัวของพลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ตัวอย่างถ้วยพลาสติกที่ขึ้นรูปไม่สมบูรณ์ โดยถ่ายจากกล้องถ่ายภาพที่อาศัยแสงผ่านจากกันถ้วยเพื่อให้เห็นความบกพร่องได้ชัดเจน โดยเปรียบเทียบกับถ้วยที่ขึ้นรูปสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยจะสังเกตเห็นว่ามีความหนาที่กันถ้วยสม่ำเสมอ



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.2 ภาพตัวอย่างของถ้วยพลาสติกสมบูรณ์ ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ถ่ายจากกล้องถ่ายภาพที่อาศัยแสงผ่านจากกันถ้วย



รูปที่ 3.3 ภาพตัวอย่างของถ้วยพลาสติกที่ไม่สมบูรณ์ (กันถ้วยบาง) ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ถ่ายจากกล้องถ่ายภาพที่อาศัยแสงผ่านจากกันถ้วย

ความบกพร่องของกันถ้วยบาง ทำให้เกิดผลกระทบต่อกระบวนการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งาน เนื่องจากเมื่อนำบรรจุภัณฑ์ไปบรรจุอาหารและทำการฆ่าเชื้อ โดยการนำเข้าเครื่องอบฆ่าเชื้อด้วยความดัน (Sterilizing Retort Machine) ที่ใช้อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 20-30 นาที เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการฆ่าเชื้อแล้วสังเกตได้ว่าถ้วยที่มีความบกพร่องเรื่องความบางที่กันถ้วย จะเกิดการยุบตัวที่บริเวณกันถ้วยบริเวณใดบริเวณหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งถือเป็นของเสียที่ไม่สามารถนำไปใช้งานได้ เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีโอกาสแตกร้าวได้ง่าย และอาจมีผลกระทบต่อคุณสมบัติในการกักเก็บอาหารภายในด้วย



รูปที่ 3.4 ภาพตัวอย่างของถ้วยพลาสติกที่เกิดการยุบตัวที่ก้นถ้วย หลังจากบรรจุอาหาร และนำเข้าเครื่องอบฆ่าเชื้อด้วยความดัน (Sterilizing Retort Machine)

จากที่กล่าวมาแล้วว่าบรรจุภัณฑ์อาหารจำนวนมากมักจะทำจากพลาสติกเนื่องจากน้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่น สามารถรีไซเคิล และมีต้นทุนต่ำ กระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งเป็นวิธีการขึ้นรูปที่นิยมมากที่สุดในการสร้างผลิตภัณฑ์เหล่านี้ กระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงเพื่อให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกจนถึงอุณหภูมิที่สามารถยืดหยุ่นได้ และจากนั้นจะยืดตัวลงบนแม่พิมพ์ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าโดยใช้แรงดันที่มีหรือไม่มีปลั๊กช่วย สำหรับผู้อ่านที่สนใจรายละเอียดเพิ่มเติมสามารถหาได้ใน [6] ในอดีตงานวิจัยหลายชิ้นมีวัตถุประสงค์เพื่อทำนายความหนาของภาชนะโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [25-26] ในขณะที่งานวิจัยอื่น ๆ เป็นการตรวจสอบผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ต่อการกระจายความหนาของผนังภาชนะ [27-28] ผลการวิจัยเหล่านี้มีส่วนช่วยในการปรับปรุงกระบวนการผลิตแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง เครื่องจักร และการใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามในกระบวนการออกแบบบรรจุภัณฑ์โดยเฉพาะอย่างยิ่งในมุมมองของการออกแบบทางกล บรรจุภัณฑ์อาจได้รับการออกแบบมากกว่าความต้องการที่แท้จริง ตัวอย่างเช่น ถ้วยที่ใช้เป็นภาชนะบรรจุอาหารของแมวดังที่แสดงในรูปที่ 3.1 มีเกณฑ์ความหนาของผนังขั้นต่ำที่ 0.3 มม. และค่าเฉลี่ยของความหนาคือ 0.35 มม. ซึ่งถ้วยอาจมีความแข็งแรงเกินกว่าความต้องการในการใช้งาน ถ้าเราสามารถลดความหนาของผนังของบรรจุภัณฑ์นี้ เราจะสามารถประหยัดวัสดุและการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตได้

งานวิจัยนี้จะจำลองการขึ้นรูปโดยพิจารณาความเร็วและระยะกดของปลั๊กช่วยต่อการกระจายความหนาของผนังถ้วย และจะคำนวณเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและความแข็งแรงของถ้วยด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การจำลองจะดำเนินการโดยซอฟต์แวร์แอนซิส (ANSYS)

3.2 การกำหนดปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งแบบจำลองชิ้นงานออกเป็นชิ้นส่วนย่อย หรือเป็น element

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ (element interpolation functions) แบ่งภาพออกเป็น element ย่อยๆ โดยใช้กระบวนการ Mesh generation เพื่อให้ได้เอลิเมนต์ที่เหมาะสมและถูกต้อง

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างสมการของเอลิเมนต์ (element equations)

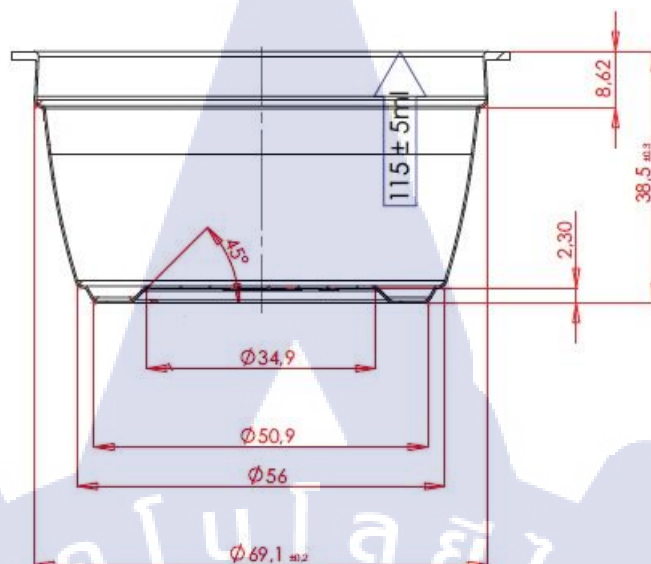
ขั้นตอนที่ 4 การนำสมการของแต่ละ element ที่ได้มาประกอบรวมกัน ก่อให้เกิดระบบสมการรวม (system of simultaneous equations)

ขั้นตอนที่ 5 ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ลงในระบบสมการรวม

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อคำนวณค่าต่างๆ ที่จุดต่อออกมาได้แล้ว สามารถนำมาใช้เพื่อหาค่าอื่นๆ ที่ต้องการออกไปได้อีก

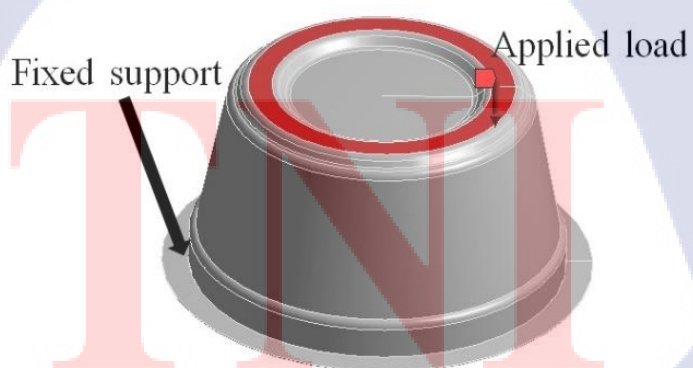
ในส่วนแรกจะจำลองการขึ้นรูปถ้วยพลาสติกด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งแบบมีปลี๊กช่วยโดยใช้โปรแกรม Polyflow โดยความหนาของแผ่นเริ่มต้นคือ 0.35 มม. ทำการปรับเปลี่ยนความเร็วของปลี๊กช่วย 6 ค่า คือ 0.25 0.5 0.75 1 1.25 และ 1.5 เมตรต่อวินาที และระยะกด (Stroke) ของปลี๊ก 5 ค่า คือ 11 15 20 30 และ 40 มม. แสดงผลการขึ้นรูปถ้วยเป็นความหนาของผนังถ้วย จำนวนเอลิเมนต์และจุดต่อให้โปรแกรมกำหนดให้โดยอัตโนมัติ

