



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

ปริญญา

วิศวกรรมวัสดุ

วิศวกรรมวัสดุ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการ
เทอร์โมฟอร์มมิ่ง

Analysis of Wall Thickness Distribution in Thermoformed Parts

นามผู้วิจัย นายธีรพล กิตติกาญจนรักษ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์สมเจตน์ พ็ชรพันธ์, Dr.-Ing.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์ยวิศย์ ไล่เจริญรัตน์, วศ.ม.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงาน
ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

Analysis of Wall Thickness Distribution
in Thermoformed Parts

โดย

นายธีรพล กิตติกาญจนรักษ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

พ.ศ. 2555

ธีรพล กิตติกาญจนรักษ์ 2555: การวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาแน่นของชิ้นงาน
ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมวัสดุ) สาขาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
หลัก: อาจารย์สมเจตน์ พัทธพันธ์, Dr.-Ing. 92 หน้า

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของชนิดแม่พิมพ์ และปัจจัยในกระบวนการผลิต ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิ
แผ่นพลาสติกและแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป ที่มีต่อการกระจายตัวความหนาแน่น และความเค้นตกค้างภายใน
ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้
กับผลการวิเคราะห์ซึ่งได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมกรรม ซึ่งได้แก่ โปรแกรม T-SIM
และ MSC.Marc จากผลการทดลองในกรณีการขึ้นรูปชิ้นงาน โดยใช้แม่พิมพ์แบบคาวิตี พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิ
ของแผ่นพลาสติก ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของชิ้นงาน ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์
ส่งผลให้ชิ้นงานมีความหนาที่บริเวณผนังเพิ่มมากขึ้น และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของ
ชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบปลั๊ก พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นพลาสติกและแม่พิมพ์ ส่งผลให้ชิ้นงาน
มีความหนาที่บริเวณผนังลดลง จากผลการวิเคราะห์ที่ได้จาก โปรแกรมคอมพิวเตอร์ แสดงให้เห็นว่าโปรแกรม
T-SIM สามารถวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาแน่น และความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานเทอร์โมฟอร์มมิ่ง
ได้อย่างแม่นยำ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาการออกแบบแม่พิมพ์ รวมถึงการกำหนดปัจจัยใน
กระบวนการผลิตที่เหมาะสมได้

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Teerapol Kittikanjanaruk 2012: Analysis of Wall Thickness Distribution in Thermoformed Parts. Master of Engineering (Materials Engineering), Major Field: Materials Engineering, Department of Materials Engineering. Thesis Advisor: Mr. Somjate Patcharaphun, Dr.-Ing. 92 pages.

The focus of this study was to primarily determine the influence of molding parameters such as types of mold, sheet and mold temperatures on the wall thickness distribution of thermoformed parts. Furthermore, the experimental results with simple mold geometry as well as with more complicated parts were also extensively verified against the analytical results obtained from Computer Aided Engineering programs including T-SIM and MSC.Marc. The experimental results of thermoformed part produced by cavity mold indicated that an increase in sheet temperature did not lead to significant changes of wall thickness, while the increase of mold temperature tended to increase the wall thickness. In the case of plug mold, it can be seen that the increasing sheet and mold temperatures decreased the wall thickness of thermoformed part. Since numerical results were in good agreement with the experimental ones, so it can be suggested that the simulation program can be used as a valuable tool for the prediction of wall thickness during thermoforming process.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สมเจตน์ พชรพันธ์ ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และกราบขอบพระคุณ ดร.ณรงค์ชัย โอเจริญ ผู้ทรงคุณวุฒิ และ ดร.ราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจ ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำในด้านต่างๆ

ทางผู้วิจัยขอขอบคุณโครงการสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมไทย (Industrial Technology Assistance Program, iTAP) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และสำนักงานโครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (TRF-Master Research Grants, TRF-MAG) สัญญาเลขที่ MRG545E074 สำหรับทุนสนับสนุนในการทำวิจัย นอกจากนี้ทางผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัทวิง ฟง แพ็คเกจจิ้ง จำกัด สำหรับทุนสนับสนุนทั้งในส่วนของค่าวัสดุ และแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณวัชรพงษ์ ชูแก้ว คุณรวิวัฒน์ รักสัง และ คุณธนวัฒน์ ตั้งเขื่อนขันธุ์ นักวิจัยของกลุ่มวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตพลาสติกและยาง (Plastic and Rubber Processing Research Group, PaRP-Group) รวมถึงเพื่อนๆ และน้องๆ ในกลุ่มที่ให้ความช่วยเหลือทุกๆ ด้านจนงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ที่ได้อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยตลอดมา

ธีรพล กิตติกาญจนรักษ์

พฤษภาคม 2555

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	26
อุปกรณ์	26
วิธีการ	30
ผลและวิจารณ์	47
สรุปและข้อเสนอแนะ	63
สรุป	63
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	64
ภาคผนวก	67
ภาคผนวก ก แบบแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง	68
ภาคผนวก ข ผลการตรวจวัดความหนาผนังของชิ้นงาน	76
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	92

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	อัตราส่วนดิ่งยึดของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ	14
2	สมบัติในด้านต่างๆ ของ PS และ HIPS	16
3	สมบัติในด้านต่างๆของ PET A-PET และ C-PET	18
4	ค่าตัวแปร m สำหรับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบต่างๆ	25
5	เงื่อนไขในการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบจากแผ่นพอลิस्टาไทริน	33
6	เงื่อนไขในการขึ้นรูปภาชนะบรรจุภัณฑ์อาหาร จากแผ่นพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต	34
7	เงื่อนไขในการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง	43

สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง	1
2	ข้อบกพร่องบนชิ้นงานเทอร์โมฟอร์มมิ่งที่เกิดขึ้น (ก) ชิ้นงานที่เกิดรอยพับ และ (ข) การกระจายตัวความหนาผนังที่ไม่สม่ำเสมอ	2
3	แผ่นเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง	4
4	ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องอัดรีด	5
5	หัวขึ้นรูปแผ่นชีทหรือฟิล์ม (ก) แบบตัวที่ และ (ข) แบบโคลซแซงเกอร์	6
6	กระบวนการอัดรีดขึ้นรูปแผ่นชีทหรือฟิล์ม	7
7	กระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง โดยใช้แม่พิมพ์แบบคาวิตี้ (ก) ขั้นตอนการให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติก และ (ข) ขั้นตอนการขึ้นรูป	8
8	กระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง โดยใช้แม่พิมพ์แบบปลั๊ก (ก) ขั้นตอนการให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติก และ (ข) ขั้นตอนการขึ้นรูป	9
9	กระบวนการขึ้นรูปโดยใช้ปลั๊กช่วย (ก) ขั้นตอนการให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติก และ (ข) ขั้นตอนการขึ้นรูป	10
10	กระบวนการขึ้นรูปแบบดึงย้อนกลับ (ก) ขั้นตอนการให้ความร้อนและแรงดันเป่า และ (ข) ขั้นตอนการขึ้นรูปโดยใช้ปลั๊กช่วย	11
11	กระบวนการขึ้นรูปแบบดีคกลับ (ก) ขั้นตอนการให้ความร้อน (ข) ขั้นตอนการใช้ปลั๊กช่วยในการขึ้นรูป และ (ค) ขั้นตอนการใช้แรงสุญญากาศในการขึ้นรูป	12
12	กระบวนการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ประกบ (ก) ขั้นตอนการให้ความร้อน (ข) ขั้นตอนในการขึ้นรูป	13
13	โครงสร้างของพอลิสไตรีน (ก) ที่ใช้งานโดยทั่วไป และ (ข) ชนิดทนแรงกระแทก	16
14	โครงสร้างของพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต	17
15	เอลิเมนต์ชนิดต่างๆ	19
16	สมบัติการยืดหยุ่นเชิงเส้นและการยืดหยุ่นไม่เชิงเส้น	23
17	เครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่ง	26
18	แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลม (ก) แบบคาวิตี้ และ (ข) แบบปลั๊ก	27
19	แม่พิมพ์ทรงกระบอกสี่เหลี่ยม (ก) แบบคาวิตี้ และ (ข) แบบปลั๊ก	27

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	แม่พิมพ์ที่มีความซับซ้อน	27
21	เครื่องทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงที่อุณหภูมิสูง	28
22	เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบมือถือ	28
23	เครื่องดีฟเฟอร์เนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์	29
24	เครื่องวิเคราะห์ความเค้นตกค้าง	29
25	ขั้นตอนการทำวิจัย	30
26	ขั้นตอนการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบมือถือ	31
27	การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ (ก) ขั้นตอนการยึดจับแผ่นพลาสติก (ข) ขั้นตอนการให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติก (ค) การให้แรงดันสูญญากาศ และแรงทางกล และ (ง) การทำให้ชิ้นงานเย็นตัว	32
28	การติดตั้งแท่งให้ความร้อน	33
29	การขึ้นรูปชิ้นงาน โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีความซับซ้อน	34
30	แบบจำลองแม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (ก) แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบคาวิตี (ข) แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบปลั๊ก (ค) แม่พิมพ์ทรงกระบอกสี่เหลี่ยมแบบคาวิตี และ (ง) แม่พิมพ์ทรงกระบอกสี่เหลี่ยมแบบปลั๊ก	35
31	การสร้างแบบจำลองพื้นผิวของแผ่นพอลิไธรีน	36
32	แบบจำลองของแผ่นพลาสติก (ก) ก่อนสร้างเอลิเมนต์ และ (ข) ภายหลังจากสร้างเอลิเมนต์บนผิวของแผ่นพลาสติก	36
33	การนำแบบจำลองของแม่พิมพ์เข้าสู่โปรแกรม T-SIM	37
34	การกำหนดเงื่อนไขของกระบวนการผลิตในโปรแกรม T-SIM	38
35	การกำหนดสมบัติทางความร้อนของแม่พิมพ์ และแผ่นพลาสติก	39
36	การวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิง	40
37	การสร้างเอลิเมนต์บนแบบจำลองของแผ่นพอลิไธรีน	41
38	การกำหนดสมบัติทางเรขาคณิตของเอลิเมนต์ (ก) แบบเยื่อบาง (membrane) และ (ข) แบบเปลือก (shell)	41
39	การกำหนดความหนาของแผ่นพลาสติกเท่ากับ 1 mm	42

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
40	การเลือกใช้แบบจำลองเพื่อกำหนดพฤติกรรมของแผ่นพลาสติก	42
41	ขนาดของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน (ก) ASTM D638 type IV และ (ข) ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ	43
42	การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงที่อุณหภูมิสูง	43
43	การสร้างแบบจำลอง Elastic plastic isotropic	44
44	การสร้างแบบจำลอง Mooney	45
45	การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัส	45
46	แบบจำลองพื้นผิวที่ใช้ในการจำลองกระบวนการขึ้นรูปด้วยโปรแกรม MSC.Marc	46
47	การกระจายตัวความหนาแน่นของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลม	48
48	การกระจายตัวความหนาแน่นของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอก สี่เหลี่ยม	48
49	รอยพับที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานเทอร์โมฟอร์มมิ่งเมื่อใช้แม่พิมพ์แบบปลັกด (ก) แม่พิมพ์ลักษณะทรงกระบอกกลม และ (ข) แม่พิมพ์ลักษณะทรงกระบอก สี่เหลี่ยม	49
50	การกระจายตัวความหนาแน่นของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลม แบบควาวิดี ที่อุณหภูมิจนรูปของแผ่นพอลิสไตรีนต่างๆ กัน	50
51	การกระจายตัวความหนาแน่นของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลม แบบควาวิดี ที่อุณหภูมิมแม่พิมพ์ต่างๆ กัน	50
52	การกระจายตัวความหนาแน่นของชิ้นงานที่ขึ้นรูป โดยใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอก กลมแบบปลັกด ที่อุณหภูมิจนรูปแผ่นพอลิสไตรีนต่างๆ กัน เมื่อใช้อุณหภูมิมแม่พิมพ์ 30°C	51
53	การกระจายตัวความหนาแน่นของชิ้นงานที่ขึ้นรูป โดยใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอก กลมแบบปลັกด ที่อุณหภูมิมแม่พิมพ์ต่างๆ กัน เมื่อใช้อุณหภูมิมแผ่นพอลิสไตรีน 150°C	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
54	การกระจายตัวความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม T-SIM และผลการตรวจวัดจริง เมื่อใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบควาดี ที่อุณหภูมิในการขึ้นรูปแผ่นพอลิไทริน และอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 150°C และ 30°C ตามลำดับ	53
55	การกระจายตัวความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม T-SIM และผลการตรวจวัดจริง เมื่อใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกสี่เหลี่ยมแบบควาดี ที่อุณหภูมิในการขึ้นรูปแผ่นพอลิไทริน และอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 150°C และ 30°C ตามลำดับ	53
56	การกระจายตัวความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม T-SIM และผลการตรวจวัดจริง เมื่อใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบปลั๊ก ที่อุณหภูมิในการขึ้นรูปแผ่นพอลิไทริน และอุณหภูมิแม่พิมพ์ เท่ากับ 150°C และ 30°C ตามลำดับ	54
57	การกระจายตัวความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม T-SIM และผลการตรวจวัดจริง เมื่อใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกสี่เหลี่ยมแบบปลั๊ก ที่อุณหภูมิในการขึ้นรูปแผ่นพอลิไทริน และอุณหภูมิแม่พิมพ์ เท่ากับ 150°C และ 30°C ตามลำดับ	55
58	การกระจายตัวความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม T-SIM เมื่อใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบควาดี ที่อุณหภูมิในการขึ้นรูปแผ่นพอลิไทรินต่างๆ กัน และอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 30°C	56
59	การกระจายตัวความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม T-SIM เมื่อใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบควาดี ที่อุณหภูมิของแม่พิมพ์ต่างๆ กัน และอุณหภูมิในการขึ้นรูปแผ่นพอลิไทรินเท่ากับ 150°C	56
60	การกระจายตัวความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม T-SIM โดยใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบปลั๊ก เมื่อใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปแผ่นพอลิไทรินต่างๆ กัน และอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 30°C	57

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
61 การกระจายตัวความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม T-SIM เมื่อใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบปลັ๊ก ที่อุณหภูมิของแม่พิมพ์ต่างๆ กัน และอุณหภูมิในการขึ้นรูปแผ่นพอลิสไตรีนเท่ากับ 150°C	58
62 การกระจายตัวความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม T-SIM และผลการตรวจวัดจริง เมื่อใช้แม่พิมพ์ถาดบรรจุภัณฑ์อาหาร ที่อุณหภูมิในการขึ้นรูปแผ่นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต และอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 90°C และ 30°C ตามลำดับ	59
63 ผลการวิเคราะห์ความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานถาดบรรจุภัณฑ์อาหาร ซึ่งได้จากเครื่อง Stress viewer สำหรับ (ก) ชิ้นงานจริง และ (ข) จากโปรแกรม T-SIM	59
64 การกระจายตัวความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม T-SIM และผลการตรวจวัดจริง เมื่อใช้แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่อุณหภูมิในการขึ้นรูปแผ่นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต และอุณหภูมิแม่พิมพ์ 90°C และ 30°C ตามลำดับ	60
65 การกระจายความหนาแน่นชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม T-SIM และผลการตรวจวัดจริง เมื่อใช้แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ขึ้นส่วนยานยนต์ ที่อุณหภูมิในการขึ้นรูปแผ่นพอลิโพรไพลีน และอุณหภูมิแม่พิมพ์ 160°C และ 30°C ตามลำดับ	61
66 การกระจายตัวความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้จากการทดลองกับผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม T-SIM และ โปรแกรม MSC.Marc เมื่อใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปของแผ่นพอลิสไตรีน 150°C และใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 30°C	62

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

T_g	=	อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว
T_m	=	อุณหภูมิการหลอมตัวของพอลิเมอร์
PS	=	พอลิสไตรีน
HIPS	=	พอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทก
EPS	=	โฟมพอลิสไตรีน
PET	=	พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต
A-PET	=	พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตกลุ่มที่มีเนื้อใส
C-PET	=	พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตกลุ่มที่มีสีขาวขุ่น
CAE	=	โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม
CAD	=	โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ
W	=	พลังงานความเครียด
σ	=	ความเค้น
a_i	=	relaxation modulus
τ_i	=	relaxation time
I_1, I_2	=	Finger strain tensor
λ	=	อัตราส่วนการยืดตัว
DSC	=	เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

การวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงาน ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

Analysis of Wall Thickness Distribution in Thermoformed Parts

คำนำ

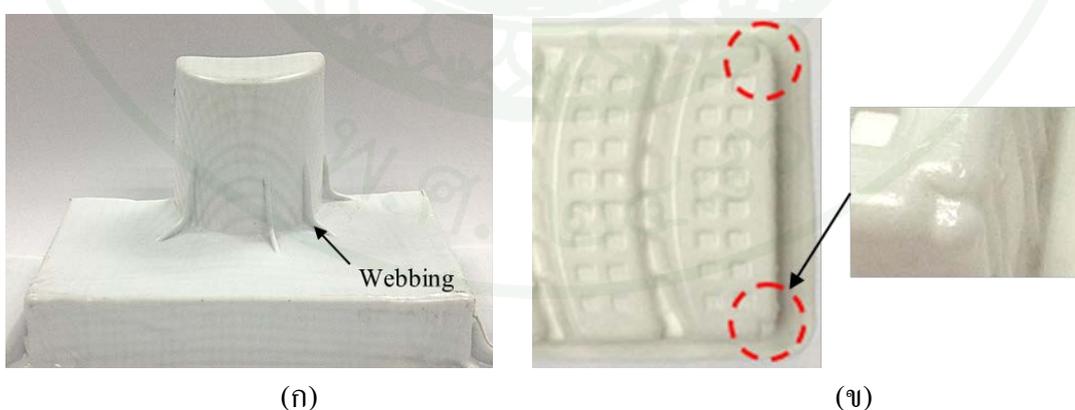
อุตสาหกรรมการผลิตบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจากเทอร์โมพลาสติกถือเป็นอุตสาหกรรมประเภทหนึ่งที่มีการเติบโตอย่างรวดเร็วในปัจจุบัน ซึ่งผลิตภัณฑ์ประเภทบรรจุภัณฑ์โดยทั่วไปนิยมใช้วิธีการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง (thermoforming process) เนื่องจากเครื่องจักร และแม่พิมพ์มีราคาถูก สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีความบางมากได้ ผลิตชิ้นงานได้อย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับกระบวนการผลิตประเภทอื่นๆ ตัวอย่างชิ้นงานที่ผลิตด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ดังแสดงในภาพที่ 1 ยกตัวอย่างเช่น แก้วน้ำ กล่องอาหาร และบรรจุภัณฑ์สินค้าอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น



ภาพที่ 1 ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

หลักการของกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งประกอบด้วยสามขั้นตอนหลักๆ คือ การให้ความร้อนแก่แผ่นเทอร์โมพลาสติก (heating) จากนั้นจึงใช้แรงดันสุญญากาศ (vacuum) ในการขึ้นรูป เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะรูปร่างตามแม่พิมพ์ที่ได้ออกแบบไว้ และขั้นตอนสุดท้ายการระบายความร้อนออกจากชิ้นงาน (cooling) โดยทั่วไปแล้วปัญหาที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานที่พบมากที่สุดได้แก่ การเกิดรอยพับ (webbing) และการกระจายตัวความหนาผนังที่ไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงในภาพที่ 2 ทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาผนังที่มากกว่าบริเวณอื่น โรงงานอุตสาหกรรมโดยส่วนใหญ่ได้แก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยใช้เทคนิคลองผิดลองถูก (trials and

errors) ในการออกแบบแม่พิมพ์ (mold designing) และการหาปัจจัยในกระบวนการผลิต (processing parameters) ที่เหมาะสม ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองวัตถุดิบ (materials) พลังงาน และระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิต ปัจจุบันได้มีงานวิจัยเพื่อพัฒนากระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ยกตัวอย่าง การศึกษาปัจจัยของกระบวนการผลิตที่มีต่อการกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานโดยมีปลั๊กช่วย (plug-assisted) (Mccool and Martin, 2010) การศึกษาอิทธิพลของปลั๊กที่มีต่อการกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงาน (Martin and Duncan, 2007) วิธีการแก้ไขปัญหารอยพับที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต (Hosseini *et al.*, 2006) เป็นต้น วิธีการหนึ่งที่สามารถประยุกต์ใช้ในการลดปัญหาที่เกิดขึ้น และสามารถใช้หาปัจจัยในกระบวนการผลิตที่เหมาะสม ในกระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง คือ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis, FEA) สามารถทำนายการกระจายความหนาผนังชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง โดยการเลือกใช้แบบจำลองเชิงโครงสร้าง (constitutive model) ที่เหมาะสมเพื่อกำหนดพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปร่างของแผ่นพลาสติก งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) ซึ่งได้แก่โปรแกรม T-SIM ในการศึกษาอิทธิพลของชนิด และลักษณะของแม่พิมพ์ รวมถึงปัจจัยในกระบวนการผลิต ที่มีต่อการกระจายตัวความหนาผนัง และความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน โดยได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจริง เพื่อประยุกต์ใช้ผลจากการวิจัยในการพัฒนาการออกแบบแม่พิมพ์ การกำหนดเงื่อนไขในกระบวนการผลิตที่เหมาะสม ซึ่งเป็นการลดการใช้วัตถุดิบ และพลังงาน ตลอดจนระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิต



ภาพที่ 2 ข้อบกพร่องบนชิ้นงานเทอร์โมฟอร์มมิ่งที่เกิดขึ้น (ก) ชิ้นงานที่เกิดรอยพับ และ (ข) การกระจายตัวความหนาผนังที่ไม่สม่ำเสมอ

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิด และลักษณะแม่พิมพ์ รวมถึงปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อการกระจายตัวความหนาผนังและความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง
2. เพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนัง และความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับผลการทดลองจริง

การตรวจเอกสาร

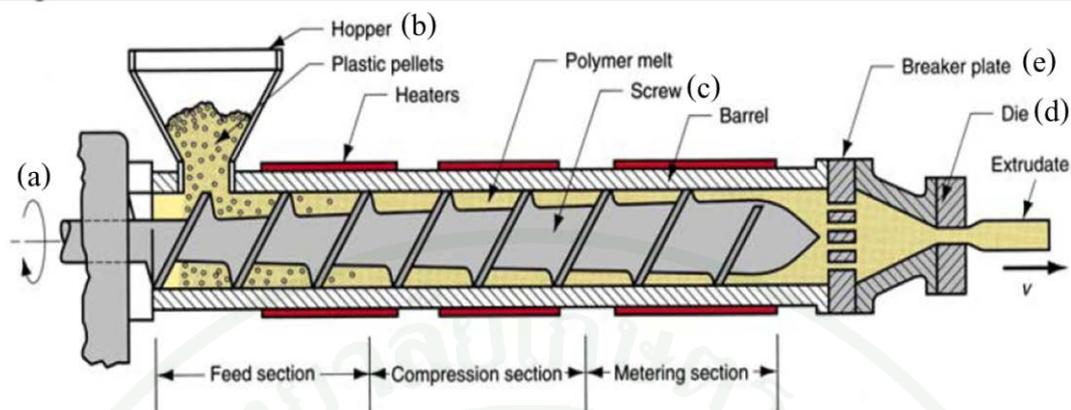
กระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง เป็นกระบวนการขั้นทุติยภูมิ (secondary operation) ในอุตสาหกรรมการผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติกต่างๆ เช่น บรรจุภัณฑ์อาหารและยา บรรจุภัณฑ์ทางการแพทย์ โดยใช้แผ่นซีทหรือฟิล์มเทอร์โมพลาสติก ดังแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งผลิตได้จากกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป (Klein, 2009)



ภาพที่ 3 แผ่นเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

1. กระบวนการอัดรีดแผ่นซีทหรือแผ่นฟิล์ม (sheet/film extrusion)

วัตถุดิบในกระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง คือ แผ่นซีทหรือฟิล์มเทอร์โมพลาสติก ซึ่งผลิตได้จากการหลอมละลายเม็ดพอลิเมอร์และอัดรีดพอลิเมอร์หลอมเหลว โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (single screw extrusion) ดังแสดงในภาพที่ 4 เพื่อให้พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลเข้าสู่หัวขึ้นรูปแบบตัวที (T-shaped die) หรือหัวขึ้นรูปแบบโคลซแฮงเกอร์ (clothes hanger die) ดังแสดงในภาพที่ 5 หลังจากนั้นแผ่นพลาสติกถูกดึงยืด โดยผ่านลูกกลิ้งชุดแรกที่มีความเร็วรอบในการหมุนแตกต่างกัน ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อปรับให้แผ่นพลาสติกมีความหนาตามที่ต้องการ จากนั้นลูกกลิ้งชุดถัดไปมีหน้าที่ม้วนเก็บแผ่นพลาสติกสำหรับเป็นวัตถุดิบในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งต่อไป ดังแสดงในภาพที่ 6 โดยแผ่นซีทมีความหนามากกว่า 1 mm และแผ่นฟิล์มมีความหนาน้อยกว่า 1 mm



ภาพที่ 4 ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องอัดรีด

(a) ระบบขับเคลื่อน (drive system) หรือมอเตอร์ทำหน้าที่หมุนสกรูซึ่งอยู่ในห้องหลอมเหลวเพื่อให้พอลิเมอร์เกิดการหลอมละลายและไหลตามร่องสกรูไปยังหัวขึ้นรูป

(b) กรวยเติม (hopper) เป็นอุปกรณ์ป้อนเม็ดพอลิเมอร์เข้าสู่สกรู

(c) สกรู (screw) เป็นอุปกรณ์สำคัญที่ทำให้พอลิเมอร์เกิดการหลอมละลายและทำหน้าที่ลำเลียงพอลิเมอร์ไปยังหัวขึ้นรูป โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้

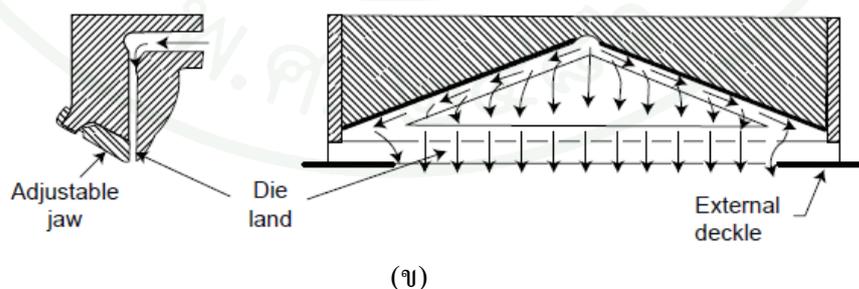
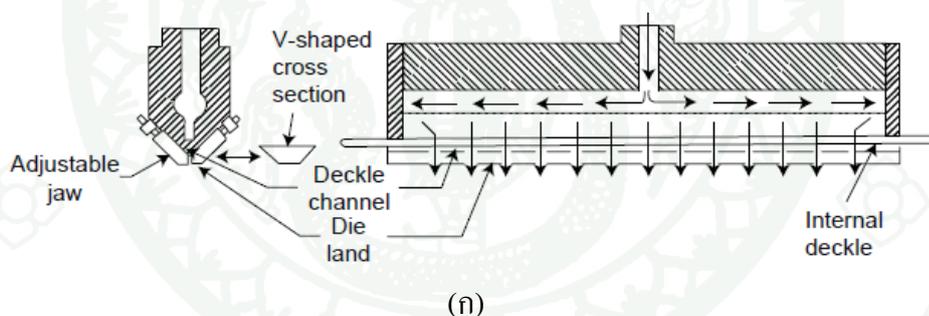
- ช่วงการลำเลียง (feed zone) ทำหน้าที่ลำเลียงเม็ดพอลิเมอร์จากกรวยเติมเข้าสู่สกรู โดยความลึกของร่องเกลียว (channel depth) ในช่วงการลำเลียงมีความลึกมากกว่าช่วงอื่นๆ เม็ดพอลิเมอร์ที่เข้าสู่ช่วงการลำเลียงอาจเกิดการหลอมละลายที่บริเวณติดอยู่กับผนังห้องหลอมเหลว เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากความร้อนภายนอก (external heat) ที่ได้จากชุดให้ความร้อนเป็นหลัก

- ช่วงการอัดหรือช่วงการหลอมละลาย (compression/transition zone) ในช่วงนี้เม็ดพอลิเมอร์ถูกอัดด้วยแรงเฉือนจนเกิดความร้อนขึ้นอย่างมากหรือที่เรียกว่าความร้อนเฉือน (shear heating) แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในช่วงนี้เกิดจากการลดลงของความลึกของร่องสกรู โดยความร้อนภายใน (internal heat) มีอิทธิพลอย่างมากต่อการหลอมละลายของเม็ดพอลิเมอร์

