



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

ปริญญา

วิศวกรรมวัสดุ

วิศวกรรมวัสดุ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนังในกระบวนการเป่าขึ้นรูปพอลิเมอร์

An Investigation on Wall Thickness Distribution in Polymer Blow Molding Process

นามผู้วิจัย นายปณัสม์ กาลนิล

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์สมเจตน์ พ็ชรพันธ์, Dr.-Ing.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์วิศิษฐ์ ไส้เจริญรัตน์, วศ.ม.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสิงห์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนังในกระบวนการเป่าขึ้นรูปพอลิเมอร์

An Investigation on Wall Thickness Distribution in Polymer Blow Molding Process

โดย

นายปานัสม์ กาลนิล

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปาณีสร์ กานนิต 2555: การวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนังในกระบวนการเป่า
ขึ้นรูปพอลิเมอร์ ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ) สาขาวิศวกรรม
วัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมเจตน์ พชรพันธ์, Dr.-Ing. 103 หน้า

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อการกระจายตัวความหนาผนัง
ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูปแบบดึงยืด (stretch blow molding) และกระบวนการ
อัดรีด-เป่าขึ้นรูป (extrusion blow molding) โดยปัจจัยที่ได้ทำการศึกษาในกระบวนการฉีด-เป่าขึ้น
รูป ได้แก่ ขนาดหลอดพรีฟอร์ม อุณหภูมิหลอดพรีฟอร์ม ระยะทางการเคลื่อนที่และความเร็วการ
เคลื่อนที่ของแท่งยืด ในขณะที่ปัจจัยที่ทำการศึกษาในกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป ได้แก่ ขนาด
และอุณหภูมิของหลอดพรีสตัน อุณหภูมิแม่พิมพ์ และแรงดันเป่า นอกจากนี้ยังได้ทำการ
เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับผลการวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite
Element Method, FEM) ซึ่งใช้แบบจำลอง Mooney Rivlin และแบบจำลอง K-BKZ จากผลการ
ทดลองพบว่า ขนาดหลอดพรีฟอร์มและพรีสตัน รวมถึงระยะทางการเคลื่อนที่ของแท่งยืด มี
อิทธิพลอย่างมากต่อการกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงาน ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิหลอดพรี
ฟอร์ม ความเร็วการเคลื่อนที่ของแท่งยืด อุณหภูมิแม่พิมพ์เป่า และแรงดันเป่า ไม่ส่งผลต่อการ
เปลี่ยนแปลงความหนาผนังที่เกิดขึ้น จากผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin
และแบบจำลอง K-BKZ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง พบว่าผลการวิเคราะห์การกระจาย
ตัวความหนาผนังที่ได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin มีความสอดคล้องและใกล้เคียงกับผลการ
ทดลองที่ได้จากกระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูป ในขณะที่ แบบจำลอง K-BKZ ให้ผลการวิเคราะห์การ
กระจายตัวความหนาผนังที่สอดคล้องและแม่นยำ ในกรณีขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Panus Kalanin 2012: An Investigation on Wall Thickness Distribution in Polymer Blow Molding Process. Master of Engineering (Materials Engineering), Major Field: Materials Engineering, Department of Materials Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Somjate Patcharaphun, Dr.-Ing. 103 pages.

The effect of processing parameters on the wall thickness distribution of injection and extrusion blow molding parts was investigated in this work. The processing parameters for stretch blow molding included size and temperature of preform, distance and velocity of stretch rod. In the case of extrusion blow molding process, the influences of size and temperature of parison, mold temperature, and blow pressure were studied in details. In addition, the selected experimental results were also extensively verified against the analytical results obtained from Finite Element Method (FEM) which based on Mooney-Rivlin and K-BKZ models. Both simulated and measured results indicated that the size of preform and parison, and distance of stretch rod had significant effect on the wall thickness of blow molding products in comparison with the changes of preform and mold temperatures, velocity of stretch rod, and blow pressure. The analytical results obtained from Mooney-Rivlin model were in good agreement with the experimental results from stretch blow molding process, while the predicted results from K-BKZ model were found to agree very well with extrusion blow molding process.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ผศ.ดร.สมเจตน์ พชรพันธ์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการให้ความช่วยเหลือแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดจนการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ และกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.นเรศ อินต๊ะวงศ์ ผู้ทรงคุณวุฒิ ดร.ราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจที่ได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ

ขอขอบคุณสถาบันค้นคว้า และพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม บริษัท หาญเจริญ โฮลดิ้ง จำกัด บริษัท ภัทรกร พลาสติก จำกัด สำหรับความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ และวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณวัชรพงษ์ ชูแก้ว คุณรวิวัฒน์ รักสัจ นักวิจัยของกลุ่มวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตยางและพลาสติก (Plastic and Rubber Processing Research Group; PaRP-Group) เพื่อนๆ และน้องๆ ในกลุ่มที่ให้ความช่วยเหลือทุกๆด้าน จนงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณบิดา มารดาที่ได้อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะสามารถนำไปใช้เพื่อเป็นพื้นฐานในงานวิจัยต่อไปในอนาคต อีกทั้งเป็นประโยชน์สำหรับการพัฒนาอุตสาหกรรมต่อไป

ปานัสม์ กาลนิล

เมษายน 2555

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(9)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	29
อุปกรณ์	29
วิธีการ	30
ผลและวิจารณ์	52
สรุปและข้อเสนอแนะ	80
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	81
ภาคผนวก	84
ภาคผนวก ก ค่า Strain invariants และ Strain energy ที่ได้จากการคำนวณ	85
ภาคผนวก ข แบบที่ได้จากโปรแกรมช่วยออกแบบ Solid Work สำหรับการจำลอง การเป่าขึ้นรูป	90
ภาคผนวก ค ค่าความหนาผนังของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการเป่าขึ้นรูป	94
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	103

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนเทอร์พทาเลต	9
2	สมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีน	16
3	สภาวะกระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบดึงยืด	31
4	สภาวะกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูปที่ใช้ในแบบจำลอง	33
5	ค่าตัวแปรอิสระที่ใช้ในระบบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	40
6	เปรียบเทียบจำนวนเอลิเมนต์ ค่าความเค้น ความหนาผนัง และเวลาในการวิเคราะห์การเป่าขึ้นรูป	41

สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	(ก) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูป (ข) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป	3
2	ขั้นตอนของกระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูปแบบขั้นตอนเดียว	4
3	(ก) หลอดพีรiform (ข) แม่พิมพ์ฉีดหลอดพีรiform	5
4	ขั้นตอนของกระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูปแบบ 2 ขั้นตอน	6
5	ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณในกระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบดึงยืด	6
6	ลักษณะของหลอดพีรiform แม่พิมพ์เป่า และผลิตภัณฑ์ที่ได้ในกระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูปแบบดึงยืด	7
7	เครื่องเป่าขึ้นรูปแบบ 2 ขั้นตอน	7
8	ส่วนประกอบของแม่พิมพ์เป่าขึ้นรูป	8
9	โครงสร้างของพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต	9
10	ส่วนประกอบของเครื่องอัดรีด-เป่าขึ้นรูป	10
11	(ก) พอลิเมอร์หลอมเหลวหลังการอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูป และ (ข) หลอดพาริสัน	11
12	(ก) พาริสันถูกอัดรีดออกมามีลักษณะเป็นท่อกกลาง (ข) แม่พิมพ์เคลื่อนที่ประกบพาริสัน และพาริสันถูกตัดออก และ (ค) ให้แรงดันแก่หลอดพาริสัน จนขยายตัวติดผนังแม่พิมพ์	12
13	ส่วนประกอบของแม่พิมพ์อัดรีด-เป่าขึ้นรูป	13
14	ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณในกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป	14
15	โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีน	14
16	โครงสร้างโมเลกุลแบบกึ่งก้าน	15
17	โครงสร้างโมเลกุลแบบเส้นตรง	15
18	โครงสร้างโมเลกุลของพอลิโพรพิลีน	16
19	ตัวอย่างเอลิเมนต์แบบต่าง ๆ	19
20	ปัญหาการบิดตัวที่เกิดกับ solid element (a) ก่อนการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (b) หลังการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง	21

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	การทดสอบสมบัติของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก (ก) Uniaxial test (ข) Biaxial test (ค) Planar test และ (ง) Volumetric test	26
22	ความหนาแน่นของขวด PET ช่วงคอขวด และส่วนฐานขวด	28
23	การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของขวด PET (ก) กระบวนการผลิตจริง (ข) กระบวนการจำลองการเป่าขึ้นรูปโดยให้แรงดันโดยตรง (direct pressure) และ (ค) กระบวนการจำลองการเป่าขึ้นรูปโดยให้แรงดันแบบควบคุมการอัตราไหลเชิงมวล (mass flow rate)	28
24	แผนผังการดำเนินการวิจัย	30
25	(ก) เครื่องให้ความร้อนอินฟราเรดแก่หลอดพรีฟอร์ม (ข) พรีฟอร์มขึ้นงานก่อนการเป่าขึ้นรูป และ (ค) ขึ้นงานหลังการเป่าขึ้นรูป	31
26	เครื่องเป่าหลอดพรีฟอร์มที่ใช้ในงานวิจัย	32
27	แม่พิมพ์เป่าขึ้นรูปที่ใช้ในงานวิจัย	32
28	เครื่องอัดรีด-เป่าขึ้นรูป (ก) ชุดอัดรีด และ (ข) ชุดเป่าขึ้นรูปผลิตภัณฑ์	33
29	การวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาแน่น (ก) หลอดพรีฟอร์ม และ (ข) ผลิตภัณฑ์ขวดหลังการเป่าขึ้นรูปแบบดิงยัด	34
30	การวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาแน่น (ก) หลอดพรีสตัน และ (ข) ผลิตภัณฑ์ขวดภายหลังจากการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป	35
31	เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC)	36
32	(ก) เครื่อง Stress viewer และ (ข) ผลการวิเคราะห์ความเค้นตกค้างที่ได้จากเครื่อง Stress viewer	36
33	ลักษณะขึ้นงานสำหรับกระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบดิงยัด	37
34	ลักษณะขึ้นงานสำหรับกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ขวด	38
35	ลักษณะขึ้นงานสำหรับกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูปผลิตภัณฑ์กระถาง	38
36	ขนาดของขึ้นงานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกล	39
37	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่อุณหภูมิการดิงยัดต่างๆ กัน	40

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
38	ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความเครียด (W) และค่า Strain invariants (I)	40
39	ปัญหาการสัมผัสระหว่างชิ้น และแท่งยึด	41
40	ลักษณะชิ้นงานที่ใช้สำหรับการจำลองการฉีด-เป่าขึ้นรูปแบบดึงยึด	42
41	ลักษณะชิ้นงานที่ใช้สำหรับการจำลองการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป	43
42	ลักษณะของแบบจำลองหลอดพรีฟอร์ม และแม่พิมพ์ เมื่อนำเข้าสู่โปรแกรม MSC MARC	44
43	การกำหนดลักษณะพื้นผิวของเอลิเมนต์ และการกระจายตัวความหนาของหลอดพรีฟอร์ม	44
44	การสร้างแบบจำลอง Mooney Rivlin	45
45	กำหนดเงื่อนไขการสัมผัสแม่พิมพ์	46
46	กำหนดแรงดันเป่าของชิ้นงาน	46
47	การเริ่มต้นการวิเคราะห์การเป่าขึ้นรูป โดยโปรแกรม MSC MARC	47
48	การสร้างแบบจำลองของหลอดพรีฟอร์ม หรือพาริสัน	48
49	การนำแบบจำลองของแม่พิมพ์เข้าสู่โปรแกรม	48
50	การกำหนดเงื่อนไขในกระบวนการเป่าขึ้นรูป	49
51	การกำหนดแบบจำลองของวัสดุ	50
52	การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	50
53	ขั้นตอนการเริ่มต้นการวิเคราะห์ โดยโปรแกรม B-SIM	51
54	การเปรียบเทียบการกระจายตัวความหนาผนังของหลอดพรีฟอร์มขนาด 17 g 20 g และ 34 g	52
55	ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างขณะเป่าขึ้นรูปของหลอดพรีฟอร์มที่ขนาดต่างๆ กันซึ่งได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin	53
56	การกระจายตัวความหนาของผนังที่ได้จากการเป่าขึ้นรูปหลอดพรีฟอร์มขนาดต่างๆ กัน	55
57	ผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวความหนาผนังที่ได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlingเมื่อใช้หลอดพรีฟอร์มขนาดต่างๆ กัน	55

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
58 ผลการวิเคราะห์ความเค้นตangk้างภายในชิ้นงานทดสอบที่ได้จากเครื่อง Stress viewer และผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin โดยใช้หลอดพีริฟอร์มขนาดต่างๆ กัน	56
59 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างขณะเป่าขึ้นรูปของหลอดพีริฟอร์มที่อุณหภูมิหลอดพีริฟอร์มต่างๆกัน	57
60 (ก) การเกิดการตกผลึกใหม่ที่อุณหภูมิ 90oC และ (ข) ปัญหาการเป่าไม่เต็มเข้าแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 70oC	58
61 การกระจายตัวความหนาของผนังที่ได้จากการเป่าขึ้นรูปเมื่อใช้อุณหภูมิหลอดพีริฟอร์มต่างๆ กัน	59
62 ผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวความหนาผนังที่ได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin โดยใช้อุณหภูมิหลอดพีริฟอร์มต่างๆ กัน	59
63 ผลการวิเคราะห์ความเค้นตangk้างภายในชิ้นงานทดสอบที่ได้จากเครื่อง Stress viewer และที่ได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin โดยใช้อุณหภูมิหลอดพีริฟอร์มต่างๆ กัน	60
64 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานขนาด 20 g ที่อุณหภูมิ 80oC โดยแท่งยึดมีความเร็วต่างๆ กัน	61
65 การกระจายตัวความหนาของผนังที่ได้จากการเป่าขึ้นรูปหลอดพีริฟอร์มเมื่อใช้ความเร็วแท่งยึดต่างๆ กัน	62
66 ผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวความหนาผนังที่ได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin เมื่อใช้ความเร็วของแท่งยึดต่างๆ กัน	62
67 ผลการวิเคราะห์ความเค้นตangk้างภายในชิ้นงานทดสอบที่ได้จากเครื่อง Stress viewer และผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin เมื่อใช้ความเร็วของแท่งยึดต่างๆ กัน	63
68 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานขนาด 20 g ที่อุณหภูมิ 80° C โดยมีระยะเวลาเคลื่อนที่ของแท่งยึดต่างๆ กัน	64
69 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานขนาด 20 g ที่อุณหภูมิ 80° C โดยระยะเวลาเคลื่อนที่ของแท่งยึดต่างๆ กัน	65

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
70	ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานเมื่อใช้ระยะเวลาเคลื่อนที่ของแท่งยึดต่างๆ กันจากโปรแกรม B-SIM โดยใช้แบบจำลอง K-BKZ	66
71	การวิเคราะห์ความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานซึ่งได้จากแบบจำลอง K-BKZ เมื่อใช้ระยะเวลาเคลื่อนที่ของแท่งยึดต่างๆ กัน	66
72	การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหลอดพรีฟอร์มขนาด 20 g ที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin และแบบจำลอง K-BKZ	67
73	การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานขนาด 20 g ที่อุณหภูมิ 80 oC โดยแท่งยึดมีความเร็วต่างๆ กัน	68
74	ผลการวิเคราะห์ความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานทดสอบที่ได้จากเครื่อง Stress viewer และที่ได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin รวมทั้งแบบจำลอง K-BKZ	69
75	ผลการวิเคราะห์ความหนาผนังชิ้นงานที่ได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin และ K-BKZ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงในกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป	70
76	ผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวความหนาผนังที่ได้จากโปรแกรม B-SIM โดยใช้แบบจำลอง K-BKZ ที่หลอดพรีสั่นขนาดต่างๆ กัน	71
77	ผลการวิเคราะห์ความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานที่ได้จากแบบจำลอง K-BKZ เมื่อใช้หลอดพรีสั่นขนาดต่างๆ กัน	72
78	ผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวความหนาผนังที่ได้จากแบบจำลอง K-BKZ ที่อุณหภูมิหลอดพรีสั่นต่างๆ กัน	73
79	ปัญหาการเป่าไม่เต็มเบ้าแม่พิมพ์ในกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูปที่อุณหภูมิหลอดพรีสั่นเท่ากับ 150 oC	73
80	การวิเคราะห์ความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานจากแบบจำลอง K-BKZ เมื่อใช้อุณหภูมิหลอดพรีสั่นต่างๆ กัน	74
81	ผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวความหนาผนังที่ได้จากแบบจำลอง K-BKZ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์เป่าต่างๆ กัน	75
82	การวิเคราะห์ความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานจากแบบจำลอง K-BKZ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์เป่าต่างๆ กัน	75

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
83 ผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวความหนาผนังที่ได้จากโปรแกรม B-SIM โดยใช้แบบจำลอง K-BKZ ที่แรงคั้นเป่าต่างๆ กัน	76
84 การวิเคราะห์ความเค้นตึงภายในชิ้นงานที่ได้จากแบบจำลอง K-BKZ เมื่อใช้แรงคั้นเป่าต่างๆ กัน	77
85 ผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวความหนาผนังที่ได้จากโปรแกรม B-SIM โดยใช้แบบจำลอง K-BKZ เมื่อกำหนดให้ (ก) หลอดพริสันมีหนาตัดคงที่ และ (ข) หลอดพริสัน มีหน้าตัดไม่คงที่ตลอดความยาว	78
86 ผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวความหนาผนังที่ได้จากแบบจำลอง K-BKZ เมื่อเปรียบเทียบขนาดของหลอดพริสันที่เส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ กัน แต่มีปริมาตรเท่ากัน	79