ถ้วยพลาสติกตัวอย่างที่มีขนาดบางส่วนดังแสดงในรูปที่ 3.5 เป็นสมมาตรตามแนวแกน ทำจากพลาสติกที่มีโมดูลัสแรงดึง 1.3 GPa ความเค้นของผลผลิตที่ 24 MPa และอัตราส่วน Poisson เท่ากับ 0.42 ใน ANSYS ได้มีการกำหนดจำนวนของเอลิเมนต์และจุดต่อเป็น 200058 เอลิเมนต์ และ 400572 จุดต่อตามลำดับ ซึ่งผ่านการทดสอบการลู่เข้าของผลลัพธ์แล้ว

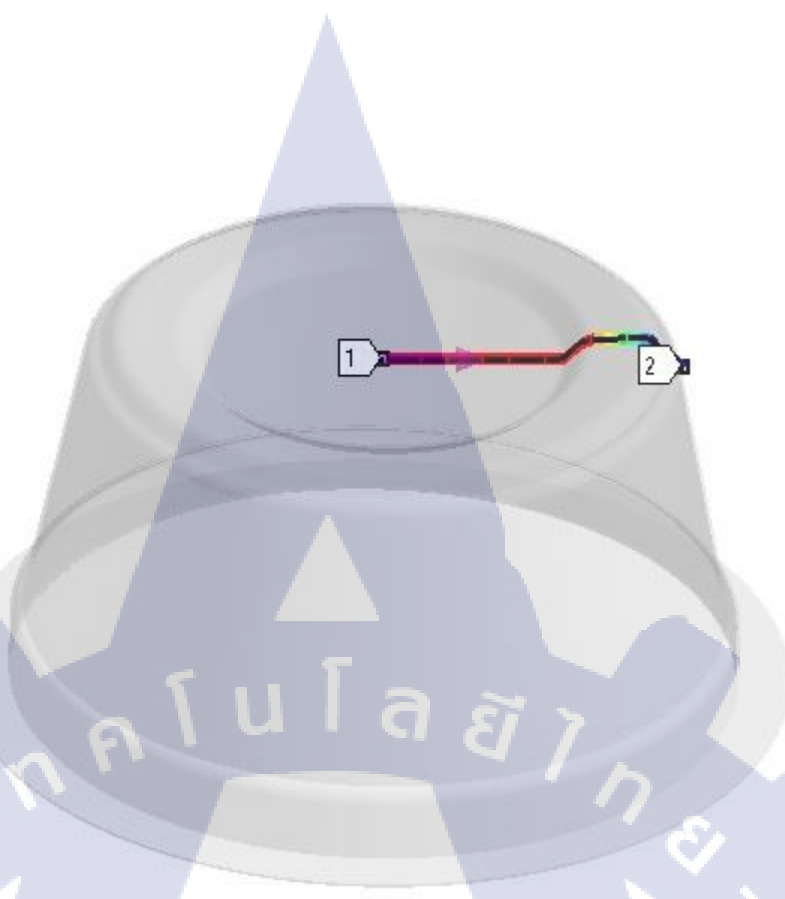


รูปที่ 3.5 ขนาดของถ้วยตัวอย่าง

ความหนาของถ้วยคือ 0.2, 0.25, 0.3 และ 0.35 มม. และแรงที่ใช้คือ 1, 3, 5, 7 และ 9 N ซึ่งเพียงพอสำหรับการสังเกตผลกระทบของความหนาของถ้วย โหลดที่ใช้ทำหน้าที่ปกติในพื้นที่วงแหวนที่ด้านล่างของถ้วยและพื้นที่ด้านบนของถ้วยถูกตั้งค่าเป็นตัวรองรับตามที่แสดงในรูปที่ 3.6 การเบี่ยงเบนแนวตั้งตามแนวการวัดจากจุด 1 ไปจุด 2 ดังแสดงในรูป 3.7 จะเป็นภาพสำหรับการวิเคราะห์



รูปที่ 3.6 ภาระที่กระทำและเงื่อนไขขอบเขต



รูปที่ 3.7 เส้นทางที่จะวัดระยะยวบตัวในแนวตั้ง

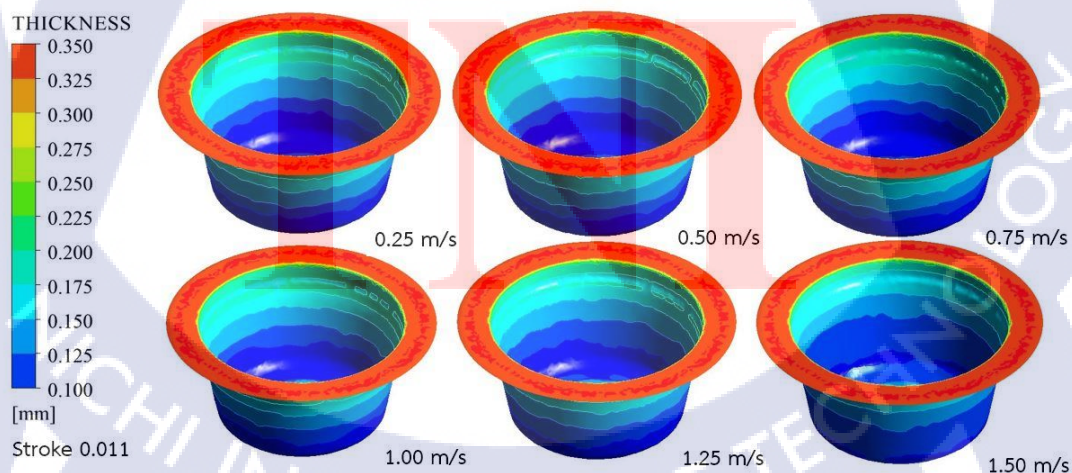
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

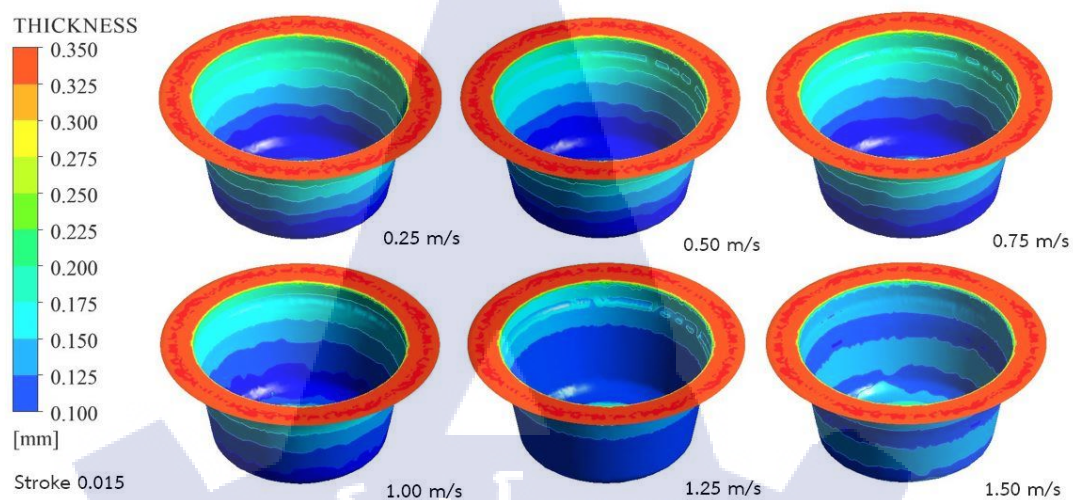
ในบทนี้แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นสองส่วน โดยส่วนแรกจะเกี่ยวกับพารามิเตอร์ในการผลิตที่มีผลต่อการกระจายความหนาของถ้วย โดยกำหนดให้ความหนาของแผ่นพลาสติกมีค่าเป็น 0.35 มม. ในขณะที่ส่วนที่สองจะเป็นการวิเคราะห์การเสียรูปของถ้วยที่มีความหนาต่าง ๆ