- ช่วงเพิ่มความดัน (metering/pumping zone) สกรูในช่วงนี้มีความลึกของร่องเกลียว น้อยที่สุดเพื่อเพิ่มความดันให้แก่ระบบและเพิ่มความหนาแน่นของพอลิเมอร์หลอมเหลว รวมไปถึง การได้รับอิทธิพลของความร้อนจากชุดให้ความร้อนเพื่อให้มั่นใจว่าพอลิเมอร์เกิดการหลอมละลาย อย่างสมบูรณ์ทั้งหมดก่อนเข้าสู่หัวขึ้นรูป

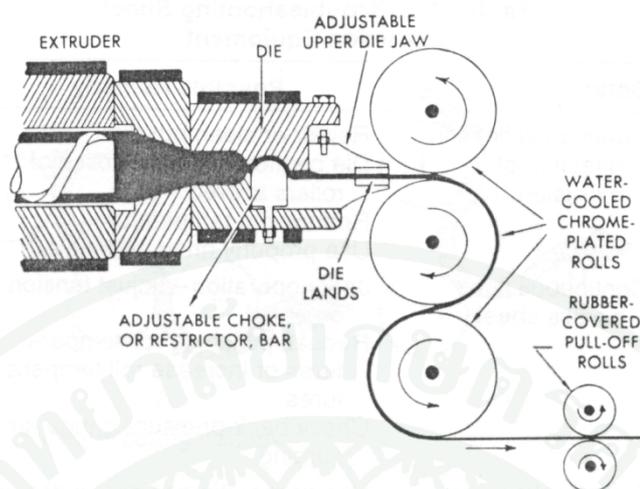
(d) ชุดปรับทิศทางการไหล และแผ่นกรอง (beaker plate/screen pack) เป็นอุปกรณ์ที่อยู่ ถัดจากหัวสกรู ทำหน้าที่ปรับทิศทางการไหลและสร้างแรงดันหรือเพิ่มความหนาแน่นของพอลิ- เมอร์หลอมเหลวก่อนไหลเข้าสู่หัวขึ้นรูป นอกจากนี้ชุดปรับทิศทางการไหลยังทำหน้าที่สำหรับยึด กับแผ่นกรอง โดยแผ่นกรองทำหน้าที่กรองเศษโลหะหรือเม็ดพลาสติกที่ยังหลอมไม่สมบูรณ์ ไม่ให้ ไหลเข้าสู่หัวขึ้นรูป

(e) หัวขึ้นรูป (die) อยู่ในตำแหน่งหน้าสุดของเครื่องอัดรีดเพื่อกำหนดรูปร่างผลิตภัณฑ์ที่ ได้



ภาพที่ 5 หัวขึ้นรูปแผ่นซีทหรือฟิล์ม (ก) แบบตัวที และ (ข) แบบ โคลซเสงเกอร์

ที่มา: Chanda and Roy (2007)



ภาพที่ 6 กระบวนการอัดรีดขึ้นรูปแผ่นซีทหรือฟิล์ม

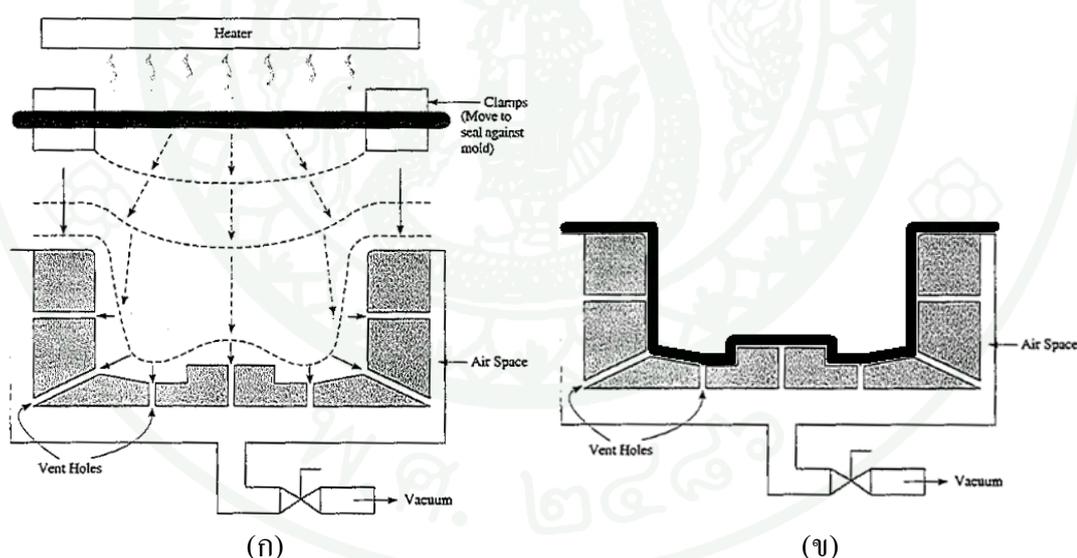
ที่มา: Levy and Carley (1989)

2 กระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง (thermoforming process)

ขั้นตอนในการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่งเริ่มจากการจับยึดแผ่นเทอร์โมพลาสติกและให้ความร้อนจนอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ประมาณ 15°C สำหรับพอลิเมอร์อสัณฐาน (amorphous polymer) และต่ำกว่าอุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก (melting temperature, T_m) ประมาณ 10°C สำหรับพอลิเมอร์กึ่งผลึก (semi-crystalline polymer) เพื่อให้แผ่นเทอร์โมพลาสติกอ่อนตัวจนสามารถขึ้นรูปได้ จากนั้นให้แรงทางกล แรงดันลม และแรงสุญญากาศ หรือให้แรงทั้งสามชนิดร่วมกันในการขึ้นรูป และการทำให้ชิ้นงานเย็นตัวจนสามารถนำปลดออกจากแม่พิมพ์ได้ ข้อเด่นของกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตอื่นๆ เช่น กระบวนการฉีดขึ้นรูป (injection molding) คือ ราคาของเครื่องจักรและแม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตที่มีราคาต่ำกว่า จึงเป็นกระบวนการที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายและมีการพัฒนาตลอดสองทศวรรษที่ผ่านมา (Klein, 2009)

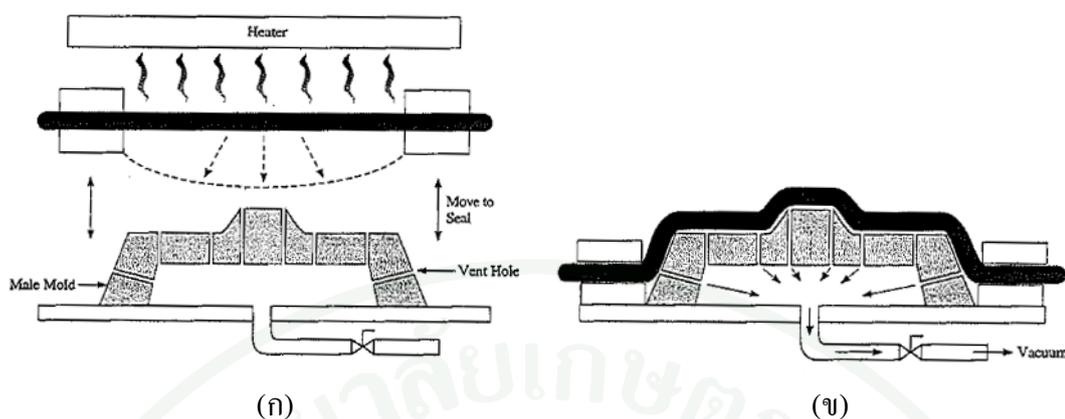
กระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามชนิดของแม่พิมพ์ ได้แก่ การขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์แบบคาวีตี้ (cavity mold) หรือแม่พิมพ์แบบตัวเมีย (female mold) ซึ่งเป็นการขึ้นรูปโดยใช้แรงสุญญากาศโดยตรง (vacuum forming) ดังแสดงในภาพที่ 7 โดยส่วนที่เป็น

ขอบของชิ้นงานมีความหนาใกล้เคียงกับความหนาแผ่นพลาสติกเริ่มต้น และบริเวณที่มีความบางของผนังมากที่สุดคือบริเวณขอบมุมของชิ้นงานด้านล่าง ด้วยสาเหตุนี้การขึ้นรูปโดยใช้แรงสูญญากาศโดยตรงจึงทำให้ชิ้นงานมีการกระจายความหนาผนังที่ไม่สม่ำเสมอ (uneven wall thickness distribution) ประเภทที่สองเป็นการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบปลั๊ก (plug mold) หรือแม่พิมพ์แบบตัวผู้ (male mold) ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวมการใช้แรงทางกลและการใช้แรงสูญญากาศร่วมกัน (drape forming) ดังแสดงในภาพที่ 8 โดยการเคลื่อนที่แม่พิมพ์ขึ้นจากนั้นจึงใช้แรงสูญญากาศในการขึ้นรูปแผ่นเทอร์โมพลาสติก เพื่อช่วยในการขึ้นรูปชิ้นงานให้เป็นไปตามแบบของแม่พิมพ์ ข้อเด่นของการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบปลั๊ก คือ ชิ้นงานมีการกระจายความหนาผนังที่สม่ำเสมอและสามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้รวดเร็วกว่าวิธีการใช้แรงสูญญากาศโดยตรง นอกจากนี้ยังเป็นการลดต้นทุนในการผลิตแม่พิมพ์ เนื่องจากแม่พิมพ์แบบปลั๊กสามารถผลิตได้ง่ายกว่าแม่พิมพ์แบบควาดี อย่างไรก็ตามข้อเสียของการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบปลั๊ก คือ ผลิตชิ้นงานได้ปริมาณที่น้อยกว่าแม่พิมพ์แบบควาดี และชิ้นงานอาจเกิดรอยพับในบริเวณที่ถูกดึงยึดโดยแม่พิมพ์ ด้วยสาเหตุนี้ภาคอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้แม่พิมพ์แบบควาดีมากกว่าการใช้แม่พิมพ์แบบปลั๊ก



ภาพที่ 7 กระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง โดยใช้แม่พิมพ์แบบควาดี (ก) ขั้นตอนการให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติก และ (ข) ขั้นตอนการขึ้นรูป

ที่มา: Brent (2006)



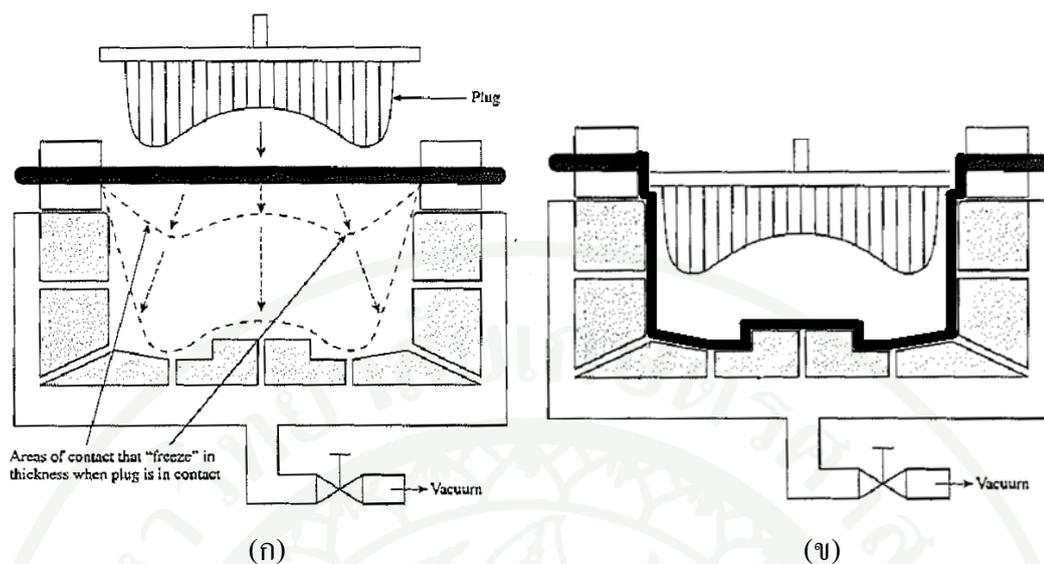
ภาพที่ 8 กระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง โดยใช้แม่พิมพ์แบบปลั๊ก (ก) ขั้นตอนการให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติก และ (ข) ขั้นตอนการขึ้นรูป

ที่มา: Brent (2006)

นอกจากนี้กระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่งได้มีการพัฒนาให้เหมาะสมกับลักษณะของชิ้นงานที่ขึ้นรูป และสามารถแบ่งออกได้เป็นประเภทย่อยๆ เช่น กระบวนการขึ้นรูปโดยใช้ปลั๊กช่วย (plug-assist forming) กระบวนการขึ้นรูปแบบดึงย้อนกลับ (reverse draw forming) กระบวนการขึ้นรูปแบบดีดกลับ (snap back forming) และกระบวนการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ประกบ (matched mold forming) เป็นต้น

2.1 กระบวนการขึ้นรูปโดยใช้ปลั๊กช่วย (plug-assist forming)

กระบวนการขึ้นรูปโดยใช้ปลั๊กช่วย เป็นเทคนิคที่ใช้ช่วยในกระบวนการขึ้นรูปโดยใช้แรงสุญญากาศโดยตรง ดังแสดงในภาพที่ 9 ข้อเด่นของเทคนิคนี้ คือ ชิ้นงานมีการกระจายความหนาผนังที่สม่ำเสมอเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีอัตราส่วนดึงยืด (draw ratio) ที่สูง เช่น แก้วน้ำ เป็นต้น

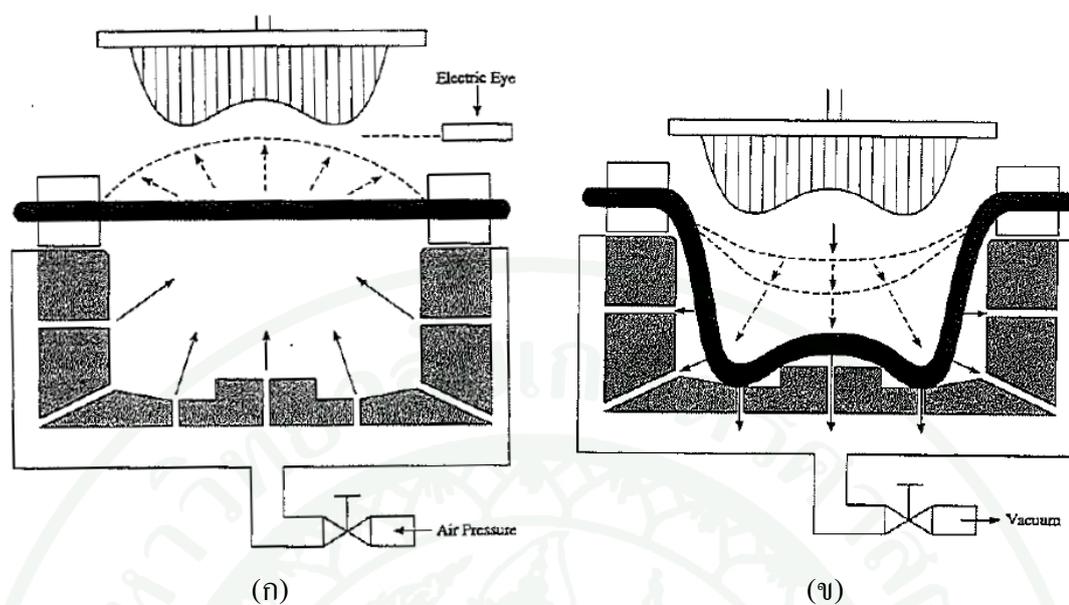


ภาพที่ 9 กระบวนการขึ้นรูปโดยใช้ปลั๊กช่วย (ก) ขั้นตอนการให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติก และ (ข) ขั้นตอนการขึ้นรูป

ที่มา: Brent (2006)

2.2 กระบวนการขึ้นรูปแบบดึงย้อนกลับ (reverse draw forming)

กระบวนการขึ้นรูปแบบดึงย้อนกลับเหมาะสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานที่ต้องการการดึงยึดที่สูงมากๆ โดยมีหลักการ คือ แผ่นพลาสติกถูกทำให้อ่อนตัว และให้แรงดันเป่าในทิศทางตรงกันข้ามกับเบ้าของแม่พิมพ์ เพื่อกระจายความหนาผนังของแผ่นพลาสติกจากจุดศูนย์กลางไปตามขอบมุม ให้มีความหนาสม่ำเสมอ จากนั้นเป็นการขึ้นรูปโดยการใส่ปลั๊กช่วย ดังแสดงในภาพที่ 10 ข้อเด่นของเทคนิคนี้เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการขึ้นรูปโดยใช้ปลั๊กช่วย คือ สามารถปรับระดับการดึงยึดได้ซึ่งช่วยในการควบคุมความหนาของชิ้นงานได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้อาจมีข้อจำกัด คือ มีรอบการทำงาน (cycle time) ที่นานขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิของแผ่นพลาสติก ขนาดของแผ่นพลาสติกที่ถูกเป่า ขนาดและระยะเคลื่อนที่ของปลั๊ก เป็นต้น

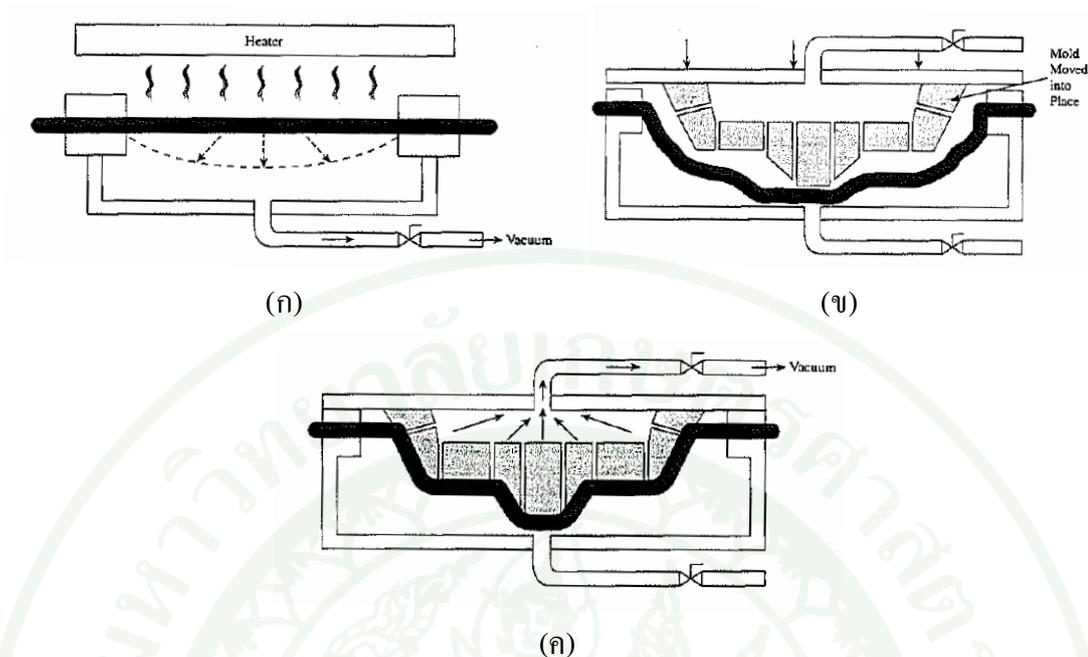


ภาพที่ 10 กระบวนการขึ้นรูปแบบดึงย้อนกลับ (ก) ขั้นตอนการให้ความร้อนและแรงดันเป่า และ (ข) ขั้นตอนการขึ้นรูปโดยใช้ปลั๊กช่วย

ที่มา: Brent (2006)

2.3 กระบวนการขึ้นรูปแบบดีดกลับ (snap back forming)

กระบวนการขึ้นรูปแบบดีดกลับ เป็นกระบวนการขึ้นรูปโดยใช้แรงสุญญากาศและแรงทางกลร่วมกัน โดยมีหลักการคล้ายกับกระบวนการขึ้นรูปแบบดึงย้อนกลับ แต่เป็นการใช้แรงสุญญากาศในการดึงยึดแผ่นพลาสติกในทิศทางตรงกันข้าม จากนั้นจึงใช้ปลั๊กช่วยในการขึ้นรูป ดังแสดงในภาพที่ 11 โดยความหนาของชิ้นงานที่จุดศูนย์กลางของแม่พิมพ์ซึ่งเป็นจุดที่สัมผัสกับปลั๊ก มีความหนาใกล้เคียงกับความหนาแผ่นพลาสติกเริ่มต้น และบริเวณที่บางที่สุดคือขอบของชิ้นงาน

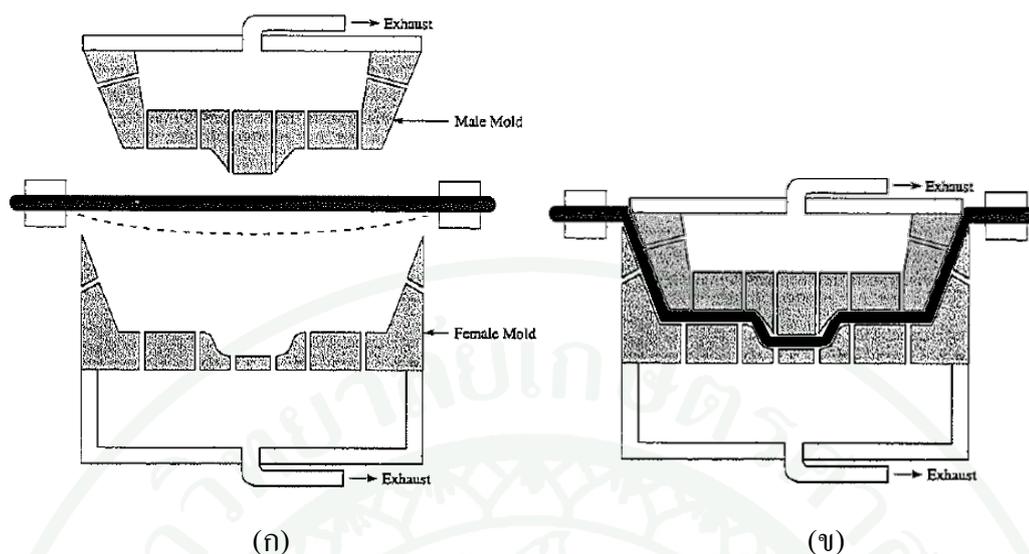


ภาพที่ 11 กระบวนการขึ้นรูปแบบติดกลับ (ก) ขั้นตอนการให้ความร้อน (ข) ขั้นตอนการใช้ปลี๊กช่วยในการขึ้นรูป และ (ค) ขั้นตอนการใช้แรงสุญญากาศในการขึ้นรูป

ที่มา: Brent (2006)

2.4 กระบวนการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ประกบ (matched mold forming)

กระบวนการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ประกบ เป็นกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีลักษณะตามรูปร่างของแม่พิมพ์ โดยการเคลื่อนที่เข้าหากันของแม่พิมพ์ทั้งแม่พิมพ์แบบคาวีดีและแม่พิมพ์แบบปลี๊ก ดังแสดงในภาพที่ 12 ซึ่งกระบวนการนี้เป็นการใช้ความร้อนและแรงทางกลในการขึ้นรูป กระบวนการนี้เหมาะสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีการดึงยืดต่ำ และสามารถใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรายละเอียดสูงหรือต้องการควบคุมขนาดของชิ้นงาน



ภาพที่ 12 กระบวนการขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ประกบ (ก) ขั้นตอนการให้ความร้อน (ข) ขั้นตอนในการขึ้นรูป

ที่มา: Brent (2006)

3. อัตราส่วนดึงยึด (draw ratio)

โดยทั่วไปอัตราส่วนดึงยึดสามารถใช้ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบลักษณะของชิ้นงาน ซึ่งอัตราส่วนดึงยึด สามารถแบ่งได้เป็นประเภทย่อยๆ 3 ประเภท ประกอบด้วย อัตราส่วนดึงยึดโดยพื้นที่ (Aerial Draw Ratios, ADR) อัตราส่วนดึงยึดเชิงเส้น (Linear Draw Ratios, LDR) และอัตราส่วนดึงยึดโดยความสูง (Height-to-Dimension Ratios, H:D) ตามลำดับ

3.1 อัตราส่วนดึงยึดโดยพื้นที่

อัตราส่วนดึงยึดโดยพื้นที่ คือ การวัดพื้นที่โดยรวมของชิ้นงานหลังจากการขึ้นรูปกับพื้นที่ของแผ่นพลาสติกที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 โดยอัตราส่วนการดึงยึดของพอลิเมอร์แต่ละชนิด แสดงในตารางที่ 1

$$\text{ADR} = \frac{\text{พื้นที่ของชิ้นงานภายหลังการขึ้นรูปชิ้นงาน}}{\text{พื้นที่ของแผ่นพลาสติกที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน}} \quad (1)$$

ตารางที่ 1 อัตราส่วนดิ่งยัดของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ

Polymers	Maximum ADR
ABS	5.5
Acrylic	3.4
HDPE	6.5
LDPE	6.0
PP	7.5
PS	8.0
PVC	4.3

ที่มา: Klein (2009)

ค่า ADR สามารถใช้ระบุการลดความหนาเฉลี่ยของแผ่นพลาสติก จากสมการที่ 2

$$\text{การลดความหนาเฉลี่ย} = \frac{1}{\text{ADR}} \quad (2)$$

3.2 อัตราส่วนดิ่งยัดเชิงเส้น

อัตราส่วนดิ่งยัดเชิงเส้น คือ การเปรียบเทียบความยาวของเส้นตรงที่ลากผ่านแผ่นพลาสติกหลังจากกระบวนการขึ้นรูป กับความยาวของเส้นตรงที่ลากผ่านแผ่นพลาสติกก่อนกระบวนการขึ้นรูป (โดยเฉพาะในส่วนที่ถูกขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน)

$$\text{LDR} = \frac{\text{ความยาวของเส้นตรงที่ลากผ่านแผ่นพลาสติกหลังจากกระบวนการขึ้นรูป}}{\text{ความยาวของเส้นตรงที่ลากผ่านแผ่นพลาสติกก่อนกระบวนการขึ้นรูป}} \quad (3)$$

3.3 อัตราส่วนความสูงต่อมิติ

อัตราส่วนความสูงต่อมิติ คือ ความสูงของชิ้นงานภายหลังกระบวนการขึ้นรูปต่อระยะของส่วนเปิดที่กว้างที่สุดของชิ้นงาน มีประโยชน์ในการระบุความสมมาตรของชิ้นงาน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$H:D = \frac{\text{ความสูงของชิ้นงานภายหลังกระบวนการขึ้นรูป}}{\text{ระยะของส่วนเปิดที่กว้างที่สุดของชิ้นงาน}} \quad (4)$$

4. วัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

4.1 พอลิสไตรีน (polystyrene, PS)

พอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างอสัณฐาน (amorphous) มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วประมาณ 94°C จึงมีความเปราะ และมีความสามารถในการป้องกันความชื้นหรือกักเก็บการซึมผ่านของความชื้นและก๊าซได้ต่ำ โดยโครงสร้างของพอลิสไตรีน ดังแสดงในภาพที่ 13(ก) จึงมีการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการ Copolymerization ของ Butadiene ดังแสดงในภาพที่ 13(ข) เพื่อเพิ่มสมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทกซึ่งมีชื่อเรียกว่า High impact polystyrene (HIPS) ยกตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ทำจาก HIPS เช่น ถาดบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น โดยสมบัติของ PS และ HIPS แสดงดังตารางที่ 2 ในกรณีที่มีการเติมสารพองตัว (blowing agent) สามารถผลิตเป็นแผ่นโฟมที่เรียกว่า Expanded Polystyrene (EPS)



ภาพที่ 13 โครงสร้างของพอลิสไตรีน (ก) ที่ใช้งานโดยทั่วไป และ (ข) ชนิดทนแรงกระแทก

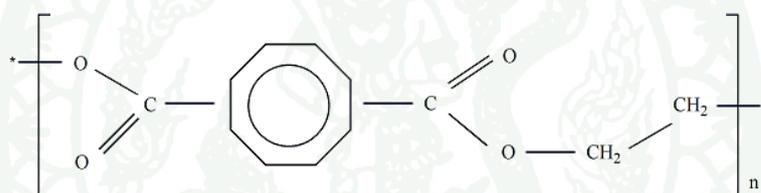
ตารางที่ 2 สมบัติในด้านต่างๆ ของ PS และ HIPS

Properties	PS	HIPS	EPS
Young's modulus (MPa)	3000 - 3500	1800 - 2500	0.16 - 3.1
Tensile strength (MPa)	32 - 60	26 - 48	0.15 - 0.52
Impact strength (J/cm)	0.27 - 5	0.27 - 5	0.27 - 5
Thermal conductivity (W/m.K)	0.14 - 0.16	0.12 - 0.18	0.031 - 0.038
Density (kg/m^3)	1040 - 1050	1040 - 1050	16 - 28