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

I	=	Strain invariants
ϵ	=	ความเครียด (Strain)
W	=	ค่าพลังงานความเครียด (Strain Energy)
PP	=	พอลิโพรพิลีน (Polypropylene)
LDPE	=	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene)
HDPE	=	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, LDPE)
PET	=	พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate)
FEM	=	ระเบียบวิธีการแก้ปัญหาเชิงตัวเลข (finite element method)
$D_{\text{extrudate}}$	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิเมอร์หลอมเหลวบริเวณทางออกหัวขึ้นรูป (m)
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูอัดรีด (m)
D_{die}	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูป (m)
B	=	อัตราส่วนการบวมตัว
T_g	=	อุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature)
T_m	=	อุณหภูมิสถานะหลอมละลาย (melting temperature)

(10)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

I	=	Strain invariants
ϵ	=	ความเครียด (Strain)
W	=	ค่าพลังงานความเครียด (Strain Energy)
PP	=	พอลิโพรพิลีน (Polypropylene)
LDPE	=	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene)
HDPE	=	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, LDPE)
PET	=	พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate)
FEM	=	ระเบียบวิธีการแก้ปัญหาเชิงตัวเลข (finite element method)
$D_{extrudate}$	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิเมอร์หลอมเหลวบริเวณทางออกหัวขึ้นรูป (m)
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูอัดรีด (m)
D_{die}	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูป (m)
B	=	อัตราส่วนการบวมตัว
T_g	=	อุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature)
T_m	=	อุณหภูมิสถานะหลอมละลาย (melting temperature)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

B	=	อัตราส่วนการบวมตัว
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูอัดรีด (m)
D_{die}	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูป (m)
$D_{extrudate}$	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิเมอร์หลอมเหลวบริเวณทางออกหัวขึ้นรูป (m)
H	=	ความถี่ร่องเกลียวของสกรูอัดรีด (m)
K	=	ค่าคงที่การไหล (Consistency constant)
L	=	ความยาวของหัวขึ้นรูป (m)

(11)

L/D	=	ความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูป
MFI	=	เครื่องมือวัดดัชนีการไหล (Melt flow index)
N	=	ความเร็วรอบการหมุนของสกรูอัดรีด (rpm)
N_{DEB}	=	เลขดีเบอร์่าห์ (Deborahnumber)
n	=	ดัชนีการไหล (Power law index)
PP	=	โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)
ΔP	=	ความดันตกคร่อม (Pa)
Q	=	อัตราการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว ($m^3 \cdot s^{-1}$)
R	=	รัศมีของหัวขึ้นรูป (m)
t_r	=	เวลาที่พอลิเมอร์ใช้เพื่อคลายตัว (s)
t_p	=	เวลาที่พอลิเมอร์ไหลอยู่ในกระบวนการผลิต (s)
τ	=	ความเค้นเฉือน ($N \cdot m^{-2}$)
$\dot{\gamma}$	=	อัตราเฉือนเฉือน (s^{-1})
η	=	ความหนืด ($N \cdot s \cdot m^{-2}$)
ϕ	=	มุมเอียงของสกรูอัดรีด

การวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนัง ในกระบวนการเป่าขึ้นรูปพอลิเมอร์

An Investigation on Wall Thickness Distribution in Polymer Blow

Molding Process

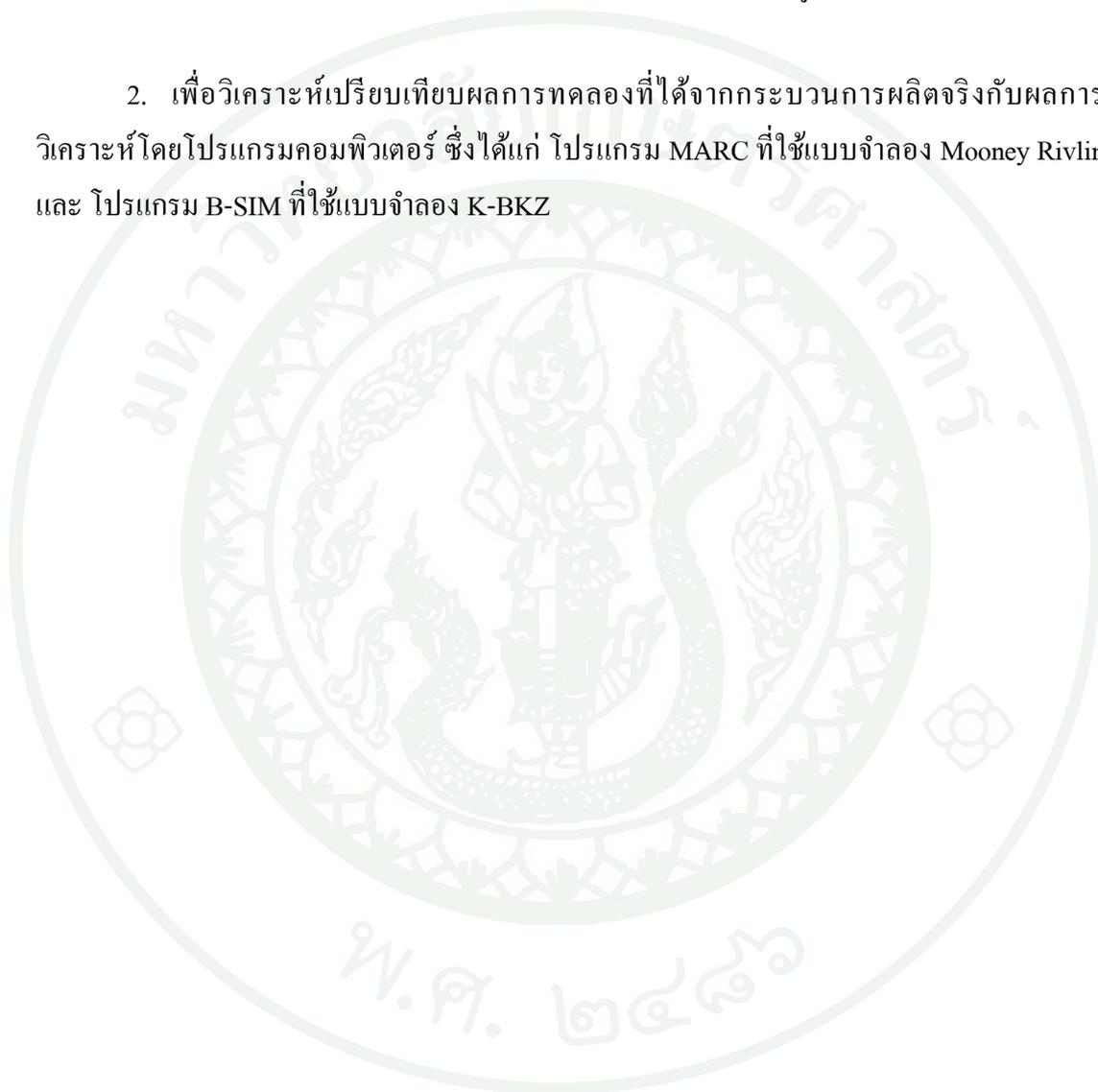
คำนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตบรรจุภัณฑ์ เช่น ขวดน้ำดื่ม และขวดน้ำอัดลมมีความจำเป็นต้องพัฒนาองค์ความรู้และเทคโนโลยีที่ใช้ในกระบวนการผลิตเป็นอย่างมากเนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งกระบวนการผลิตที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันคือ กระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูป (injection blow molding process) ซึ่งเป็นกระบวนการร่วมกันระหว่าง กระบวนการฉีดขึ้นรูป (injection molding) และกระบวนการเป่าขึ้นรูป (blow molding) ในขณะที่อีกกระบวนการหนึ่งคือกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป (extrusion blow molding process) ซึ่งเป็นกระบวนการร่วมกันระหว่างกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป (extrusion molding) และกระบวนการเป่าขึ้นรูป อย่างไรก็ตามผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์บรรจุในประเทศไทย ยังขาดองค์ความรู้และความเข้าใจในเทคโนโลยีการออกแบบแม่พิมพ์ และหาเงื่อนไขในกระบวนการผลิตที่เหมาะสม โดยส่วนใหญ่แล้วผู้ประกอบการยังคงใช้วิธีลองผิดลองถูก (trials and errors) ส่งผลให้สิ้นเปลืองทั้งพลังงาน วัสดุุดิบ และระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิต

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) เพื่อหาแนวทางในการแก้ไขข้อบกพร่องของชิ้นงาน และลดต้นทุนการผลิตที่เกิดขึ้น ซึ่งได้แก่โปรแกรม MARC เพื่อวิเคราะห์ผลการกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูป และกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูปที่เงื่อนไขในกระบวนการผลิตต่างกัน โดยได้ทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้ กับผลการทดลองจริง และโปรแกรม B-SIM ที่มีใช้ในเชิงพาณิชย์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีผลต่อการกระจายตัวความหนาผนังและความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานพอลิเมอร์ที่ผ่านกระบวนการเป่าขึ้นรูป
2. เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากกระบวนการผลิตจริงกับผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งได้แก่ โปรแกรม MARC ที่ใช้แบบจำลอง Mooney Rivlin และ โปรแกรม B-SIM ที่ใช้แบบจำลอง K-BKZ



การตรวจเอกสาร

1. กระบวนการเป่าขึ้นรูป (blow molding process)

กระบวนการเป่าขึ้นรูปเป็นกรรมวิธีการผลิตบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์โดยมีหลักการทำงาน คือ ใช้แรงดันเป่าขึ้นงานหลอดพรีฟอร์ม (preform) หรือหลอดพาริสัน (parison) ให้ขยายตัวออกจนติดผนังแม่พิมพ์เป่าที่มีลักษณะตามที่ต้องการ กระบวนการนี้เป็นที่นิยมใช้สำหรับการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ ประเภทต่าง ๆ เช่น ขวดบรรจุน้ำ รวมไปถึงถังบรรจุขนาดใหญ่ ดังแสดงในภาพที่ 1 สำหรับกระบวนการเป่าขึ้นรูปที่ใช้กันมากในปัจจุบัน สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ กระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูป (injection blow molding) และกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป (extrusion blow molding)



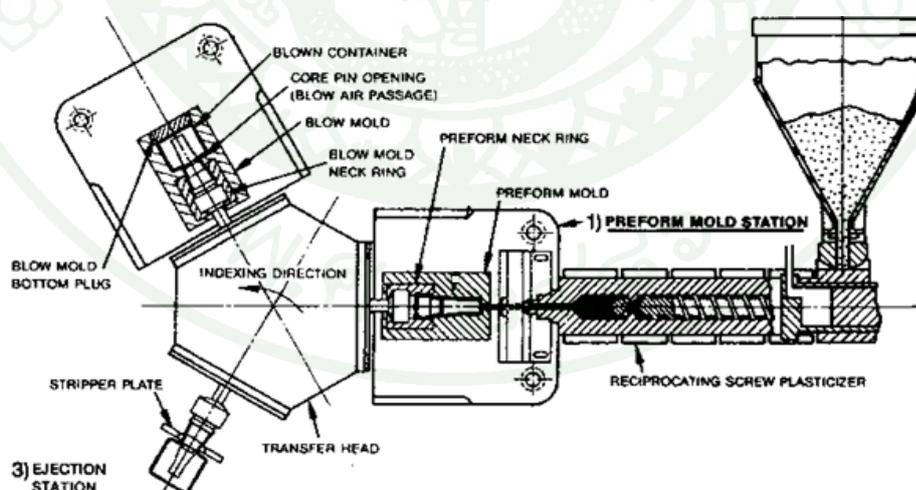
ภาพที่ 1 (ก) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูป และ (ข) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป

2. กระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูป (injection blow molding)

กระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูปเป็นกรรมวิธีร่วมกันระหว่างกระบวนการฉีด และกระบวนการเป่าขึ้นรูป โดยเริ่มจากการฉีดขึ้นรูปเป็นหลอดพรีฟอร์ม จากนั้นนำไปเข้าสู่กระบวนการเป่าขึ้นรูปในแม่พิมพ์เป่า ซึ่งเครื่องที่ใช้ฉีด-เป่าขึ้นรูปประกอบด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป (injection molding machine) และเครื่องเป่าขึ้นรูป (blow molding machine) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วกระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูปที่ใช้กันในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์บรรจุสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี ได้แก่ กระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูปแบบขั้นตอนเดียวต่อเนื่อง (single stage) และแบบ 2 ขั้นตอน (two stage)

2.1 กระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูปแบบขั้นตอนเดียว (single stage)

กระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูปแบบขั้นตอนเดียว มีขั้นตอนการทำงานแบบต่อเนื่อง โดยสามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการ ฉีด และเป่าขึ้นรูปอย่างต่อเนื่อง เริ่มตั้งแต่การฉีดพอลิเมอร์เข้าไปในแม่พิมพ์เตรียมขึ้นรูปหลอดพรีฟอร์ม จากนั้นแกนหมุนย้ายหลอดพรีฟอร์มไปเป่าในแม่พิมพ์เป่า เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างตามแม่พิมพ์เป่า แล้วย้ายชิ้นงานไปยังตำแหน่งปลดชิ้นงาน เพื่อปลดชิ้นงานออก และแกนหมุนไปตำแหน่งเริ่มใหม่ดังแสดงในภาพที่ 2 โดยทั่วไปแล้วหากเป็นการขึ้นรูปแบบขั้นตอนเดียวนิยมใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กเท่านั้น



ภาพที่ 2 ขั้นตอนของกระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูปแบบขั้นตอนเดียว

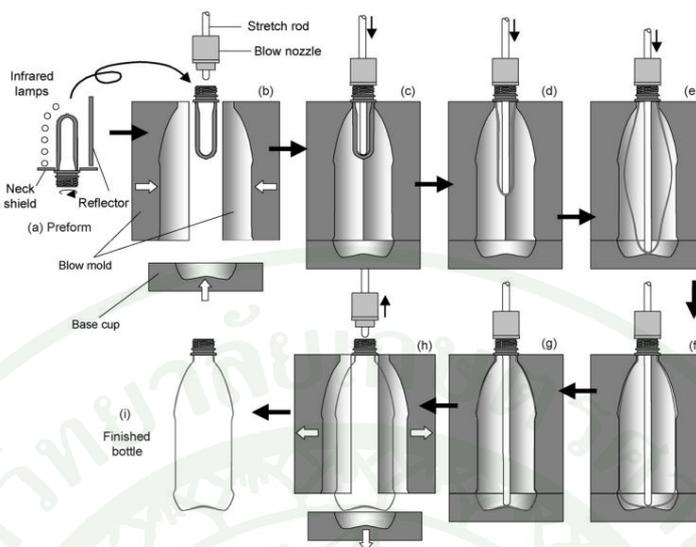
ที่มา: Rosato et al. (2004)

2.2 กระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูปแบบ 2 ขั้นตอน (two stage)

กระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูปแบบ 2 ขั้นตอน นิยมใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการฉีด-เป่าแบบขั้นตอนเดียว เริ่มจากฉีดหลอดพรีฟอร์มโดยใช้แม่พิมพ์ฉีดที่มีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 3 จากนั้นนำหลอดพรีฟอร์มเข้าสู่กระบวนการให้ความร้อนอีกครั้ง แล้วนำเข้าสู่แม่พิมพ์ โดยบริเวณชุดเป่ามีแกนยึดทำให้หลอดพรีฟอร์มยึดออกตามความยาวของขวด หลังจากนั้นให้แรงดันเป่าพอลิเมอร์ขยายออกจนเต็มแม่พิมพ์ แล้วปลดชิ้นงานออกหลังจากชิ้นงานเย็นตัว ดังแสดงในภาพที่ 4 โดยการทำให้พอลิเมอร์ให้ยึดออกในแนวตั้งในขณะเป่าขึ้นรูปทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่เป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้ มีความบางใส และมีสมบัติเชิงกลที่ดี คือ ทนต่อการกระแทก โดยก่อนเข้าสู่กระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูปสามารถใช้สูตรคำนวณเพื่อหาขนาดของชิ้นงานได้ดังสมการที่ 1 และ 2 โดยทั่วไปแล้วมีการกำหนดอัตรา การยืดตัว (stretch ratio) ของการผลิตขวด PET อยู่ที่ประมาณ 2.0 ในแนวตั้ง (axial direction) และ 4.0 ในแนวรัศมี (hoop direction) (Hugener, 2009)



ภาพที่ 3 (ก) หลอดพรีฟอร์ม และ (ข) แม่พิมพ์ฉีดหลอดพรีฟอร์ม

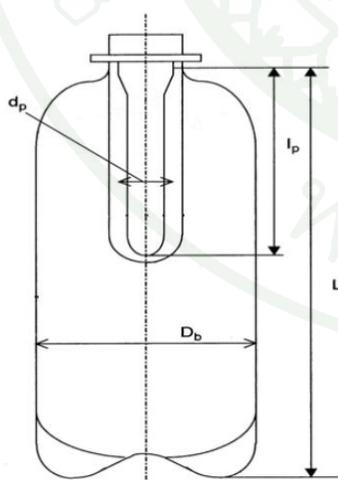


ภาพที่ 4 ขั้นตอนของกระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูปแบบ 2 ขั้นตอน

ที่มา: Lim *et al.* (2008)

$$\lambda_{ax} = \frac{L_b}{L_p} \quad (1)$$

$$\lambda_{rad} = \frac{D_b}{D_p} \quad (2)$$



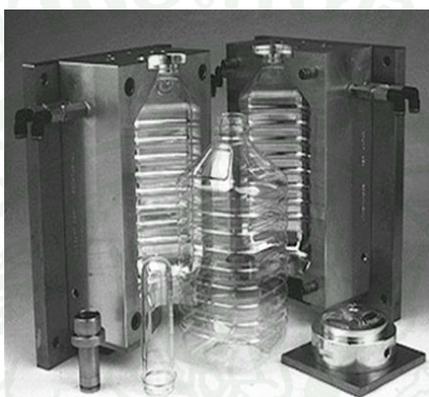
- λ_{ax} = อัตราการยืด (stretch ratio) ในแนวตั้ง
- λ_{rad} = อัตราการยืด (stretch ratio) ในแนวรัศมี
- L_p = ความยาวของหลอดพรีฟอร์ม
- L_b = ความยาวของชิ้นงานสำเร็จ
- D_p = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของหลอดพรีฟอร์ม
- D_b = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของชิ้นงานสำเร็จ