4.1 ผลของความเร็วและระยะกดของปลั๊กต่อการกระจายความหนาของถ้วย

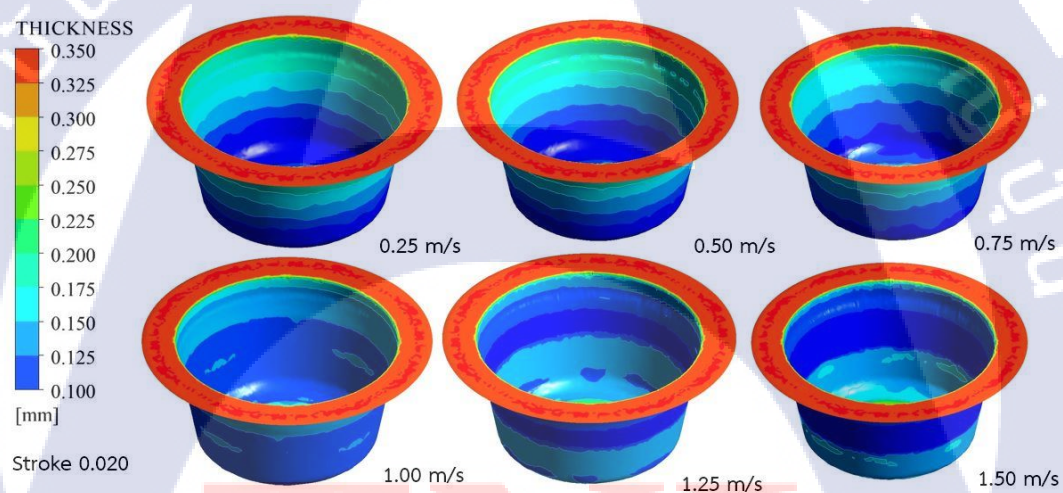
เมื่อให้ระยะกดของปลั๊กมีค่าคงที่แล้วเปรียบเทียบความเร็วของหัวกดที่ค่าต่าง ๆ กรณีแรกที่ระยะกดของปลั๊กเป็น 11 มม. ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ความหนาที่ก้นถ้วยจะน้อยกว่าความหนาที่บริเวณผนังด้านข้างอย่างชัดเจน ไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน กรณีที่สองที่ระยะกดของปลั๊กเป็น 15 มม. ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งพบว่า ที่ความเร็วปลั๊กเป็น 1.5 เมตรต่อวินาที การกระจายความหนาจะค่อนข้างดี บริเวณที่ผนังบางประมาณ 0.1 มม. จะอยู่ที่ก้นถ้วย แต่มีบริเวณไม่มากเมื่อเทียบกับของความเร็วกว่าค่าอื่น ๆ เมื่อพิจารณารูปที่ 4.3 และ 4.4 ซึ่งระยะกดของปลั๊กเป็น 20 และ 30 มม. ตามลำดับ จะพบการกระจายของความหนาที่ค่อนข้างดี เมื่อความเร็วปลั๊กเป็น 1.25 และ 0.75 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ ในขณะที่เมื่อให้ระยะกดของปลั๊กเป็น 40 มม. ดังแสดงในรูปที่ 4.5 จะพบการกระจายของถ้วยที่น่าจะพอใช้ได้ และความหนาประมาณ 0.1 มม. มีพื้นที่ไม่มากนัก คือ ที่ความเร็วปลั๊กเป็น 0.5 และ 0.75 เมตรต่อวินาที ซึ่งจำเป็นต้องนำไปวิเคราะห์ความแข็งแรงและความแข็งแรงในการใช้งานต่อไป เพื่อให้มั่นใจว่าสามารถใช้งานได้จริง ๆ



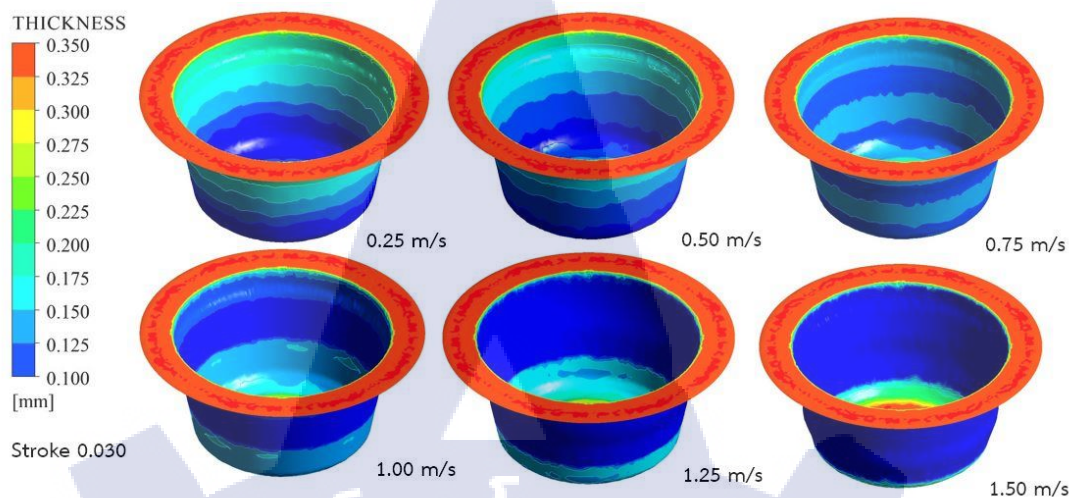
รูปที่ 4.1 การกระจายความหนาของถ้วยที่ความเร็วปลั๊กต่าง ๆ กันเมื่อระยะกดของปลั๊กเป็น 11 มม.



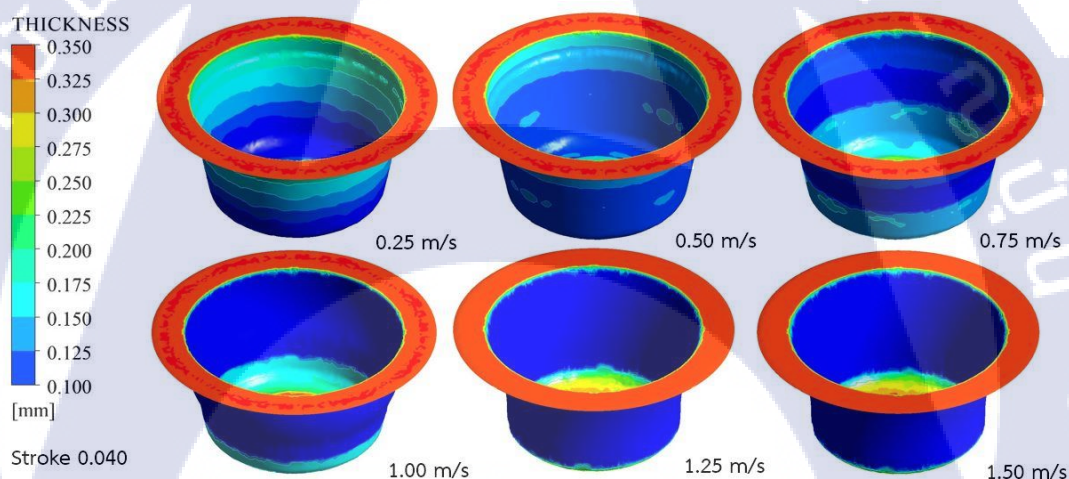
รูปที่ 4.2 การกระจายความหนาของถั่วที่ความเร็วปลักต่าง ๆ กันเมื่อระยะกดของปลักเป็น 15 มม.



รูปที่ 4.3 การกระจายความหนาของถั่วที่ความเร็วปลักต่าง ๆ กันเมื่อระยะกดของปลักเป็น 20 มม.



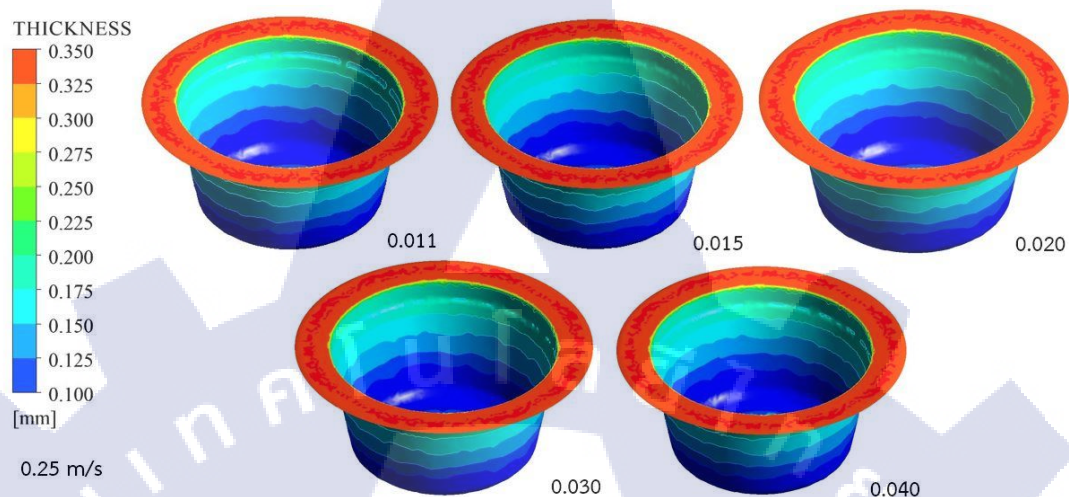
รูปที่ 4.4 การกระจายความหนาของถ้วยที่ความเร็วปลั๊กต่าง ๆ กันเมื่อระยะกดของปลั๊กเป็น 30 มม.