ที่มา: Vennix (2009); Doroudiani and Kortschot (2003); Mark (2009)

4.2 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate, PET)

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเป็นพอลิเมอร์ที่มีการใช้งานเป็นจำนวนมากในเชิงพาณิชย์ สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (condensation polymerization) โดยใช้เอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) และกรดเทเรฟทาลิก (terephthalic acid) แต่ไม่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม เนื่องจากกรดเทเรฟทาลิกทำให้บริสุทธิ์ได้ยาก จึงมีการใช้ไดเมทิลเทเรฟทาเลต (dimethyl terephthalate) หรือเอทิลีนเทเรฟทาเลต (ethylene terephthalate) แทนซึ่งสามารถทำให้บริสุทธิ์ได้ง่ายโดยการกลั่นแบบลดความดัน (vacuum distillation) หรือวิธีการตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำ (low temperature crystallization) นอกจากนี้ไดเมทิลเทเรฟทาเลตยังสามารถละลายได้ดีในเอทิลีนไกลคอล ทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้ดีขึ้น ซึ่งโครงสร้างของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ได้ ดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเป็นพอลิเมอร์ประเภทกึ่งผลึก (semi-crystalline) มีสมบัติความต้านทานการซึมผ่านของก๊าซ และทนต่อแรงกระแทกสูง โดยมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วประมาณ 75°C และอุณหภูมิหลอมเหลว ประมาณ 260°C ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่มตามปริมาณผลึกที่เกิดขึ้น คือ กลุ่มที่มีเนื้อใส (Amorphous Polyethylene Terephthalate, A-PET) และกลุ่มที่มีสีขาวขุ่น (Crystallized Polyethylene Terephthalate, C-PET) โดยสมบัติในด้านต่างๆ ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สมบัติในด้านต่างๆของ PET A-PET และ C-PET

Properties	PET	A-PET	C-PET
Young's modulus (MPa)	2800-3100	2800-3100	2800-3100
Tensile strength (MPa)	55-75	60	55-75
Impact strength (J/cm)	0.5	4.1	0.5
Thermal conductivity (W/m.K)	0.15-0.24	0.15-0.24	0.15-0.24
Density (g/cm ³)	1.4	1.37	1.455

ที่มา: Van der veegt and Govaert (2005)

5. การเปลี่ยนสถานะของพอลิเมอร์

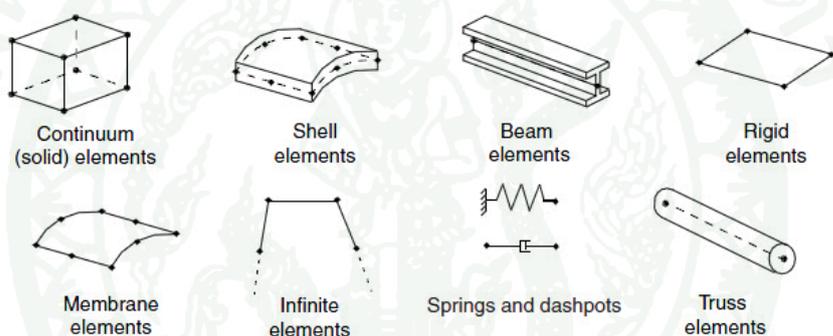
พอลิเมอร์สามารถเปลี่ยนสถานะได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความดัน โดยมีอุณหภูมิหลักที่สำคัญเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสถานะอยู่ 2 อุณหภูมิ คือ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) และอุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก (T_m) ในกรณีของพอลิเมอร์อสัณฐานมีการเปลี่ยนสถานะจากสถานะคล้ายแก้วเป็นสถานะคล้ายยางเท่านั้น ไม่มีสถานะการหลอมตัวของผลึก เพราะพอลิเมอร์ชนิดนี้ไม่มีความเป็นผลึก จึงมีเฉพาะค่า T_g เท่านั้น ในกรณีของพอลิเมอร์กึ่งผลึกจะแสดงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะทั้งสองค่า เนื่องจากพอลิเมอร์กึ่งผลึกมีทั้งบริเวณที่เป็นอสัณฐานและผลึก ดังนั้นจึงมีทั้งค่า T_g และ T_m

6. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis, FEA) เป็นวิธีการหนึ่งของการใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Computer-Aided Engineering, CAE) ซึ่งเป็นการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข นิยมใช้ในการแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนเพื่อคำนวณหาผลเฉลยของปัญหาที่กำหนด จากการแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาที่ต้องการหาผลลัพธ์ออกเป็นเอลิเมนต์ โดยสามารถกำหนดลักษณะและขนาดที่แตกต่างกันออกไป จากนั้นสร้างสมการของแต่ละเอลิเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น เช่น การเสียรูปของวัสดุ การถ่ายเทความร้อน และการไหลของของไหล เป็นต้น ขั้นตอนต่อไปเป็นการนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบ

เป็นระบบสมการ จากนั้นทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) ลงในสมการ แล้วจึงแก้ระบบสมการ โดยจุดเชื่อมต่อของเอลิเมนต์ (nodes) เป็นตำแหน่งที่ใช้ในการคำนวณค่าตัวแปรของสมการ

การกำหนดลักษณะและขนาดรวมถึงการสร้างสมการของเอลิเมนต์ เป็นสิ่งสำคัญของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ยกตัวอย่างเอลิเมนต์ลักษณะต่างๆ เช่น เอลิเมนต์ของแข็ง (solid elements) เอลิเมนต์แบบเปลือก (shell element) เอลิเมนต์แบบคาน (beam elements) เอลิเมนต์แบบแข็งเกร็ง (rigid elements) เอลิเมนต์เยื่อบาง (membrane elements) เอลิเมนต์ไม่จำกัด (infinite elements) เอลิเมนต์แบบสปริงและเส้นประ (springs and dashpots elements) และเอลิเมนต์แบบโครงสร้าง (truss elements) ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 15



ภาพที่ 15 เอลิเมนต์ชนิดต่างๆ

ที่มา: Hibbitt (2002)

เอลิเมนต์ที่สามารถใช้จำลองการขึ้นรูปชิ้นงานในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งมี 3 ชนิด คือ เอลิเมนต์ของแข็ง เอลิเมนต์เยื่อบาง และ เอลิเมนต์แบบเปลือก (Karlsson and Sorensen, 2002) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- เอลิเมนต์ของแข็ง เป็นเอลิเมนต์ที่ใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ โดยสามารถใช้แทนวัสดุเนื้อเดียว เหมาะกับการวิเคราะห์ปัญหาไม่เป็นเชิงเส้นที่มีเงื่อนไขการสัมผัส วัสดุพลาสติก และปัญหาการเสียรูปมาก (large deformation) ซึ่งมีความแม่นยำในการคำนวณสูงหากไม่เกิดการบิดตัวของเอลิเมนต์

- เอลิเมนต์เยื้องบาง เป็นเอลิเมนต์แบบพื้นผิว มีลักษณะเป็นแผ่นบาง สามารถรองรับแรงกระทำได้ในแนวระนาบเดียวกับผิวเท่านั้น ไม่รองรับแรงที่ตั้งฉากกับระนาบของผิว ไม่รองรับโมเมนต์คด เอลิเมนต์ชนิดนี้ไม่เหมาะสำหรับปัญหาที่มีการเสีรูปอย่างมาก (large displacement) ซึ่งอาจทำให้เอลิเมนต์เกิดการหักงอ (buckling) เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนรูปในแนวอื่น และหากมีแรงกระทำในแนวตั้งฉากกับระนาบ จะทำให้เกิดความผิดพลาดทางตัวเลข (numerical singularities) และปัญหาการไม่เข้าสู่ผลเฉลย (diverge) ในการคำนวณ
- เอลิเมนต์แบบเปลือก เหมาะสำหรับโครงสร้างที่มีมิติของความหนาน้อยกว่ามิติอื่นๆ และความเค้นในแนวตั้งฉากกับความหนามีความสำคัญเพียงเล็กน้อย

6.1 แบบจำลองเชิงโครงสร้างของวัสดุ (constitutive material model)

แบบจำลองเชิงโครงสร้างของวัสดุ คือ ชุดของสมการที่ใช้อธิบายถึงพฤติกรรมของวัสดุในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (stress) ความเครียด (strain) อุณหภูมิ (temperature) และอัตราความเครียด (strain rate) แบบจำลองเชิงโครงสร้างที่สามารถอธิบายพฤติกรรมการเสีรูปของแผ่นพลาสติกในกระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ได้แก่ แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก (hyperelastic model) และแบบจำลองวิสโคอีลาสติก (viscoelastic model) ได้มีงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมสำหรับงานทั่วไป ซึ่งทำงานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มาประยุกต์ใช้ในการจำลองกระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง โดยกำหนดพฤติกรรมเมื่อได้รับความร้อนของแผ่นเทอร์โมพลาสติกให้มีพฤติกรรมการเสีรูปคล้ายวัสดุประเภทยาง (rubber like) ซึ่งตรงกับแบบจำลองวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก ของ Mooney-Rivlin (Carlone and Palazzo, 2006) และ Ogden (Dong *et al.*, 2006) ผลการวิเคราะห์การกระจายความหนาผนังชิ้นงานมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกระบวนการทดลองจริง อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ยังคงมีความคลาดเคลื่อน ทั้งนี้เนื่องมาจากแผ่นเทอร์โมพลาสติกเมื่อได้รับความร้อนนั้นมีทั้งสมบัติเหนียวหนืด (viscous property) และสมบัติความยืดหยุ่น (elastic property) ในเวลาเดียวกัน ซึ่งมีผู้วิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตและออกแบบชิ้นงานผนังบางที่ทำจากพอลิโอสไตรีน ด้วยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ T-SIM (accuform software) ที่ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และแบบจำลองเชิงโครงสร้างวิสโคอีลาสติกชนิดอินทิกรัล (K-BKZ) ในการอธิบายพฤติกรรมของวัสดุ พบว่าสามารถทำนายผลการกระจายความหนาผนังได้แม่นยำ (Unwin *et al.*, 2005)

6.2 สมบัติไฮเปอร์อีลาสติก (hyperelasticity)

ในการวิเคราะห์วัสดุประเภทยางแบบจำลองของวัสดุมีความแตกต่างจากฟังก์ชันพลังงานความเครียดโดยทั่วไป เนื่องจากวัสดุขงมีสมบัติที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time independent) และไม่สามารถอัดตัวได้ (incompressible) ซึ่งจำเป็นต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียด เพื่ออธิบายพฤติกรรมการยืดหยุ่นแบบไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear elasticity) ของวัสดุประเภทยาง ซึ่งเขียนอยู่ในรูปฟังก์ชันพลังงานความเครียด (strain energy function, W) ได้ดังสมการที่ 1

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (1)$$

โดยที่ $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ เป็นค่าระยะการยืดในแนวแกน x, y, z ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของสเตรนอินวาเรียนท์ (strain invariants) ดังแสดงในสมการที่ 2

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \quad (2)$$

โดยที่

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (3)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad (4)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \quad (5)$$

6.2.1 แบบจำลองพหุนาม (polynomial model)

แบบจำลองพหุนามเป็นฟังก์ชันของพลังงานความเครียด (strain energy function) สำหรับวัสดุที่มีคุณสมบัติไอโซโทรปิกและไม่สามารถอัดตัวได้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุกรมของ สเตรนอินวาเรียนท์ ได้ดังสมการที่ 6

$$W = \sum_{i+j+k=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j (I_3 - 3)^k \quad (6)$$

โดยที่ C_{ijk} เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง และเนื่องจากยางเป็นวัสดุที่ไม่สามารถอัดตัวได้ ดังนั้น $I_3 = 1$ จึงสามารถลดรูปแบบจำลอง ดังแสดงในสมการที่ 7

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (7)$$

เมื่อ $N=2$ ดังนั้น

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{02}(I_2 - 3)^2 \quad (8)$$

6.2.2 แบบจำลอง Mooney-Rivlin

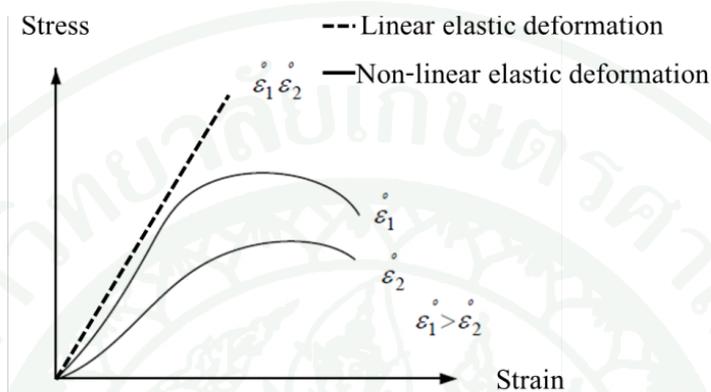
แบบจำลอง Mooney-Rivlin เป็นแบบจำลองที่มีรูปแบบสมการเหมือนกับแบบจำลองพหุนาม โดยกำหนดให้เป็นอันดับที่ 1 ($N=1$) ดังแสดงในสมการที่ 9 ซึ่งแบบจำลองชนิดนี้สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดได้ในช่วงที่การยืดตัวไม่สูงมาก เนื่องจากการลดจำนวนเทอมของสมการ

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (9)$$

6.3 สมบัติวิสโคอีลาสติก (viscoelasticity)

โดยทั่วไปแล้วพอลิเมอร์ทั้งในสถานะของแข็ง และหลอมเหลว แสดงสมบัติวิสโคอีลาสติก กล่าวคือ เกิดการเสียดรูป (viscous) และการคืนตัวกลับ (elastic) เมื่อมีแรงกระทำต่อสายโซ่โมเลกุล การตอบสนองต่อแรงกระทำต่อสายโซ่โมเลกุลจึงมีลักษณะแตกต่างจากวัสดุที่มีสมบัติแบบอีลาสติก ที่ค่าความเครียดแปรผันตรงกับค่าความเค้น โดยไม่ขึ้นอยู่กับเวลา แต่ในกรณีของวัสดุแบบวิสโคอีลาสติก สายโซ่โมเลกุลมีการยืดตัวอย่างช้าๆ จนถึงสภาวะที่ทุกสายโซ่โมเลกุลตอบสนองต่อแรงกระทำอย่างสมบูรณ์ และเมื่อปราศจากแรงที่มากกระทำนั้น สายโซ่โมเลกุลค่อยๆ เรียงตัวสู่ช่องว่างและความเครียดลดลงสู่สภาวะเดิมก่อนที่โครงสร้างมีแรงกระทำ (Ferry, 1970) โดยแสดงสมบัติการยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elasticity) ในขอบเขตที่มีความเครียดต่ำ (small strains)

แต่เมื่อความเครียดเพิ่มขึ้นเกินขีดจำกัดหนึ่งความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเค้นกับความเครียด จึงหมดไป โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดนี้เป็นฟังก์ชันของอัตราการเสียรูป (deformation rate) ดังแสดงในภาพที่ 16



ภาพที่ 16 สมบัติการยืดหยุ่นเชิงเส้นและการยืดหยุ่นไม่เชิงเส้น

ที่มา: Haddad (1995)

6.3.1 แบบจำลองวิสโคอีลาสติก

แบบจำลองพฤติกรรมของวัสดุพอลิเมอร์เป็นส่วนสำคัญในการจำลองกระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ได้มีงานวิจัยจำนวนหนึ่งที่พัฒนาแบบจำลองสำหรับอธิบายถึงพฤติกรรมของวัสดุพอลิเมอร์ในช่วงที่มีการเสียรูปมาก (large deformation) เช่น แบบจำลอง Mooney (Carlone and Palazzo, 2006) ซึ่งเป็นแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก และแบบจำลอง Kaye-Bernstien-Kearsley-Zapas (K-BKZ) ซึ่งเป็นแบบจำลองวิสโคอีลาสติก โดยแผ่นพลาสติกเมื่อได้รับความร้อนจนอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่สามารถขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่งมีสมบัติความเป็นวิสโคอีลาสติกมากกว่าไฮเปอร์อีลาสติก นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของแผ่นเทอร์โมพลาสติกในกระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง พบว่า แบบจำลอง K-BKZ สามารถอธิบายพฤติกรรมได้ตรงกับพฤติกรรมในกระบวนการทดลองจริงมากกว่าแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก อย่างไรก็ตามแบบจำลอง K-BKZ มีข้อจำกัดในด้านการคำนวณและการทดสอบ

สมบัติของวัสดุที่มีความซับซ้อนมากกว่าแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก โดยสามารถหาความเค้น (σ) ในกรณีของการดึงในแนวแกนเดียว (uni-axial stretching) ได้จากสมการที่ 10

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^t \mu(t-t') \cdot h(I_1, I_2) \cdot B(t, t') dt' \quad (10)$$

$\mu(t-t')$ ที่แสดงในสมการที่ 10 คือ Time memory function ซึ่งมีความสัมพันธ์ ดังแสดงในสมการที่ 11 โดยอยู่ในรูปของเวลา t และ t' โดยค่า a_i และ τ_i คือ Relaxation modulus และ Relaxation time ตามลำดับ

$$\mu(t-t') = \sum_{i=1}^N \left[\frac{a_i}{\tau_i} \exp\left(-\frac{t-t'}{\tau_i}\right) \right] \quad (11)$$

$h(I_1, I_2)$ ในสมการที่ 10 คือ ค่า Damping function ของ Wagner แสดงในสมการที่ 12

$$h(I_1, I_2) = \frac{1}{1 + \alpha \sqrt{(I_1 - 3)(I_2 - 3)}} \quad (12)$$

โดยที่ α คือ พารามิเตอร์ที่ปรับเปลี่ยนได้ และ I_1, I_2 เป็นค่าคงที่ของ Finger strain tensor ดังแสดงในสมการที่ 13

$$B(t, t') = \begin{bmatrix} \lambda^2(t, t') & 0 & 0 \\ 0 & \lambda^{2m}(t, t') & 0 \\ 0 & 0 & \lambda^{-2(l+m)}(t, t') \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\lambda(t, t') = e^{[s_0(t, t')]} \quad (14)$$

เมื่อ λ คือ อัตราส่วนการยืดตัว (extension ratio) และค่าตัวแปร m สำหรับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าตัวแปร m สำหรับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบต่างๆ

Types of deformation	m
Uniaxial elongation	-1/2
Planar extension (pure shear)	0
Ellipsoidal extension	1/2
Equibiaxial extension	1

ค่าคงที่ของ Finger strain tensor แสดงดังสมการที่ 15 และ 16 ตามลำดับ

$$I_1 = \lambda^{-2} + \lambda^{2m} + \lambda^{-2(1+m)} \quad (15)$$

$$I_2 = \lambda^{-2} + \lambda^{-2m} + \lambda^{2(1+m)} \quad (16)$$

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1.1 แผ่นพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทก (high impact polystyrene, HIPS) ความหนา 1 mm และแผ่นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (amorphous polyethylene terephthalate, A-PET) ความหนา 0.5 mm ได้รับการอนุเคราะห์จากบริษัท วิง ฟง แพ็คเกจจิ้ง จำกัด

1.2 เทปกาวอลูมิเนียมชนิดทนความร้อน

1.3 เครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่ง (thermoforming machine) ของบริษัท Bosco รุ่น SB 4060 โดยแทนฮีดแผ่นพลาสติกทำจากวัสดุอลูมิเนียม ขึ้นรูปด้วยระบบนิวแมติกส์ พื้นที่ในการขึ้นรูปเท่ากับ 400x600 mm ความสูงในการขึ้นรูป 150 mm แรงดันไฟฟ้า 220V ดังแสดงในภาพที่ 17



ภาพที่ 17 เครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

1.4 แม่พิมพ์ (mold) ที่ออกแบบให้สามารถติดตั้งแ่งให้ความร้อน เพื่อควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 18 และภาพที่ 19 แม่พิมพ์ที่มีความซับซ้อน ซึ่งได้แก่ ถาดบรรจุภัณฑ์อาหาร ดังแสดงในภาพที่ 20



(ก)



(ข)

ภาพที่ 18 แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลม (ก) แบบคาวีดี และ (ข) แบบปลั๊ก

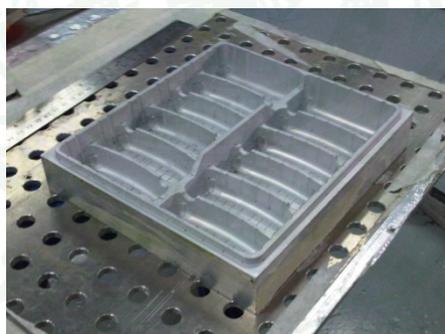


(ก)



(ข)

ภาพที่ 19 แม่พิมพ์ทรงกระบอกสี่เหลี่ยม (ก) แบบคาวีดี และ (ข) แบบปลั๊ก



ภาพที่ 20 แม่พิมพ์ที่มีความซับซ้อน

1.5 แท่งให้ความร้อน (cartridge heater) ของ หจก. สวนหลวงเอ็นเจเนียร์ริง แรงดันไฟฟ้า 200V กำลังไฟฟ้า 1000W สามารถให้ความร้อนที่อุณหภูมิในช่วง 30 ถึง 100°C

1.6 ชุดควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller)

1.7 เครื่องทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงที่อุณหภูมิสูง ของบริษัท Instron รุ่น 5567 ดังแสดงในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 เครื่องทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงที่อุณหภูมิสูง

1.8 เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบมือถือ (portable temperature sensor) ชนิด K (type-K) ของบริษัท Testo รุ่น Testo 925 สามารถวัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ -50 ถึง $1,000^{\circ}\text{C}$ ดังแสดงในภาพที่ 22



ภาพที่ 22 เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบมือถือ

1.9 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC) ของบริษัท Mettler Toledo รุ่น DSC 1 Star System ดังแสดงในภาพที่ 23



ภาพที่ 23 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

1.10 เครื่องวิเคราะห์ความเค้นตกค้าง (stress viewer) ของบริษัท Moldex 3D รุ่น R4.2 ดังแสดงในภาพที่ 24



ภาพที่ 24 เครื่องวิเคราะห์ความเค้นตกค้าง

1.11 คอมพิวเตอร์ (computer) หน่วยประมวลผล Core™2 Duo Processor P8700 ของบริษัท Intel

1.12 โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ภาพ Image Pro-Plus 4.5 ของบริษัท Media Cybernetics

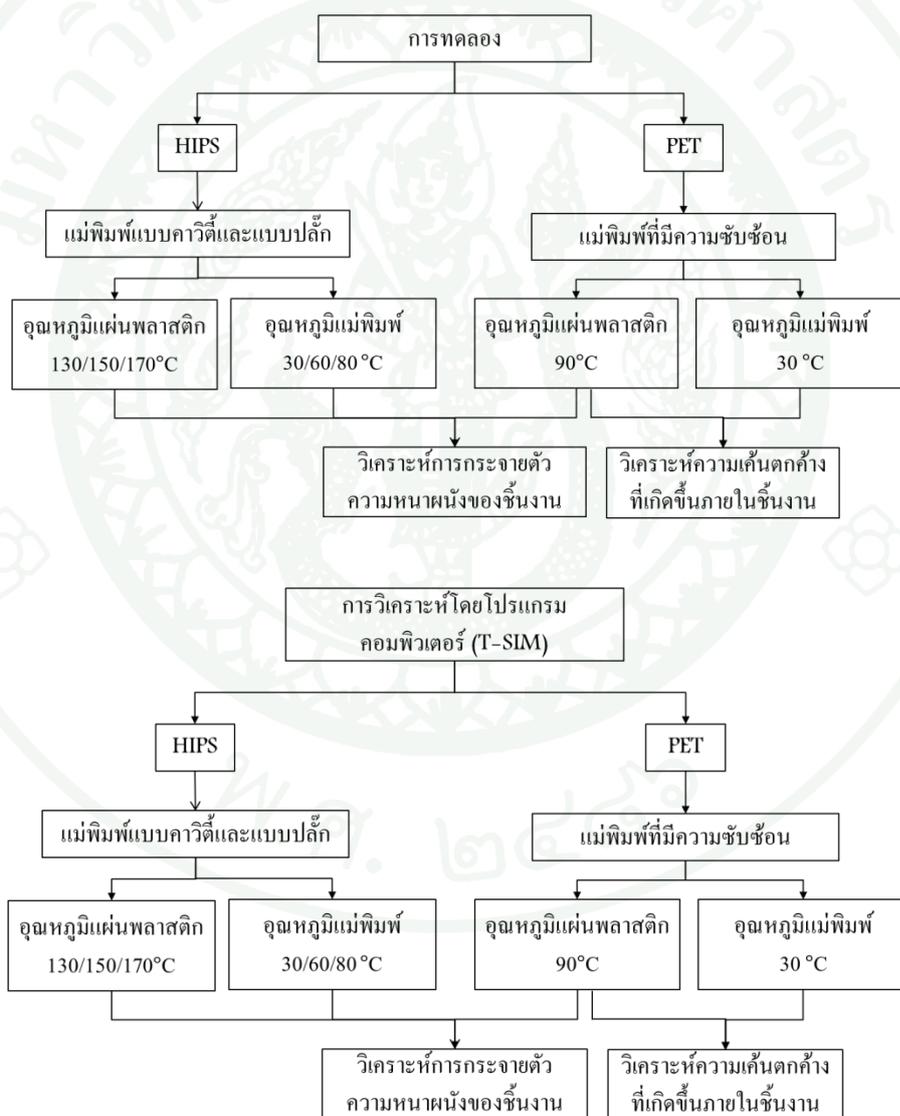
1.13 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer-Aided Design, CAD) ได้แก่ โปรแกรม SolidWorks 2010 สำหรับใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์ และชิ้นงานทดสอบ

1.14 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Computer-Aided Engineering, CAE) ได้แก่ โปรแกรม MSC.Patran สำหรับใช้ในการสร้างเอลิเมนต์บนแบบจำลองชิ้นงาน โปรแกรม T-SIM 4.7f และ MSC.Marc 2010 สำหรับใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาแน่น และความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานทดสอบ ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

วิธีการ

1. ขั้นตอนการทำวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของชนิด และลักษณะแม่พิมพ์ รวมถึงปัจจัยในกระบวนการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป อุณหภูมิแม่พิมพ์ ที่มีต่อความเค้นตกค้างและการกระจายตัวความหนาแน่นของชิ้นงาน ขั้นตอนการทำวิจัย ดังแสดงในภาพที่ 25



ภาพที่ 25 ขั้นตอนการทำวิจัย

2. วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ โดยใช้เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์(Differential Scanning Calorimeter, DSC)

การวิเคราะห์อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิสไตรีน และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต โดยใช้เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ เพื่อใช้ในการกำหนดอุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง โดยใช้อัตราการให้ความร้อน (heating rate) และอัตราการเย็น (cooling rate) ตัวเท่ากัน คือ $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ที่อุณหภูมิทดสอบในช่วงระหว่าง $25\text{-}300^{\circ}\text{C}$

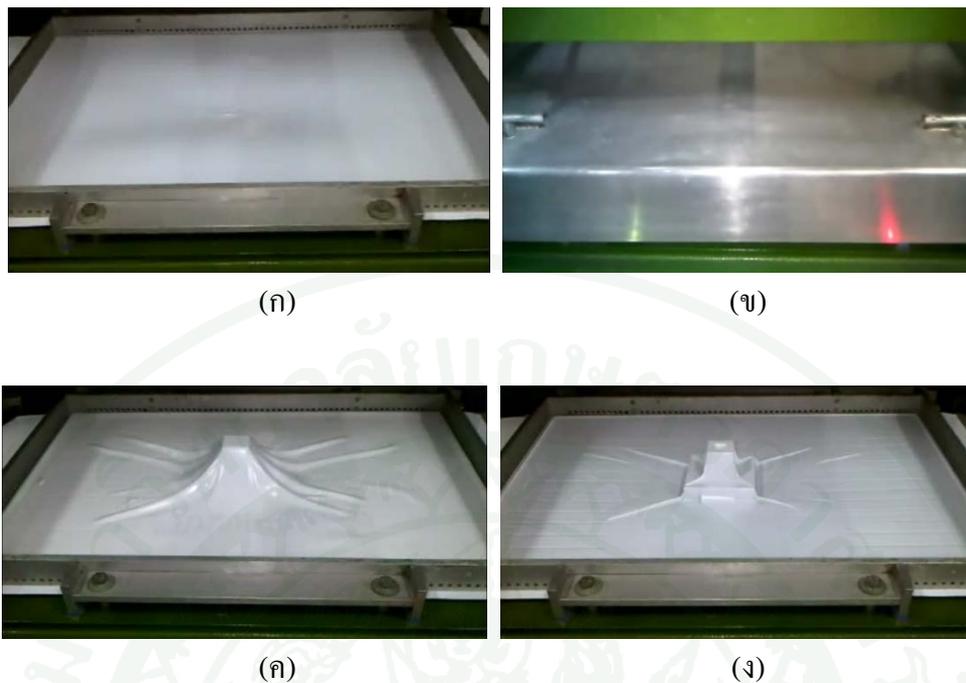
3. การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดอุณหภูมิของแผ่นพอลิสไตรีนที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ โดยติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบมือถือที่บริเวณกึ่งกลางด้านล่างของแผ่นพอลิสไตรีน โดยใช้เทปกาวยึดนิยมนชนิดทนความร้อน ดังแสดงในภาพที่ 26 จากนั้นยึดแผ่นพลาสติกกับแท่นของเครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่ง และให้ความร้อนแก่แผ่นพอลิสไตรีน พร้อมทั้งจับเวลาที่ให้ความร้อนจนแผ่นพอลิสไตรีนมีอุณหภูมิตามที่ได้กำหนดไว้