ภาพที่ 5 ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณในกระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบดึงยืด

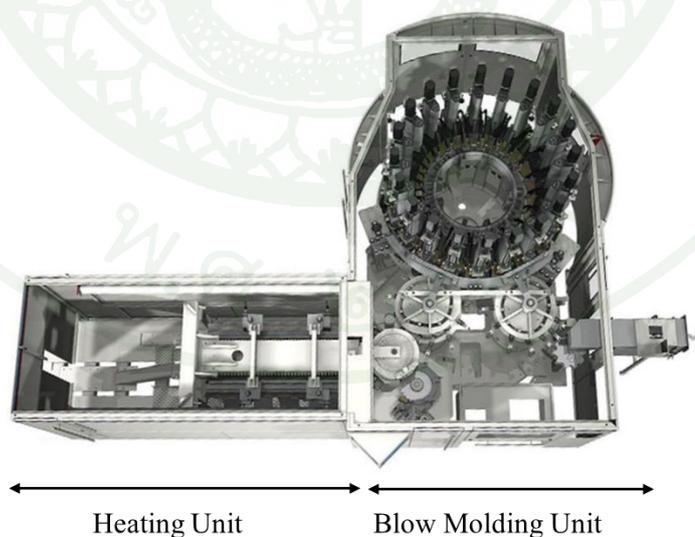
ที่มา: Hugener (2009)

3. เครื่องเป่าขึ้นรูป (blow molding machine)

เครื่องเป่าขึ้นรูป ทำหน้าที่ให้ความร้อน และแรงดันแก่หลอดพรีฟอร์มให้ขยายตัวออกจนเต็มแม่พิมพ์เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะตามต้องการ ดังภาพที่ 6 โดยทั่วไปแล้วส่วนประกอบของเครื่องเป่าขึ้นรูปสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนหลัก คือ ชุดให้ความร้อน และชุดเป่าขึ้นรูปดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 6 ลักษณะของหลอดพรีฟอร์ม แม่พิมพ์เป่า และผลิตภัณฑ์ที่ได้ในกระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูปแบบคิงซีค



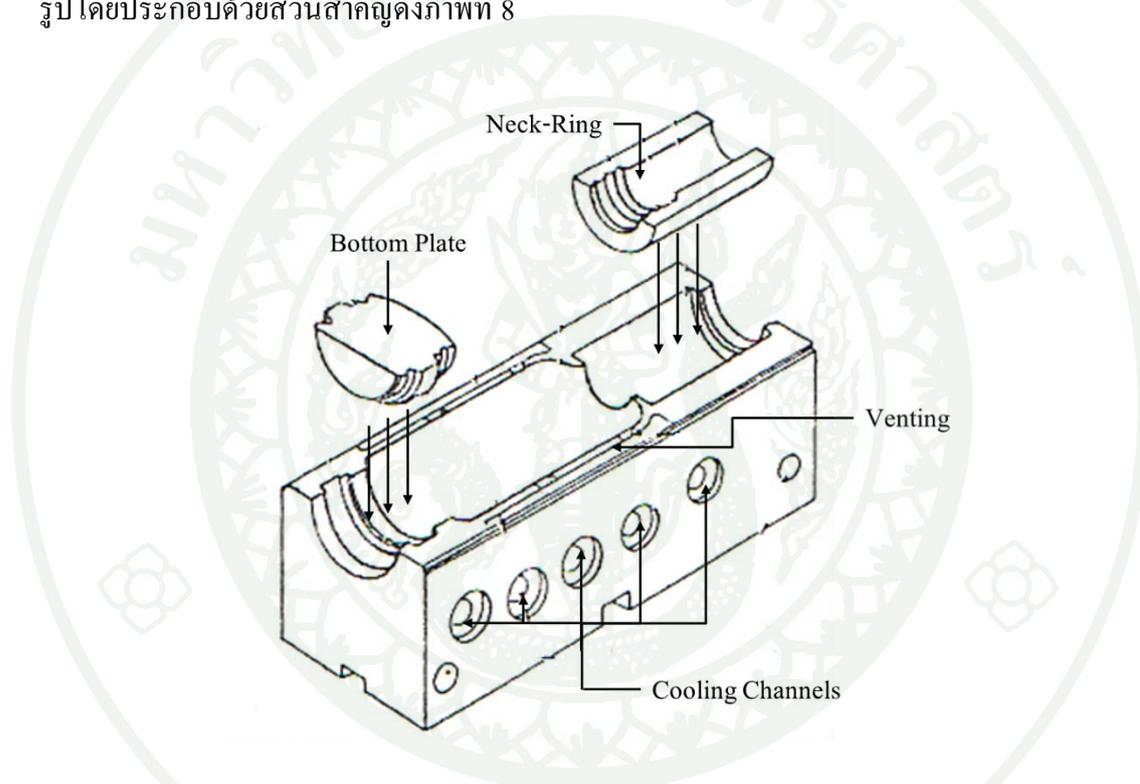
ภาพที่ 7 เครื่องเป่าขึ้นรูปแบบ 2 ขั้นตอน

ที่มา: Brandau (2012)

3.1 ชุดให้ความร้อนอินฟราเรด (heating unit) ทำหน้าที่ให้ความร้อน และควบคุมอุณหภูมิแก่หลอดพรีฟอร์ม โดยหลอดพรีฟอร์มจะถูกนำเข้าสู่สายพานลำเลียงผ่านเตารังสีอินฟราเรด

3.2 ชุดเป่าขึ้นรูป (blow molding unit) เป็นส่วนที่สำคัญมากสำหรับกระบวนการเป่าขึ้นรูป ทำหน้าที่ให้แรงดันเป่าแก่หลอดพรีฟอร์มให้ขยายตัวออกจนเต็มแม่พิมพ์

3.3 แม่พิมพ์เป่า (blow molding) ทำหน้าที่กำหนดลักษณะของชิ้นงานหลังการเป่าขึ้นรูป โดยประกอบด้วยส่วนสำคัญดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์เป่าขึ้นรูป

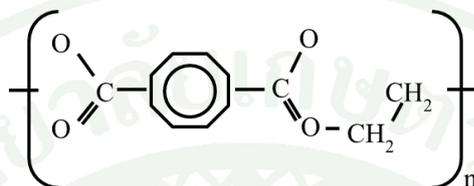
ที่มา: Rosato *et al.* (2004)

4. วัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้ในกระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูป

4.1 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate, PET)

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต คือ พอลิเมอร์ประเภทพอลิเอสเทอร์ ซึ่งโครงสร้างของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต แสดงในภาพที่ 9 โดยในช่วงแรก PET ถูกนำมาผลิตและใช้งานในรูปแบบของ

เส้นใย เนื่องจาก PET มีสมบัติเด่นหลายด้าน คือ มีความแข็งแรง ทนต่ออุณหภูมิสูง ต่อมาในปี ค.ศ. 1967 PET ถูกนำมาผลิตเป็นขวดพลาสติกที่ทนต่อแรงกระแทก ไม่เปราะแตกง่าย ใส จึงนิยมใช้บรรจุน้ำดื่ม น้ำมันพืช และขวดสำหรับบรรจุน้ำอัดลมด้วย เนื่องจาก PET มีสมบัติป้องกันการแพร่ผ่านของก๊าซได้ดีกว่าพลาสติกทั่วไป



ภาพที่ 9 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเป็นพอลิเมอร์ประเภทกึ่งผลึก (semi-crystalline) ทำให้พลาสติกที่ได้มีความใส หรือมีสีขาวขุ่นตามปริมาณผลึกที่เกิดขึ้น มีสมบัติด้านการต้านทานการซึมผ่านของก๊าซ และทนต่อแรงกระแทกสูง โดยมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ประมาณ $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ประมาณ $270\text{ }^{\circ}\text{C}$

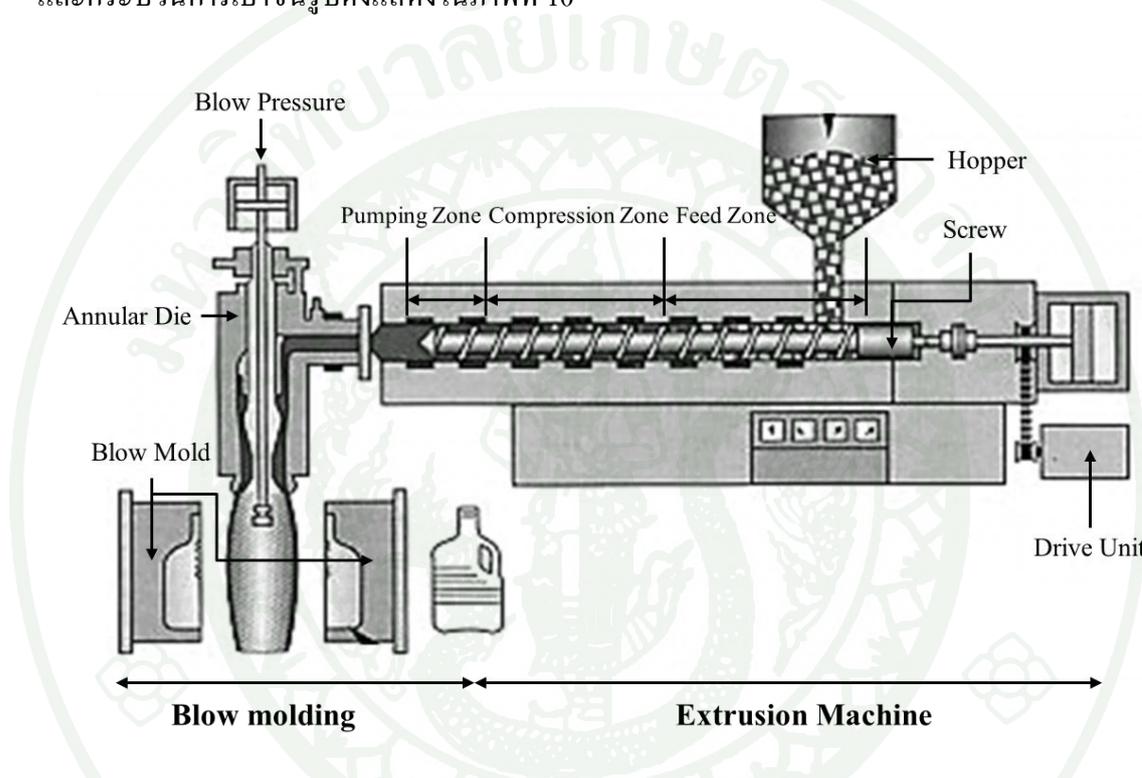
ตารางที่ 1 สมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

Property	Polyethylene terephthalate (PET)
Density	1370 kg/m^3
Tensile strength	70 mpa
Elongation	130 %
Flexural Modules	3100 mpa
Impact strength	0.5 J/cm
Melting Temp. (range)	230°C
Lower working temperature	-40°C

ที่มา: Vennix (2009)

5. กระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป (extrusion blow molding)

กระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูปเป็นกระบวนการผลิตที่นิยมใช้กันอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมการผลิตขวดน้ำที่มีลักษณะขาวขุ่นหรือผลิตภัณฑ์ที่ใช้บรรจุสารเคมี ซึ่งกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูปเป็นกรรมวิธีร่วมกันระหว่างกระบวนการอัดรีด (extrusion molding) และกระบวนการเป่าขึ้นรูปดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ส่วนประกอบของเครื่องอัดรีด-เป่าขึ้นรูป

ที่มา: Belcher. (2011)

5.1 ชุดอัดรีด (extrusion unit)

ชุดอัดรีดมีหน้าที่หลอมละลายเม็ดพอลิเมอร์และอัดรีดพอลิเมอร์ หลอมเหลว ผ่านหัวขึ้นรูป โดยได้รับความร้อนจากชุดให้ความร้อน (heater) และความร้อนที่เกิดขึ้นจากการหมุนของสกรู เช่นเดียวกับหลักการหลอมละลายในกระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูป จากนั้น พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลผ่านชุดปรับทิศทางกรไหล (breaker plate) และแผ่นกรอง (screen pack) เพื่อเข้าสู่หัวขึ้นรูปต่อไป

5.1.1 ระบบขับเคลื่อน (drive system) หรือมอเตอร์ทำหน้าที่ หมุนสกรูที่อยู่ในห้อง หลอมเหลวเพื่อให้เม็ดพอลิเมอร์เกิดการหลอมเหลวและไหลตามร่องสกรูไปยังหัวขึ้นรูป

5.1.2 สกรู (screw) เป็นอุปกรณ์สำคัญที่ทำให้พอลิเมอร์เกิดการหลอมละลายและทำ หน้าที่ลำเลียงพอลิเมอร์ไปยังหัวขึ้นรูป

5.1.3 ชุดปรับทิศทางการไหล และแผ่นกรอง (breaker plate/screen pack) เป็นอุปกรณ์ ที่อยู่ถัดจากสกรู ทำหน้าที่ปรับทิศทางการไหลและสร้างแรงดันหรือเพิ่มความหนาแน่นของ พอลิเมอร์หลอมเหลว (melt density) ก่อนไหลเข้าสู่หัวขึ้นรูป นอกจากนี้ชุดปรับทิศทางการไหลยัง ทำหน้าที่สำหรับยึดกับแผ่นกรอง โดยแผ่นกรองทำหน้าที่กรองเศษโลหะหรือเม็ดพลาสติกที่ยัง หลอมไม่สมบูรณ์ ไม่ให้ไหลเข้าสู่หัวขึ้นรูป

5.1.4 หัวขึ้นรูป (die) อยู่ในตำแหน่งหน้าสุดของชุดอัดรีด สำหรับหัวขึ้นรูปของเครื่อง อัดรีด-เป่าขึ้นรูปมีลักษณะเป็นรูปวงแหวน (annular die) อัดรีดพอลิเมอร์ออกมามีลักษณะเป็นท่อ กลวง หรือที่เรียกว่า หลอดพาริสัน ดังแสดงในภาพที่ 11(ก) และ 11(ข) โดยในส่วนหัวขึ้นรูปนี้ มี การให้แรงอากาศเป่าเพื่อรักษารูปร่างของหลอดพาริสัน ป้องกันการเกิด sagging รวมถึงเป่าขึ้นรูป หลอดพาริสันให้ขยายออกจนเต็มแม่พิมพ์



(ก)



(ข)

ภาพที่ 11 (ก) พอลิเมอร์หลอมเหลวหลังการอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูป และ (ข) หลอดพาริสัน

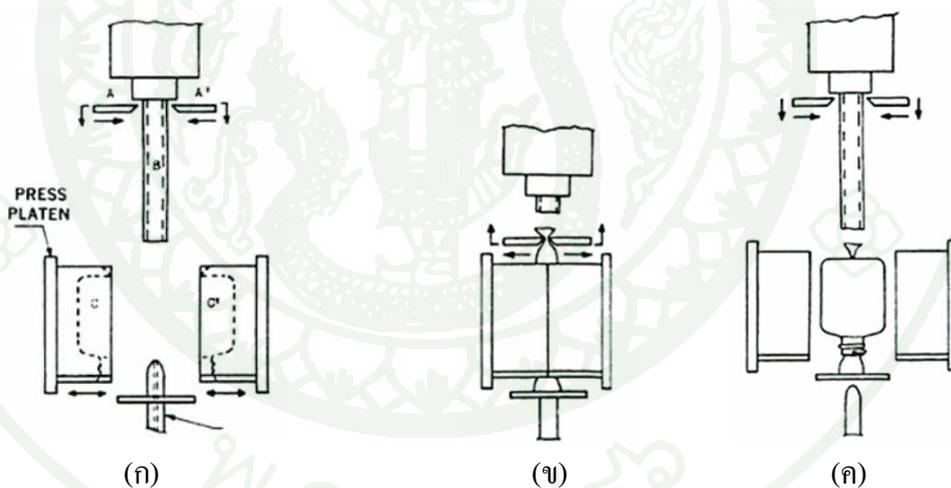
ที่มา: นเรศ (2552)

5.2 ชุดเป่าขึ้นรูป (blow molding unit)

หลังจากพอลิเมอร์ถูกอัดรีดออกมาเป็นหลอดพาริสัน โดยมีความยาวและขนาดตามต้องการ จากนั้นชุดเป่าขึ้นรูปเริ่มให้แรงดันเป่าหลอดพาริสันจนขยายตัวออกเต็มผนังแม่พิมพ์ โดยชุดเป่าขึ้นรูปมีส่วนประกอบ ดังนี้

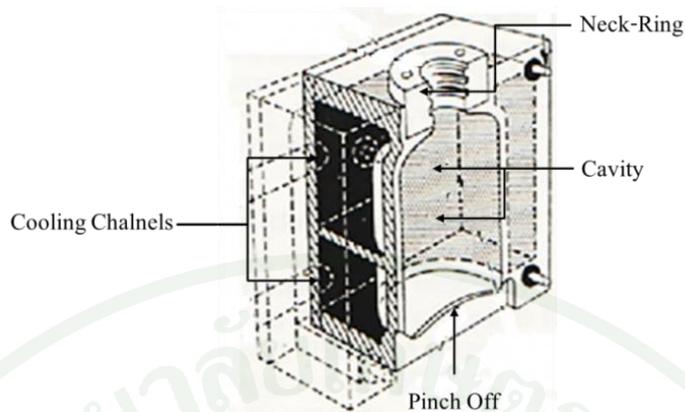
5.2.1 ชุดให้แรงดันเป่า (blow pressure) ทำหน้าที่ให้แรงดันเป่าแก่หลอดพาริสัน เพื่อให้ขยายตัวออกจนเต็มแม่พิมพ์