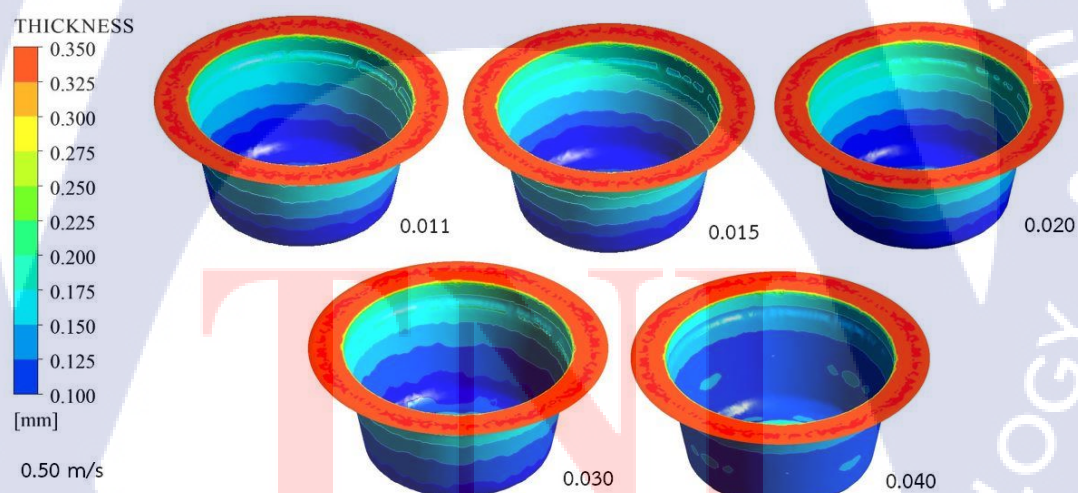
รูปที่ 4.5 การกระจายความหนาของถ้วยที่ความเร็วปลั๊กต่าง ๆ กันเมื่อระยะกดของปลั๊กเป็น 40 มม.

สังเกตเพิ่มเติมจากรูปที่ 4.5 ได้ว่า ที่ความเร็วตั้งแต่ 1 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป ผนังด้านข้างของถ้วยที่ติดกับขอบถ้วยด้านบนจะค่อนข้างบางเมื่อเทียบกับบริเวณอื่น เป็นไปได้ว่า ความเร็วของปลั๊กน่าจะเป็นสาเหตุของการกระจายความหนาแบบนี้ เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ได้ชัดเจนขึ้น จึงจำเป็นต้องจัดกลุ่มผลการทดลองโดยให้ความเร็วของปลั๊กคงที่โดยมีระยะกดของปลั๊กแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.6 – 4.11 ซึ่งจะได้ชัดเจนจากรูปที่ 4.10 และ 4.11 ว่า ถ้าให้ความเร็วและระยะกดของปลั๊กมีค่าสูง เช่น ความเร็วตั้งแต่ 1 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป และระยะกดของปลั๊กเป็น 30 และ 40

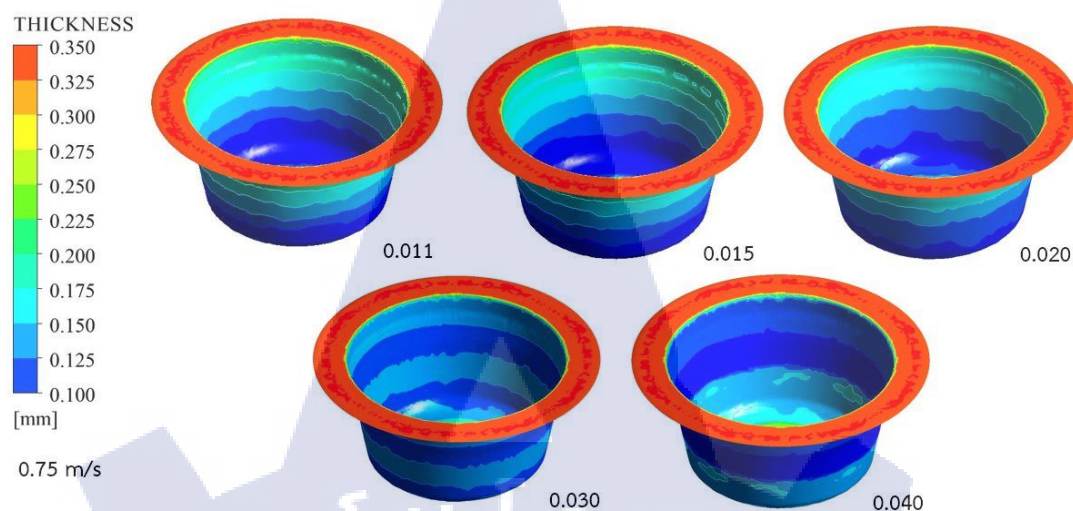
มม. ผนังด้านข้างของถ้วยจะค่อนข้างบาง และการกระจายความหนาไม่ค่อยดี ดังนั้นสามารถใช้เป็น
ข้อแนะนำได้ว่า ในการผลิตถ้วยไม่ควรใช้ค่าความเร็วและระยะกดของปลั๊กสูงทั้งคู่



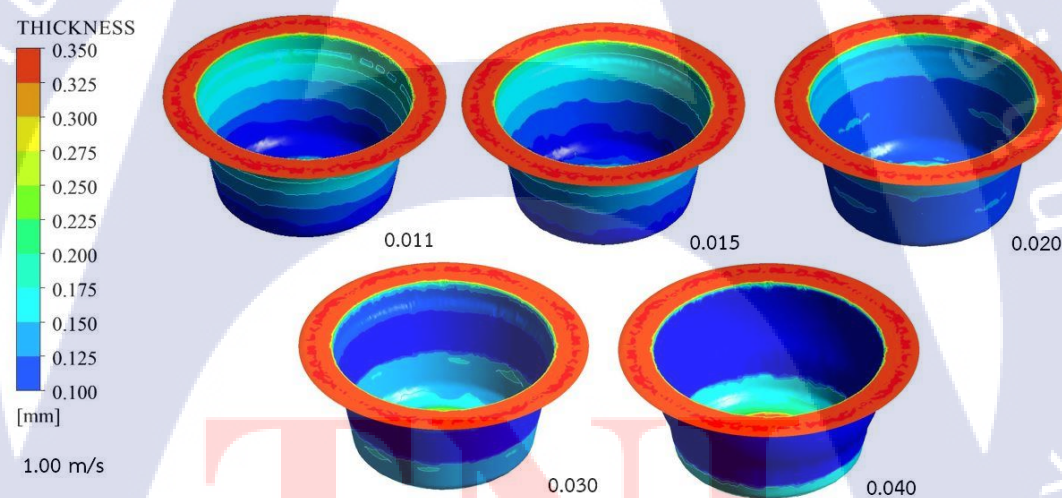
รูปที่ 4.6 การกระจายความหนาของถ้วยที่ระยะกดของปลั๊กต่าง ๆ กันเมื่อความเร็วของปลั๊กเป็น
0.25 เมตรต่อวินาที



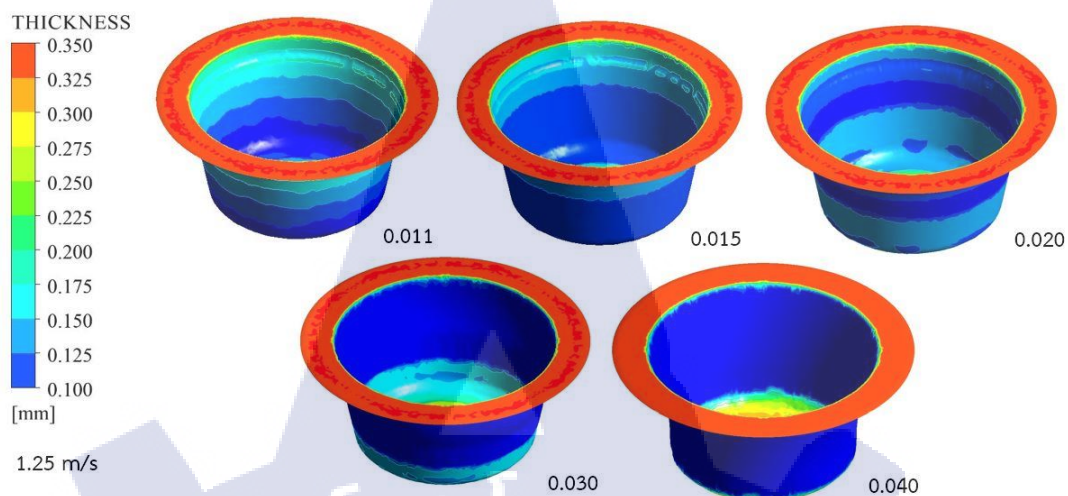
รูปที่ 4.7 การกระจายความหนาของถ้วยที่ระยะกดของปลั๊กต่าง ๆ กันเมื่อความเร็วของปลั๊กเป็น
0.5 เมตรต่อวินาที