ภาพที่ 26 ขั้นตอนการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบมือถือ

ในขั้นตอนถัดไปเป็นการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ โดยใช้อุณหภูมิของแผ่นพอลิสไตรีนในการขึ้นรูปชิ้นงานที่ 130 150 และ 170°C ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 27 จากแม่พิมพ์ทั้ง 4 ชนิด เพื่อใช้ในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป และชนิดของแม่พิมพ์ที่มีต่อการกระจายตัวความหนาแน่นของชิ้นงาน



ภาพที่ 27 การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ (ก) ขั้นตอนการยึดจับแผ่นพลาสติก (ข) ขั้นตอนการให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติก (ค) การให้แรงดันสูญญากาศ และแรงทางกล และ (ง) การทำให้ชิ้นงานเย็นตัว

ขั้นตอนต่อไปเป็นการติดตั้งแท่งให้ความร้อนเข้ากับแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 28 และทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 30 60 และ 80°C ตามลำดับ โดยใช้แผ่นพอลิโพรไพลีนความหนา 1 mm อุณหภูมิของแผ่นพลาสติกในการขึ้นรูปชิ้นงานที่ 150°C ซึ่งเงื่อนไขในการขึ้นรูปดังแสดงในตารางที่ 5 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อการกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงาน



ภาพที่ 28 การติดตั้งแท่งให้ความร้อน

ตารางที่ 5 เงื่อนไขในการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบจากแผ่นพอลิสไตรีน

Polystyrene		Grade: HIPS 350E
Mold type	Cavity mold	Plug mold
Sheet thickness (mm)	1	1
Sheet temperature (°C)	130/150/170	130/150/170
Mold temperature (°C)	30/60/80	30/60/80
Cooling time (sec)	15	15

งานวิจัยนี้ได้ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบจากแผ่นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (A-PET) โดยประยุกต์ใช้แม่พิมพ์ที่ใช้ผลิตถาดบรรจุภัณฑ์อาหาร ดังแสดงในภาพที่ 29 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนังและความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน โดยใช้อุณหภูมิของแผ่น A-PET ที่มีความหนา 0.5 mm ในการขึ้นรูปชิ้นงานที่ 90°C ซึ่งเงื่อนไขในการทดสอบ แสดงในตารางที่ 6



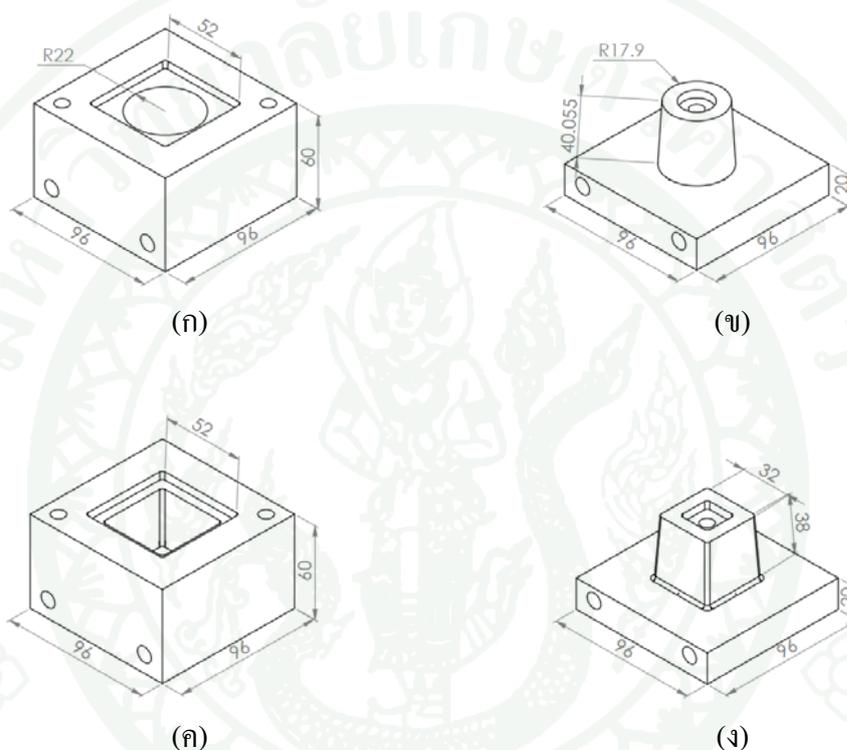
ภาพที่ 29 การขึ้นรูปชิ้นงาน โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีความซับซ้อน

ตารางที่ 6 เงื่อนไขในการขึ้นรูปถาดบรรจุภัณฑ์อาหาร จากแผ่นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

Polyethylene terephthalate	Grade A-PET
Mold type	Tray
Sheet thickness (mm)	0.5
Sheet temperature (°C)	90
Mold temperature (°C)	30
Cooling time (sec)	12

4. การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ สำหรับการออกแบบแม่พิมพ์

งานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม SolidWorks สำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดสอบ และใช้ในการสร้างแบบจำลองของแม่พิมพ์ เพื่อการวิเคราะห์กระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงาน โดยโปรแกรม T-SIM ดังแสดงในภาพที่ 30



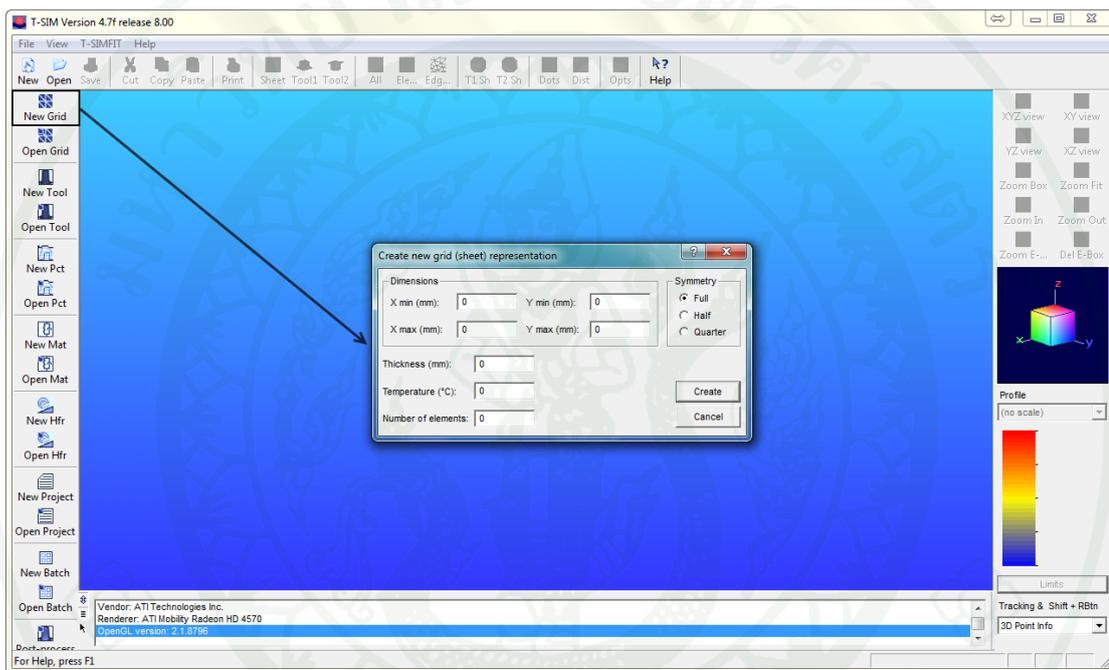
ภาพที่ 30 แบบจำลองแม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (ก) แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบควาดี (ข) แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบปลั๊ก (ค) แม่พิมพ์ทรงกระบอกสี่เหลี่ยมแบบควาดี และ (ง) แม่พิมพ์ทรงกระบอกสี่เหลี่ยมแบบปลั๊ก

5. การวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานโดยใช้โปรแกรม T-SIM

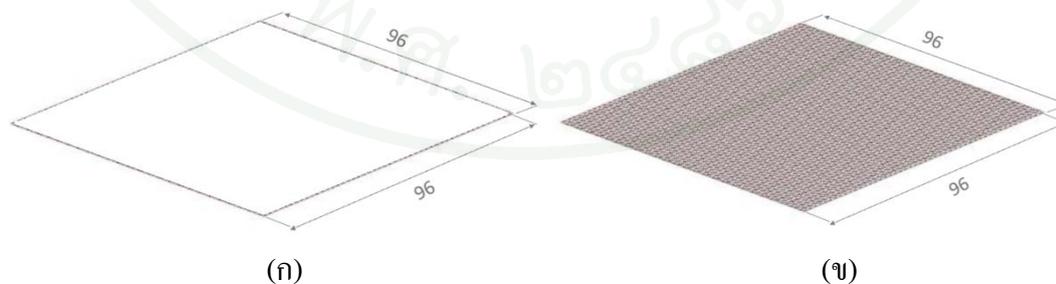
5.1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองของแผ่นพลาสติก

งานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม T-SIM ซึ่งเป็น โปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ในการสร้างแบบจำลอง

พื้นผิว (surface model) ของแผ่นพอลิโอสไตรีนโดยใช้คำสั่ง New grid ดังแสดงในภาพที่ 31 โดยการกำหนดความกว้าง และความยาวของแผ่นพลาสติก เท่ากับ 96 x 96 mm ความหนาเท่ากับ 1 mm จากนั้นกำหนดคุณสมบัติของแผ่นพลาสติกที่ใช้ในการขึ้นรูป และกำหนดจำนวนเอลิเมนต์ที่ต้องการสร้างขึ้นบนแบบจำลองของแผ่นพลาสติก ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้เอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม (triangular element) จำนวน 100,000 เอลิเมนต์ โดยแบบจำลองของแผ่นพลาสติก แสดงดังภาพที่ 32



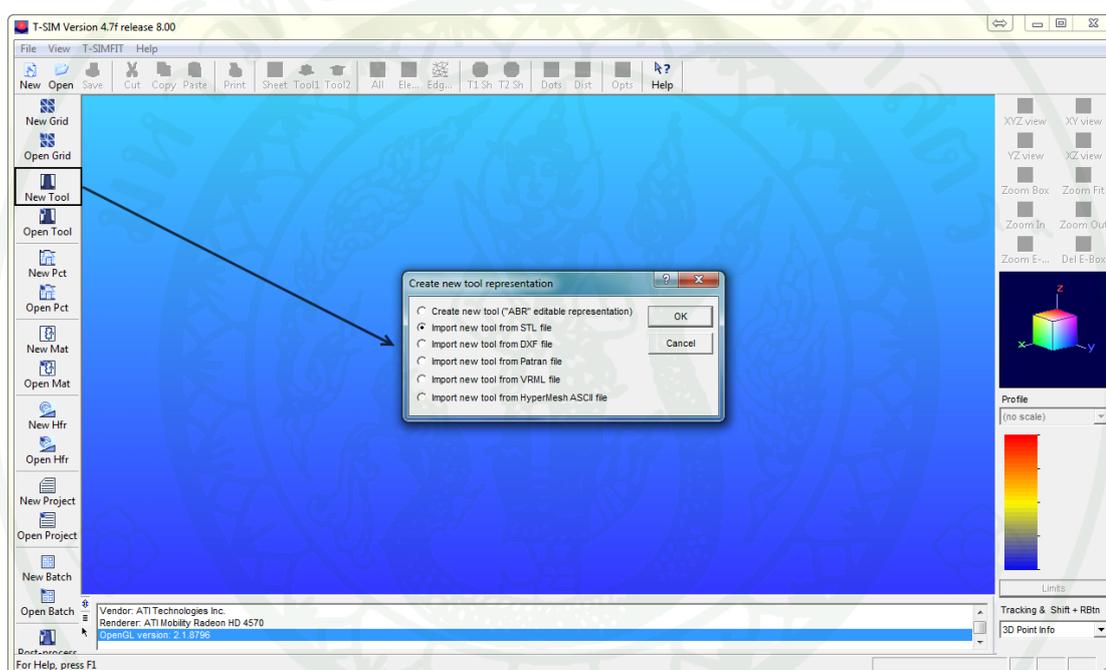
ภาพที่ 31 การสร้างแบบจำลองพื้นผิวของแผ่นพอลิโอสไตรีน



ภาพที่ 32 แบบจำลองของแผ่นพลาสติก (ก) ก่อนสร้างเอลิเมนต์ และ (ข) ภายหลังจากสร้างเอลิเมนต์บนผิวของแผ่นพลาสติก

5.2 ขั้นตอนการนำแบบจำลองของแม่พิมพ์เข้าสู่โปรแกรม T-SIM

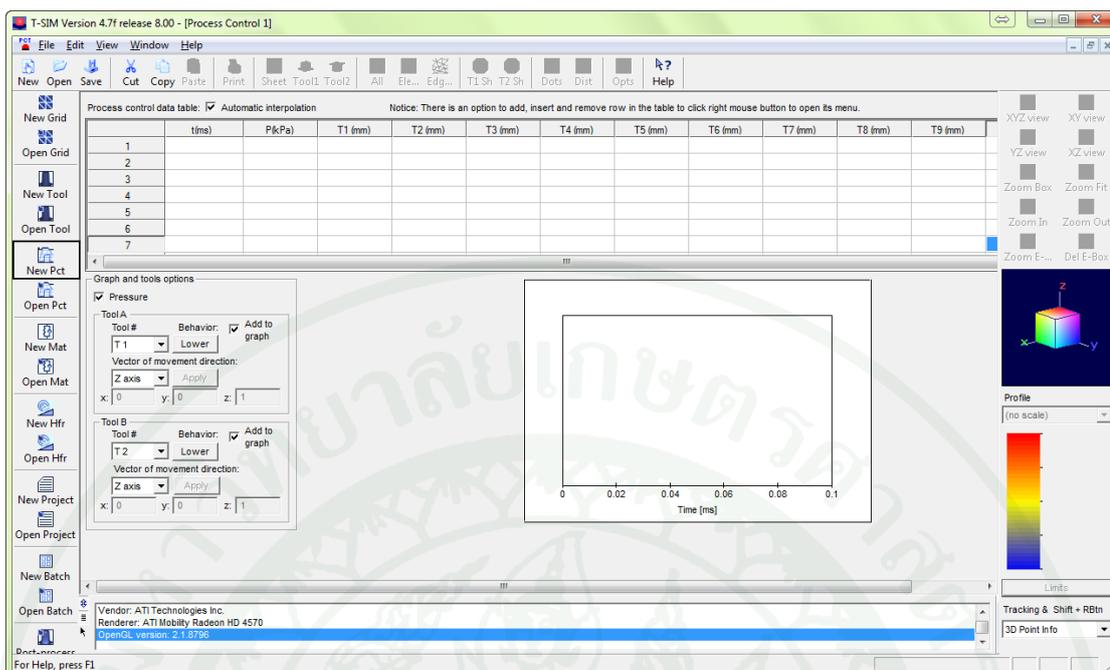
ในการจำลองกระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่งโดยใช้โปรแกรม T-SIM จำเป็นต้องใช้แบบจำลองของแม่พิมพ์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ โดยสามารถสร้างแบบจำลองของแม่พิมพ์ได้จากโปรแกรม SolidWorks และบันทึกไฟล์ในรูปแบบ Standard Tessellation Language (STL) จากนั้นนำแบบจำลองของแม่พิมพ์เข้าสู่โปรแกรม T-SIM โดยใช้คำสั่ง New tool แล้วเลือกประเภทไฟล์เป็น STL ดังแสดงในภาพที่ 33



ภาพที่ 33 การนำแบบจำลองของแม่พิมพ์เข้าสู่โปรแกรม T-SIM

5.3 ขั้นตอนการกำหนดเงื่อนไขในกระบวนการผลิต

โปรแกรม T-SIM มีความสามารถในการกำหนดเงื่อนไขกระบวนการผลิตได้แตกต่างกัน 10 เงื่อนไข โดยใช้คำสั่ง New pct ซึ่งค่าพารามิเตอร์ t คือ เวลาที่ใช้ในการให้แรงดัน P (kPa) และแม่พิมพ์เคลื่อนที่ T (mm) นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดทิศทางเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์แต่ละชั้นในแนวแกน x y และ z ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 34



ภาพที่ 34 การกำหนดเงื่อนไขของกระบวนการผลิตในโปรแกรม T-SIM

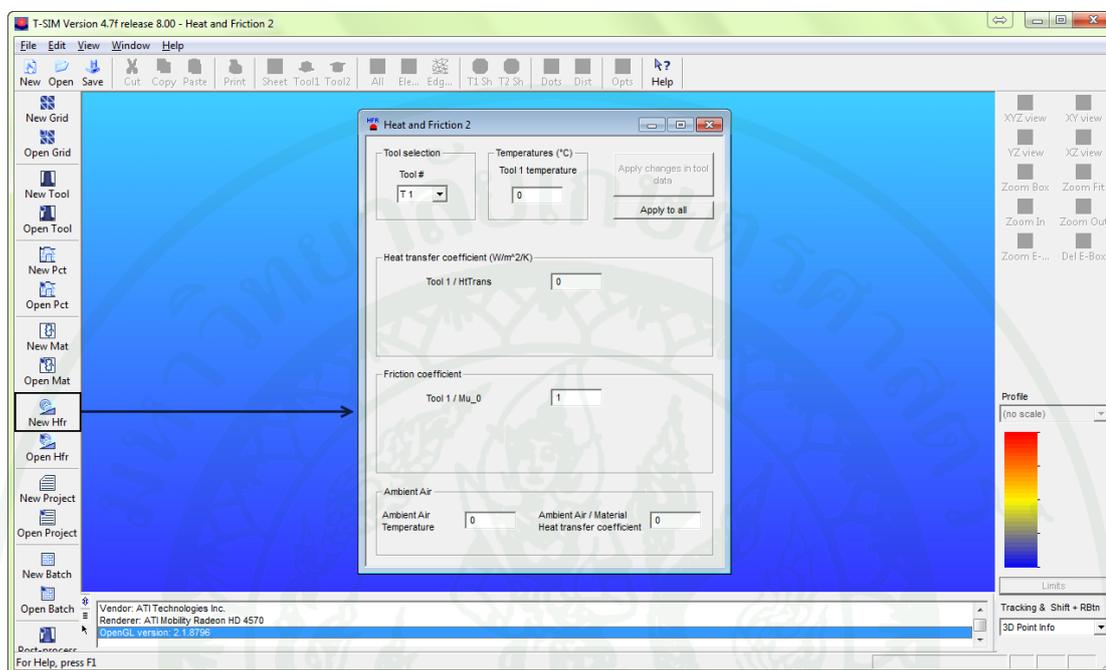
5.4 ขั้นตอนการกำหนดแบบจำลองของวัสดุ

ในการวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาแน่นของชิ้นงาน สามารถเลือกใช้แบบจำลองวัสดุของพอลิโอสไตรีนชนิดทนแรงกระแทก และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ซึ่งมีอยู่ในฐานข้อมูลวัสดุของโปรแกรม T-SIM เพื่อกำหนดพฤติกรรมของแผ่นพลาสติกเมื่อได้รับแรงดัน และความร้อนที่ใช้ในการขึ้นรูป สำหรับการวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาแน่นและความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน

5.5 ขั้นตอนการกำหนดสมบัติทางความร้อนของแม่พิมพ์ และแผ่นพลาสติก

โปรแกรม T-SIM สามารถกำหนดสมบัติทางความร้อนของแม่พิมพ์ และแผ่นพลาสติกได้ โดยค่าพารามิเตอร์ Tool temperature คือ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แม่พิมพ์ที่ทำจากอลูมิเนียม ซึ่งใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (heat transfer coefficient) เท่ากับ $500 \text{ W/m}^2\text{K}$ และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (friction coefficient) เท่ากับ 0.5 จากนั้นกำหนดอุณหภูมิ

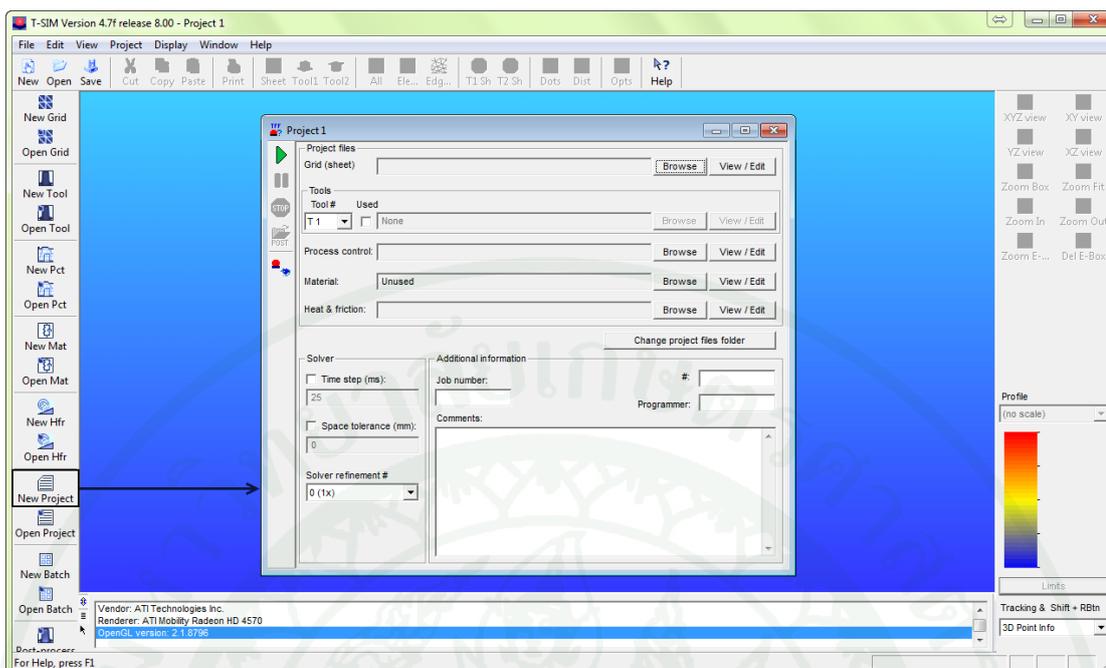
ของระบบเป็น 30°C และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างแผ่นพลาสติกกับระบบ (ambient air temperature) เท่ากับ $5.7 \text{ W/m}^2\text{K}$ ดังแสดงในภาพที่ 35



ภาพที่ 35 การกำหนดสมบัติทางความร้อนของแม่พิมพ์ และแผ่นพลาสติก

5.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

การวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง สามารถทำได้โดยการเลือกใช้ข้อมูลในหัวข้อ 5.1-5.4 ดังแสดงในภาพที่ 36 โดยระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ของโปรแกรมขึ้นอยู่กับความซับซ้อน และจำนวนของชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปภายในแม่พิมพ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจำนวนของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

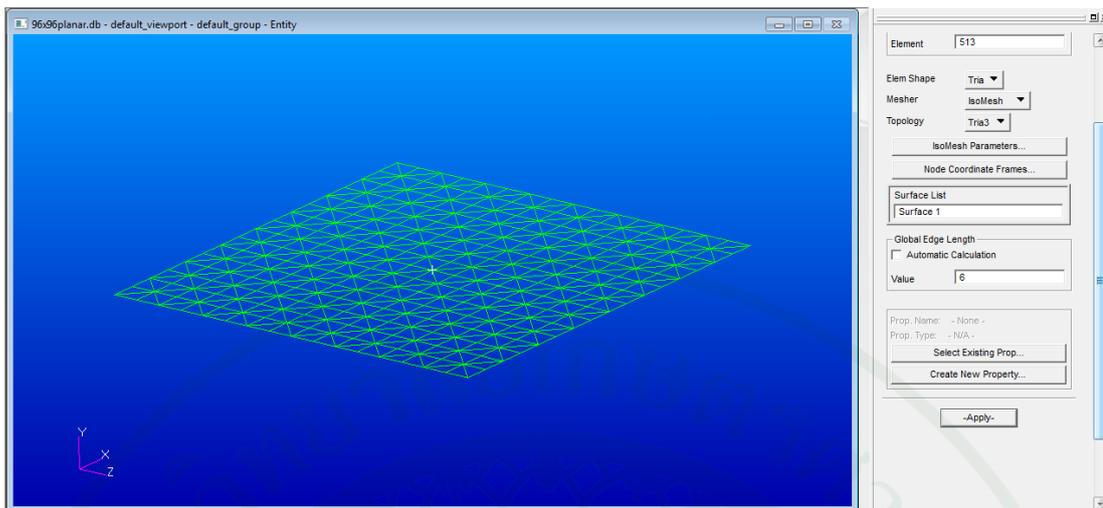


ภาพที่ 36 การวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

6. การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

6.1 การสร้างแบบจำลองพื้นผิวเพื่อใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูป

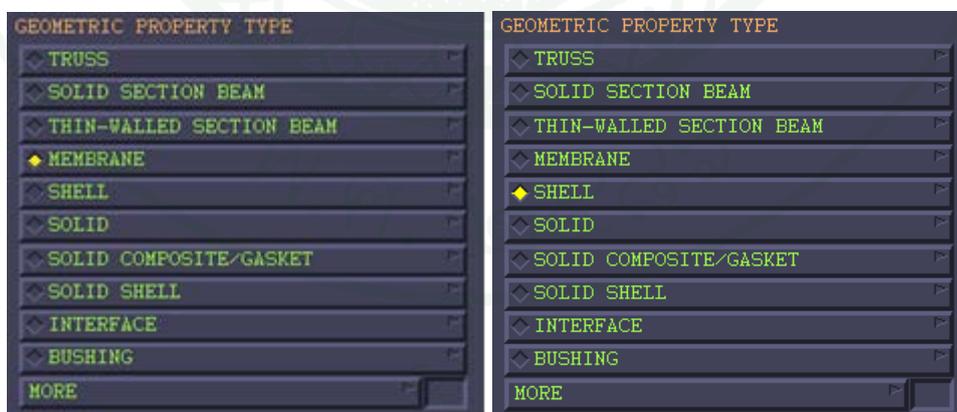
โปรแกรม SolidWorks ถูกใช้ในการสร้างแบบจำลองของแม่พิมพ์ และแบบจำลองของแผ่นพลาสติกที่ใช้ในการขึ้นรูป จากนั้นสร้างเอลิเมนต์ชนิดสามเหลี่ยมบนแบบจำลองของแผ่นพลาสติก โดยมีอัตราส่วนของความยาวฐานต่อความสูงเท่ากับ 2 ต่อ 1 โดยใช้โปรแกรม MSC.Patran ดังแสดงในภาพที่ 37



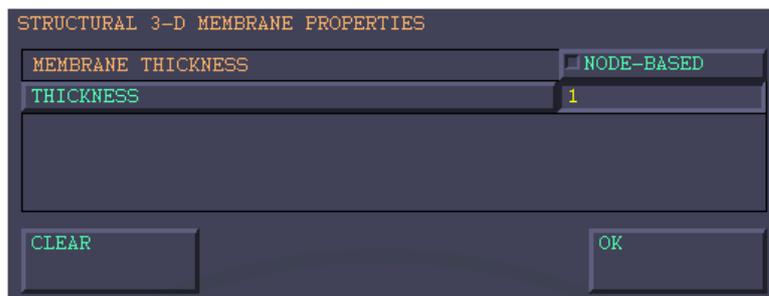
ภาพที่ 37 การสร้างเอลิเมนต์บนแบบจำลองของแผ่นพอลิไทรไทรน

6.2 การวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

6.2.1 ประกอบแบบจำลองพื้นผิวของแผ่นพลาสติก และแม่พิมพ์เข้าด้วยกัน โดยใช้โปรแกรม MSC.Marc จากนั้นกำหนดลักษณะของเอลิเมนต์ โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เอลิเมนต์แบบเยื่อบาง และเอลิเมนต์แบบเปลือก ดังแสดงในภาพที่ 38 จากนั้นกำหนดความหนาของแผ่นพลาสติก ดังแสดงในภาพที่ 39