5.2.2 แม่พิมพ์ (mold) หลังจากพอลิเมอร์ถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปไปหลอดพาริสัน แม่พิมพ์เคลื่อนที่เข้าประกบหลอดพาริสัน แม่พิมพ์เป็นส่วนที่กำหนดรูปร่างของผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ ดังแสดงในภาพที่ 12 โดยส่วนต่างๆ ของแม่พิมพ์เป่าในกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูปดังแสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 12 (ก) พาริสันถูกอัดรีดออกมามีลักษณะเป็นท่อกลวง (ข) แม่พิมพ์เคลื่อนที่ประกบพาริสัน และพาริสันถูกตัดออก และ (ค) ให้แรงดันแก่หลอดพาริสัน จนขยายตัวติดผนังแม่พิมพ์

ที่มา: Rosato *et al.* (2004)



ภาพที่ 13 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์อัดรีด-เป่าขึ้นรูป

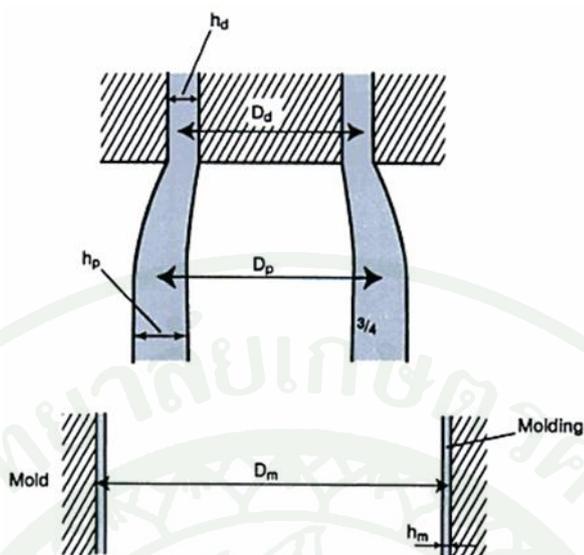
ที่มา: Rosato *et al.* (2004)

โดยทั่วไปแล้วสามารถประมาณความหนาผนังของชิ้นงานได้ โดยพิจารณาถึงอัตราส่วนการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ไหลผ่านหัวขึ้นรูป กล่าวคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิเมอร์หลอมเหลวมีขนาดที่ใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูป เนื่องจากการไหลที่แตกต่างกันซึ่งทำให้เกิดการสะสมพลังงานอย่างมากที่บริเวณใกล้ผนังหัวขึ้นรูป ดังนั้นเมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลออกจากหัวขึ้นรูปมีการคายพลังงานออกมาในรูปแบบการบวมตัวโดยสามารถคำนวณหาความหนาผนังได้จากสมการที่ 3

$$h_m = \frac{\left(\frac{D_{extrudate}}{D_{die}}\right)^3 \times h_d \times D_{extrudate}}{D_{mold}} \quad (3)$$

โดย

- h_m = ความหนาเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์ขวด
- h_d = ความกว้างช่องวงแหวนของหัวขึ้นรูป
- D_d = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของหัวขึ้นรูป
- D_p = เส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิเมอร์หลอมเหลว
- D_m = เส้นผ่านศูนย์กลางของแม่พิมพ์



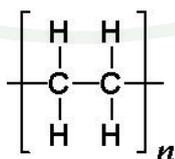
ภาพที่ 14 ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณในกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป

ที่มา: Rosato *et al.* (2004)

6. วัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้ในกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป

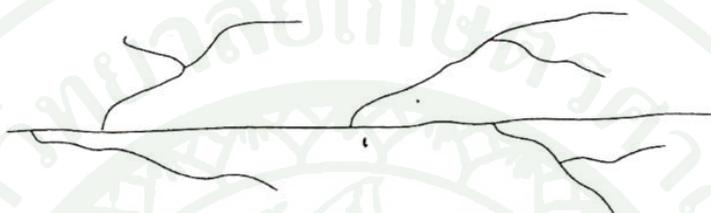
6.1 พอลิเอทิลีน (polyethylene, PE)

พอลิเอทิลีนถูกค้นพบในปี ค.ศ.1933 โดยโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน ดังแสดงในภาพที่ 15 สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะโครงสร้างสายโซ่โมเลกุล ซึ่งได้แก่ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (high density polyethylene, HDPE)



ภาพที่ 15 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีน

LDPE มีโครงสร้างโซ่โพลีเมอร์เป็นแบบ กิ่งก้าน (branch chain) ดังแสดงในภาพที่ 16 มีความหนาแน่นอยู่ที่ประมาณ $0.910-0.940 \text{ g/cm}^3$ โดยมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ประมาณ -110°C และอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ประมาณ 115°C ผลิตโดยใช้แรงดันสูง จากกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) มีความเหนียว และยืดหยุ่น อุณหภูมิการใช้งานอยู่ที่ประมาณ -50°C ถึง 80°C นิยมนำ LDPE มาใช้สำหรับการผลิตแผ่นฟิล์มและถุงพลาสติก



ภาพที่ 16 โครงสร้างโพลีเมอร์แบบกิ่งก้าน

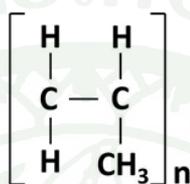
HDPE มีโครงสร้างสายโซ่โพลีเมอร์เป็นแบบเส้นตรง (linear chain) ดังแสดงภาพที่ 17 โดยมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ประมาณ -90°C และอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ประมาณ 137°C อุณหภูมิการใช้งานอยู่ที่ประมาณ -50 ถึง 100°C เนื่องจากมีแรงดึงดูดระหว่างโพลีเมอร์ของพอลิเมอร์ค่อนข้างสูง มีความแข็งแรง เนื่องจากความเป็นเส้นตรงของสายโซ่โพลีเมอร์ ส่งผลให้ความหนาแน่นของโครงสร้างภายใน หรือความเป็นผลึกสูง มีสมบัติเด่นด้านการกักเก็บก๊าซ และทนต่อสารเคมี แต่มีข้อด้อย คือ มีการหดตัวภายหลังจากการเย็นตัวในแม่พิมพ์ และไม่สามารถขึ้นรูปเป็นถุงขนาดใหญ่หรือแผ่นฟิล์มได้เนื่องจากมีความแข็งแรงของพอลิเมอร์หลอมเหลว (melt strength) ต่ำ นิยมนำ HDPE มาใช้สำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์บรรจุ เช่น ขวดน้ำดื่ม ขวดแชมพู ทั่อน้ำ และชิ้นส่วนยานยนต์ เป็นต้น



ภาพที่ 17 โครงสร้างโพลีเมอร์แบบเส้นตรง

6.2 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP)

พอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP) ได้รับการพัฒนาและผลิตขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1957 โดยโครงสร้างทางเคมีของพอลิโพรพิลีนมีลักษณะดังภาพที่ 18 มีความหนาแน่นประมาณ 0.890-0.905 g/cm³ มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ประมาณ -18°C และอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ประมาณ 175°C



ภาพที่ 18 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิโพรพิลีน

ในปัจจุบันพอลิโพรพิลีนมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีจุดเด่นในเรื่องการทนทานต่อสารเคมีต่างๆ และมีความแข็งแรงที่สูง เป็นต้น ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ขวดแชมพู ก่องบรรจุอาหาร อุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น

ตารางที่ 2 สมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีน

Properties	Polypropylene	Polyethylene
Density	0.898 gm/cm ³	0.955 gm/cm ³
Tensile @ Yield	27 MPa	28 MPa
Elongation @ Yield	10%	800%
Flexural modulus	1,220 MPa	1,220 MPa
Izod impact	1.59 J/cm	2.1 J/cm
Melting temperature. (range)	160-166°C	125-135°C
Low temperature. brittleness	-5°C	<-70°C

ที่มา: Bochsler creative solutions (2008)

7. อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของพอลิเมอร์ (transition temperature)

พอลิเมอร์สามารถเปลี่ยนแปลงสถานะได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความดัน โดยสถานะที่นำมาพิจารณามี 3 สถานะ ได้แก่ สถานะคล้ายแก้ว (glassy state) สถานะคล้ายยาง (rubbery state) และสถานะหลอมเหลว (molten state) ตามลำดับดังนี้

7.1 สถานะคล้ายแก้ว (glassy state)

การเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเกิดขึ้นในพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างอสัณฐาน (amorphous) และโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) ในขณะที่เพิ่มอุณหภูมิ โมเลกุลจะเกิดการสั่น (vibrate) และการหมุน (rotate) แต่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นยังไม่สามารถเคลื่อนไหวได้อย่างอิสระ โดยเมื่อพอลิเมอร์อยู่ในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition, T_g) พอลิเมอร์จะมีลักษณะแข็ง เปราะ และแตกหักได้

7.2 สถานะคล้ายยาง (rubbery state)

การเปลี่ยนสถานะคล้ายยาง เกิดในช่วงระหว่างอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และที่อุณหภูมิหลอมตัวของผลึก (melting temperature, T_m) ในขณะที่เพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น โมเลกุลเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ เกิดการสั่น และการหมุนมากขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์เสียรูปได้ เมื่อมีแรงมากระทำ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบทั้งแบบยืดหยุ่น (elastic deformation) และแบบถาวร (plastic deformation) ในเวลาเดียวกัน

7.3 สถานะการหลอมละลาย (molten state)

การเปลี่ยนแปลงสถานะการหลอมละลายเกิดจากการหลอมตัวของผลึกทำให้พอลิเมอร์เปลี่ยนจากสถานะของแข็งไปเป็นของเหลวซึ่งเกิดในช่วงที่พอลิเมอร์ได้รับความร้อนและได้รับพลังงานมากพอจนทำให้ความเป็นผลึกถูกทำลายลงทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ อย่างไรก็ตามสถานะนี้เกิดขึ้นเฉพาะพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบกึ่งผลึกเท่านั้นส่วนพอลิเมอร์แบบอสัณฐานจะมีการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วและสถานะคล้ายยางเท่านั้น

8. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานของกระบวนการเป่าขึ้นรูป

ความเค้นตกค้าง (residual stress) คือ ความเค้นที่คงค้างอยู่ในวัสดุ ขณะที่วัสดุนั้นๆ ไม่มีแรงกระทำจากภายนอก (external force) โดยความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานหลังการขึ้นรูปมีสาเหตุมาจากความเค้นที่ได้รับจากการเย็นตัวของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปซึ่งมีอิทธิพลมาจากการถ่ายเทความร้อนภายในแม่พิมพ์ ความไม่สม่ำเสมอของการยืดตัวภายในชิ้นงาน หรือความเครียด (strain) ซึ่งทำให้เกิดความเค้นตกค้างภายใน ซึ่งความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นในชิ้นงานทำให้เกิดแตกหัก การโก่งงอ และส่งผลเสียต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากผลรวมของค่าความเครียดที่เกิดจากโหลด (load) ดังสมการที่ 4

$$\varepsilon_{Total} = \varepsilon_e + \varepsilon_{\Delta T} + \varepsilon_p + \varepsilon_{tp} \quad (4)$$

โดย

ε_e = ความเครียดที่เกิดจากการกระทำจากโหลดภายนอก

$\varepsilon_{\Delta T}$ = ความเครียดที่เกิดจากการขยายตัวของวัสดุเนื่องจากอุณหภูมิ

ε_p = ความเครียดเมื่อวัสดุได้รับโหลดภายนอกจนเลยจุดคราก (yield point) ของวัสดุ หรือเมื่อวัสดุเข้าสู่จุดการเสียรูปแบบถาวร (plastic deformation)

ε_{tp} = ความเครียดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเฟสภายในเนื้อวัสดุ

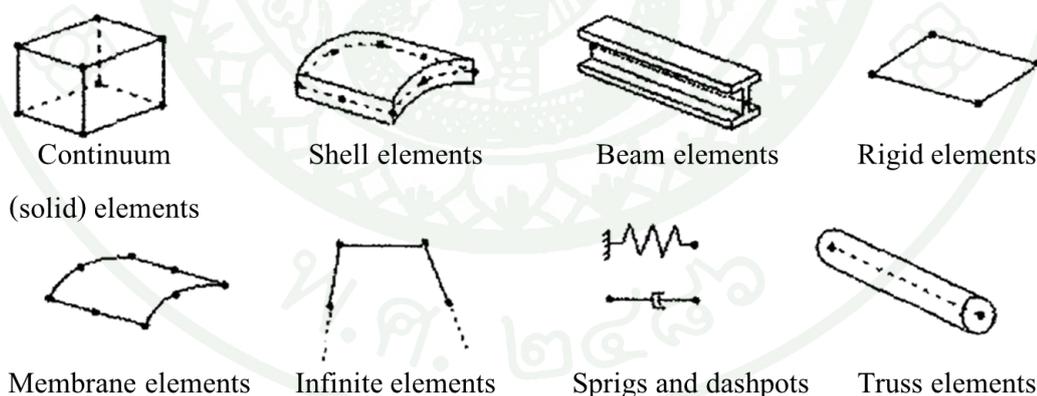
ความเค้นตกค้างสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งชิ้นงาน หรืออาจเกิดขึ้นเพียงบางบริเวณของชิ้นงาน โดยความเค้นตกค้างเป็นตัวเร่งอัตราการเกิดความเสียหาย หรือเร่งการเสื่อมสภาพของวัสดุ (material degradation) และเป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายชนิดต่างๆ ตามมาได้ การวัดความเค้นตกค้างสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น การวัดการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffractive technique) การวัดการกระเจิงของนิวตรอน (neutron diffraction) การใช้หลักการของสนามแม่เหล็ก (magnetic method) การใช้คลื่นเสียงความถี่สูง (ultrasonic method) ในการวัด และสามารถใช้เครื่องวัดความเค้นตกค้าง (stress viewer) โดยใช้หลักการโพลาไรเซชัน (polarization) ของแสง เพื่อตรวจสอบบริเวณที่มีความเค้นตกค้างภายในชิ้นงาน

9. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) ชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม ซึ่งเหมาะสมกับการแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนจนไม่สามารถแก้ปัญหาคด้วยการวิเคราะห์ (analytical method) โดยตรง สามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนหลักๆ คือ ขั้นตอนก่อนการประมวลผล (pre-processing) ซึ่งเป็นขั้นเตรียมแบบ การกำหนดกรูปร่าง การเลือกชนิดของเอลิเมนต์ เงื่อนไขของแบบจำลอง และการเลือกแบบจำลองวัสดุ ขั้นตอนที่ 2 คือ การประมวลผล (processing) เป็นขั้นตอนของการคำนวณโดยอาศัยข้อมูลและข้อกำหนดจากขั้นตอนแรก จากนั้นแก้ระบบสมการเพื่อหาผลเฉลยของปัญหาที่ต้องการ และขั้นตอนสุดท้าย คือ ขั้นตอนหลังการประมวลผล (post-processing) เป็นการแสดงผลที่ได้จากการคำนวณ โดยแสดงผลออกมาในรูปแบบของรูปภาพหรือในรูปแบบของข้อมูลที่เป็นตัวเลข

9.1 ชนิดของเอลิเมนต์

โดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งชนิดของเอลิเมนต์ได้ 8 ประเภท ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 ตัวอย่างเอลิเมนต์แบบต่างๆ

ที่มา: Hibbitt (2002)

ในการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์ มีเอลิเมนต์ให้เลือกหลายชนิด และยังสามารถแบ่งเอลิเมนต์ออกเป็นเอลิเมนต์อันดับที่ 1 (first-order element) และเอลิเมนต์อันดับที่ 2 (second-order element)

มีความแตกต่างกันคือ เอลิเมนต์อันดับที่ 2 มีจำนวนจุดต่อ (node) ต่อเอลิเมนต์มากกว่า จึงมีความแม่นยำกว่าเอลิเมนต์อันดับที่ 1 สามารถทำนายความเค้นได้ดีกว่า เหมาะกับงานที่มีความโค้งมาก ๆ และปัญหาที่ชิ้นงานเกิดการงอ แต่ไม่เหมาะกับปัญหาที่มีเงื่อนไขสัมผัส ปัญหาการกระทบ (impact) และปัญหาที่เกิดการบิดตัว (distort) ของเอลิเมนต์ซึ่งเอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับชิ้นงานที่ใช้ในกระบวนการเป่าขึ้นรูปมีอยู่ 3 ชนิดคือ เอลิเมนต์ชนิดแข็ง (solid element) เอลิเมนต์ชนิดเยื่อบาง (membrane element) และเอลิเมนต์ชนิดเปลือกบาง (shell element) มีรายละเอียดของเอลิเมนต์แต่ละชนิดดังนี้

9.1.1 เอลิเมนต์ ชนิดแข็ง (solid element) เป็นเอลิเมนต์ที่มีรูปแบบการใช้ค่อนข้างกว้าง ใช้ได้ในงานหลากหลาย ใช้แทนวัสดุเนื้อเดียว มีรูปแบบเหมือนกับการแบ่งชิ้นงานออกเป็น ส่วนย่อยหลายๆ ส่วน โดยแต่ละเอลิเมนต์ต่อกันด้วยจุดต่อจุด (node) เอลิเมนต์ชนิดนี้เหมาะสมกับการวิเคราะห์ปัญหาไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearity) มีเงื่อนไขการสัมผัส (contact) และปัญหาการเสียรูปอย่างมาก (large deformation) มีความแม่นยำในการคำนวณสูง ถ้าไม่เกิดการบิดตัวของชิ้นงาน (Hibbitt, 2002) ปัญหาที่สำคัญของ Solid element มีอยู่ 3 ประการ คือ การล็อกตัวของการเฉือน (shear locking) การล็อกตัวของปริมาตร (volumetric locking) และปัญหาการบิดตัว (distort) อย่างมากของเอลิเมนต์โดยการล็อกตัวของการเฉือน เป็นปัญหาที่ทำให้โครงสร้างทางตัวเลขของเอลิเมนต์ผิดพลาด เนื่องจากเกิดการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือนที่ไม่มีอยู่จริง (ดังนั้นบางครั้งเรียกว่า parasitic shear) สิ่งที่เกิดขึ้นตามมา คือ เอลิเมนต์ต่อต้านการงอ และการคำนวณเกิดการผิดพลาด เนื่องจากเอลิเมนต์ไม่เปลี่ยนรูปร่างไปตามความเค้นที่เกิดขึ้น เป็นผลให้โปรแกรมหยุดการคำนวณ อีกปัญหาหนึ่ง คือ การล็อกตัวของปริมาตรเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ ทำให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร รูปร่างจึงไม่เปลี่ยนแปลงด้วย ซึ่งทำให้โปรแกรมผิดพลาดและหยุดการคำนวณเช่นกัน ปัญหาสุดท้าย คือ การบิดตัวอย่างมากของเอลิเมนต์ เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในลักษณะที่เป็นการบิดตัวที่มากเกินไป ที่ทำให้มุมใดมุมหนึ่งของเอลิเมนต์มีขนาดใหญ่หรือเล็กจนเกินไป ดังภาพที่ 20 มักเกิดขึ้นบริเวณที่ชิ้นงานมีการเสียรูปอย่างมาก และบริเวณที่เป็นส่วนโค้ง ซึ่ง Solid element ไม่สามารถรองรับการบิดตัวลักษณะนี้ได้