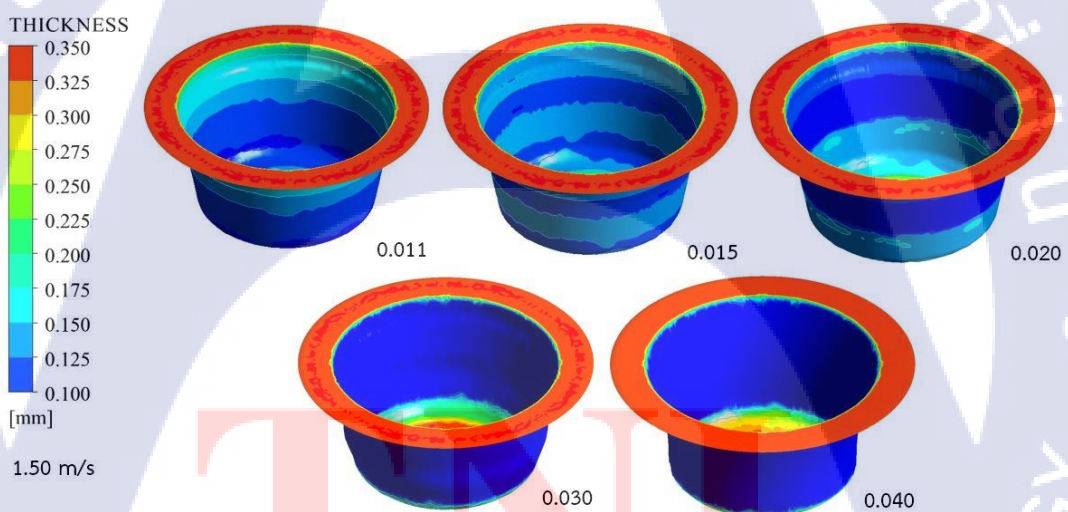
รูปที่ 4.8 การกระจายความหนาของถ้วยที่ระยะกดของปลั๊กต่าง ๆ กันเมื่อความเร็วของปลั๊กเป็น 0.75 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.9 การกระจายความหนาของถ้วยที่ระยะกดของปลั๊กต่าง ๆ กันเมื่อความเร็วของปลั๊กเป็น 1 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.10 การกระจายความหนาของถ้วยที่ระยะกตของปลั๊กต่าง ๆ กันเมื่อความเร็วของปลั๊กเป็น 1.25 เมตรต่อวินาที



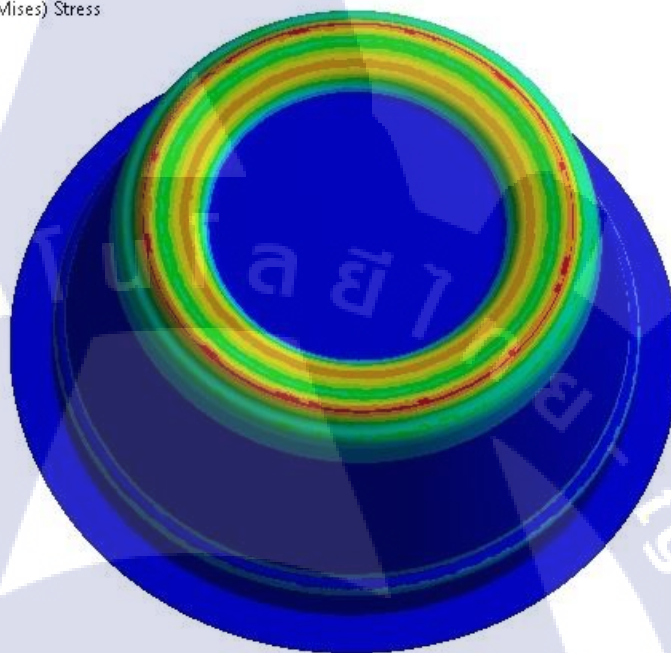
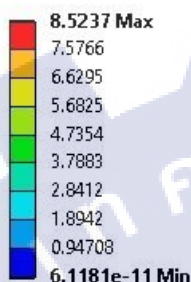
รูปที่ 4.11 การกระจายความหนาของถ้วยที่ระยะกตของปลั๊กต่าง ๆ กันเมื่อความเร็วของปลั๊กเป็น 1.5 เมตรต่อวินาที

4.2 ความหนาของถ้วยต่อความแข็งแรงและการเสียรูปเมื่อรับภาระกต

จากผลการคำนวณโดยโปรแกรมแอนซิส (ANSYS) ที่ความหนาของถ้วยเป็น 0.2 0.25 0.3 และ 0.35 มม. และให้ภาระกตกระทำที่ก้นถ้วยตามแนวแกน ในส่วนของความแข็งแรง ความเค้นวอนมิสส์สูงสุด (Maximum von Mises Stress) มีค่าเพียง 13.5 MPa ซึ่งเกิดขึ้นกับถ้วยที่มีผนังหนา

0.2 มม. ในขณะที่ความเค้นครากมีค่า 24 MPa ซึ่งจะเห็นได้ว่า หากไม่เกิดการกระแทกในระหว่างการใช้งาน ถ้วยพลาสติกไม่น่าจะเสียหายในลักษณะของการยุบได้ รูปที่ 4.12 แสดงความเค้นวอนมิสของถ้วยที่มีความหนา 0.25 มม. โดยความเค้นวอนมิสสูงสุดมีค่าประมาณ 8.52 MPa

Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa

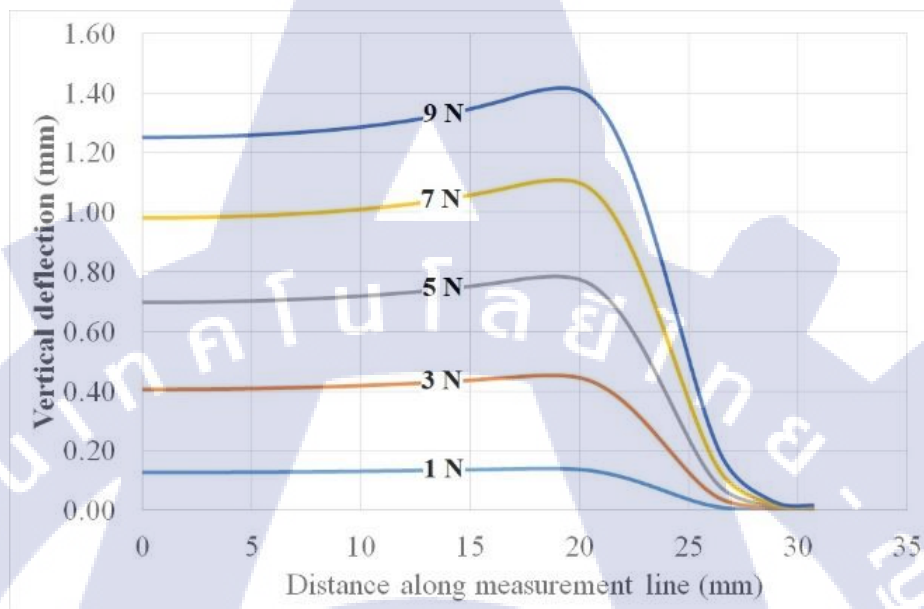


รูปที่ 4.12 ความเค้นวอนมิสของถ้วยหนา 0.25 มม.