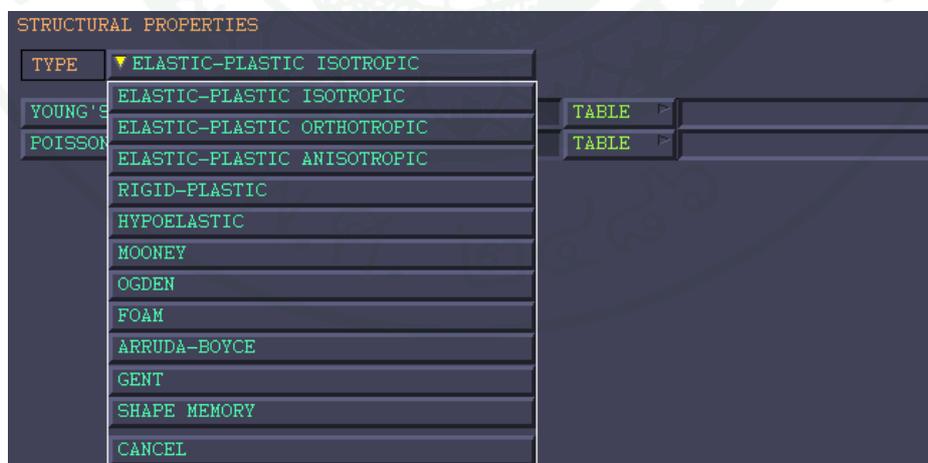


ภาพที่ 38 การกำหนดสมบัติทางเรขาคณิตของเอลิเมนต์ (ก) แบบเยื่อบาง (membrane) และ (ข) แบบเปลือก (shell)

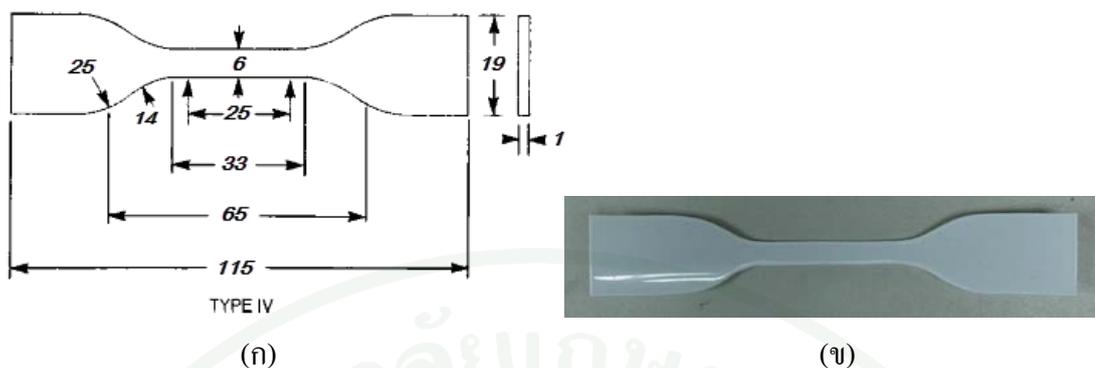


ภาพที่ 39 การกำหนดความหนาของแผ่นพลาสติกเท่ากับ 1 mm

6.2.2 ในการวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ต้องกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียด เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองของวัสดุ ซึ่งประกอบไปด้วยแบบจำลอง Elastic-plastic isotropic และแบบจำลอง Hyperelastic ของ Mooney-Rivlin ดังแสดงในภาพที่ 40 โดยสามารถหาได้จากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงที่อุณหภูมิสูงของพอลิไทรีน ตามมาตรฐาน ASTM D638 type IV ดังแสดงในภาพที่ 41 อุณหภูมิทดสอบเท่ากับ 130 150 และ 170°C โดยให้ความร้อนแก่ชิ้นงานทดสอบเป็นเวลา 15 นาที และความเร็วในการดึงเท่ากับ 120 240 และ 480 mm/min ตามลำดับ ในกรณีการทดสอบความต้านทานแรงดึงของพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต ใช้อุณหภูมิทดสอบเท่ากับ 90°C และความเร็วในการดึง 500 mm/min แสดงดังภาพที่ 42 และเงื่อนไขในการทดสอบแสดงในตารางที่ 7



ภาพที่ 40 การเลือกใช้แบบจำลองเพื่อกำหนดพฤติกรรมของแผ่นพลาสติก



ภาพที่ 41 ขนาดของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน (ก) ASTM D638 type IV และ (ข) ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ



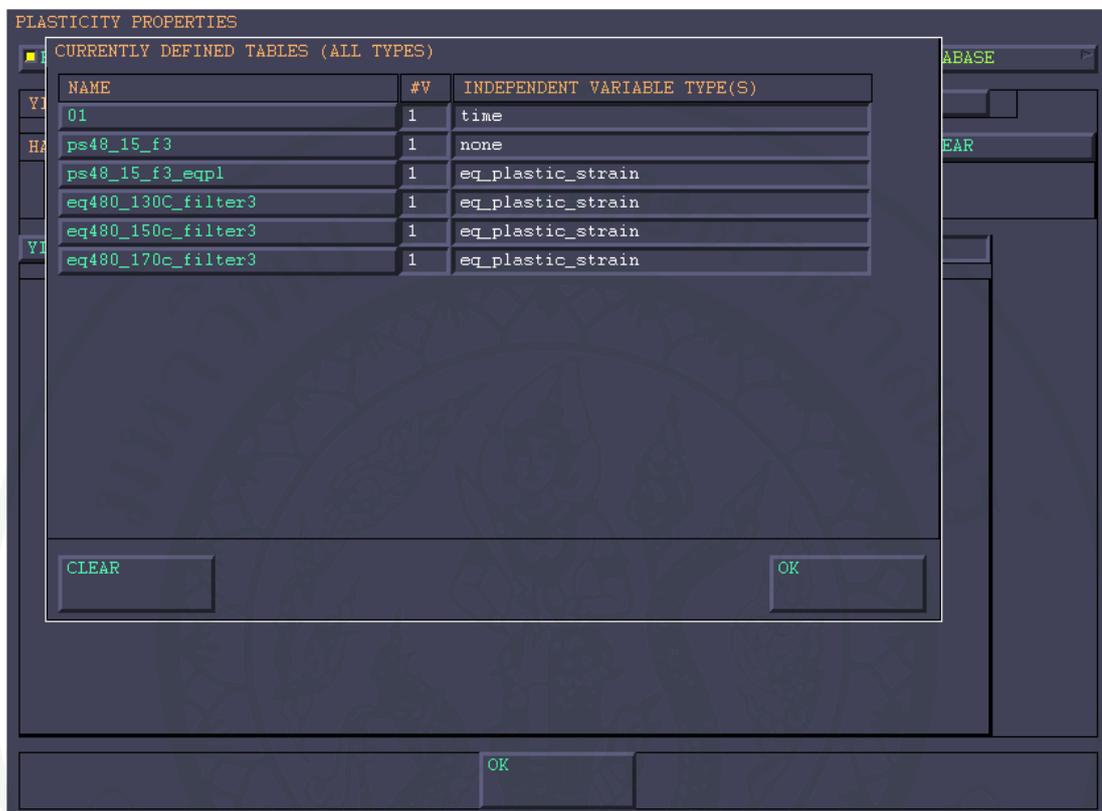
ภาพที่ 42 การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงที่อุณหภูมิสูง

ตารางที่ 7 เงื่อนไขในการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง

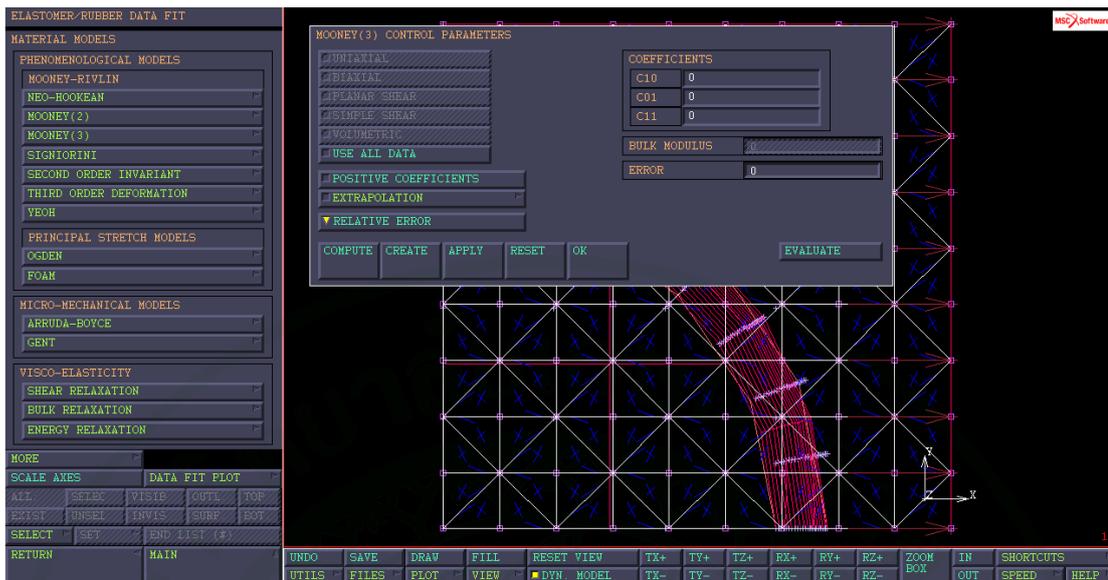
Materials	Test temperature (°C)	Cross-head speed (mm/min)
Polystyrene	130/150/170	120/240/480
Polyethylene terephthalate	90	500

การสร้างแบบจำลองของวัสดุ เพื่อกำหนดพฤติกรรมของแผ่นพอลิไทรีนเมื่อได้รับความร้อน สามารถทำได้โดยการระบุความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดที่ได้จากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ในกรณีของแบบจำลอง Elastic plastic isotropic โดยการใช้

คำสั่ง Plasticity ดังแสดงในภาพที่ 43 และสำหรับแบบจำลอง Mooney โดยการใช้คำสั่ง Experiment data fit กำหนดประเภทวัสดุเป็น Elastomers ดังแสดงในภาพที่ 44

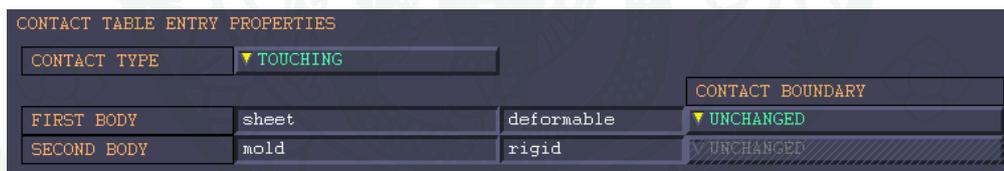


ภาพที่ 43 การสร้างแบบจำลอง Elastic plastic isotropic



ภาพที่ 44 การสร้างแบบจำลอง Mooney

6.2.3 ขั้นตอนการกำหนดเงื่อนไขการสัมผัส ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดเงื่อนไขการสัมผัสระหว่างแผ่นพลาสติก และแม่พิมพ์เป็นแบบสัมผัส (touch) ดังแสดงในภาพที่ 45



ภาพที่ 45 การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัส

6.2.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูป โดยกำหนดให้อุณหภูมิ และความดันในการขึ้นรูปคงที่ และเนื่องจากแม่พิมพ์และแผ่นพอลิสไตรีนมีความสมมาตร จึงสามารถใช้แบบจำลองพื้นผิวเพียงหนึ่งในสี่เพื่อลดระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณของโปรแกรม ดังแสดงในภาพที่ 46



ภาพที่ 46 แบบจำลองพื้นผิวที่ใช้ในการจำลองกระบวนการขึ้นรูปด้วยโปรแกรม MSC.Marc

7. การวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงาน

งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ และเปรียบเทียบการกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงาน โดยสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนาผนังของชิ้นงานเมื่อเทียบกับความหนาเริ่มต้น (thickness fraction) ดังแสดงในสมการที่ 17 กับตำแหน่งในการวัดความหนาต่อความยาวของชิ้นงานทั้งหมด (relative length) ดังแสดงในสมการที่ 18

$$\frac{t}{t_0} = \text{อัตราส่วนความหนาผนังของชิ้นงานเมื่อเทียบกับความหนาเริ่มต้น} \quad (17)$$

โดยค่า t คือ ความหนาที่วัดได้ ณ ตำแหน่งใดๆ และ t_0 คือ ความหนาเริ่มต้นของแผ่นพลาสติกที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

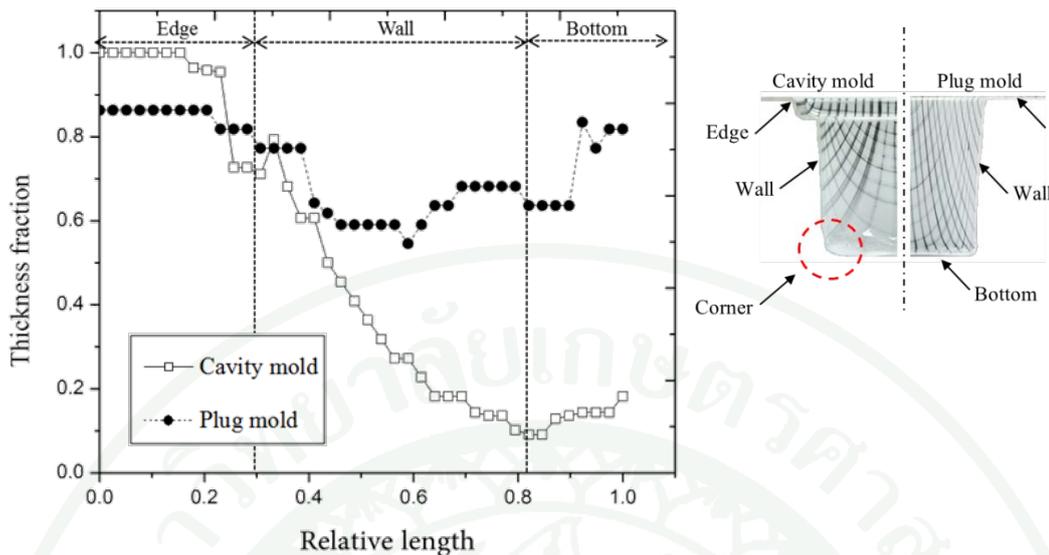
$$\frac{x_1}{x_0} = \text{ตำแหน่งในการวัดความหนาต่อความยาวของชิ้นงานทั้งหมด} \quad (18)$$

โดยค่า x คือ ระยะทางจากขอบชิ้นงานถึงตำแหน่งในการวัด และ x_0 คือ ระยะทางจากขอบถึงฐานของชิ้นงาน

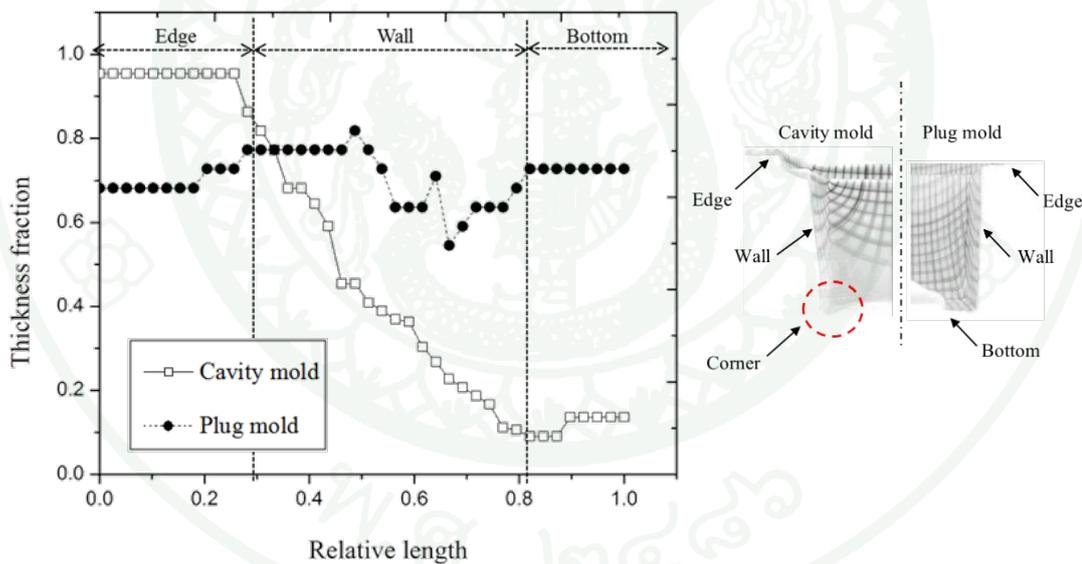
ผลและวิจารณ์

1. อิทธิพลของชนิดแม่พิมพ์ที่มีต่อการกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงาน

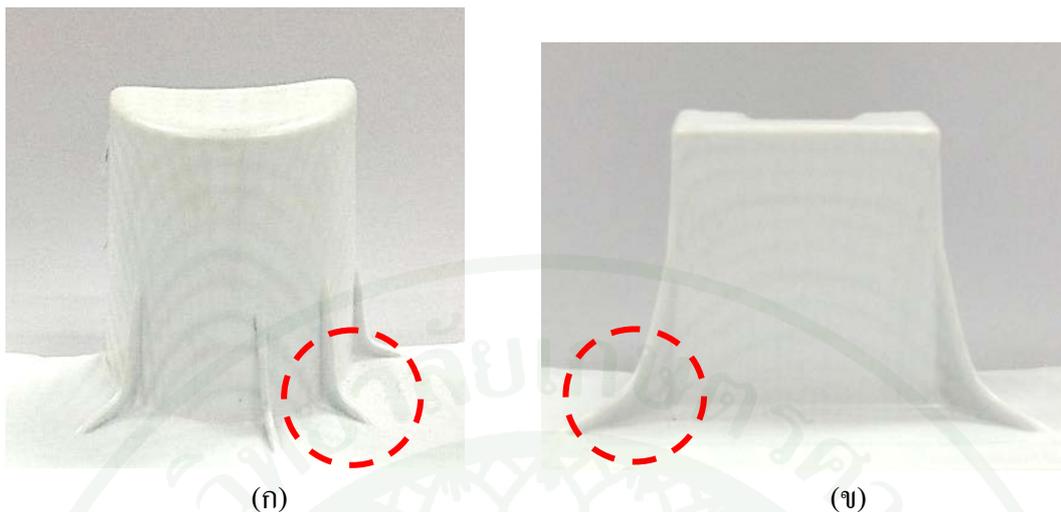
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของชนิดแม่พิมพ์แบบคาวิตี้ และแม่พิมพ์แบบปลั๊ก โดยเปรียบเทียบการกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานที่เกิดขึ้น เมื่อใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปของแผ่นพอลิสไตรีนเท่ากับ 150°C และความหนาเริ่มต้นของแผ่นพอลิสไตรีนเท่ากับ 1 mm จากผลการวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์ทรงกระบอกกลม และแม่พิมพ์ทรงกระบอกสี่เหลี่ยมที่ระยะต่างๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 47 และภาพที่ 48 พบว่า การกระจายตัวความหนาผนังมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ในกรณีชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบคาวิตี้มีความหนาผนังลดลงอย่างมาก ตามระยะทางจากขอบของชิ้นงาน (edge) โดยบริเวณมุมของชิ้นงานเป็นบริเวณที่มีความบางมากที่สุด ซึ่งมีค่าประมาณ 0.1 mm ในขณะที่ชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบปลั๊กมีการกระจายตัวความหนาผนังที่สม่ำเสมอ โดยผนังของชิ้นงานมีความหนาอยู่ที่ประมาณ 0.6 mm ทั้งนี้มีสาเหตุมาจาก เกิดการดึงยึดเนื้อพลาสติกในบริเวณที่เป็นขอบของชิ้นงานในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป โดยพิจารณาได้จากความหนาในบริเวณที่เป็นขอบของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบปลั๊กมีความบางกว่าเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบคาวิตี้ อย่างไรก็ตามการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบปลั๊กมีข้อจำกัด คือ อาจเกิดรอยพับบนชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 49 และนอกจากนี้ในกรณีที่แม่พิมพ์เป็นแบบปลั๊กหลายชิ้นงาน (multiple plugs) เมื่อขึ้นรูปชิ้นงานทำให้เกิดการดึงเนื้อพลาสติกระหว่างส่วนที่เป็นขอบของชิ้นงาน ดังนั้นในการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบปลั๊กจึงจำเป็นต้องใช้พื้นที่ในการขึ้นรูปมากกว่าการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบคาวิตี้ ส่งผลให้ผลิตชิ้นงานที่ได้จำนวนที่น้อยกว่าการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบคาวิตี้ เมื่อใช้แผ่นพลาสติกในการขึ้นรูปที่มีขนาดเท่ากัน



ภาพที่ 47 การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลม



ภาพที่ 48 การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกสี่เหลี่ยม

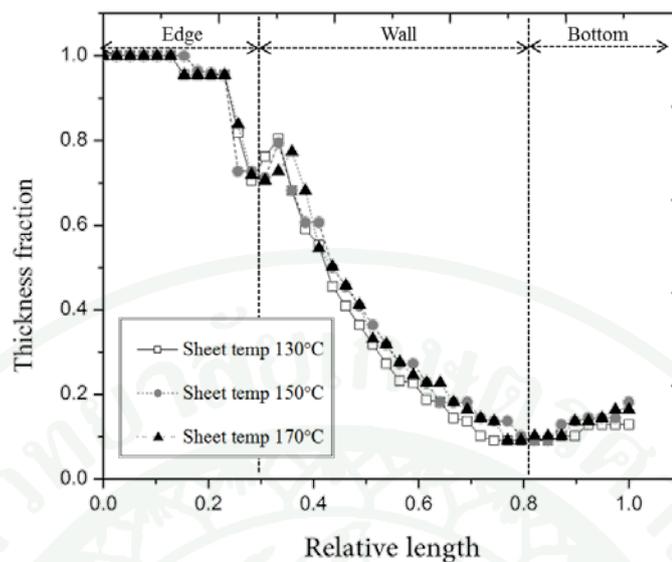


ภาพที่ 49 รอยพับที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานเทอร์โมฟอร์มมิ่งเมื่อใช้แม่พิมพ์แบบปลั๊ก

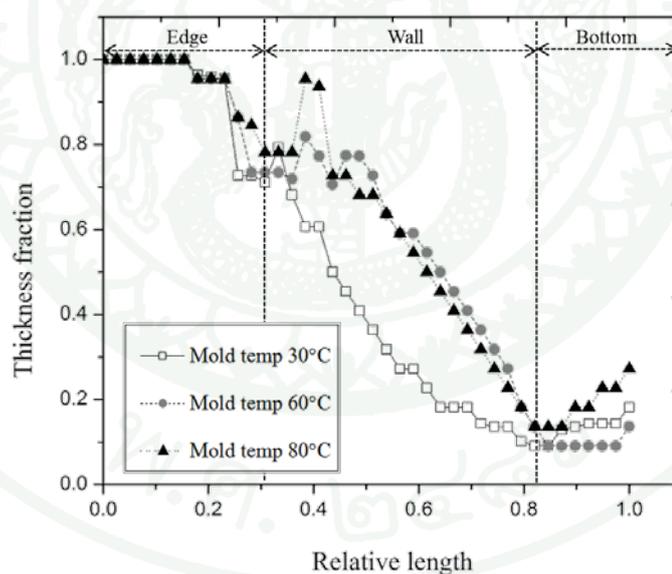
(ก) แม่พิมพ์ลักษณะทรงกระบอกกลม และ (ข) แม่พิมพ์ลักษณะทรงกระบอกสี่เหลี่ยม

2. อิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นพลาสติกและอุณหภูมิของแม่พิมพ์ ที่มีต่อการกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์แบบควิตี้

ภาพที่ 50 แสดงผลการเปรียบเทียบการกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงาน ที่อุณหภูมิในการขึ้นรูปของแผ่นพอลิสไตรีนเท่ากับ 130 150 และ 170°C ตามลำดับ โดยใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบควิตี้ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 30°C จากผลการวิเคราะห์พบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิแผ่นพอลิสไตรีนในช่วงดังกล่าว ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาผนังของชิ้นงานที่เกิดขึ้น และหากพิจารณาอิทธิพลของการเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ตั้งแต่ 30 ถึง 80°C เมื่อใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปแผ่นพอลิสไตรีนเท่ากับ 150°C ดังแสดงในภาพที่ 51 พบว่า ความหนาผนังชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่ออุณหภูมิแม่พิมพ์เพิ่มขึ้นจาก 30°C เป็น 60°C อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิของแม่พิมพ์จาก 60°C เป็น 80°C ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาผนังของชิ้นงาน



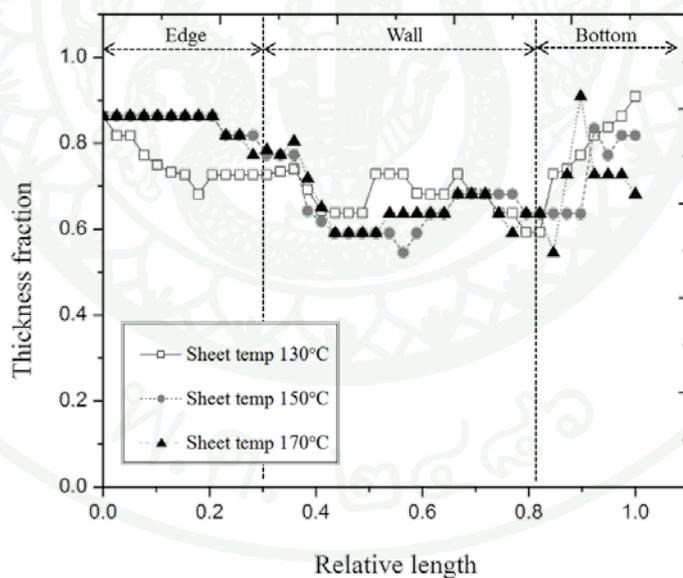
ภาพที่ 50 การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบ คาวีตี้ ที่อุณหภูมิขึ้นรูปของแผ่นพอลิสไตรีนต่างๆ กัน



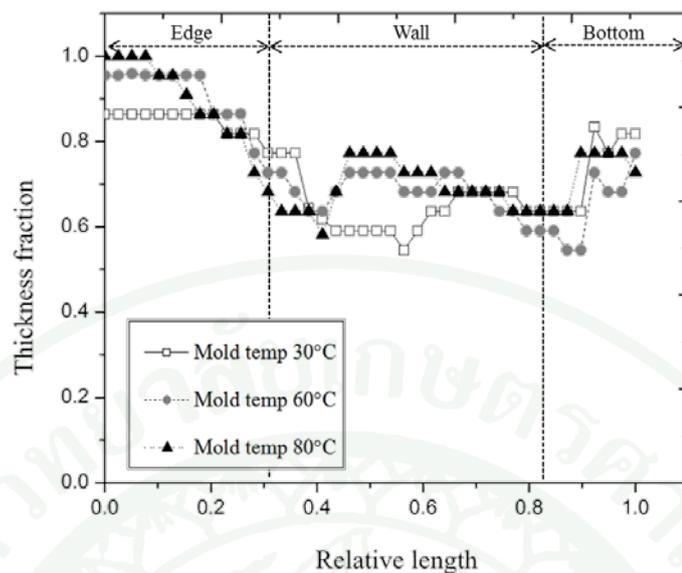
ภาพที่ 51 การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบ คาวีตี้ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่างๆ กัน

3. อิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นพลาสติกและอุณหภูมิของแม่พิมพ์ ที่มีต่อการกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์แบบปลัก

ภาพที่ 52 แสดงผลการเปรียบเทียบการกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงาน ที่อุณหภูมิในการขึ้นรูปของแผ่นพอลิโพรไพลีนต่างๆ กัน โดยใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบปลัก ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 30°C จากผลการวิเคราะห์ พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแผ่นพอลิโพรไพลีนจาก 130°C เป็น 170°C แผ่นพลาสติกที่บริเวณผนัง (wall) มีความสามารถในการยึดตัวเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ไม่เกิดการดึงยึดที่บริเวณขอบของชิ้นงาน ความหนาผนังชิ้นงานจึงมีแนวโน้มลดลง และหากพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อความหนาผนังชิ้นงาน เมื่อใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปแผ่นพอลิโพรไพลีนเท่ากับ 150°C ดังแสดงในภาพที่ 53 พบว่า ให้ผลที่สอดคล้องกับการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นพลาสติก กล่าวคือ การเพิ่มอุณหภูมิของแม่พิมพ์ส่งผลให้เกิดการยึดตัวที่บริเวณผนังของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น โดยไม่เกิดการยึดตัวที่บริเวณขอบของชิ้นงาน ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของความหนาผนังระหว่างที่บริเวณขอบ และบริเวณผนังเพิ่มมากขึ้น