ภาพที่ 20 ปัญหาการบิดตัวที่เกิดกับ solid element (a) ก่อนการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (b) หลังการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

ที่มา: Hibbitt (2002)

9.1.2 เอลิเมนต์ชนิดเยื่อบาง (membrane element) เป็นเอลิเมนต์แบบพื้นผิว ลักษณะเป็นแผ่นบางๆ ดังนั้นการรองรับแรงจึงสามารถทำได้แนวระนาบเดียวกับพื้นผิวเท่านั้น ไม่รองรับแรงที่ตั้งฉากกับระนาบของผิว ไม่รองรับโมเมนต์ดัด และยังมีปัญหาอีก 2 อย่างคือ ถ้าหากมีการตัดตัวมากๆ ในปัญหาการเสียรูปอย่างมาก (large displacement) อาจทำให้เอลิเมนต์ชนิดเยื่อบางเกิดการงอ (buckling) ได้ เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนรูปในแนวอื่นที่ไม่ใช่แนวระนาบของเอลิเมนต์ ซึ่ง Membrane elements ไม่รองรับพฤติกรรมนอกแนวระนาบแบบนี้ อีกปัญหาคือหากมีแรงกระทำในแนวตั้งฉากกับระนาบทำให้เกิดความผิดพลาดทางตัวเลข (numerical singularities) และปัญหาการลู่ออกของผลเฉลย (diverge) ของการคำนวณ

9.1.3 เอลิเมนต์ชนิดเปลือกบาง (shell element) เหมาะกับ โครงสร้างที่มีมิติของความหนาน้อยกว่ามิติอื่นมาก และไม่สามารถรับความเค้นในแนวตั้งฉากได้เอลิเมนต์ชนิดเปลือกบาง มีให้เลือกหลายแบบใน โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือแบบบาง แบบทั่วไป และแบบหนา ถ้าหากชิ้นงานมีความหนาเป็นสัดส่วนมากกว่า 1/15 ของความยาวลักษณะเฉพาะ (characteristic length) (Hibbitt, 2002) แสดงว่าเป็นเอลิเมนต์แบบหนา หากน้อยกว่านี้เป็นเอลิเมนต์แบบบาง ส่วนเอลิเมนต์แบบทั่วไปสามารถใช้แทนได้ทั้งแบบหนาและแบบบาง นอกจากนี้เอลิเมนต์ชนิดเปลือกบางแบบทั่วไปยังสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบย่อยๆ ได้อีก คือ แบบความเครียดมาก (finite strain) และแบบความเครียดน้อย (small strain) โดยแบบความเครียดมากนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงของความหนาด้วย ส่วนแบบความเครียดน้อยจะถือว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความหนาระหว่างการวิเคราะห์

9.1.4 เอลิเมนต์ชนิดแข็งเกร็ง (rigid elements) คือ เอลิเมนต์ที่ถูกกำหนดให้เป็น Rigid elements ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง แต่สามารถเคลื่อนที่ได้ ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้ รูปแบบที่ใช้กันโดยทั่วไปคือกำหนดให้เป็นแม่พิมพ์ หรือชิ้นส่วนที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุ

10. แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก (hyper elastic model)

แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกเป็นแบบจำลองเชิงโครงสร้างของวัสดุ (constitutive model of materials) อย่างหนึ่ง เป็นแบบจำลองที่ใช้อธิบายถึงพฤติกรรมวัสดุที่มีการยืดตัวสูงมีพฤติกรรมเสียดรูปแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear elastic deformation) เป็นสาเหตุให้ค่ากราฟความเค้น-ความเครียด (stress-strain curve) แตกต่างจากวัสดุที่เป็นไปตามกฎของฮุก มีนักวิจัยหลายท่านได้พยายามสร้างแบบจำลองคอนสตีติวทีฟเพื่ออธิบายพฤติกรรมของความเค้น-ความเครียด ซึ่งแบบจำลองนี้ถูกอธิบายในรูปแบบความสัมพันธ์ของพลังงานความเครียด (strain energy) และการยืดตัวของวัสดุ

จากงานวิจัยของ Schmidt *et al.* (1975) พบว่าในช่วงอุณหภูมิประมาณ 80-120°C วัสดุ PET มีสมบัติคล้ายวัสดุยาง (rubber like hyperelastic material) ทำให้สามารถนำแบบจำลองแบบไฮเปอร์อีลาสติก มาใช้สำหรับทำนายพฤติกรรมการขึ้นรูปของ PET ในช่วงอุณหภูมินี้ได้ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิคงที่ ความเค้นที่เวลาใดๆ คือ พลังงานความเครียด (strain energy function) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความเครียด ณ เวลานั้น โดยแบบจำลองของไฮเปอร์อีลาสติก แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ แบบจำลองที่แทนพฤติกรรมจากการสังเกต (phenomenological based model) และแบบจำลองที่แทนพฤติกรรมกายภาพ (physical based model) โดยแต่ละประเภทของมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

10.1 แบบจำลองที่แทนพฤติกรรมจากการสังเกต (phenomenological based model)

หลักการของแบบจำลองที่พัฒนามาจากพื้นฐานของวิธีการแทนพฤติกรรมจากการสังเกต คือ การสร้างแบบจำลองโดยอ้างอิงกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ เพื่อเลียนแบบพฤติกรรมของกราฟที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งค่าคงที่หรือค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากแบบจำลองไม่มีความหมายทางกายภาพ เป็นเพียงการปรับข้อมูลเพื่อให้คล้ายกับผลการทดสอบจริงเท่านั้น อย่างไรก็ตามแบบจำลองนี้มีข้อดี คือ สามารถทำนายผลได้ค่อนข้างแม่นยำในช่วงที่ทดสอบ ในขณะที่มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถทำนายผลได้แม่นยำในช่วงที่นอกเหนือจากผลการทดสอบ จากการสำรวจเอกสาร

พบว่า แบบจำลองที่พัฒนาจากวิธีการแทนพฤติกรรมจากการสังเกต สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ แบบจำลองที่ฟังก์ชันพลังงานความเครียดที่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการยืดตัว และแบบจำลองที่ฟังก์ชันพลังงานความเครียดที่ขึ้นอยู่กับ Strain invariants

10.1.1 ฟังก์ชันพลังงานความเครียดที่ขึ้นอยู่กับ Strain invariants (strain invariants based strain energy function) โดย Strain invariants 3 ค่าที่ใช้ในการหาพลังงานความเครียด ได้แก่ First strain invariant (I_1) Second strain invariant (I_2) และ Third strain invariant (I_3) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนการยืดตัว ดังแสดงในสมการที่ 3-5

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

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

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

โดยที่ λ_1 , λ_2 และ λ_3 คือ อัตราส่วนการยืดตัว สำหรับวัสดุที่อัดตัวไม่ได้ (incompressible materials)

- แบบจำลอง Polynomial ฟังก์ชันพลังงานความเครียด (strain energy function) สำหรับวัสดุที่มีสมบัติไอโซโทรปิก (isotropic properties) และสามารถเขียนได้ในรูปของอนุกรมของ Strain invariants ได้โดย

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

โดยที่ C_{ij} คือ ค่าคงที่

- แบบจำลอง Neo-Hookean ดังแสดงในสมการที่ 7 ซึ่งสามารถหาโดยการแทนค่า $i = 1$ และ $j = 0$ ในสมการที่ 10 แบบจำลองนี้นิยมนำมาใช้ในโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมเนื่องจากเป็นแบบจำลองที่มีความซับซ้อนน้อยที่สุด

$$W = C_{10} (I_1 - 3) \quad (7)$$

- แบบจำลอง Mooney-Rivlin สามารถเขียนได้ดังสมการเป็นแบบจำลองที่ใช้รูปแบบสมการเดียวกับแบบจำลองพหุนาม โดยกำหนดให้เป็นอันดับที่ 1 ($N=1$)

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) \quad (8)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ 7 และ 8 พบว่า แบบจำลอง Mooney-Rivlin มีความแม่นยำมากกว่าแบบจำลอง Neo-Hookean เนื่องจากเทอมของ I_2 ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามแบบจำลองทั้งสองนี้ความแม่นยำอยู่ในช่วงที่ความเครียดกลางๆ (moderate strain) ประมาณ $2.5 < \epsilon < 0.3$ สำหรับในช่วงที่ความเครียดต่ำและความเครียดสูงไม่สามารถทำนายพฤติกรรมได้แม่นยำ (Shen *et al.*, 2004)

10.1.2 ฟังก์ชันพลังงานความเครียดที่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการยืดตัว (stretch ratio based strain energy function) อัตราส่วนการยืดตัว (stretch ratio, λ) คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวเมื่อได้รับแรง (L) ต่อความยาวเริ่มต้น (L_0) ของวัสดุ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 9

$$\lambda_i = I + \epsilon_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (9)$$

แบบจำลองกลุ่มนี้ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีและมีการนำไปใช้ในโปรแกรมเสริมช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม คือ แบบจำลอง Ogden ดังแสดงในสมการที่ 10

- แบบจำลอง Ogden Model อยู่ในรูปการรวมของอัตราส่วนการยืดตัว (Stretch Ratio) ดังนี้

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (10)$$

ข้อแตกต่างที่สำคัญของแบบจำลองคือเมื่อเทียบกับ Polynomial Model และ Mooney-Rivlin model คือ α_i ไม่จำเป็นต้องเป็นจำนวนเต็ม ทำให้สามารถปรับให้เหมาะสมได้ตามลักษณะของข้อมูลได้ดี

เนื่องจากแบบจำลองที่แทนพฤติกรรมจากการสังเกต ไม่สามารถทำนายพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปลักษณะอื่น ๆ ที่ไม่ได้มีผลการทดลองมาก่อน เนื่องจากแบบจำลองที่แทนพฤติกรรมจากการสังเกตจะอ้างอิงข้อมูลจากการทดลองมาทำนายพฤติกรรม จากปัญหาดังกล่าวจึงมีการพัฒนาแบบจำลองที่นำความรู้ด้านกลไกการเสียรูปและการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุล ดังนั้นแม้ว่าข้อมูลจากการทดลองมีไม่เพียงพอ แต่แบบจำลองที่แทนพฤติกรรมกายภาพสามารถทำนายพฤติกรรมในช่วงที่ไม่มีข้อมูลได้

10.2 แบบจำลองที่แทนพฤติกรรมทางกายภาพ (physical based model)

แบบจำลองที่แทนพฤติกรรมทางกายภาพเป็นแบบจำลองที่พิจารณาการยึดตัวของวัสดุในระดับโมเลกุล โดยตัวแปรต่างๆ ที่อยู่ในแบบจำลองล้วนมีความหมายทางภาพ แม้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดสอบไม่ครอบคลุมปัญหาที่วิเคราะห์ก็ตาม ตัวอย่างของแบบจำลองนี้ ได้แก่ แบบจำลอง Arruda-Boyce แบบจำลอง Van Der Waals เป็นต้น โดยพื้นฐานของการสร้างแบบจำลองที่แทนพฤติกรรมทางกายภาพ วัสดุถูกกำหนดให้อยู่ในลักษณะเอลิเมนต์ที่เชื่อมต่อกันด้วยสายโซ่ ตัวอย่างเช่น แบบจำลอง Arruda-Boyce ซึ่งมาจากแบบจำลองโครงข่าย (network model) ที่มี 8 สายโซ่ (chains) โดยกำหนดให้สายโซ่แต่ละเส้นอยู่ในแนวทแยงมุมของเอลิเมนต์ทรงลูกบาศก์และมีจุดเชื่อมต่ออยู่ตรงกลางเอลิเมนต์ แบบจำลอง Arruda-Boyce ใช้วิธีการขยายอนุกรม Inverse Langevin Function ในการหาค่าคงที่ต่างๆ ของแบบจำลอง (Boyce and Arruda, 2000)

- แบบจำลอง Arruda-Boyce คือ แบบจำลองที่อ้างอิงพฤติกรรมของวัสดุจากสมบัติของวัสดุและการวิเคราะห์จากโครงสร้างโมเลกุลของวัสดุ โดยตรงมาแทนที่แบบจำลองที่อ้างอิงจากข้อมูลการทดสอบเพียงอย่างเดียว มีรูปแบบสมการที่ 11

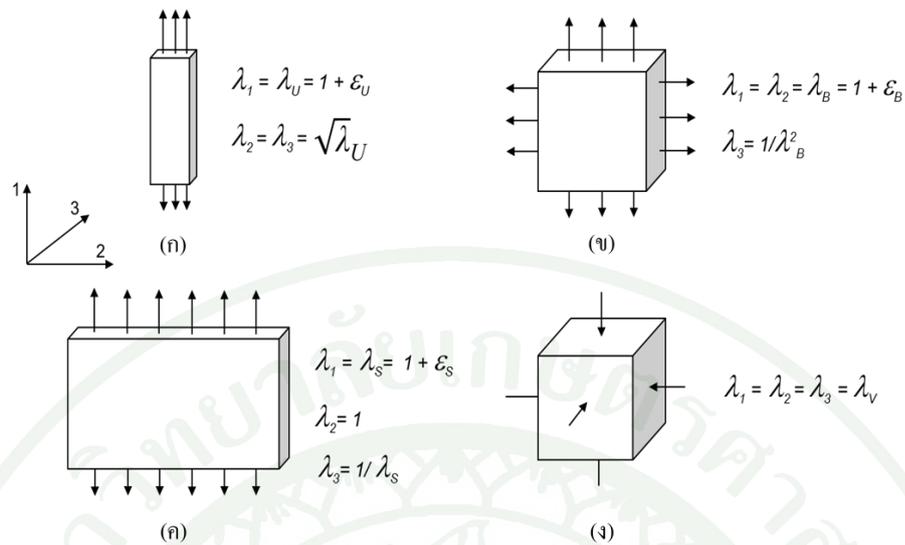
$$W = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_m^{2i-2}} (I_1 - 3)^i \quad (11)$$

โดย $C_1 = \frac{1}{2}$, $C_2 = \frac{1}{20}$, $C_{13} = \frac{11}{1050}$, $C_4 = \frac{19}{7000}$, $C_5 = \frac{1}{673756}$

J คือ Volume ratio, μ คือ Shear modulus ที่ความเครียดต่ำ และ λ_m คือ Locking stretch

11. การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก (mechanical testing of hyperelastic material)

การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกที่ใช้สำหรับเป็นข้อมูลเพื่อหาค่าคงที่ของสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันพลังงานความเครียด ได้แก่ การทดสอบแบบดึงในแนวแกนเดียว (uniaxial test) การทดสอบแบบดึงสองแกน (biaxial test) การทดสอบแบบดึงในแนวระนาบ (planar test) และการทดสอบเชิงปริมาตร (volumetric test) ดังแสดงในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 การทดสอบสมบัติของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก (ก) Uniaxial test (ข) Biaxial test (ค) Planar test และ(ง) Volumetric test

11.1 การทดสอบแบบดึงในแนวแกนเดียว (uniaxial test)

การทดสอบแบบดึงในแนวแกนเดียว เป็นวิธีการที่นิยมใช้มากที่สุดสำหรับวัสดุพอลิเมอร์ มีมาตรฐานการทดสอบหลายแบบที่กำหนดเงื่อนไขสำหรับการทดสอบแบบดึง อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบที่ได้เพื่อนำไปใช้ในการหาค่าคงที่ของแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก มีปัจจัยที่ต้องคำนึงถึง นั่นคือ ชิ้นงานต้องมีความยาวในทิศทางของแรงดึงมากกว่า 10 เท่าของความกว้างหรือความหนาชิ้นงาน (Miller, 2004)

11.2 การทดสอบแบบดึงสองทิศทาง (biaxial test)

การทดสอบแบบดึงสองทิศทาง สำหรับวัสดุที่ไม่สามารถอัดตัวได้ (incompressible material) ซึ่งชิ้นงานถูกดึงออกจากสองทิศทางในที่อยู่ระนาบเดียวกัน (biaxial extension) ดังแสดงในภาพที่ 20(ข) ซึ่งมีผลเทียบเท่ากับการกดอัด (pure compression) แต่ใช้เครื่องมือที่มีความซับซ้อนมากกว่า อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้จากการทดสอบแบบดึงสองแกน สามารถนำไปสร้างแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่มีประสิทธิภาพมากกว่า เนื่องจากการทดสอบแบบกดอัดได้รับผลกระทบจากแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส (Miller, 2004)

11.3 การทดสอบแบบดึงในแนวระนาบ (planar test)

ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบการดึงในแนวระนาบมีลักษณะเป็นแผ่นที่ต้องมีความกว้างมากกว่า 10 เท่าของความยาวในทิศทางที่รับแรง โดยชิ้นงานทดสอบถูกดึงออกในทิศทางเดียว

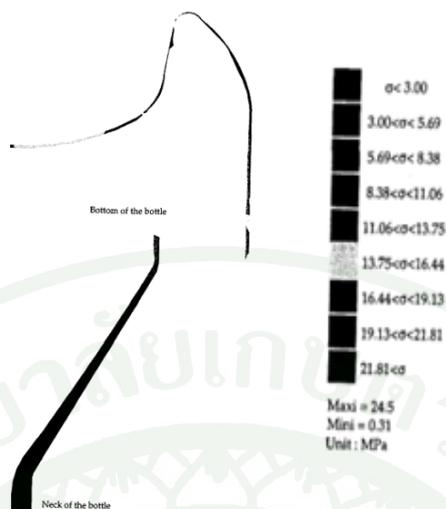
11.4 การทดสอบเชิงปริมาตร (volumetric test)