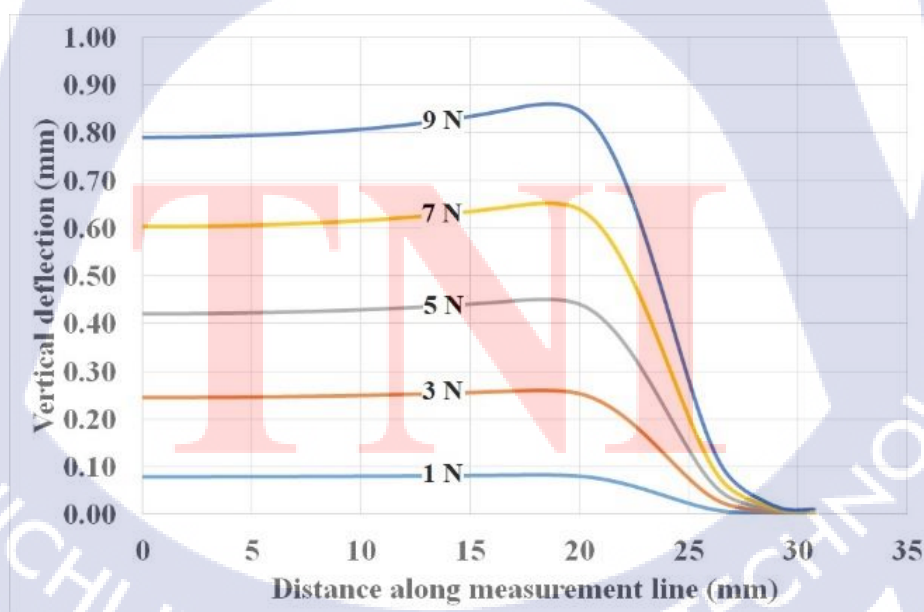
รูปที่ 4.13 – 4.16 แสดงระยะยุบตัวในแนวดิ่งหรือในแนวแกนของถ้วย โดยวัดตามแนวเส้นที่กั้นถ้วยจากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 (ดังรูปที่ 3.7) จากผลการคำนวณจะเห็นว่า ระยะยุบตัวที่บริเวณก้นถ้วยจัดเป็นการเสียรูปมาก (Large Deformation) เนื่องจากระยะยุบตัวมีค่ามากกว่าหนึ่งในสิบเท่าของความหนาถ้วย เช่น ถ้วยหนา 0.35 มม. เมื่อรับภาระ 1 N แล้วมีระยะยุบตัวมากกว่า 0.035 มม. ซึ่งเมื่อเกิดกรณีเช่นนี้ ในการคำนวณด้วยโปรแกรมแอนซิสต้องเปิดใช้งานตัวเลือก “Large Deflection” เพื่อให้โปรแกรมรวมผลการคำนวณในส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้นเข้าไปด้วย ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่า ถ้วยที่มีความหนาของผนังน้อยกว่าจะเสียรูปมากกว่า ซึ่งเป็นไปตามความคาดหมายในส่วนของความไม่เชิงเส้นที่สังเกตได้จากความห่างของเส้นกราฟของแต่ละภาระ น่าจะเกิดจากรูปร่างของถ้วยที่มีลักษณะเป็นเปลือก (Shells)

จากผลการคำนวณเหล่านี้ สามารถนำไปเป็นข้อเสนอแนะให้กับโรงงานผู้ผลิตถ้วยให้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ เพราะจะสามารถลดความหนาเฉลี่ยของถ้วยให้มี

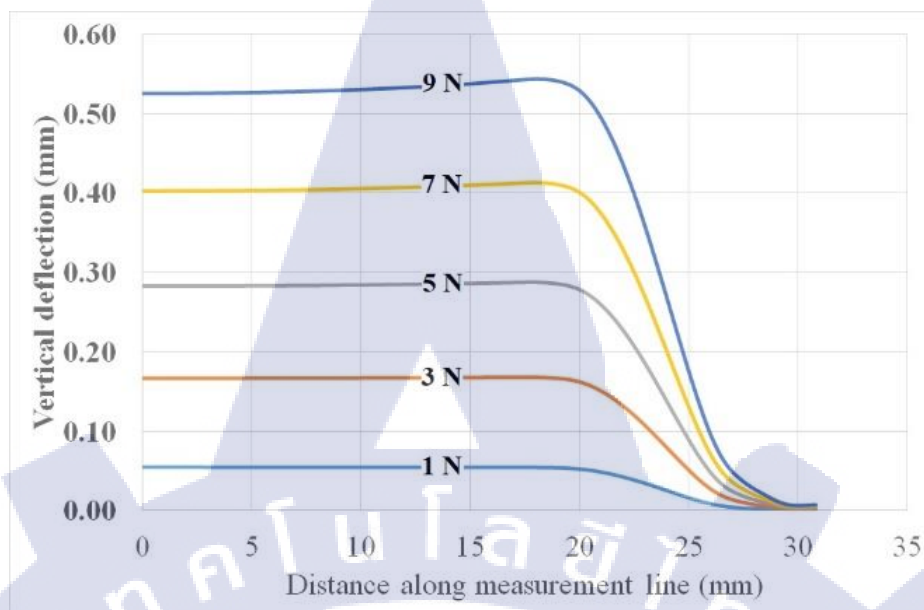
ค่าน้อยที่สุดได้ ยกตัวอย่างในกรณีศึกษา นี้ ทางบริษัทผู้ผลิตด้วยกำหนดความหนาเฉลี่ยของถ้วยเป็น 0.35 มม. ซึ่งถ้าพิจารณาผลการคำนวณที่ปรากฏ เราสามารถเลือกใช้งานถ้วยที่มีความหนาเฉลี่ยเป็น 0.3 มม.ได้ ถ้าระยะยุบตัวสูงสุดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้



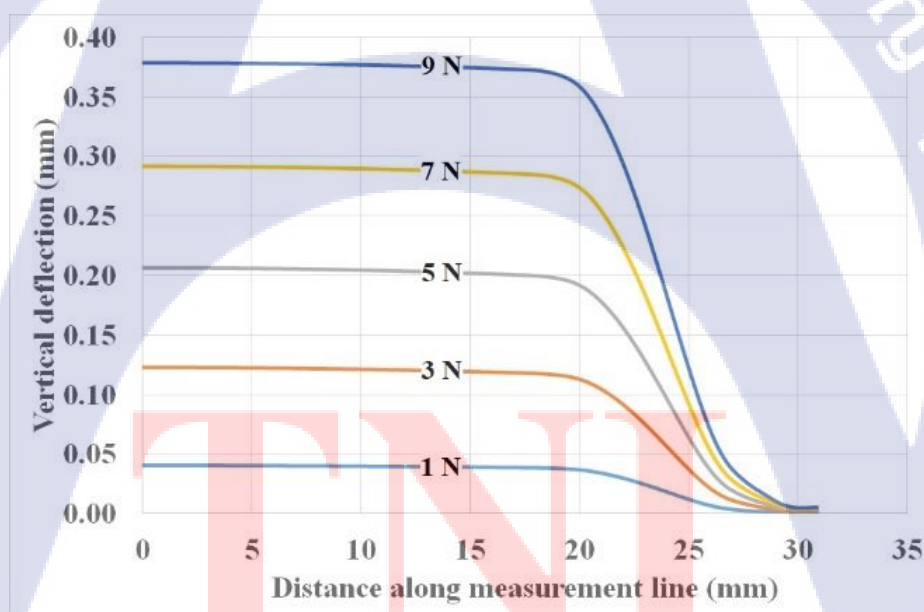
รูปที่ 4.13 ระยะโก่งของถ้วยหนา 0.2 มม.



รูปที่ 4.14 ระยะโก่งของถ้วยหนา 0.25 มม.



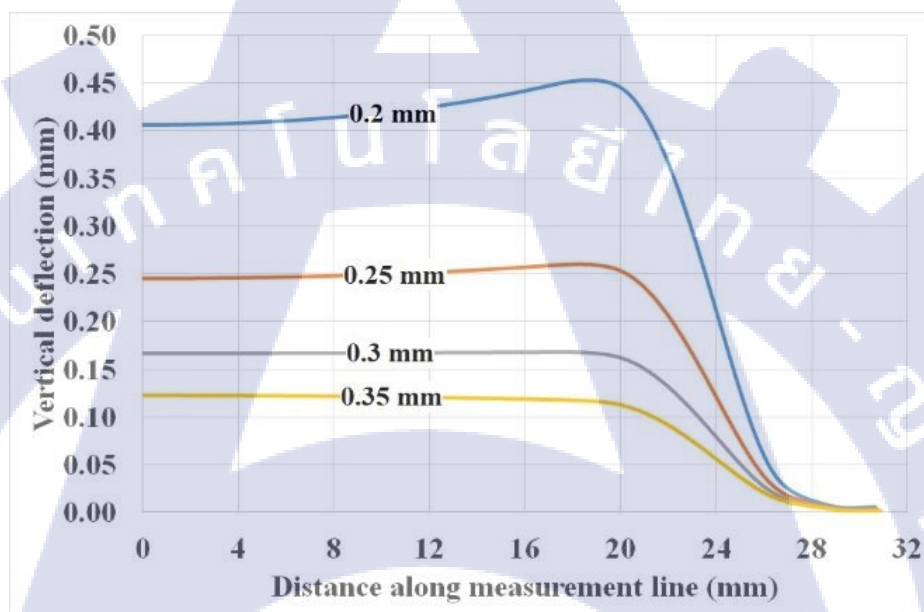
รูปที่ 4.15 ระยะโค้งของถั่วหนา 0.3 มม.