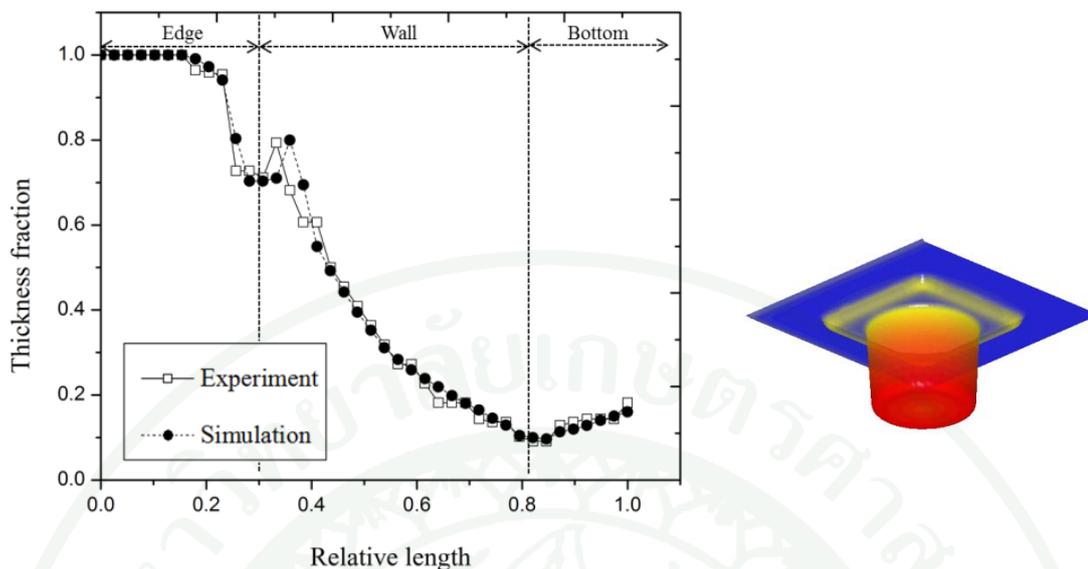
ภาพที่ 52 การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานที่ขึ้นรูป โดยใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบปลัก ที่อุณหภูมิขึ้นรูปแผ่นพอลิโพรไพลีนต่างๆ กัน เมื่อใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C



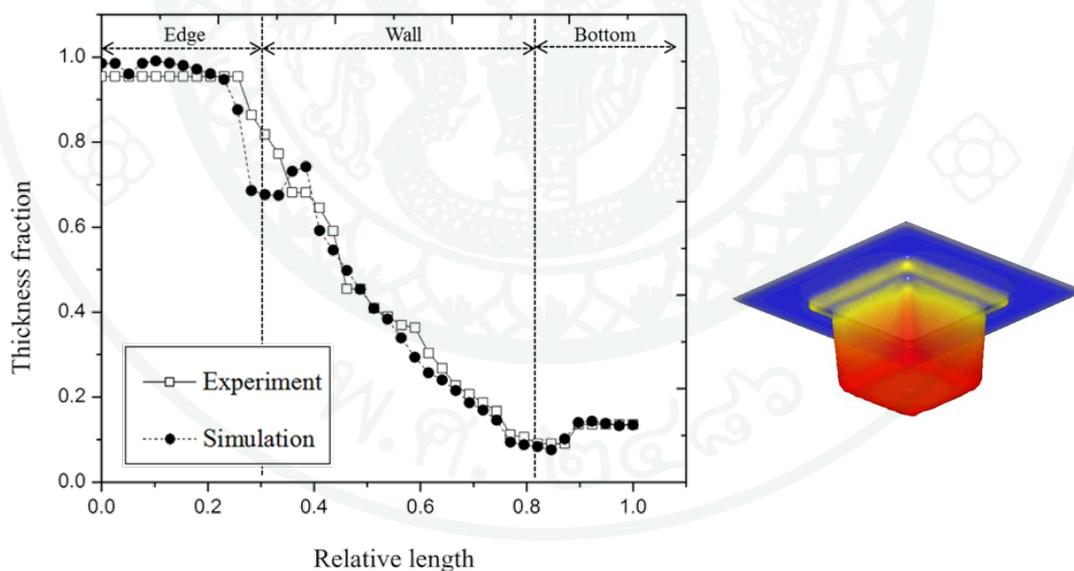
ภาพที่ 53 การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานที่ขึ้นรูป โดยใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบปลั๊ก ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่างๆ กัน เมื่อใช้อุณหภูมิแผ่นพอลิस्टาไร์น 150°C

4. การเปรียบเทียบการกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานที่ได้จากการทดลอง และผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรม T-SIM

งานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม T-SIM ในการวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานโดยใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลม และสี่เหลี่ยมทั้งแบบคาวิตี และแบบปลั๊ก เมื่อใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปแผ่นพอลิस्टาไร์น 150°C และใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 30°C จากผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรม T-SIM เทียบกับผลการตรวจวัดจริง เมื่อใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลม และสี่เหลี่ยมแบบคาวิตี ดังแสดงในภาพที่ 54 และ 55 พบว่า ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาผนังของชิ้นงานที่บริเวณต่างๆ มีความสอดคล้อง และใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง

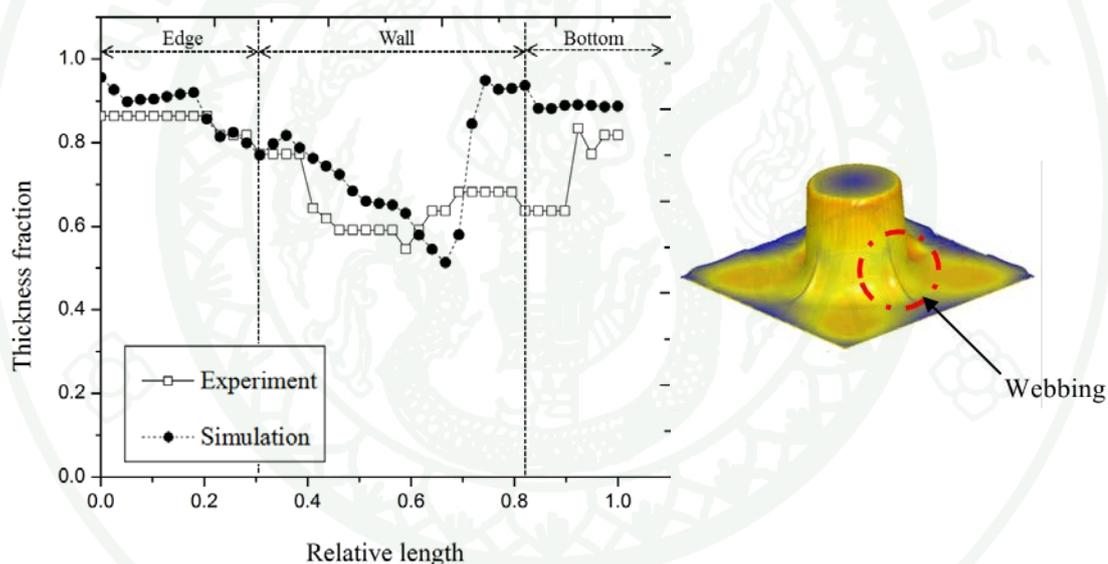


ภาพที่ 54 การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม T-SIM และผลการตรวจวัดจริง เมื่อใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบควัดที่อุณหภูมิในการขึ้นรูปแผ่นพอลิस्टาไทริน และอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 150°C และ 30°C ตามลำดับ

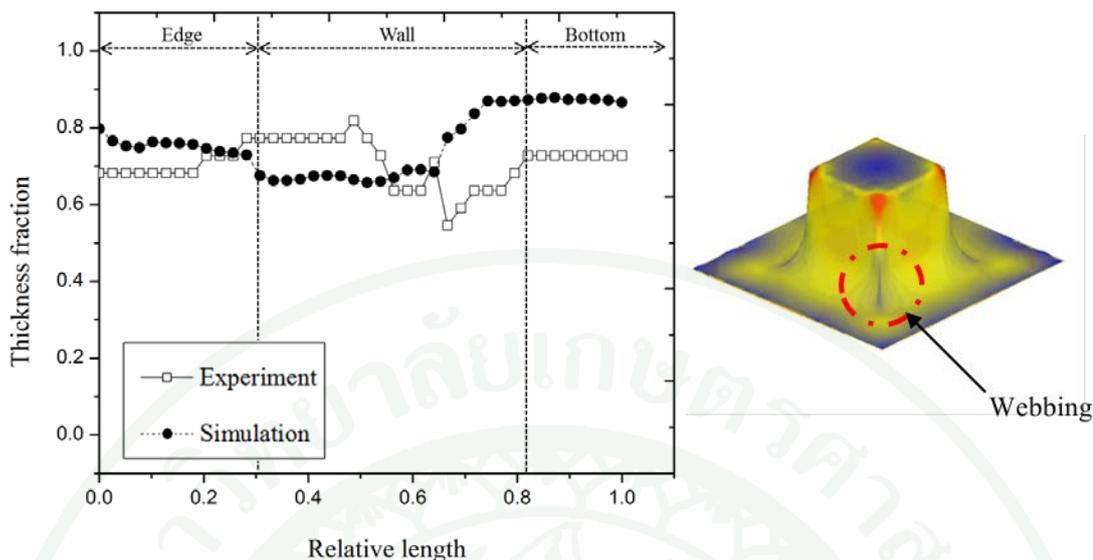


ภาพที่ 55 การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม T-SIM และผลการตรวจวัดจริง เมื่อใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกสี่เหลี่ยมแบบควัดที่อุณหภูมิในการขึ้นรูปแผ่นพอลิस्टาไทริน และอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 150°C และ 30°C ตามลำดับ

นอกจากนี้หากพิจารณาผลการวิเคราะห์ค่าความหนาผนังที่ได้จากโปรแกรม T-SIM เมื่อขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์แบบปลั๊ก ดังแสดงในภาพที่ 56 และ 57 พบว่า ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาผนังของชิ้นงานที่ได้จากโปรแกรม T-SIM ให้ผลที่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการตรวจวัดจริง และแสดงให้เห็นถึงรอยพับที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน อย่างไรก็ตามค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ยังคงมีความแตกต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบปลั๊ก ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิต (non-isothermal) ทำให้แผ่นพลาสติกที่ใช้ในการขึ้นรูปมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันในแต่ละส่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณขอบของแผ่นพลาสติก ซึ่งเกิดการถ่ายเทความร้อนออกสู่ภายนอก ส่งผลให้ที่บริเวณขอบมีอุณหภูมิต่ำกว่าที่บริเวณกึ่งกลางของแผ่นพลาสติก ในขณะที่การวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม T-SIM ได้กำหนดให้แผ่นพลาสติกมีอุณหภูมิคงที่ และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลาในกระบวนการผลิต (isothermal condition)

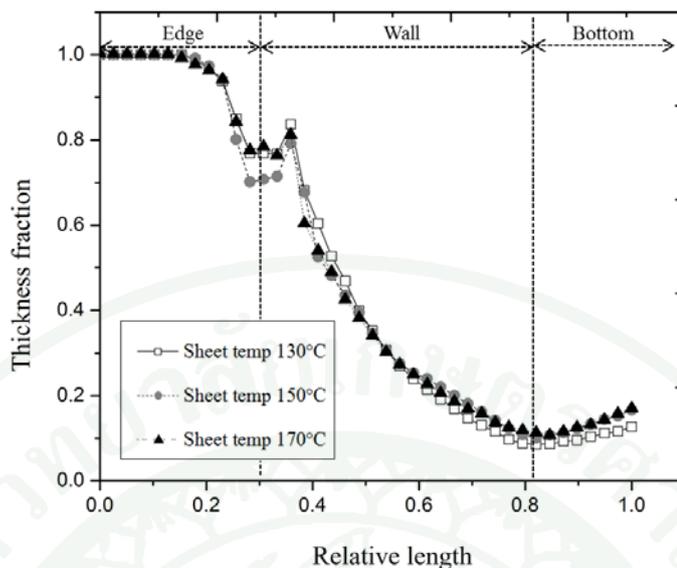


ภาพที่ 56 การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม T-SIM และผลการตรวจวัดจริง เมื่อใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบปลั๊ก ที่อุณหภูมิในการขึ้นรูปแผ่นพอลิสไตรีน และอุณหภูมิแม่พิมพ์ เท่ากับ 150°C และ 30°C ตามลำดับ

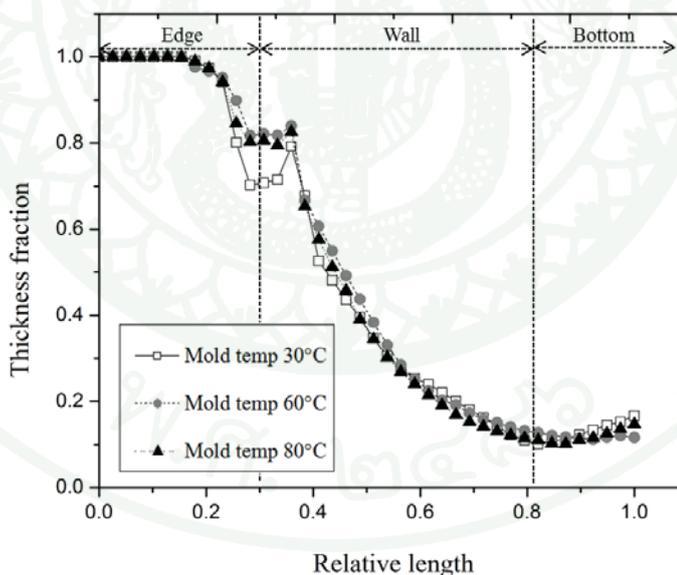


ภาพที่ 57 การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม T-SIM และผลการตรวจวัดจริง เมื่อใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกสี่เหลี่ยมแบบปลัก ที่อุณหภูมิในการขึ้นรูปแผ่นพอลิสไตรีน และอุณหภูมิแม่พิมพ์ เท่ากับ 150°C และ 30°C ตามลำดับ

นอกจากนี้หากพิจารณาผลการวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบควิดี้ที่ได้จากโปรแกรม T-SIM เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแผ่นพลาสติก ดังแสดงในภาพที่ 58 พบว่า ให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดลองจริง (ดังแสดงในภาพที่ 59) กล่าวคือ การเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นพลาสติก ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาผนังที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน อย่างไรก็ตามหากพิจารณาผลการวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนังเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 59 พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาผนังที่เกิดขึ้น ซึ่งแตกต่างจากผลการทดลองจริง (ดังแสดงในภาพที่ 51) ที่แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์จาก 30 เป็น 60°C ส่งผลให้ชิ้นงานมีความหนาที่บริเวณผนังเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากสมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งกำหนดให้ตัวแปรบางตัวของแผ่นพลาสติก ซึ่งได้แก่ ความหนาแน่น (density, ρ) ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity, k) ค่าความจุความร้อน (heat capacity, C) รวมทั้งสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (heat transfer coefficient, α) และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (friction coefficient, μ) ระหว่างแผ่นพลาสติก และผิวของแม่พิมพ์ เป็นค่าคงที่ ซึ่งอาจส่งผลให้ผลจากการวิเคราะห์มีความแตกต่างกับผลการตรวจวัดที่ได้จากการทดลองจริง

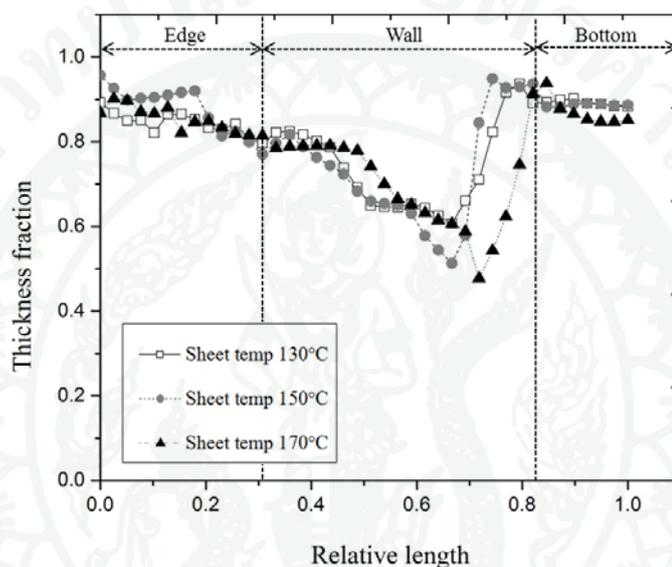


ภาพที่ 58 การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม T-SIM เมื่อใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบคาวิตี้ ที่อุณหภูมิในการขึ้นรูปแผ่นพอลิสไตรีนต่างๆ กัน และอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 30°C

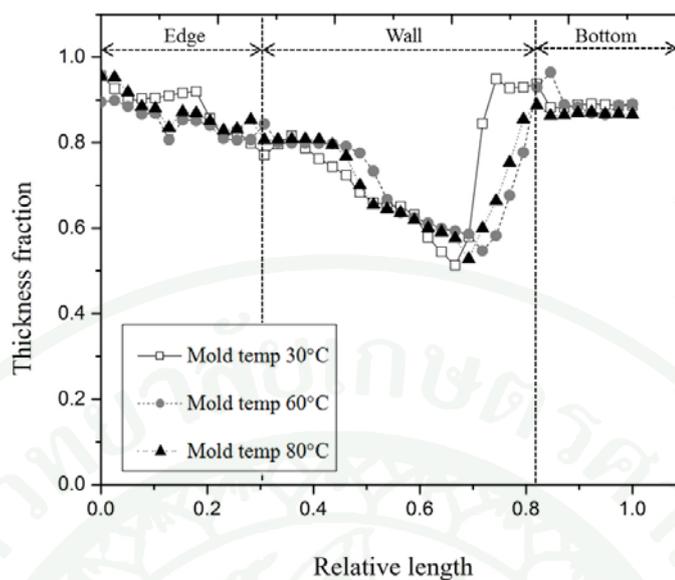


ภาพที่ 59 การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม T-SIM เมื่อใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบคาวิตี้ ที่อุณหภูมิของแม่พิมพ์ต่างๆ กัน และอุณหภูมิในการขึ้นรูปแผ่นพอลิสไตรีนเท่ากับ 150°C

ภาพที่ 60 และ 61 แสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรม T-SIM เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิแผ่นพลาสติก และอุณหภูมิแม่พิมพ์ โดยใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบปลั๊ก จากผลการวิเคราะห์พบว่า ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรม T-SIM ให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดลองจริง (ดังแสดงในภาพที่ 52 และ 53) กล่าวคือ การเพิ่มอุณหภูมิแผ่นพลาสติก และแม่พิมพ์ ส่งผลให้ความหนาของชิ้นงานที่บริเวณผนังมีค่าลดลง หรือเกิดความแตกต่างระหว่างความหนาผนังที่บริเวณขอบของชิ้นงาน และที่บริเวณผนังของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น



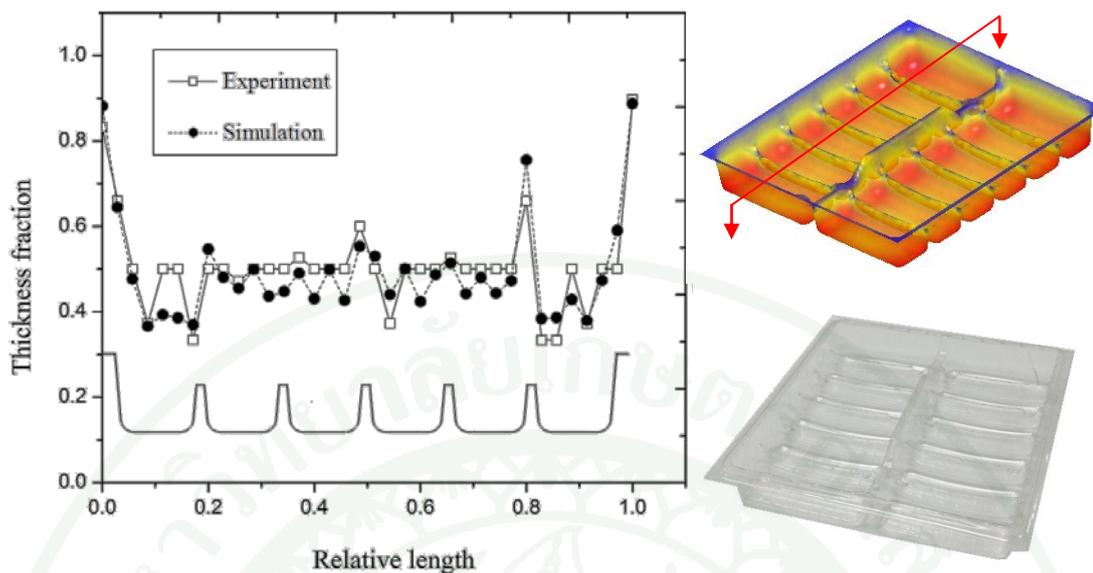
ภาพที่ 60 การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม T-SIM โดยใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบปลั๊ก เมื่อใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปแผ่นพอลิ-สไตรีนต่างๆ กัน และอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 30°C



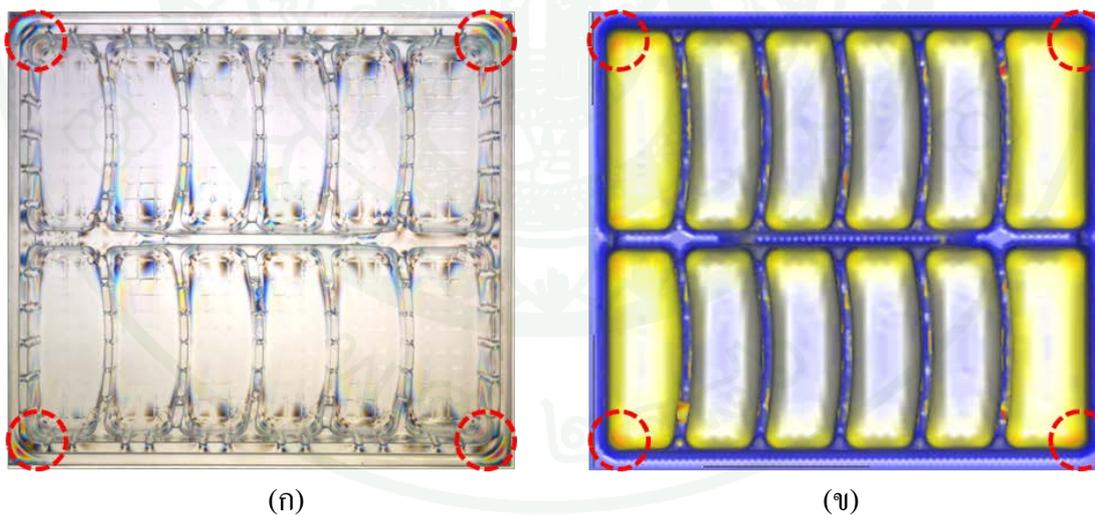
ภาพที่ 61 การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม T-SIM เมื่อใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบปลี๊ก ที่อุณหภูมิของแม่พิมพ์ต่างๆ กัน และอุณหภูมิในการขึ้นรูปแผ่นพอลิस्टาไทรินเท่ากับ 150°C

5. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนัง และความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน ที่ได้จากโปรแกรม T-SIM โดยประยุกต์ใช้กับแม่พิมพ์ที่มีความซับซ้อน

ภาพที่ 62 แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงาน โดยใช้โปรแกรม T-SIM กับผลการตรวจวัดความหนาผนังแท้จริงที่เกิดขึ้น เมื่อใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปของแผ่นพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต 90°C ที่ความหนาเริ่มต้น 0.5 mm โดยใช้แม่พิมพ์แบบควาดีที่อุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 30°C จากผลการวิเคราะห์ พบว่า ความหนาผนังชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์ยังคงให้ผลที่สอดคล้อง และใกล้เคียงกับความหนาของชิ้นงานจริงที่เกิดขึ้น นอกจากนี้จากผลการเปรียบเทียบความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน ซึ่งได้จากโปรแกรม T-SIM และการวิเคราะห์ความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานจริง ได้จากเครื่อง Stress viewer พบว่า ให้ผลที่สอดคล้องกัน กล่าวคือ ในบริเวณมุมของชิ้นงานแทนด้วยวงกลมสีแดง ซึ่งเป็นบริเวณที่ชิ้นงานเกิดการยึดตัวมากกว่าบริเวณอื่น จึงเป็นบริเวณที่เกิดความเค้นตกค้างมาก ดังแสดงในภาพที่ 63

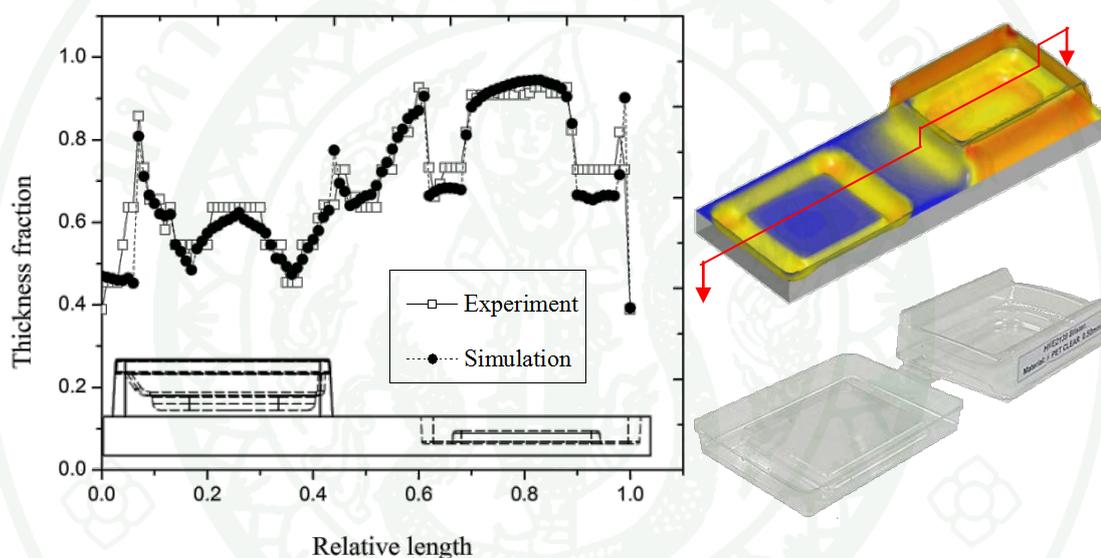


ภาพที่ 62 การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม T-SIM และผลการตรวจวัดจริง เมื่อใช้แม่พิมพ์ถาดบรรจุภัณฑ์อาหาร ที่อุณหภูมิในการขึ้นรูปแผ่นพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต และอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 90°C และ 30°C ตามลำดับ

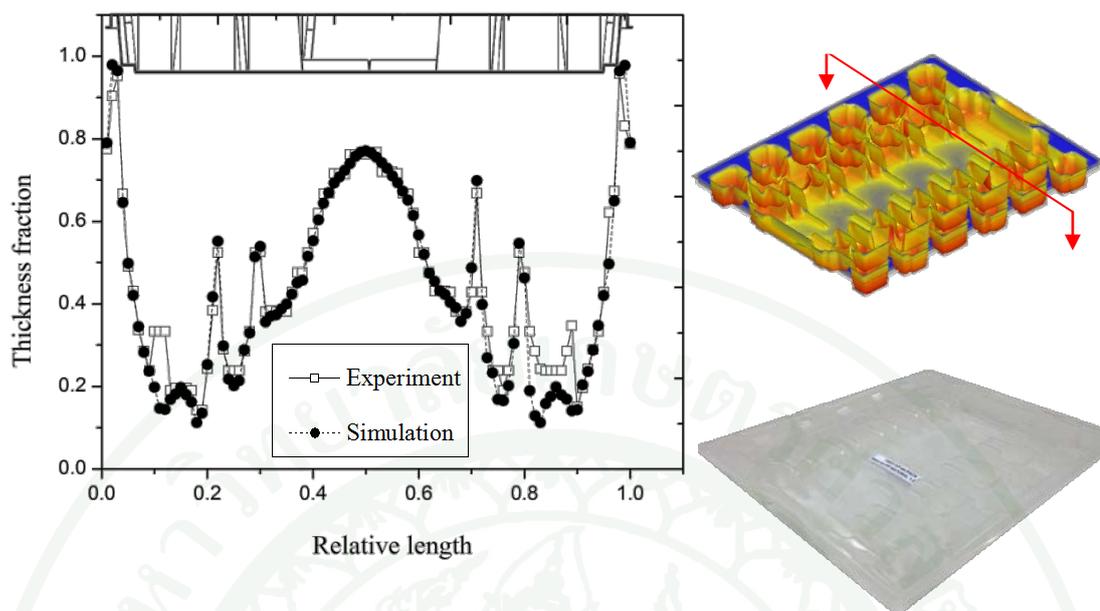


ภาพที่ 63 ผลการวิเคราะห์ความเค้นตึงที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานถาดบรรจุภัณฑ์อาหาร ซึ่งได้จากเครื่อง Stress viewer สำหรับ (ก) ชิ้นงานจริง และ (ข) จากโปรแกรม T-SIM