ในการทดสอบชิ้นงานวัสดุถูกอัดในสองทิศทาง ดังแสดงในภาพที่ 20(ง)

12. แบบจำลองวิสโคอีลาสติก (viscoelastic models)

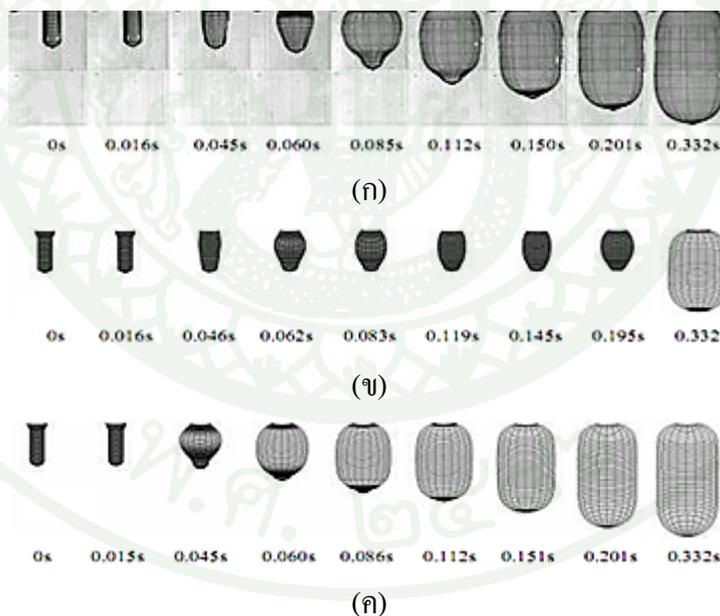
แบบจำลองวิสโคอีลาสติกของวัสดุ (viscoelastic models) ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการอธิบายพฤติกรรมความเป็นวิสโคอีลาสติกของวัสดุพอลิเมอร์ เนื่องจากวัสดุพอลิเมอร์ส่วนใหญ่มีรูปแบบความสัมพันธ์ ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ขึ้นกับเวลา ซึ่งวัสดุแสดงสมบัติความเป็นวิสกัส (viscous property) และอีลาสติก (elastic property) ในเวลาเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อมีแรงมากระทำ วัสดุที่มีสมบัติความเป็นวิสโคอีลาสติก จะพบรูปแบบการเสีรูป 3 ช่วง คือ ช่วงแรกพอลิเมอร์สามารถคืนตัวได้อย่างสมบูรณ์ ช่วงที่สอง ช่วงนี้เป็นสุดท้ายที่พอลิเมอร์สามารถคืนตัวได้แต่มีบางส่วนเกิดการเสีรูปอย่างถาวร และช่วงสุดท้ายพอลิเมอร์เกิดการเสีรูปและไม่สามารถคืนตัวได้

โดยมีนักวิจัยพัฒนาแบบจำลองวิสโคอีลาสติกมาใช้ในการทำนายพฤติกรรมเสีรูปของวัสดุ เช่น แบบจำลอง Maxwell แบบจำลอง Kelvin อย่างไรก็ตามทั้งสองแบบจำลองนี้ไม่สามารถอธิบายการเสีรูปเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิได้ ดังนั้น Kaye (1962) ; Bernstein *et al.* (1963) ได้พัฒนาแบบจำลองวิสโคอีลาสติกในรูปแบบของแบบจำลองเชิงอนุพันธ์ (integral model) และเรียกว่าแบบจำลอง K-BKZ ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับเวลา โดย Schmidt *et al.* (1996) ได้ใช้การจำลองการเป่าขึ้นรูปขวด PET โดยใช้สมการวิสโคอีลาสติกเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง และศึกษากระบวนการยึดตัวของแกนยึด และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในช่วงเวลาต่างๆ กัน จากผลการวิเคราะห์ พบว่า ความหนาของผนังขวดในช่วงคอมีความหนาผนังที่มากเมื่อเทียบกับความหนาผนังช่วงท้ายดังภาพที่ 22 และ Tan *et al.* (2008) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแต่ละช่วงเวลาของขวด PET โดยได้ศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของวิธีการกำหนดแรงดันให้กับชิ้นงานในช่วงการเป่าขึ้นรูป จากผลการวิเคราะห์พบว่า การกำหนดแรงดันแบบควบคุมการอัตราไหลของมวล (mass flow rate) ให้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องและใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงมากกว่าการกำหนดการให้แรงดันโดยตรง (direct pressure) ดังภาพที่ 23



ภาพที่ 22 ความหนาผนังของขวด PET ช่วงคอขวด และส่วนฐานขวด

ที่มา: Schmidt *et al.* (1996)



ภาพที่ 23 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของขวด PET (ก) กระบวนการผลิตจริง (ข) กระบวนการจำลอง การเป่าขึ้นรูปโดยให้แรงดันโดยตรง (direct pressure) และ (ค) กระบวนการจำลองการ เป่าขึ้นรูปโดยให้แรงดันแบบควบคุมการอัตราไหลเชิงมวล (mass flow rate)

ที่มา: Tan *et al.* (2008)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุ

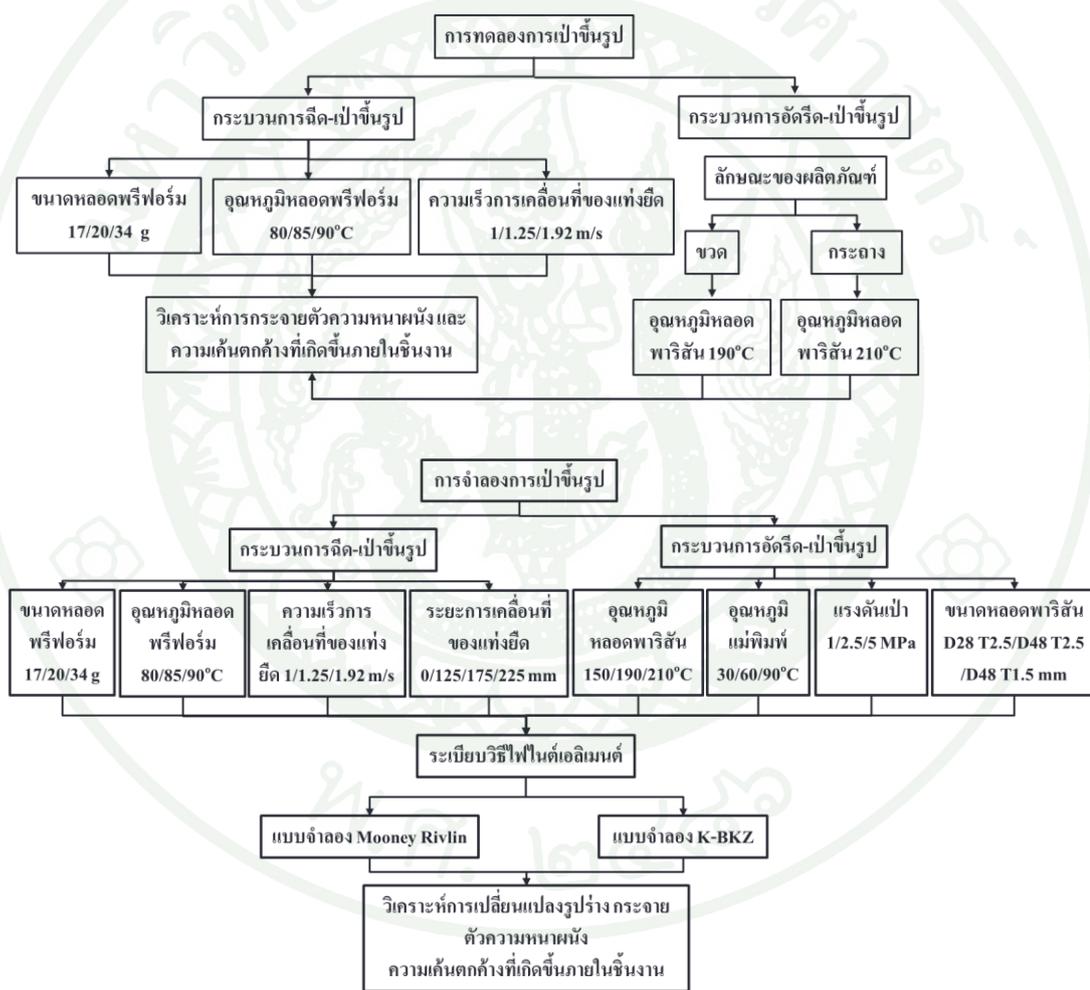
- 1.1 ชิ้นงานหลอดพรีฟอร์ม (preform) PET ขนาด 17 g 20 g และ 34 g
- 1.2 เม็ดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE)

2. อุปกรณ์

- 2.1 เครื่องเป่าขึ้นรูปหลอดพรีฟอร์ม (blow molding machine)
- 2.2 ชุดให้ความร้อน (heating unit)
- 2.3 เครื่องอัด-รีดเป่าขึ้นรูป (extrusion blow mold machine)
- 2.4 แม่พิมพ์เป่า (blow mold)
- 2.5 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Differential Scanning Calorimeter, DSC)
- 2.6 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุที่อุณหภูมิสูง (Universal Testing Machine, UTM) ของบริษัท Instron Series IX Automated Material Testing
- 2.7 เครื่องวิเคราะห์ความเค้นตกค้าง (stress viewer) รุ่น R4.2 ของบริษัท Moldex 3D
- 2.8 โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการออกแบบ (Computer Aided Design, CAD) ได้แก่ Solidworks Version 2010
- 2.9 โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) ได้แก่ โปรแกรม MSC MARC Version 2010 และโปรแกรม B-SIM Version 2.7 Release 7.00

วิธีการ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูปแบบดึงยืด ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิ ขนาดหลอดพรีฟอร์ม และความเร็วของแท่งยืด ที่มีต่อการกระจายตัวความหนาผนังและการเกิดความเค้นภายในชิ้นงาน นอกจากนี้ยังได้ทำการวิจัยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลิตภัณฑ์ ที่มีต่อการกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงาน ในกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป จากนั้นผู้วิจัยได้นำผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ โดยมีขั้นตอนการทำวิจัยดังแสดงในภาพที่ 24



ภาพที่ 24 แผนผังการดำเนินการวิจัย

1. กระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูปแบบดึงยืด

กระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูปแบบดึงยืดเป็นกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์บรรจุ โดยเริ่มจากการนำหลอดพรีฟอร์มขนาดต่างๆ กันไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 80-90 °C ดังแสดงในภาพที่ 25(ก) เพื่อให้หลอดพรีฟอร์มอยู่ในช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว หลังจากที่หลอดพรีฟอร์มมีอุณหภูมิตามที่กำหนดดังตารางที่ 3 จากนั้นหลอดพรีฟอร์มถูกนำไปยังแม่พิมพ์เป่า ดังแสดงในภาพที่ 25(ข) และให้แรงดันเป่าได้ชิ้นงานดังแสดงในภาพที่ 25(ค) โดยเครื่องเป่าขึ้นรูปและแม่พิมพ์เป่าที่ใช้ในงานวิจัยแสดงดังภาพที่ 26 และ 27

ตารางที่ 3 สภาวะกระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบดึงยืด

ขนาด (g)	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)	ระยะการเคลื่อนที่ของแกนยืด (mm)	เวลาการเคลื่อนที่ของแกนยืด (s)	เวลาในการเป่าขึ้นรูป (s)
17/20/34	70/80/85/90	3	250	0.13/0.2/0.25	2.2



(ก)

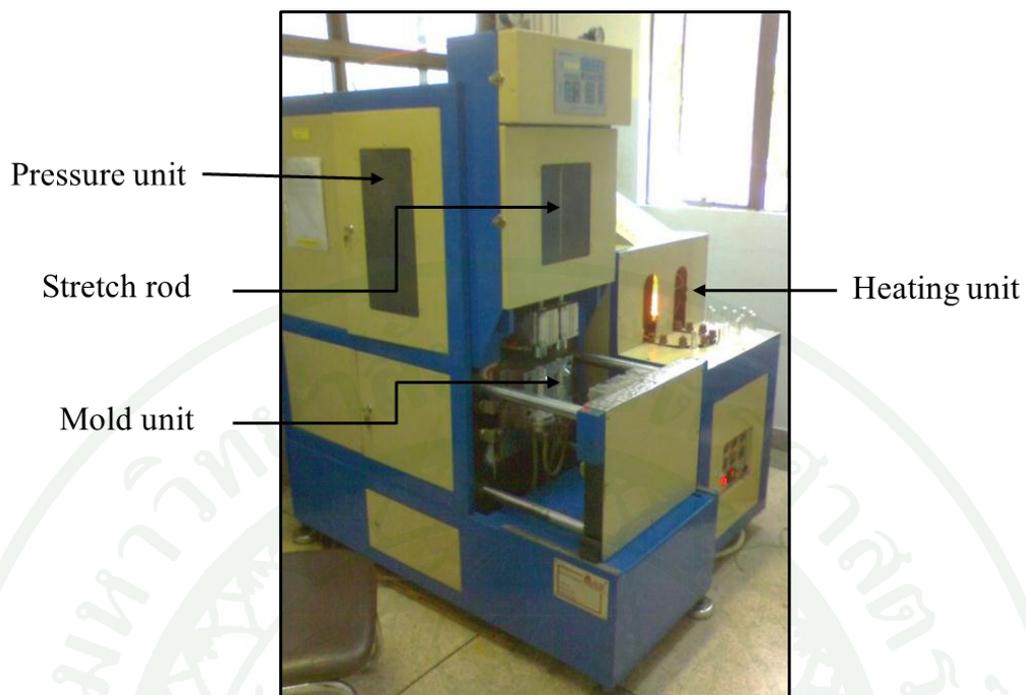


(ข)

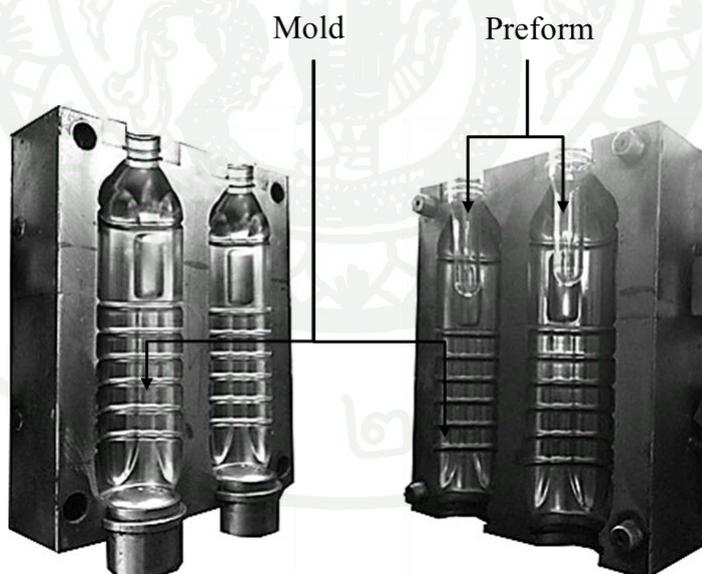


(ค)

ภาพที่ 25 (ก) เครื่องให้ความร้อนอินฟราเรดแก่หลอดพรีฟอร์ม (ข) พรีฟอร์มชิ้นงานก่อนการเป่าขึ้นรูป และ (ค) ชิ้นงานหลังการเป่าขึ้นรูป



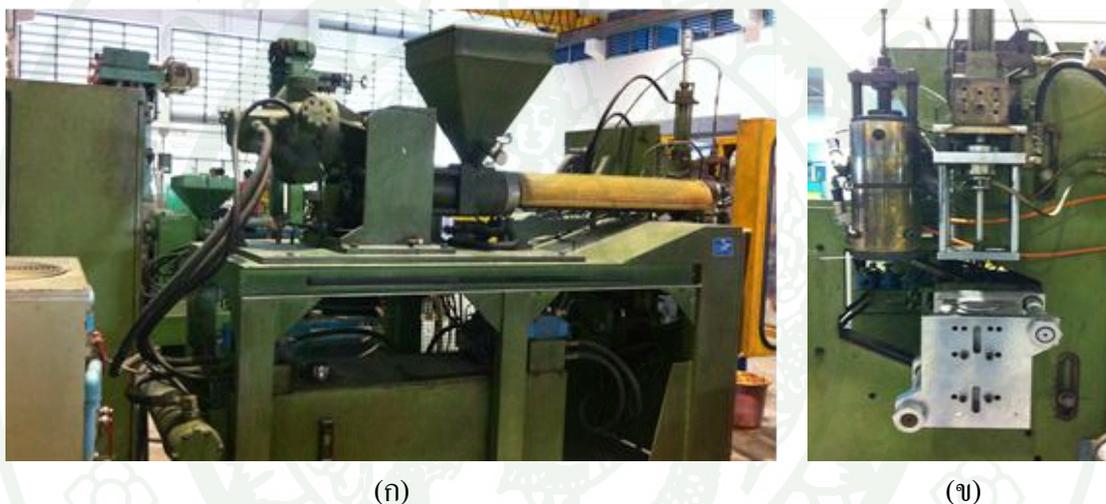
ภาพที่ 26 เครื่องเป่าหลอดพรีฟอร์มที่ใช้ในงานวิจัย