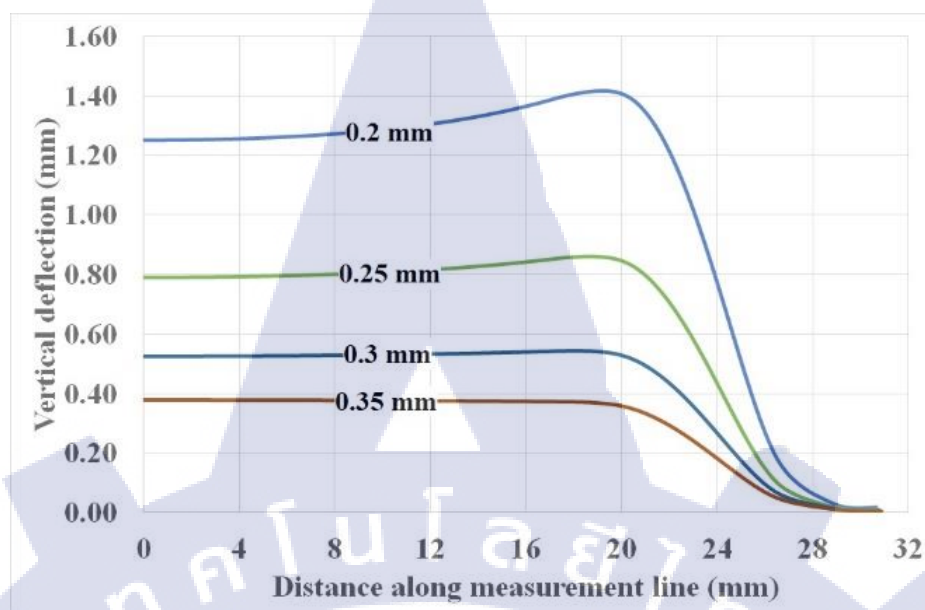
รูปที่ 4.16 ระยะโค้งของถั่วหนา 0.35 มม.

ผลของความหนาของถั่วที่ภาระคงที่ แสดงดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 ซึ่งเป็นผลการคำนวณ เมื่อภาระเป็น 3 N และ 9 N ตามลำดับ อนึ่งหมายเหตุไว้ว่า เนื่องจากผลการคำนวณในทุกกรณีมี ลักษณะแนวโน้มเหมือนกันไม่ว่าขนาดของภาระจะเป็นเท่าไร จึงเลือกมาเป็นตัวอย่างเพียงสองกรณี

เท่านั้น ซึ่งพบว่า เมื่อความหนาของผนังถ้วยเพิ่มจาก 0.2 มม. ไปเป็น 0.25 มม. ความแข็งแรงของถ้วยเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่ทว่า เมื่อเพิ่มความหนาของถ้วยจาก 0.25 มม. ไปเป็น 0.3 มม. และจาก 0.3 มม. ไปเป็น 0.35 มม. การเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงของถ้วยกลับค่อย ๆ น้อยลง ดังนั้น ในกรณีนี้การเลือกใช้งานถ้วยที่มีความหนา 0.35 มม. อาจไม่คุ้มค่ากับปริมาณวัสดุและพลังงานที่ใช้ในการผลิตเมื่อเทียบกับความแข็งแรงที่ได้ สอดคล้องกับผลการคำนวณความเค้นว่า ทางบริษัทอาจลดความหนาเฉลี่ยของถ้วยลงเป็น 0.3 มม.ก็สามารถใช้งานได้



รูปที่ 4.17 ระยะโก่งของถ้วยขนาดต่าง ๆ ที่รับแรงขนาด 3 N



รูปที่ 4.18 ระยะโค้งของถ้วยขนาดต่าง ๆ ที่รับแรงขนาด 9 N

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการจำลองการขึ้นรูปแผ่นพลาสติกด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง โดยพิจารณาความเร็วและระยะกดของปลั๊กช่วยไปพร้อม ๆ กัน ทำให้เห็นถึงความเชื่อมโยงของพารามิเตอร์ทั้งสอง ในส่วนของผลกระทบต่อ การกระจายความหนาของผนังถ้วยนั้น สามารถระบุได้ว่า หากกำหนดพารามิเตอร์ทั้งสองให้มีค่าสูงพร้อม ๆ กัน การกระจายความหนาของผนังถ้วยจะไม่ดี และจะเกิดส่วนที่บางมากที่บริเวณก้นถ้วย หรือบริเวณผนังด้านข้างถ้วยเป็นบริเวณกว้าง

ในส่วนที่สองได้พิจารณาผลของความหนาถ้วยที่แตกต่างกัน ต่อความแข็งแรงและความแข็งแรงของถ้วยเพื่อเป็นแนวทางที่จะใช้เลือกค่าความหนาที่เหมาะสมของผนังที่ตรงกับความต้องการใช้งานจริง นอกจากความแข็งแรงและความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นตามความหนาที่เพิ่มขึ้นแล้ว ผลการคำนวณยังแสดงให้เห็นว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงจะลดลงเมื่อเพิ่มความหนา การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงวิธีการปรับปรุงการออกแบบผลิตภัณฑ์ก่อนกระบวนการผลิตด้วยการจำลองความแข็งแรง และความแข็งแรงของถ้วยพลาสติกที่มีความหนาของผนังแตกต่างกัน ซึ่งในกรณีนี้ความแข็งแรงของถ้วยหรือระยะยุบตัวควรเป็นพารามิเตอร์หลักที่จะต้องพิจารณาแทนความเค้นสูงสุดหรือความเค้นวอนมิส

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้ ซอฟต์แวร์ Ansys Polyflow ช่วยให้การทดลองเชิงตัวเลขได้ ในช่วงของค่าการทดลองที่สนใจสำหรับการสร้างแบบจำลองในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง โดยโปรแกรมสามารถกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของปลั๊กช่วย รูปแบบการเคลื่อนที่ของปลั๊กที่สามารถกำหนดความเร็วและระยะทางที่กดได้ในหลาย ๆ รูปแบบฟังก์ชัน ช่วยให้สามารถวิเคราะห์การกระจายความหนาของผนังที่ตีมากขึ้นภายใต้ข้อบังคับและปัจจัยที่กำหนด และน่าจะช่วยปรับปรุงกระบวนการให้ง่ายขึ้นได้ในกรณีที่รูปทรงของถ้วยมีลักษณะทางเรขาคณิตที่ซับซ้อน การใช้เทคโนโลยีของการขึ้นรูปสูญญากาศ และการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายและลดเวลาในการออกแบบผลิตภัณฑ์เทอร์โมฟอร์มมิ่งแบบผนังบางได้ อีกทั้งการใช้โปรแกรม Ansys Polyflow ยังมีส่วนช่วยสนับสนุนขั้นตอนการผลิตในทางเทคนิค เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการในช่วงของการกระจายความหนาของผนังในขอบเขตที่แคบลง ในขณะที่ข้อจำกัดในการออกแบบ หรือข้อจำกัดในกระบวนการผลิตที่อาจเพิ่มขึ้น

ในส่วนของปัญหาผู้วิจัยพบว่า โปรแกรม ANSYS PolyFlow เป็นโปรแกรมที่ใช้งานค่อนข้างยาก การอินเทอร์เฟซกับผู้ใช้ยังต่ำกว่ามาตรฐานโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์อื่น ๆ อีกทั้งคู่มือประกอบการใช้งานก็ยังทำความเข้าใจได้ยาก ทำให้เสียเวลามากในการศึกษาและฝึกฝนการใช้โปรแกรมเพื่อให้มั่นใจว่าจะสามารถคำนวณออกมาได้อย่างถูกต้อง