ภาพที่ 64 แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานบรรจุภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้โปรแกรม T-SIM เมื่อเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดความหนาผนังแท้จริงที่เกิดขึ้น เมื่อใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปของแผ่นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต 90°C ที่ความหนาเริ่มต้น 0.5 mm ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 30°C และภาพที่ 65 แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานบรรจุภัณฑ์ชิ้นส่วนยานยนต์ เมื่อใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปของแผ่นพอลิโพรไพลีน (PP) 160°C ที่ความหนาเริ่มต้น 1.0 mm ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 30°C จากผลการวิเคราะห์พบว่าความหนาผนังชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์ให้ผลที่สอดคล้อง และใกล้เคียงกับความหนาของชิ้นงานจริงที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 64 การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม T-SIM และผลการตรวจวัดจริง เมื่อใช้แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่อุณหภูมิในการขึ้นรูปแผ่นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต และอุณหภูมิแม่พิมพ์ 90°C และ 30°C ตามลำดับ

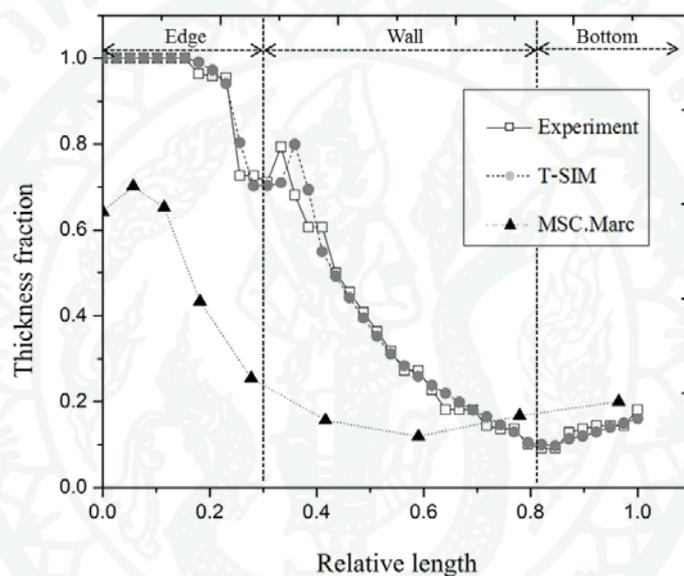


ภาพที่ 65 การกระจายความหนาผนังชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม T-SIM และผลการตรวจวัดจริง เมื่อใช้แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ชิ้นส่วนยานยนต์ ที่อุณหภูมิในการขึ้นรูปแผ่นพอลิโพรไพลีน และอุณหภูมิแม่พิมพ์ 160°C และ 30°C ตามลำดับ

6. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานที่ได้จากการทดลองกับผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม T-SIM และโปรแกรม MSC.Marc

ภาพที่ 66 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานที่ได้จากการทดลองกับผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม T-SIM และโปรแกรม MSC.Marc ตามลำดับ เมื่อใช้ อุณหภูมิในการขึ้นรูปของแผ่นพอลิสไตรีน 150°C และอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 30°C โดยใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบควาดี จากผลการวิเคราะห์พบว่า โปรแกรม T-SIM ที่ใช้แบบจำลอง วิสโคอีลาสติก K-BKZ ซึ่งให้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องและใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง ในขณะที่โปรแกรม MSC.Marc โดยการใช้แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกของ Mooney-Rivlin ให้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับผลการทดลองจริงเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ยังคงมีความแตกต่างอย่างมาก ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากความร้อนที่ให้กับแผ่นพอลิสไตรีนต้องมีค่าสูงกว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว โดยช่วงดังกล่าววัสดุมีพฤติกรรมการเสียรูปคล้ายวัสดุประเภท ยาง ในการกำหนดพฤติกรรมของวัสดุสามารถเลือกใช้ได้ทั้งแบบจำลองวิสโคอีลาสติก (Erchiqui, 2004) และแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก (Ogden, 1972; Rivlin, 1951; Mooney, 1940) ซึ่งในการวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงาน โดยใช้แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก สามารถ

วิเคราะห์วัสดุได้ที่อุณหภูมิ และอัตราการเสียรูปตามที่ได้ทดสอบ แต่ในกระบวนการทดลองจริง แผ่นพอลิस्टาไทรินเกิดการถ่ายเทความร้อนออกสู่ภายนอก ส่งผลให้บริเวณขอบของแผ่นพลาสติกมีอุณหภูมิต่ำกว่ากึ่งกลางของแผ่นพลาสติก นอกจากนี้การวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม MSC.Marc ซึ่งใช้แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก ไม่สามารถกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของแม่พิมพ์ได้ และข้อจำกัดของเอลิเมนต์แบบเยื้องบางที่ไม่รองรับแรงในแนวตั้งฉาก ผลการวิเคราะห์จึงมีความแตกต่างกับกระบวนการขึ้นรูปจริง ซึ่งในด้านความแม่นยำของการวิเคราะห์ยังคงต้องการการพัฒนาต่อไป



ภาพที่ 66 การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานที่ได้จากการทดลองกับผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม T-SIM และ โปรแกรม MSC.Marc เมื่อใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปของแผ่นพอลิस्टาไทริน 150°C และใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 30°C

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของชนิด ลักษณะของแม่พิมพ์ และปัจจัยในกระบวนการผลิต ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิของแผ่นพลาสติก และอุณหภูมิแม่พิมพ์ ที่มีต่อการกระจายตัวความหนาผนังและความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง และได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรม T-SIM และ MSC.Marc จากผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ดังนี้

- การขึ้นรูปชิ้นงาน โดยใช้แม่พิมพ์แบบปลั๊กได้ชิ้นงานที่มีความหนาผนังที่สม่ำเสมอว่าการขึ้นรูปชิ้นงาน โดยใช้แบบแม่พิมพ์แบบคาวีดี อย่างไรก็ตามการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบปลั๊กอาจเกิดรอยพับขึ้นบนชิ้นงาน และจำเป็นต้องใช้พื้นที่ในการขึ้นรูปมากกว่าการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบคาวีดี ส่งผลให้จำนวนชิ้นงานที่ได้น้อยกว่าการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบคาวีดี เมื่อเปรียบเทียบที่ขนาดแผ่นพลาสติกเท่ากัน

- ในกรณีการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบคาวีดี การเพิ่มอุณหภูมิแผ่นพลาสติก ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงาน ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ ส่งผลให้ชิ้นงานมีความหนาที่บริเวณผนังเพิ่มมากขึ้น และในการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบปลั๊ก การเพิ่มอุณหภูมิแผ่นพลาสติก และการเพิ่มอุณหภูมิของแม่พิมพ์ ส่งผลให้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์แบบปลั๊ก มีความหนาชิ้นงานที่บริเวณผนังลดลง หรือทำให้เกิดความแตกต่างของความหนาที่บริเวณขอบ และผนังของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น

- ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรม T-SIM ให้ผลที่สอดคล้อง และใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง นอกจากนี้โปรแกรม T-SIM ยังมีความสามารถในการวิเคราะห์ผลที่ครอบคลุมเทคนิคต่างๆ ในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์ที่ได้ในบางกรณียังคงมีความแตกต่างจากผลการทดลองจริง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Brent, S.A. 2006. **Plastics Materials and Processing**. Pearson Education Inc, USA.
- Carlone, P. and G.S. Palazzo. 2006. Finite element analysis of the thermoforming manufacturing process using the hyperelastic mooney-rivlin model. **Computer Science** 3980: 794-803.
- Chanda, M. and S.K. Roy. 2007. **Plastics Fabrication and Recycling**. Taylor & Francis Group, USA.
- Dong, Y., R.J.T. Lin and D. Bhattacharyya. 2006. Finite element simulation on thermoforming acrylic sheets using dynamic explicit method. **Polymers and Polymer Composites** 14(3): 308-328.
- Doroudiani, S. and M.T. Kortschot. 2003. Polystyrene foams. II. structure-impact properties relationships. **Journal of Applied Polymer Science** 90(5): 1421-1426.
- Erchiqui, F., A. Gakwaya and M. Rachik. 2004. Dynamic finite element analysis of nonlinear isotropic hyperelastic and viscoelastic materials for thermoforming applications. **Polymer Engineering and Science** 45(1): 125-134.
- Ferry, J.D. 1970. **Viscoelastic properties of polymers**. 3rd ed. Wiley, USA.
- Haddad, Y.M. 1995. **Viscoelasticity of Engineering Materials**. Chapman & Hall, USA.
- Hibbitt, 2002. **CAE User's Manual**. Karlsson & Sorensen Inc, USA.

- Hosseini, H., B.V. Berdyshev and A. Mehrabani-Zeinabad. 2006. A solution for warpage in polymeric products by plug-assisted thermoforming. **European Polymer Journal** 42(8): 1836-1843.
- Klein, P.W. 2009. **Fundamentals of Plastics Thermoforming**. Morgan & Claypool Publishers, USA.
- Levy, S. and J.F. Carley. 1989. **Plastic Extrusion Technology Handbook**. Industrial Press Inc, USA.
- Mark, J.E. 2009. **Polymer Data Handbook**. 2nd ed. Oxford University Press, UK.
- Martin, P.J. and P. Duncan. 2007. The role of plug design in determining wall thickness distribution in thermoforming. **Polymer Engineering and Science** 47(6): 804-813
- Mccool, R. and P.J. Martin. 2010. The role of process parameters in determining wall thickness distribution in plug-assisted thermoforming. **Polymer Engineering and Science** 50(10): 1923-1934.
- Mooney, M. 1940. A theory of large elastic deformation. **Journal of Applied Physics** 11: 582-592.
- Ogden, R.W. 1972. Large deformation isotropic elasticity on the correlation of theory and experiment for incompressible rubberlike solid. **Proceedings of the Royal Society** 326: 565-584.
- Rivlin, R.S. and D.W. Saunders. 1951. Large elastic deformations of Isotropic materials. VII. experiments on the deformation of rubber. **Philosophical Transactions of the Royal Society** 243: 251-288

Throne, J.L. 1937. **Technology of Thermoforming**. Hanser Publishers Inc, USA.

Unwin, A.P., I.M. Ward, H. Ugail, M.I.G. Bloor and M.J. Wilson. 2005. Optimal design and manufacture of thin-walled polystyrene structures. **Polymer Engineering and Science** 45(5): 694-703

Van der vegt A.K. and L.E. Govaert, **Polymeren**. Delft University Press, Netherlands.

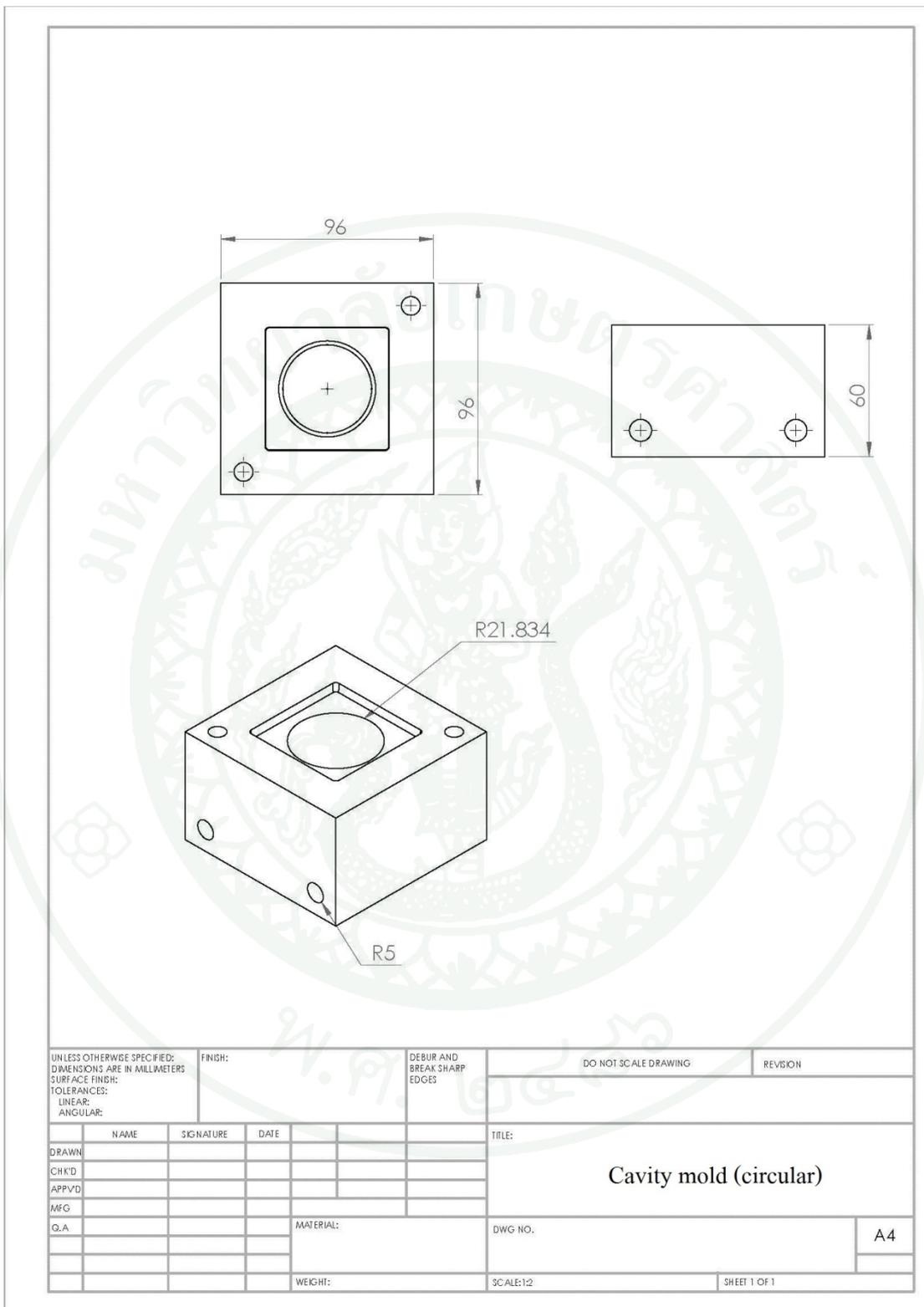
Vennix, R. 2009. **Material Properties of PS**. Mechanical and physical properties of materials.

Available Source: <http://www.matbase.com/material/polymers/commodity/ps-gpps/properties>, May 24, 2012.

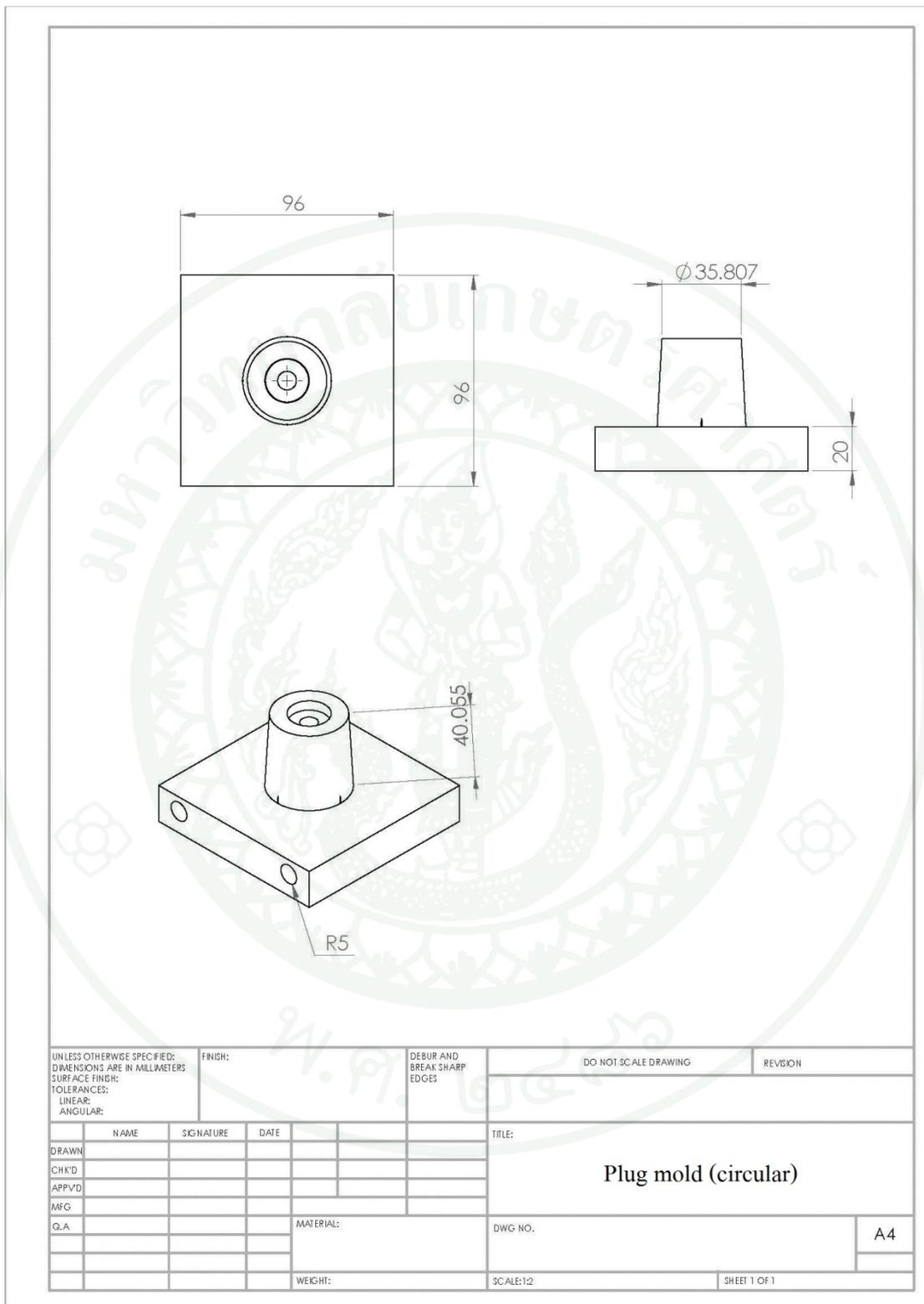




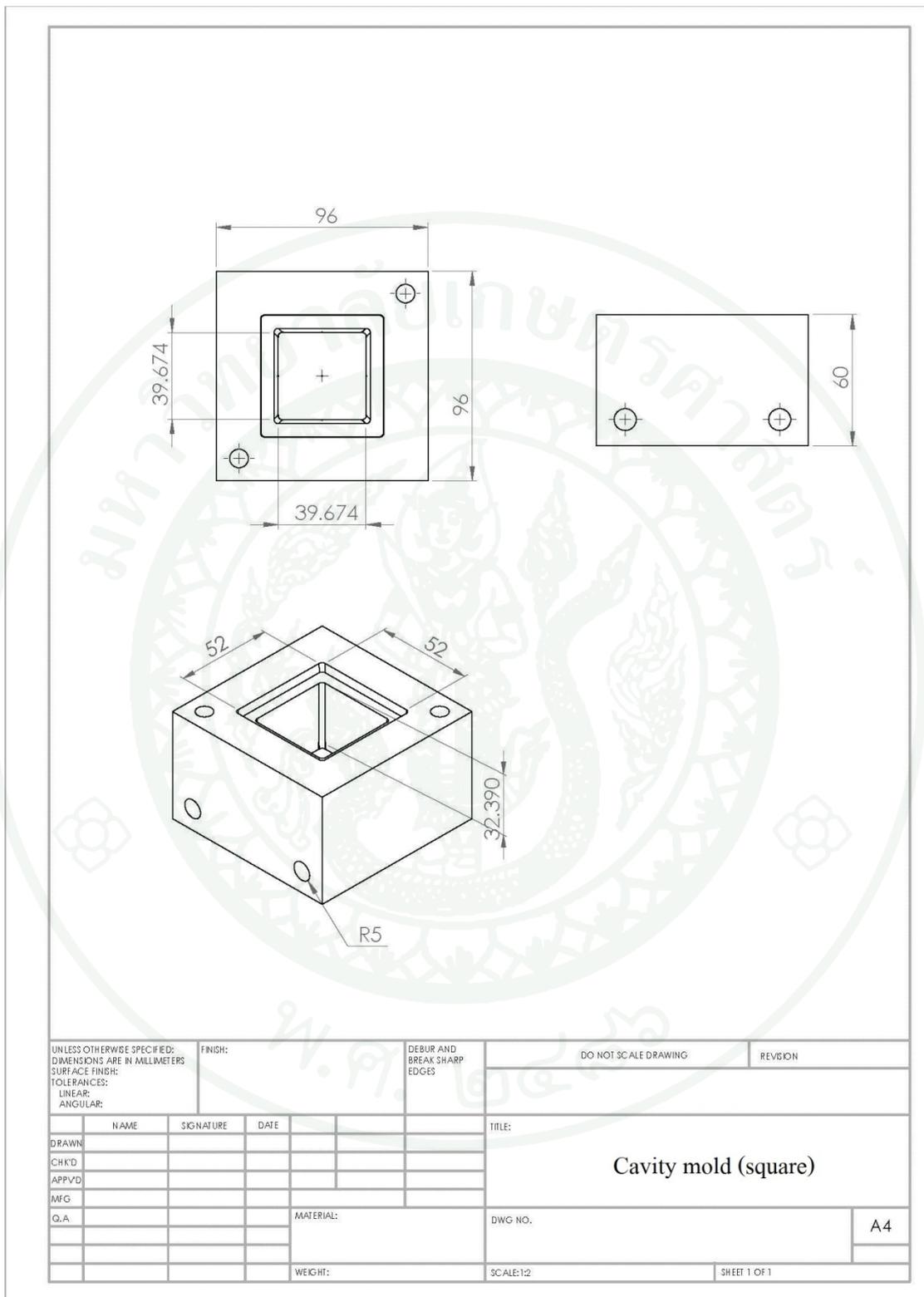
ภาคผนวก ก
แบบแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง



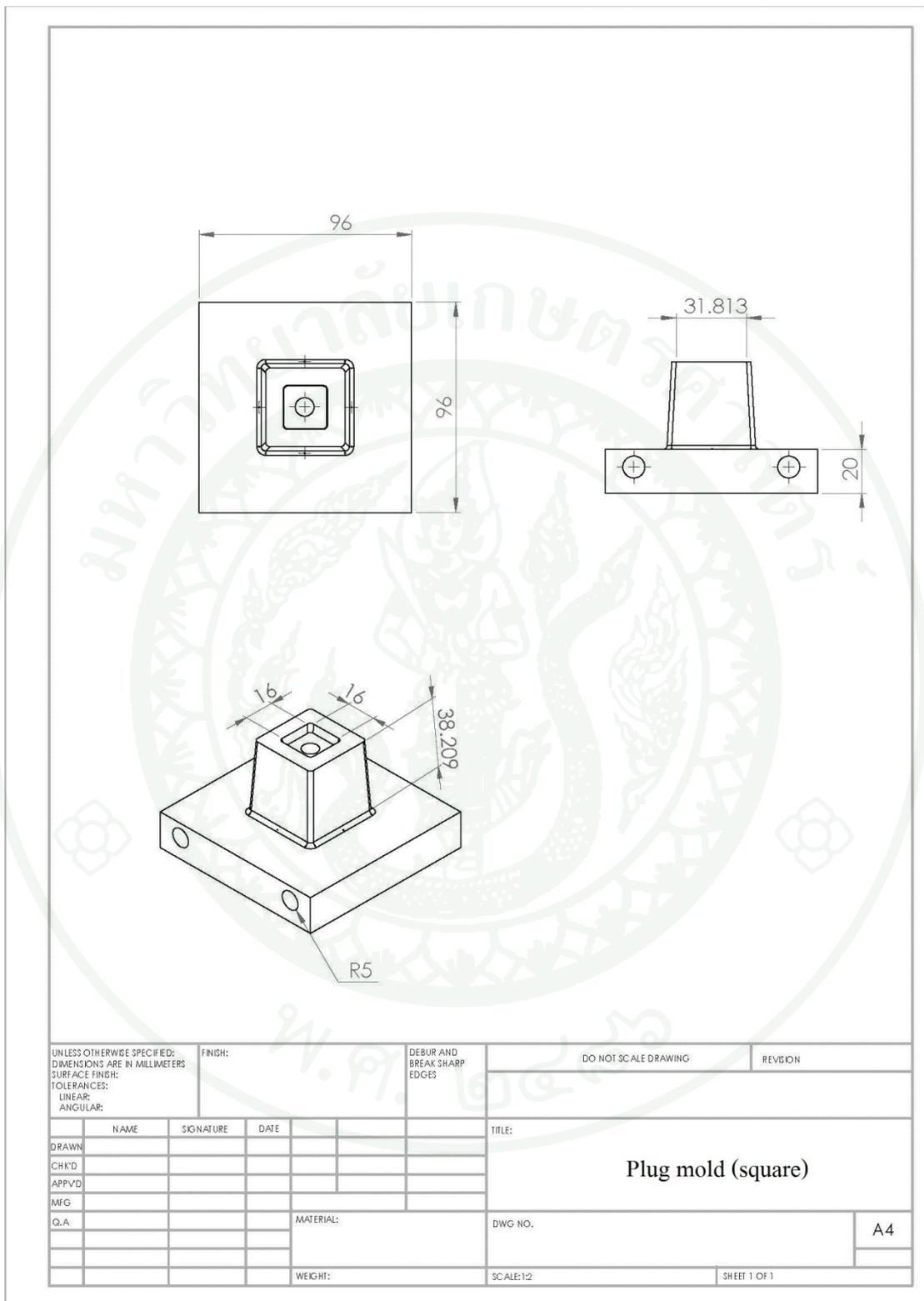
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE: Cavity mold (circular)	
CHK'D						
APP'VD						
MFG						
Q.A				MATERIAL:	DWG. NO.	A4
				WEIGHT:	SCALE:1:2	SHEET 1 OF 1



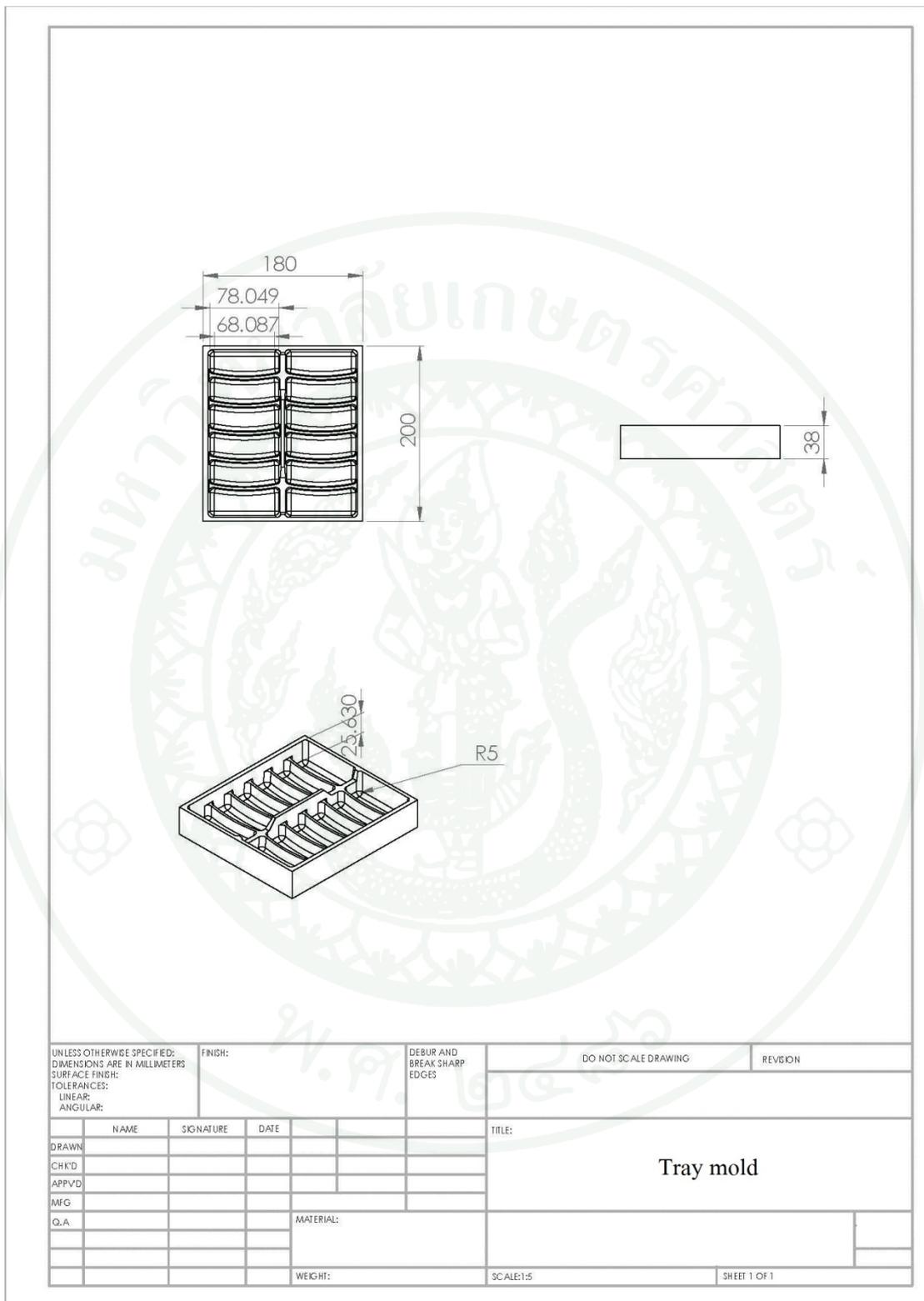
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE: Plug mold (circular)	
CHK'D						
APP'VD						
MFG						
Q.A				MATERIAL:	DWG. NO.	A4
				WEIGHT:	SCALE:1:2	SHEET 1 OF 1