ภาพที่ 27 แม่พิมพ์เป่าขึ้นรูปที่ใช้ในงานวิจัย

2. กระบวนการอัด-รีดเป่าขึ้นรูป

ในงานวิจัยนี้ได้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ขวด และกระถาง จากกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป โดยเริ่มจากพอลิเมอร์หลอมเหลวถูกอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีด ดังแสดงในภาพที่ 28(ก) เมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลออกจากหัวขึ้นรูปที่มีลักษณะเป็นวงแหวน (annular die) ออกมาอย่างต่อเนื่องในลักษณะของท่อกลวงที่เรียกว่า หลอดพาริสัน จากนั้นแม่พิมพ์เคลื่อนที่พร้อมกันทั้งสองข้างเพื่อไปประกบหลอดพาริสัน เมื่อแม่พิมพ์ปิดเรียบร้อยแล้วท่อลมทำหน้าที่ให้แรงดันเป่า ดังภาพที่ 28(ข) เพื่อให้หลอดพาริสันขยายตัวติดกับผนังแม่พิมพ์ โดยมีเงื่อนไขขึ้นรูปดังตารางที่ 4



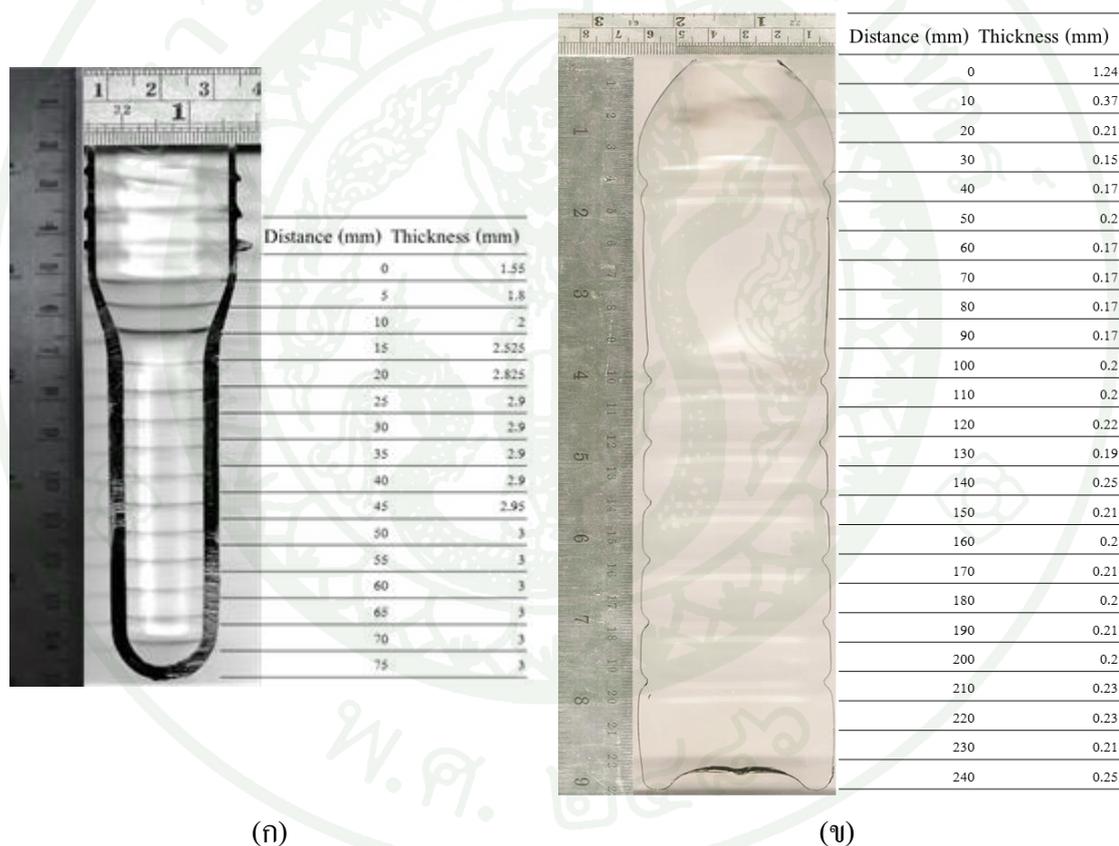
ภาพที่ 28 เครื่องอัดรีด-เป่าขึ้นรูป (ก) ชุดอัดรีด และ (ข) ชุดเป่าขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 4 สภาวะกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป

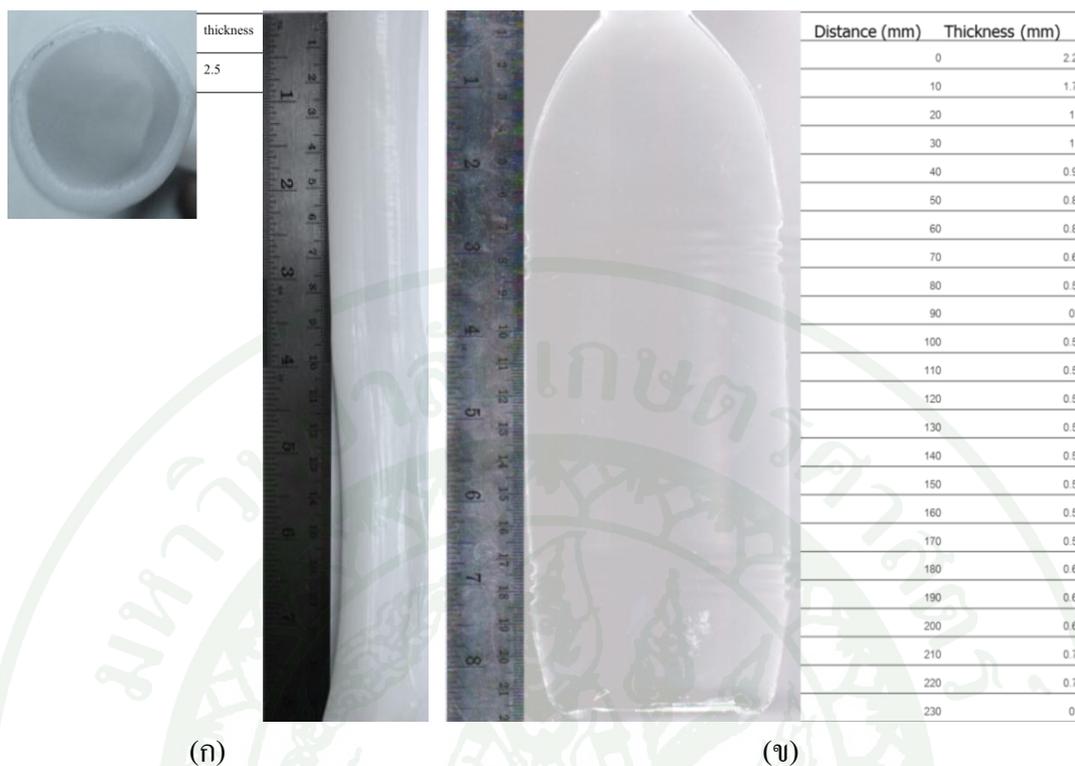
ผลิตภัณฑ์	ช่องทางการไหล (mm)	ขนาด (Parison)	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (MPa)
ขวด	1	Ø=28 L=240	190	1
กระถาง	2	Ø=45 L=240	200	0.5

3. การวิเคราะห์การกระจายตัวของความหนาผนังชิ้นงาน

งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์การกระจายตัวของความหนาผนังชิ้นงานหลอดพีริฟอร์มและความหนาผนังของผลิตภัณฑ์ภายหลังจากการเป่าขึ้นรูป ที่อุณหภูมิและความดันในการเป่าต่างๆ กัน โดยตัดชิ้นงานที่บริเวณกึ่งกลางตามแนวยาว ดังแสดงในภาพที่ 29(ก) 29(ข) และ 30(ก) 30(ข) โดยได้ทำการวัดความหนาทุกระยะ 5 mm สำหรับหลอดพีริฟอร์มและหลอดพาริสัน และทำการวัดความหนาทุกระยะ 10 mm ตลอดช่วงความยาวของผลิตภัณฑ์ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ภาพ (Image-Pro Plus 4.5)



ภาพที่ 29 การวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนัง (ก) หลอดพีริฟอร์ม และ (ข) ผลิตภัณฑ์ขวด หลังการเป่าขึ้นรูปแบบดิ่งยึด



ภาพที่ 30 การวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนัง (ก) หลอดพรีสตัน และ (ข) ผลิตภัณฑ์ขวด ภายหลังจากการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป

ขั้นตอนการวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนัง ทางผู้วิจัยได้สร้างเอลิเมนต์บนชิ้นงานจริง เพื่อหาค่าอัตราส่วนการยืดตัวในชิ้นงานเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนาผนังต่อความหนาเริ่มต้นของหลอดพรีฟอร์ม (relative thickness) และอัตราส่วนของระยะทางที่ทำให้การตรวจวัดต่อความยาวของผลิตภัณฑ์ (relative length) อย่างไรก็ตามภายหลังจากการเป่าขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบพบว่าไม่ปรากฏเส้นแบ่งเอลิเมนต์บนผิวของผลิตภัณฑ์ที่ได้ทั้งนี้เนื่องจากหลอดพรีฟอร์มเกิดการยืดออกอย่างมาก ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอผลการวิเคราะห์ที่ได้ในรูปแบบของความหนาผนังที่เกิดขึ้นตลอดความยาวทั้งหมดของชิ้นงาน

4. การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์โดย Differential Scanning Calorimeter(DSC)

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิหลอมเหลว (melt temperature) โดยใช้เครื่อง DSC ดังแสดงในภาพที่ 31

มีอัตราการให้ความร้อน (heating rate) เท่ากับ $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ต่อนาที และอัตราการเย็นตัว (cooling rate) เท่ากับ $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ต่อนาที ที่อุณหภูมิทดสอบตั้งแต่ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $300\text{ }^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 31 เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC)

5. การวิเคราะห์ความเค้นตกค้าง (residual stress) ที่เกิดขึ้นในงาน

นำชิ้นงานทดสอบวางลงบนเครื่อง Stress viewer ดังแสดงในภาพที่ 31 เพื่อวิเคราะห์บริเวณที่เกิดความเค้นตกค้างภายในชิ้นงาน



(ก)



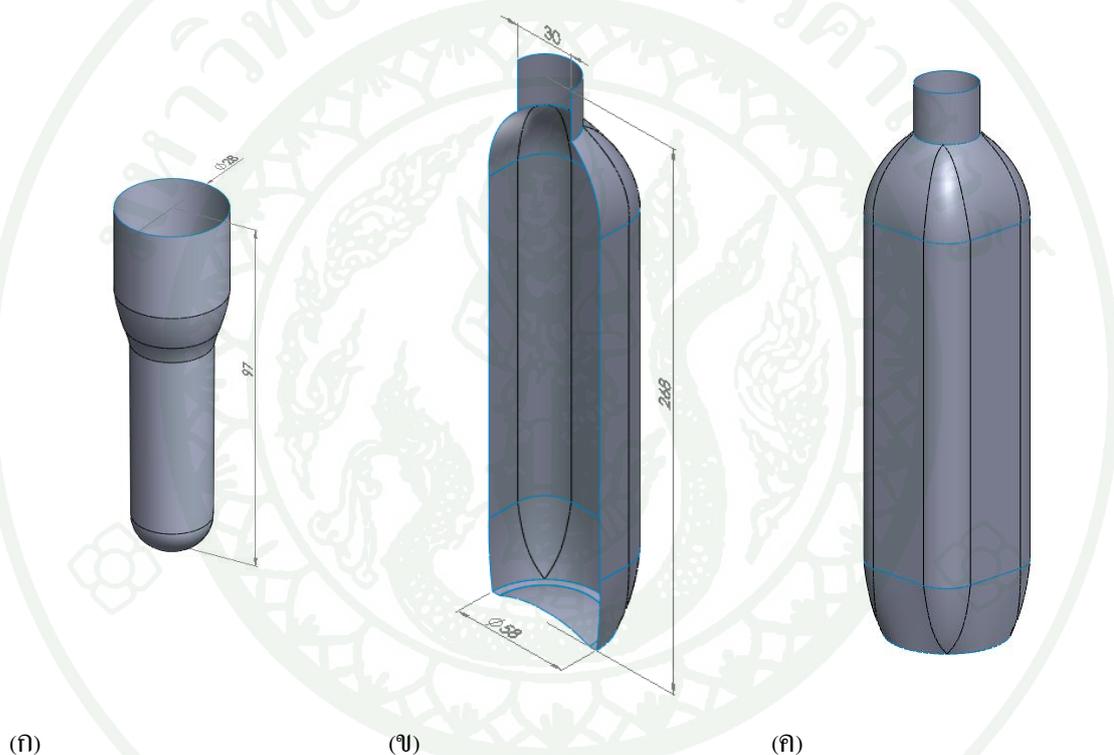
(ข)

ภาพที่ 32 (ก) เครื่อง Stress viewer และ (ข) ผลการวิเคราะห์ความเค้นตกค้างที่ได้จากเครื่อง Stress viewer

6. การสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์อีเมนต์

ในงานวิจัยนี้ได้นำโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการสร้างแบบจำลอง ได้แก่ โปรแกรม Solid Works สำหรับใช้ในการออกแบบชิ้นงานหลอดฟลูออโรรม หลอดพาริสัน และแม่พิมพ์เป่า มีลักษณะและขนาดดังแสดงในภาพที่ 33-35

6.1 แบบชิ้นงานกระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบดึงยืด



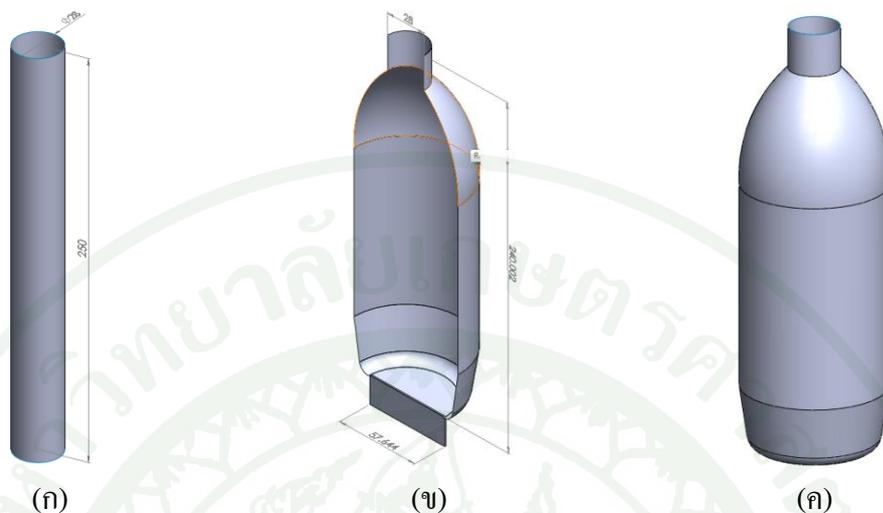
ภาพที่ 33 ลักษณะชิ้นงานสำหรับกระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบดึงยืด

(ก) หลอดฟลูออโรรม

(ข) ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ใช้เป็นแม่พิมพ์เป่าสำหรับการจำลองการเป่าขึ้นรูป

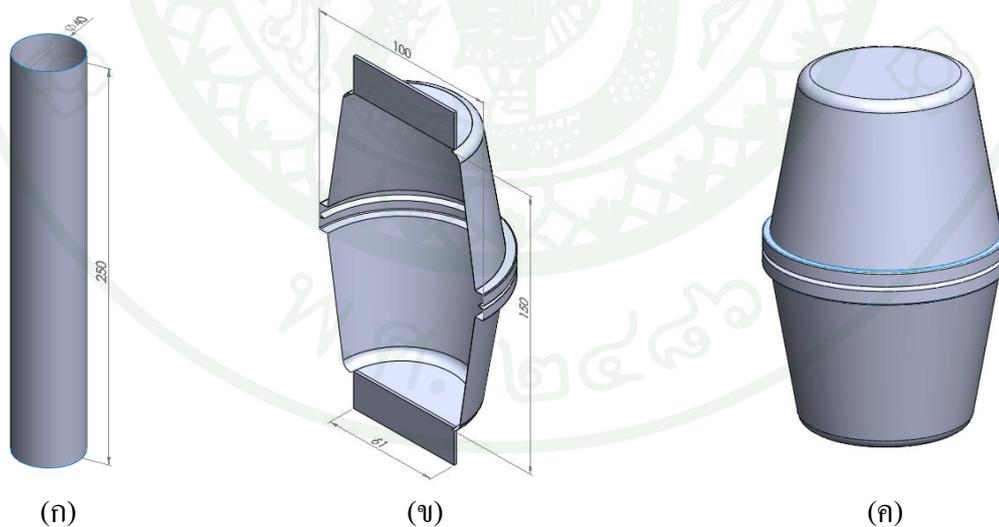
(ค) ลักษณะของผลิตภัณฑ์ขวดหลังการเป่าขึ้นรูป

6.2 แบบชิ้นงานกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูป



ภาพที่ 34 ลักษณะชิ้นงานสำหรับกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป

- (ก) หลอดพาริสัน
- (ข) ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ใช้เป็นแม่พิมพ์เป่าสำหรับการจำลองการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป
- (ค) ลักษณะของผลิตภัณฑ์ขวดหลังการเป่าขึ้นรูป



ภาพที่ 35 ลักษณะชิ้นงานสำหรับกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป

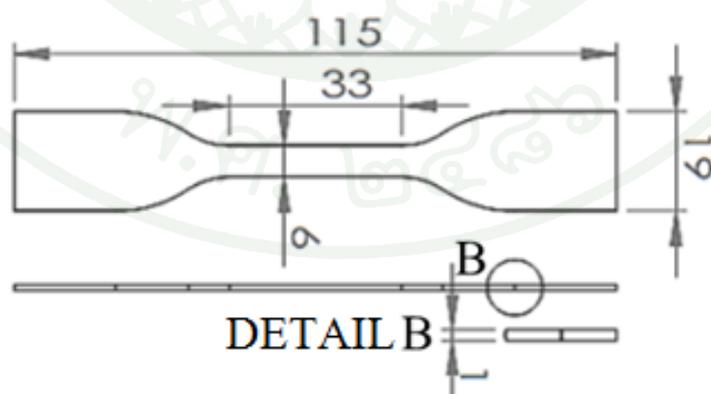
- (ก) หลอดพาริสัน
- (ข) ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ใช้เป็นแม่พิมพ์เป่าสำหรับการจำลองการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป
- (ค) ลักษณะของผลิตภัณฑ์กระถางหลังการเป่าขึ้นรูป