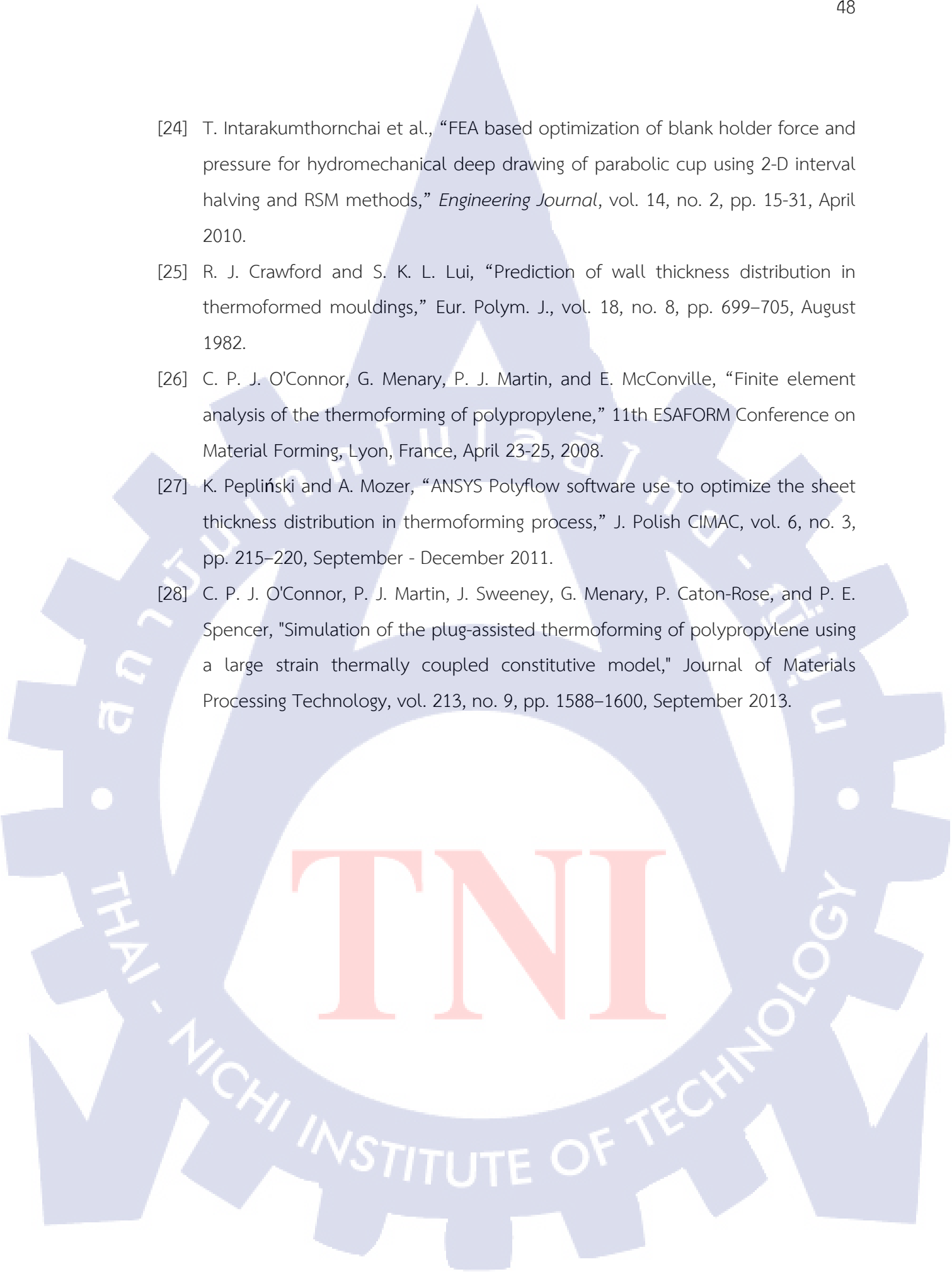
บรรณานุกรม

TNI

บรรณานุกรม

- [1] สถาบันพลาสติก, “บรรจุภัณฑ์พลาสติกกับทิศทางในอุตสาหกรรมอาหาร,” *Plastic Foresight*, ปีที่ 3, ฉบับที่ 1, หน้า 18-30, สิงหาคม – กันยายน 2555.
- [2] W. O. Leite, et al., “Vacuum thermoforming process: an approach to modeling and optimization using artificial neural networks,” *Polymers*, vol.10, no.143, pp.2, February 2018.
- [3] S. A. Ashter, *Thermoforming of Single and Multilayer Laminates: Plastic Films Technologies, Testing and Application*, Chennai: Elsevier, 2014.
- [4] BCC Research, *Thermoformed Plastics: Global Markets*, Massachusetts: BCC Research Plastic Report, 2016.
- [5] Plastic Technology, “*Thermoforming*,” Plastic Technology [Online]. Available: <https://www.ptonline.com/knowledgecenter/plastics-training/Thin-Sheet-Thermoforming>. [Accessed: January 29, 2018].
- [6] J. L. Throne, *Understanding Thermoforming*, Munich: Carl Hanser Verlag, 2008.
- [7] DX Plastiques, “*Thermoforming under Pressure*,” dxplastiques.com [Online]. Available: http://www.dxplastiques.com/en/thermoforming_under_pressure.php. [Accessed: January 29, 2018].
- [8] D. Kopeliovich, “*Thermoforming*,” Substances & Technology [online]. Available: <http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=thermoforming>. [Accessed: January 29, 2018].
- [9] S. Engelmann, *Advance Thermoforming: Methods, Machines and Material, Applications and Automation*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2012.
- [10] Ergos, “*Twin Sheet Forming*,” cannonergos.com [Online]. Available: <http://www.cannonergos.com/en/technologies/Thermoforming/Twin-Sheet-Forming.html#>. [Accessed: January 29, 2018].
- [11] วิโรจน์ เตชะวิญญูธรรม, *พลาสติกและกระบวนการขึ้นรูป: Plastic and Processing*, กรุงเทพฯ: ศูนย์ผลิตตำราเรียนมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ม.ป.ป.
- [12] วิโรจน์ เตชะวิญญูธรรม, *วิศวกรรมการขึ้นรูปพลาสติก*, กรุงเทพฯ: ศูนย์ผลิตตำราเรียนมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2556.

- [13] P. W. Klein, *Fundamentals of Plastics Thermoforming*, California: Morgan & Claypool Publishers, 2009.
- [14] P. W. Klein, "Plastic thermoforming tool design: plug vs cavity molds," *The Technology Interface*, vol.7, no.1, pp.1-10, Fall 2006.
- [15] D. L. Logan, *A First Course in the Finite Element Method*, Stamford: Cengage Learning, 2011.
- [16] ปราโมทย์ เดชะอำไพ, *ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม*, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์, 2555.
- [17] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์, *การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง Design and Analysis of Experiment*, กรุงเทพฯ: ท้อป, 2551.
- [18] ประเสริฐ ชุมปัญญา และชลิดา ชาญวิจิตร, "การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปด้วยระบบสูญญากาศสำหรับพลาสติกชนิดโพลิไวนิลคลอไรด์," *RMUTP Research Journal*, 2554, ปีที่ 5, ฉบับที่ 2, หน้า 33-45, กันยายน 2554.
- [19] จักรพันธ์ ต้นศรีวงษ์, "การศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนสำหรับเครื่องขึ้นรูปแบบสูญญากาศโดยวิธีการออกแบบการทดลอง," วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ, 2553.
- [20] ตติยา กองกิจ และคณะ, "โครงการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ไอศกรีม," *เอกสารรวบรวมผลงานโครงการที่ได้รับทุน IRPUS ประจำปี 2547*, กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2547.
- [21] ประเสริฐ ชุมปัญญา, "ศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปพลาสติกด้วยความร้อนระบบสูญญากาศ," สารนิพนธ์ วศ.ม. (สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ, 2552.
- [22] ภักจีรา พิงสุข และ วิชัย รุ่งเจริญอนันต์, "การลดสัดส่วนในกระบวนการฉีดพลาสติก โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง กรณีศึกษาโรงงานผลิตเครื่องซักผ้า," *การประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี 2554, IE Network 2011*, 20-21 ตุลาคม 2554, หน้า 589-593.
- [23] วิภาส นิตวิรภัทร และ มนต์ศักดิ์ พิมสาร, "การวิเคราะห์แรงโค้งงอของขวดน้ำพลาสติก PET," *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, ME-NETT 23*, 4-7 พฤศจิกายน 2552.

- 
- [24] T. Intarakumthornchai et al., "FEA based optimization of blank holder force and pressure for hydromechanical deep drawing of parabolic cup using 2-D interval halving and RSM methods," *Engineering Journal*, vol. 14, no. 2, pp. 15-31, April 2010.
- [25] R. J. Crawford and S. K. L. Lui, "Prediction of wall thickness distribution in thermoformed mouldings," *Eur. Polym. J.*, vol. 18, no. 8, pp. 699-705, August 1982.
- [26] C. P. J. O'Connor, G. Menary, P. J. Martin, and E. McConville, "Finite element analysis of the thermoforming of polypropylene," 11th ESAFORM Conference on Material Forming, Lyon, France, April 23-25, 2008.
- [27] K. Pepliński and A. Mozer, "ANSYS Polyflow software use to optimize the sheet thickness distribution in thermoforming process," *J. Polish CIMAC*, vol. 6, no. 3, pp. 215-220, September - December 2011.
- [28] C. P. J. O'Connor, P. J. Martin, J. Sweeney, G. Menary, P. Caton-Rose, and P. E. Spencer, "Simulation of the plug-assisted thermoforming of polypropylene using a large strain thermally coupled constitutive model," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, no. 9, pp. 1588-1600, September 2013.