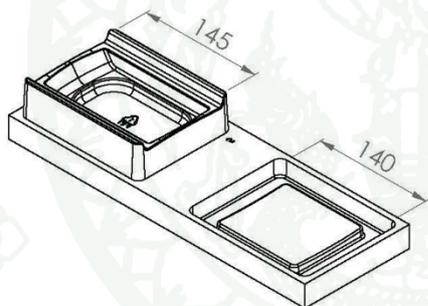
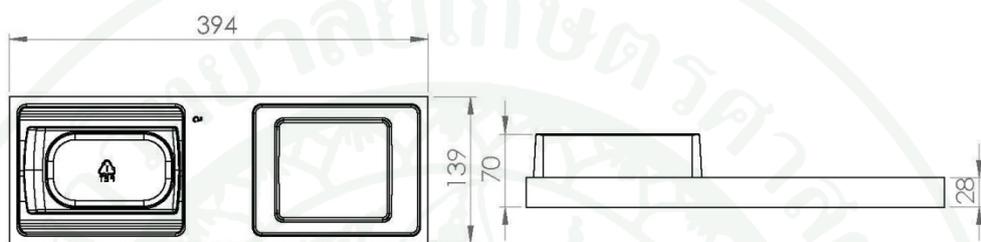


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN				TITLE: Cavity mold (square)		
CHKD						
APPVD						
MFG						
Q.A				MATERIAL:	DWG NO.	A4
				WEIGHT:	SCALE:1:2	SHEET 1 OF 1

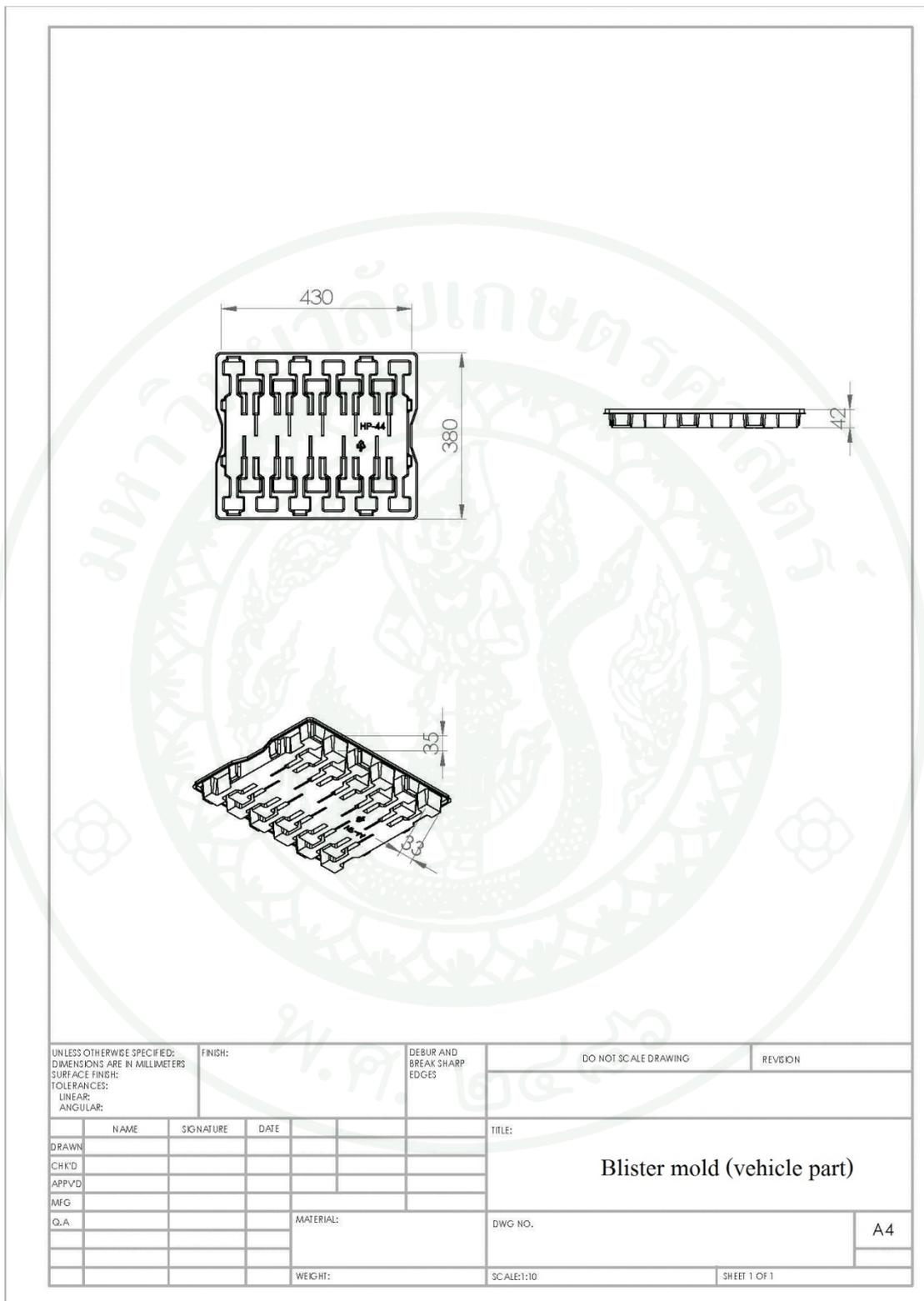


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN		NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE: Plug mold (square)	
CHKD						
APPVD						
MFG						
Q.A				MATERIAL:	DWG NO.	A4
				WEIGHT:	SCALE:1:2	SHEET 1 OF 1





UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE: Blister mold (HDD)	
CHK'D						
APP'VD						
MFG						
G.A				MATERIAL:		
				WEIGHT:	SCALE:1:5	SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE: Blister mold (vehicle part)	
CHK'D						
APP'VD						
MFG						
G.A				MATERIAL:	DWG NO.	A4
				WEIGHT:	SCALE:1:10	SHEET 1 OF 1



ภาคผนวก ข
ผลการตรวจวัดความหนาแน่นของชิ้นงาน

1. ค่าความหนาผนังของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบคาวิตี้ อุณหภูมิของแผ่นพอลิไทรีนที่ใช้ในการขึ้นรูป และอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 130°C และ 30°C ตามลำดับ



Relative length	Thickness fraction	Relative length	Thickness fraction
0	1	0.51282	0.31818
0.02564	1	0.53846	0.27273
0.05128	1	0.5641	0.23177
0.07692	1	0.58974	0.22727
0.10256	1	0.61538	0.18741
0.12821	1	0.64103	0.18182
0.15385	0.95455	0.66667	0.14374
0.17949	0.95455	0.69231	0.13636
0.20513	0.95455	0.71795	0.10164
0.23077	0.95455	0.74359	0.09091
0.25641	0.81818	0.76923	0.09091
0.28205	0.70564	0.79487	0.09091
0.30769	0.76196	0.82051	0.09091
0.33333	0.80417	0.84615	0.09091
0.35897	0.68182	0.87179	0.10164
0.38462	0.59091	0.89744	0.10164
0.41026	0.55298	0.92308	0.12856
0.4359	0.45455	0.94872	0.12856
0.46154	0.40909	0.97436	0.12856
0.48718	0.36364	1	0.12856

2. ค่าความหนาผนังของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบคาวิตี้ อุณหภูมิของแผ่นพอลิสไตรีนที่ใช้ในการขึ้นรูป และอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 150°C และ 30°C ตามลำดับ



Relative length	Thickness fraction	Relative length	Thickness fraction
0	1	0.51282	0.36364
0.02564	1	0.53846	0.31818
0.05128	1	0.5641	0.27273
0.07692	1	0.58974	0.27273
0.10256	1	0.61538	0.22727
0.12821	1	0.64103	0.18182
0.15385	1	0.66667	0.18182
0.17949	0.96424	0.69231	0.18182
0.20513	0.95886	0.71795	0.14374
0.23077	0.95455	0.74359	0.13636
0.25641	0.72727	0.76923	0.13636
0.28205	0.72727	0.79487	0.10164
0.30769	0.71148	0.82051	0.09091
0.33333	0.79383	0.84615	0.09091
0.35897	0.68182	0.87179	0.12856
0.38462	0.60644	0.89744	0.13636
0.41026	0.60644	0.92308	0.14374
0.4359	0.5	0.94872	0.14374
0.46154	0.45455	0.97436	0.14374
0.48718	0.40909	1	0.18182

3. ค่าความหนาผนังของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบคาวิตี้ อุณหภูมิของแผ่นพอลิโพรไพลีนที่ใช้ในการขึ้นรูป และอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 170°C และ 30°C ตามลำดับ



Relative length	Thickness fraction	Relative length	Thickness fraction
0	1	0.51282	0.33091
0.02564	1	0.53846	0.31818
0.05128	1	0.5641	0.27649
0.07692	1	0.58974	0.24478
0.10256	1	0.61538	0.22727
0.12821	1	0.64103	0.22727
0.15385	0.95455	0.66667	0.18182
0.17949	0.95455	0.69231	0.16389
0.20513	0.95455	0.71795	0.14374
0.23077	0.95455	0.74359	0.13636
0.25641	0.83814	0.76923	0.09091
0.28205	0.7187	0.79487	0.09091
0.30769	0.70564	0.82051	0.10164
0.33333	0.72727	0.84615	0.10164
0.35897	0.77273	0.87179	0.10164
0.38462	0.68182	0.89744	0.13636
0.41026	0.54545	0.92308	0.13636
0.4359	0.50206	0.94872	0.14374
0.46154	0.45681	0.97436	0.16389
0.48718	0.41161	1	0.16389

4. ค่าความหนาผนังของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบคาวิตี้ อุณหภูมิของแผ่นพอลิไทรีนที่ใช้ในการขึ้นรูป และอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 150°C และ 60°C ตามลำดับ



Relative length	Thickness fraction	Relative length	Thickness fraction
0	1	0.51282	0.72727
0.02564	1	0.53846	0.63636
0.05128	1	0.5641	0.59091
0.07692	1	0.58974	0.59091
0.10256	1	0.61538	0.54545
0.12821	1	0.64103	0.5
0.15385	1	0.66667	0.45455
0.17949	0.95455	0.69231	0.40909
0.20513	0.95455	0.71795	0.36364
0.23077	0.95455	0.74359	0.31818
0.25641	0.86364	0.76923	0.27273
0.28205	0.73434	0.79487	0.18182
0.30769	0.73434	0.82051	0.13636
0.33333	0.73434	0.84615	0.09091
0.35897	0.7187	0.87179	0.09091
0.38462	0.81818	0.89744	0.09091
0.41026	0.77273	0.92308	0.09091
0.4359	0.70564	0.94872	0.09091
0.46154	0.77406	0.97436	0.09091
0.48718	0.77273	1	0.13636

5. ค่าความหนาผนังของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบคาวิตี้ อุณหภูมิของแผ่นพอลิไทรีนที่ใช้ในการขึ้นรูป และอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 150°C และ 80°C ตามลำดับ



Relative length	Thickness fraction	Relative length	Thickness fraction
0	1	0.51282	0.68182
0.02564	1	0.53846	0.63636
0.05128	1	0.5641	0.59091
0.07692	1	0.58974	0.54545
0.10256	1	0.61538	0.5
0.12821	1	0.64103	0.45455
0.15385	1	0.66667	0.40909
0.17949	0.95455	0.69231	0.36364
0.20513	0.95455	0.71795	0.31818
0.23077	0.95455	0.74359	0.27273
0.25641	0.86364	0.76923	0.22727
0.28205	0.8455	0.79487	0.18182
0.30769	0.78203	0.82051	0.13636
0.33333	0.78203	0.84615	0.13636
0.35897	0.78203	0.87179	0.13636
0.38462	0.95455	0.89744	0.18182
0.41026	0.93707	0.92308	0.18182
0.4359	0.72727	0.94872	0.22727
0.46154	0.72727	0.97436	0.22727
0.48718	0.68182	1	0.27273

6. ค่าความหนาผนังของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบปลัก อุณหภูมิของแผ่นพอลิไทรีนที่ใช้ในการขึ้นรูป และอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 130°C และ 30°C ตามลำดับ



Relative length	Thickness fraction	Relative length	Thickness fraction
0	0.86364	0.51282	0.72869
0.02564	0.81818	0.53846	0.72869
0.05128	0.81818	0.5641	0.72869
0.07692	0.77273	0.58974	0.68333
0.10256	0.74966	0.61538	0.68182
0.12821	0.73293	0.64103	0.68182
0.15385	0.72727	0.66667	0.72869
0.17949	0.68182	0.69231	0.68333
0.20513	0.72727	0.71795	0.68182
0.23077	0.72727	0.74359	0.63798
0.25641	0.72727	0.76923	0.63798
0.28205	0.72727	0.79487	0.59265
0.30769	0.72727	0.82051	0.59265
0.33333	0.73434	0.84615	0.72869
0.35897	0.73995	0.87179	0.73995
0.38462	0.69234	0.89744	0.77273
0.41026	0.64282	0.92308	0.81818
0.4359	0.63798	0.94872	0.83814
0.46154	0.63798	0.97436	0.86364
0.48718	0.63798	1	0.90909

7. ค่าความหนาผนังของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบปลัก อุณหภูมิของแผ่นพอลิไทรีนที่ใช้ในการขึ้นรูป และอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 150°C และ 30°C ตามลำดับ



Relative length	Thickness fraction	Relative length	Thickness fraction
0	0.86364	0.51282	0.59091
0.02564	0.86364	0.53846	0.59091
0.05128	0.86364	0.5641	0.54545
0.07692	0.86364	0.58974	0.59091
0.10256	0.86364	0.61538	0.63636
0.12821	0.86364	0.64103	0.63636
0.15385	0.86364	0.66667	0.68182
0.17949	0.86364	0.69231	0.68182
0.20513	0.86364	0.71795	0.68182
0.23077	0.81818	0.74359	0.68182
0.25641	0.81818	0.76923	0.68182
0.28205	0.81818	0.79487	0.63636
0.30769	0.77273	0.82051	0.63636
0.33333	0.77273	0.84615	0.63636
0.35897	0.77273	0.87179	0.63636
0.38462	0.64282	0.89744	0.63636
0.41026	0.61825	0.92308	0.83443
0.4359	0.59091	0.94872	0.77273
0.46154	0.59091	0.97436	0.81818
0.48718	0.59091	1	0.81818

8. ค่าความหนาผนังของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบปลັ๊ก อุณหภูมิของแผ่นพอลิไธรีนที่ใช้ในการขึ้นรูป และอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 170°C และ 30°C ตามลำดับ



Relative length	Thickness fraction	Relative length	Thickness fraction
0	0.86364	0.51282	0.59091
0.02564	0.86364	0.53846	0.63636
0.05128	0.86364	0.5641	0.63636
0.07692	0.86364	0.58974	0.63636
0.10256	0.86364	0.61538	0.63636
0.12821	0.86364	0.64103	0.63636
0.15385	0.86364	0.66667	0.68182
0.17949	0.86364	0.69231	0.68182
0.20513	0.86364	0.71795	0.68182
0.23077	0.81818	0.74359	0.63636
0.25641	0.81818	0.76923	0.59091
0.28205	0.77273	0.79487	0.63636
0.30769	0.78467	0.82051	0.63636
0.33333	0.77273	0.84615	0.54545
0.35897	0.80417	0.87179	0.72727
0.38462	0.7187	0.89744	0.90909
0.41026	0.65081	0.92308	0.72727
0.4359	0.59091	0.94872	0.72727
0.46154	0.59091	0.97436	0.72727
0.48718	0.59091	1	0.68182

9. ค่าความหนาผนังของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบปลัก อุณหภูมิของแผ่นพอลิไทรีนที่ใช้ในการขึ้นรูป และอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 150°C และ 60°C ตามลำดับ



Relative length	Thickness fraction	Relative length	Thickness fraction
0	0.95455	0.51282	0.72727
0.02564	0.95455	0.53846	0.72727
0.05128	0.95886	0.5641	0.68182
0.07692	0.95563	0.58974	0.68182
0.10256	0.95455	0.61538	0.68182
0.12821	0.95455	0.64103	0.72727
0.15385	0.95563	0.66667	0.72727
0.17949	0.95563	0.69231	0.68182
0.20513	0.86364	0.71795	0.68182
0.23077	0.86364	0.74359	0.63636
0.25641	0.86483	0.76923	0.63636
0.28205	0.77273	0.79487	0.59091
0.30769	0.72727	0.82051	0.59091
0.33333	0.72727	0.84615	0.59091
0.35897	0.68182	0.87179	0.54545
0.38462	0.63636	0.89744	0.54545
0.41026	0.63636	0.92308	0.72727
0.4359	0.68182	0.94872	0.68182
0.46154	0.72727	0.97436	0.68182
0.48718	0.72727	1	0.77273

10. ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์ทรงกระบอกกลมแบบปลັ๊ก อุณหภูมิของแผ่นพอลิไทรินที่ใช้ในการขึ้นรูป และอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 150°C และ 80°C ตามลำดับ



Relative length	Thickness fraction	Relative length	Thickness fraction
0	1	0.51282	0.77273
0.02564	1	0.53846	0.77273
0.05128	1	0.5641	0.72727
0.07692	1	0.58974	0.72727
0.10256	0.95455	0.61538	0.72727
0.12821	0.95455	0.64103	0.68182
0.15385	0.90909	0.66667	0.68182
0.17949	0.86364	0.69231	0.68182
0.20513	0.86364	0.71795	0.68182
0.23077	0.81818	0.74359	0.68182
0.25641	0.81818	0.76923	0.63636
0.28205	0.72727	0.79487	0.63636
0.30769	0.68182	0.82051	0.63636
0.33333	0.63636	0.84615	0.63636
0.35897	0.63636	0.87179	0.63636
0.38462	0.63636	0.89744	0.77273
0.41026	0.5821	0.92308	0.77273
0.4359	0.68182	0.94872	0.77273
0.46154	0.77273	0.97436	0.77273
0.48718	0.77273	1	0.72727

11. ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์ทรงกระบอกสี่เหลี่ยมแบบคาวิตี้ อลูมิเนียม
ของแผ่นพอลิโพรไพลีนที่ใช้ในการขึ้นรูป และอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 150°C และ 30°C
ตามลำดับ



Relative length	Thickness fraction	Relative length	Thickness fraction
0	0.95455	0.51282	0.40909
0.02564	0.95455	0.53846	0.38909
0.05128	0.95455	0.5641	0.36909
0.07692	0.95455	0.58974	0.36364
0.10256	0.95455	0.61538	0.30364
0.12821	0.95455	0.64103	0.26818
0.15385	0.95455	0.66667	0.22727
0.17949	0.95455	0.69231	0.20727
0.20513	0.95455	0.71795	0.18727
0.23077	0.95455	0.74359	0.16727
0.25641	0.95455	0.76923	0.11182
0.28205	0.86364	0.79487	0.10636
0.30769	0.81818	0.82051	0.09091
0.33333	0.77273	0.84615	0.09091
0.35897	0.68182	0.87179	0.09091
0.38462	0.68182	0.89744	0.13636
0.41026	0.64546	0.92308	0.13636
0.4359	0.59091	0.94872	0.13636
0.46154	0.45455	0.97436	0.13636
0.48718	0.45455	1	0.13636

12. ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์ทรงกระบอกสี่เหลี่ยมแบบปลັ๊ก อูณหภูมิของแผ่นพอลิไธรีนที่ใช้ในการขึ้นรูป และอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 150°C และ 30°C ตามลำดับ



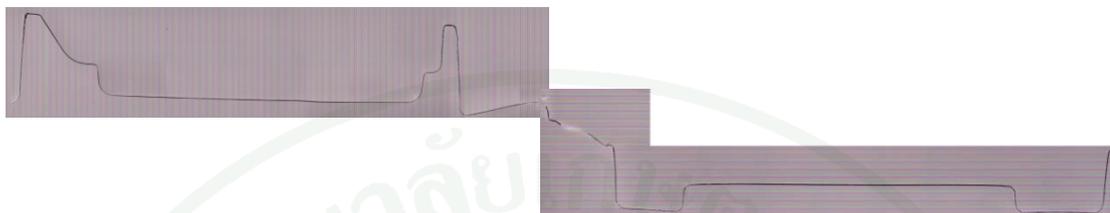
Relative length	Thickness fraction	Relative length	Thickness fraction
0	0.68182	0.51282	0.77273
0.02564	0.68182	0.53846	0.72727
0.05128	0.68182	0.5641	0.63636
0.07692	0.68182	0.58974	0.63636
0.10256	0.68182	0.61538	0.63636
0.12821	0.68182	0.64103	0.71002
0.15385	0.68182	0.66667	0.54545
0.17949	0.68182	0.69231	0.59091
0.20513	0.72727	0.71795	0.63636
0.23077	0.72727	0.74359	0.63636
0.25641	0.72727	0.76923	0.63636
0.28205	0.77273	0.79487	0.68182
0.30769	0.77273	0.82051	0.72727
0.33333	0.77273	0.84615	0.72727
0.35897	0.77273	0.87179	0.72727
0.38462	0.77273	0.89744	0.72727
0.41026	0.77273	0.92308	0.72727
0.4359	0.77273	0.94872	0.72727
0.46154	0.77273	0.97436	0.72727
0.48718	0.81818	1	0.72727

13. ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานถาดบรรจุภัณฑ์อาหาร อุณหภูมิของแผ่นพอลิเอทิลีนเทอร์ฟทาเลตที่ใช้ในการขึ้นรูป และอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 90°C และ 30°C ตามลำดับ



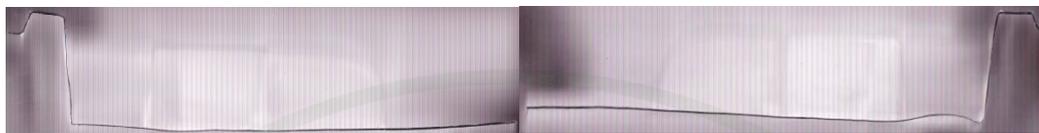
Relative length	Thickness fraction	Relative length	Thickness fraction
0	0.832	0.57143	0.5
0.02857	0.66	0.6	0.5
0.05714	0.5	0.62857	0.5
0.08571	0.372	0.65714	0.526
0.11429	0.5	0.68571	0.5
0.14286	0.5	0.71429	0.5
0.17143	0.334	0.74286	0.5
0.2	0.5	0.77143	0.5
0.22857	0.5	0.8	0.66
0.25714	0.4714	0.82857	0.33334
0.28571	0.5	0.85714	0.33334
0.31429	0.5	0.88571	0.5
0.34286	0.5	0.91429	0.37268
0.37143	0.52704	0.94286	0.5
0.4	0.5	0.97143	0.5
0.42857	0.5	1	0.89752
0.45714	0.5		
0.48571	0.6		
0.51429	0.5		
0.54286	0.37268		

14. ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานบรรจุภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ อุณหภูมิของแผ่นพอลิเอทิลีนเทอร์พทาเลตที่ใช้ในการขึ้นรูป และอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 90°C และ 30°C ตามลำดับ



Relative length	Thickness fraction								
0	0.38888	0.21	0.63636	0.42	0.64282	0.63	0.66183	0.84	0.92709
0.01	0.45455	0.22	0.63636	0.43	0.63636	0.64	0.69234	0.85	0.91363
0.02	0.45455	0.23	0.63636	0.44	0.64282	0.65	0.73293	0.86	0.91363
0.03	0.45455	0.24	0.63636	0.45	0.72727	0.66	0.73293	0.87	0.91363
0.04	0.54545	0.25	0.63636	0.46	0.72727	0.67	0.73293	0.88	0.92709
0.05	0.63636	0.26	0.63636	0.47	0.66183	0.68	0.73293	0.89	0.82322
0.06	0.63636	0.27	0.63636	0.48	0.66183	0.69	0.81818	0.9	0.72727
0.07	0.85763	0.28	0.63636	0.49	0.63636	0.7	0.90909	0.91	0.72727
0.08	0.73293	0.29	0.63636	0.5	0.63636	0.71	0.89995	0.92	0.72727
0.09	0.65555	0.3	0.63636	0.51	0.63636	0.72	0.90909	0.93	0.72727
0.1	0.65555	0.31	0.54545	0.52	0.63636	0.73	0.90909	0.94	0.72727
0.11	0.65555	0.32	0.54545	0.53	0.72727	0.74	0.90909	0.95	0.72727
0.12	0.5821	0.33	0.54545	0.54	0.72727	0.75	0.91363	0.96	0.72727
0.13	0.63636	0.34	0.54545	0.55	0.72727	0.76	0.90909	0.97	0.72727
0.14	0.54545	0.35	0.45455	0.56	0.81818	0.77	0.90909	0.98	0.81818
0.15	0.54545	0.36	0.45455	0.57	0.81818	0.78	0.90909	0.99	0.72727
0.16	0.51426	0.37	0.45455	0.58	0.81818	0.79	0.92709	1	0.38888
0.17	0.54545	0.38	0.54545	0.59	0.86244	0.8	0.90909		
0.18	0.54545	0.39	0.54545	0.6	0.92709	0.81	0.91363		
0.19	0.54545	0.4	0.54545	0.61	0.91363	0.82	0.92709		
0.2	0.54545	0.41	0.60984	0.62	0.73293	0.83	0.92709		

15. ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานบรรจุภัณฑ์ชิ้นส่วนยานยนต์ อลูมิเนียมของแผ่นพอลิเอทิลีน-เทเรฟทาเลตที่ใช้ในการขึ้นรูป และอุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ 90°C และ 30°C ตามลำดับ



Relative length	Thickness fraction								
0	0.78824	0.21	0.38392	0.42	0.66667	0.63	0.43121	0.84	0.2381
0.01	0.77518	0.22	0.52381	0.43	0.66837	0.64	0.43121	0.85	0.2381
0.02	0.90351	0.23	0.28966	0.44	0.71587	0.65	0.43121	0.86	0.2381
0.03	0.95238	0.24	0.2381	0.45	0.71587	0.66	0.42857	0.87	0.2381
0.04	0.66667	0.25	0.2381	0.46	0.71429	0.67	0.38095	0.88	0.28571
0.05	0.49027	0.26	0.2381	0.47	0.7619	0.68	0.38095	0.89	0.34667
0.06	0.43121	0.27	0.28571	0.48	0.7619	0.69	0.38095	0.9	0.15058
0.07	0.33672	0.28	0.33333	0.49	0.7619	0.7	0.42857	0.91	0.19634
0.08	0.28571	0.29	0.52381	0.5	0.7619	0.71	0.66837	0.92	0.24281
0.09	0.2381	0.3	0.52597	0.51	0.76783	0.72	0.42857	0.93	0.28966
0.1	0.33333	0.31	0.38095	0.52	0.76783	0.73	0.33333	0.94	0.33333
0.11	0.33333	0.32	0.38392	0.53	0.72061	0.74	0.2381	0.95	0.42857
0.12	0.33333	0.33	0.38095	0.54	0.72061	0.75	0.2381	0.96	0.62088
0.13	0.19048	0.34	0.38095	0.55	0.72061	0.76	0.19048	0.97	0.67344
0.14	0.19634	0.35	0.38095	0.56	0.71587	0.77	0.2381	0.98	0.95831
0.15	0.19634	0.36	0.42857	0.57	0.66837	0.78	0.33333	0.99	0.83163
0.16	0.19634	0.37	0.47619	0.58	0.66667	0.79	0.52381	1	0.78824
0.17	0.19048	0.38	0.47619	0.59	0.61905	0.8	0.47619		
0.18	0.14286	0.39	0.52381	0.6	0.52381	0.81	0.33333		
0.19	0.14286	0.4	0.57143	0.61	0.52381	0.82	0.28571		
0.2	0.24281	0.41	0.61905	0.62	0.47619	0.83	0.24281		

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	นายธีรพล กิตติกาญจนรักษ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	31 มีนาคม 2530
สถานที่เกิด	เขตดุสิต จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	ระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่ปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ทุนการศึกษา	-