7. แบบจำลองเชิงโครงสร้าง (constitutive model) ของ PET

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษากระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูป และกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป วัสดุที่ใช้ ได้แก่ หลอดพรีฟอร์ม PET และ HDPE โดยหลอดพรีฟอร์ม PET ใช้อุณหภูมิในการเป่าขึ้นรูปประมาณ 80 ถึง 90 °C โดยในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว วัสดุมีพฤติกรรมการเสียรูปคล้ายวัสดุยาง (rubber-like material) ซึ่งสามารถนำแบบจำลองแบบไฮเปอร์อีลาสติกใช้ในการทำนายพฤติกรรมการขึ้นรูปของ PET (Schmidt *et al.*,1975) กล่าวคือ ณ อุณหภูมิคงที่ ความเค้น ณ เวลาใดๆ สามารถหาฟังก์ชันพลังงานความเครียด (strain energy function) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความเครียด ณ เวลานั้น และ HDPE ใช้อุณหภูมิในการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป 180°C โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลอง Mooney-Rivlin อธิบายพฤติกรรมการเสียรูปของ PET ที่อุณหภูมิสูง และได้เปรียบเทียบแบบจำลอง K-BKZ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่อธิบายพฤติกรรมการเสียรูปที่ขึ้นอยู่กัเวลา และอุณหภูมิ

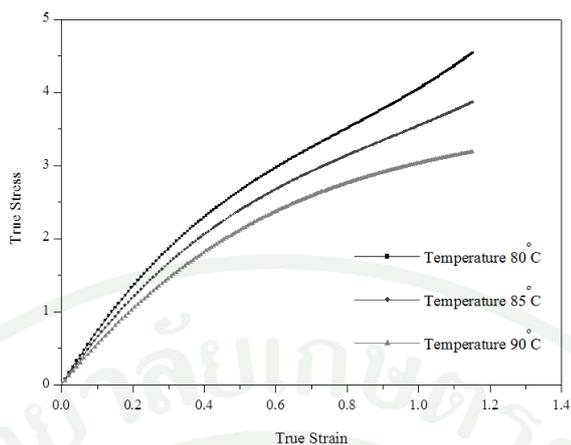
8. ค่าตัวแปรในแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก

ในงานวิจัยได้จำลองกระบวนการเป่าขึ้นรูปด้วยวัสดุ 2 ชนิด คือ PET และ HDPE โดยทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ PET ที่อุณหภูมิ 80 85 และ 90°C โดยชิ้นงานทดสอบมีลักษณะดังภาพที่ 36 ตามมาตรฐาน ASTM D638 แทนสมการที่ 8 เพื่อหาค่าตัวแปรอิสระ C_{10} และ C_{01} สำหรับวัสดุ HDPE นำข้อมูลมาจาก โปรแกรม B-SIM เพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียด



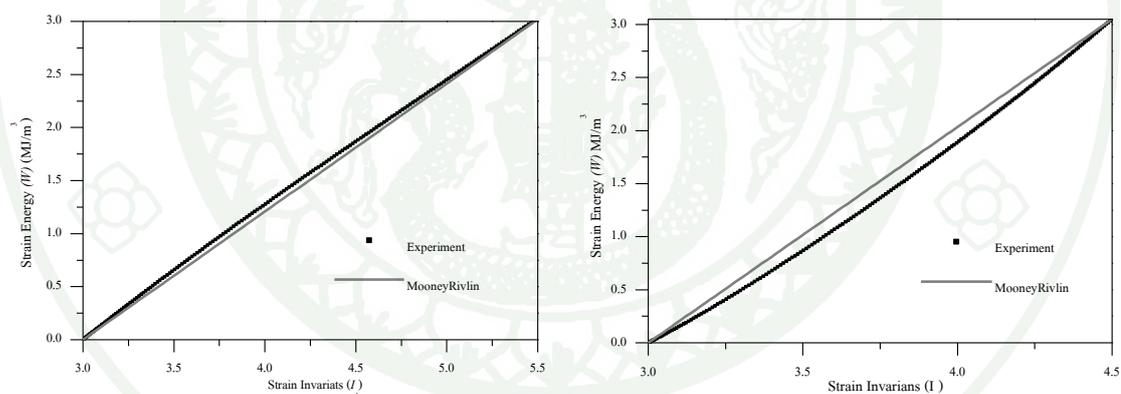
Unit : mm

ภาพที่ 36 ขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกล



ภาพที่ 37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่อุณหภูมิการดึงยึดต่างๆ กัน

นำค่า Strain invariants (I) และ ค่าพลังงานความเครียด (W) แทนในสมการที่ 8 และใช้โปรแกรม OriginPro 8.0 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานความเครียด (W) และค่า Strain invariants (I) ดังแสดงในภาพที่ 47 เพื่อหาค่า C_{10} และ C_{01} ดังตารางที่ 5



ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความเครียด (W) และค่า Strain invariants (I)

ตารางที่ 5 ค่าตัวแปรอิสระที่ใช้ในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน

Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Strain Energy (W)	
	C_{10}	C_{01}
80	0.87095	0.56704
85	0.78948	0.47058
90	0.65191	0.46393

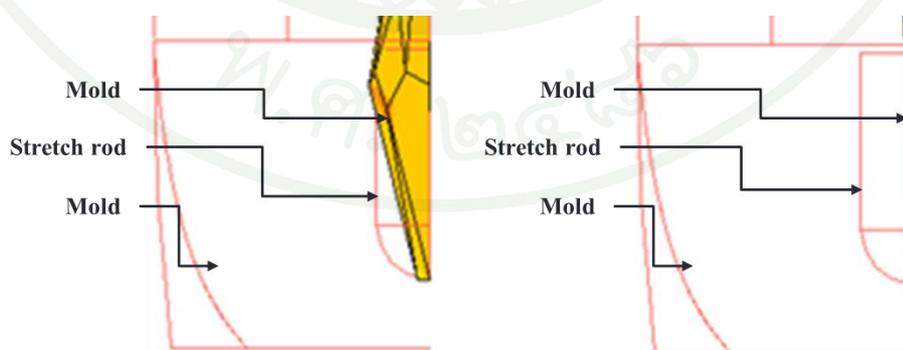
9. การทดสอบการสร้างหาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมบนชิ้นงาน (mesh convergent) ที่ใช้ในกระบวนการจำลองการเป่าขึ้นรูป

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทดสอบหาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสม โดยกำหนดจำนวนเอลิเมนต์ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 6 แล้วเปรียบเทียบ ค่าความเค้น ความหนาของเอลิเมนต์ที่เกิดขึ้นงาน และเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบจำนวนเอลิเมนต์ ค่าความเค้น ความหนาผนัง และเวลาในการวิเคราะห์

จำนวนเอลิเมนต์	Stress (MPa)	Minimum thickness (mm)	Maximum thickness (mm)	Time (s)
171	-	-	-	-
237	2.654×10^2	0.14	0.36	35
380	2.613×10^2	0.14	0.36	225

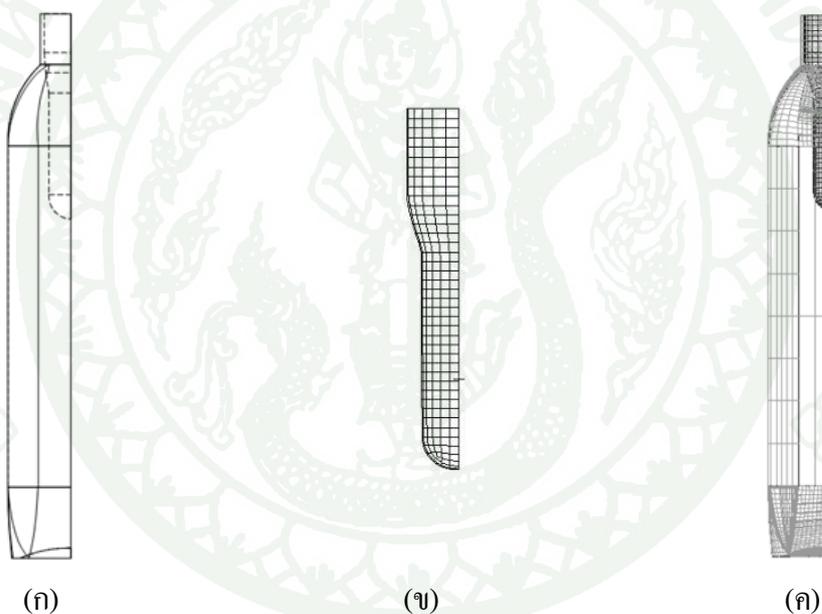
ในการทดสอบพบว่าจำนวนเอลิเมนต์ที่ 171 เกิดปัญหาการสัมผัส ระหว่างแท่งยึดกับหลอดพรีฟอร์มดังภาพที่ 39 และจากตารางที่ 6 พบว่า จำนวนเอลิเมนต์ที่ 237 และ 380 เมื่อโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลเสร็จ ค่าของความเค้น และความหนาผนังชิ้นงานที่ได้มีค่าต่างกันน้อยมาก แต่เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่เอลิเมนต์จำนวน 237 ใช้เวลาน้อยกว่า เอลิเมนต์จำนวน 380 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้จำนวนเอลิเมนต์ 237



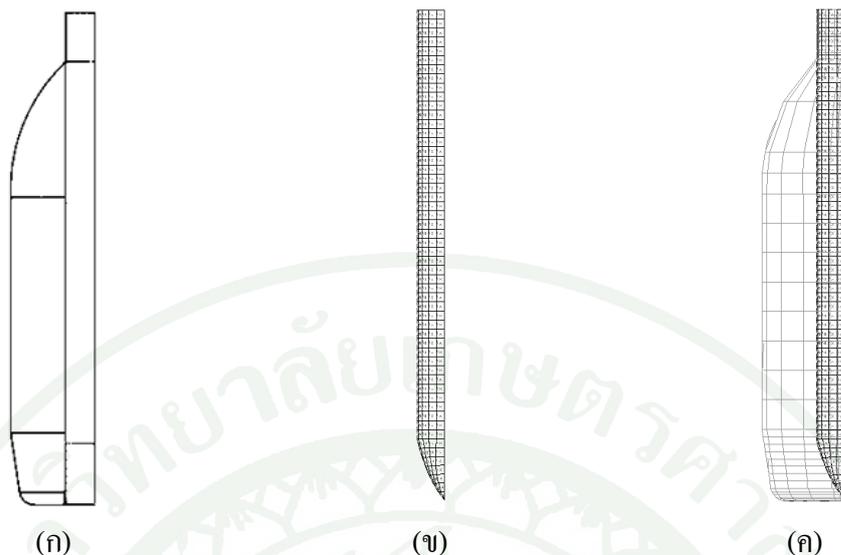
ภาพที่ 39 ปัญหาการสัมผัสระหว่างชิ้น และแท่งยึด

10. การเตรียมแบบเพื่อใช้ในการจำลองการเป่าขึ้นรูป

การเตรียมแบบสำหรับการจำลองกระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูป และอัดรีดเป่าขึ้นรูป เนื่องจากหลอดพรีฟอร์ม หลอดพรีสัน และแม่พิมพ์ขวดพลาสติกมีลักษณะสมมาตรรอบด้าน เพื่อให้ง่ายต่อการจำลองการเป่าขึ้นรูป ดังนั้น งานวิจัยนี้ได้แบ่งสัดส่วนหลอดพรีฟอร์ม และแม่พิมพ์ออกเป็น 1/4 ของชิ้นงานแล้วประกอบเข้าด้วยกันมีลักษณะดังภาพที่ 40(ก) และ 41(ก) อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกระบวนการขึ้นรูปนั้นมีความจำเป็นต้องแบ่งชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์ดังแสดงในภาพที่ 39(ข) และ 40(ข) โดยใช้โปรแกรม MSC PATRAN แบ่งหลอดพรีฟอร์มที่ออกแบบไว้เป็นเอลิเมนต์



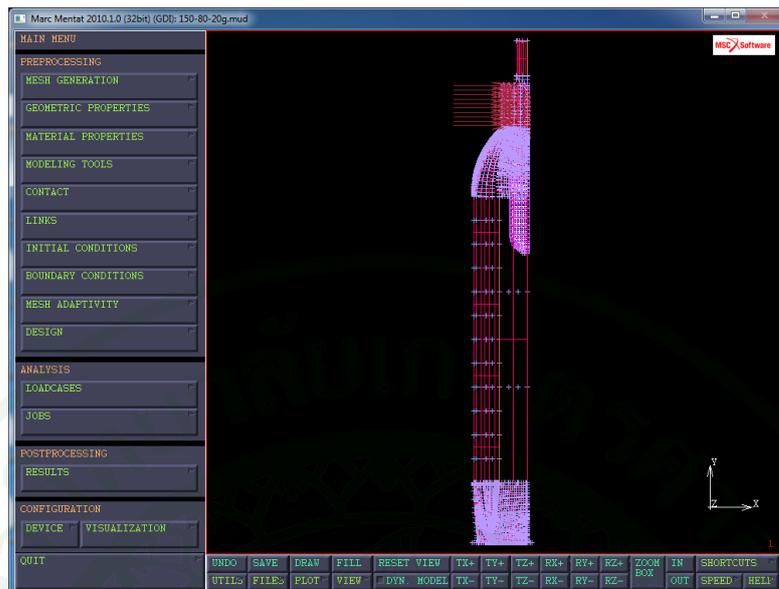
ภาพที่ 40 ลักษณะชิ้นงานที่ใช้สำหรับการจำลองการฉีด-เป่าขึ้นรูปแบบดึงยืด (ก) ลักษณะของหลอดพรีฟอร์มประกอบเข้ากับแม่พิมพ์ (ข) ลักษณะของหลอดพรีฟอร์มที่แบ่งเป็นเอลิเมนต์เป็นแบบเหยื่อบาง (ค) หลอดพรีฟอร์มเมื่อประกอบเข้ากับผนังแม่พิมพ์



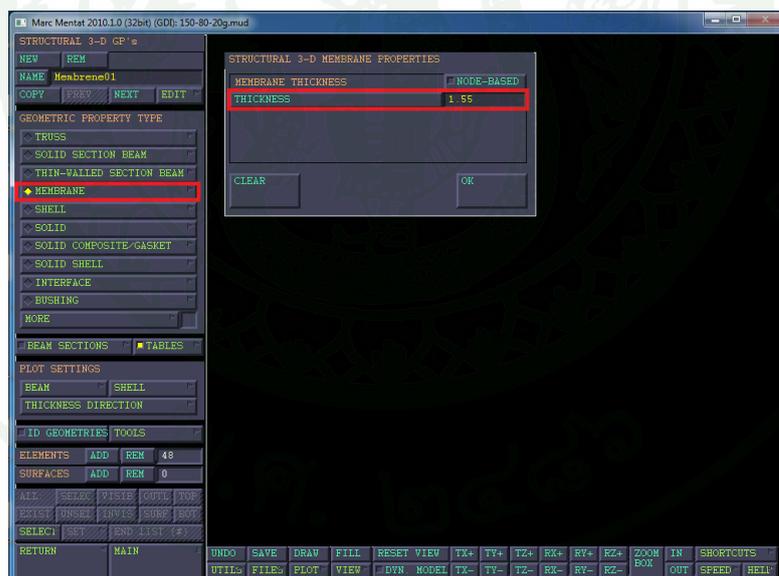
ภาพที่ 41 ลักษณะชิ้นงานที่ใช้สำหรับการจำลองการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป (ก) ลักษณะของหลอดพาริสันประกอบเข้ากับแม่พิมพ์ (ข) ลักษณะของหลอดพาริสันที่แบ่งเป็นเอลิเมนต์เป็นแบบเชื่อบาง (ค) ลักษณะของหลอดพาริสันเมื่อประกอบเข้ากับผนังแม่พิมพ์

11. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และการกระจายตัวความหนาผนังของกระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบดึงยืด โดยใช้โปรแกรม MSC MARC

11.1 ทำการประกอบแบบจำลองของหลอดพรีฟอร์ม หรือพาริสัน และแม่พิมพ์เข้าด้วยกัน ดังแสดงในภาพที่ 42 โดยการนำเข้า (import) งานวิจัยนี้กำหนดเอลิเมนต์ของหลอดพรีฟอร์มเป็นเอลิเมนต์แบบเชื่อบาง จากนั้นกำหนดความหนาของหลอดพรีฟอร์ม ดังแสดงในภาพที่

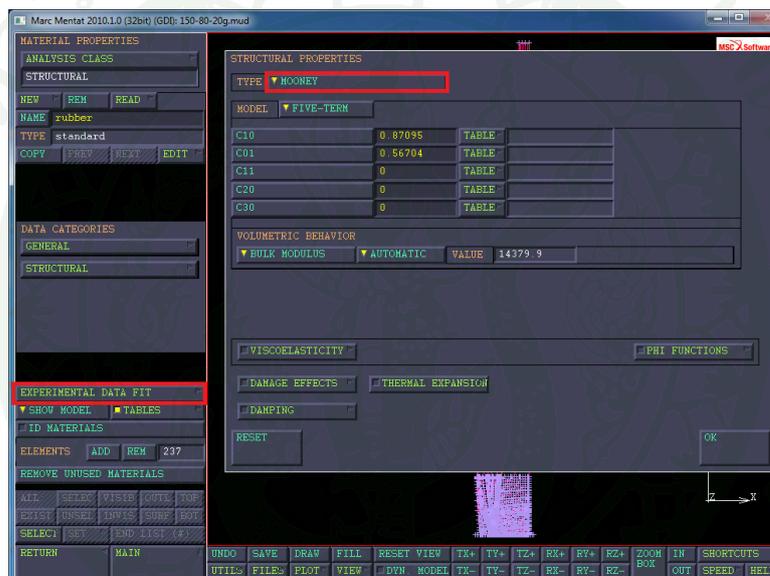


ภาพที่ 42 ลักษณะของแบบจำลองหลอดพรีฟอร์ม และแม่พิมพ์ เมื่อนำเข้าสู่โปรแกรม MSC MARC



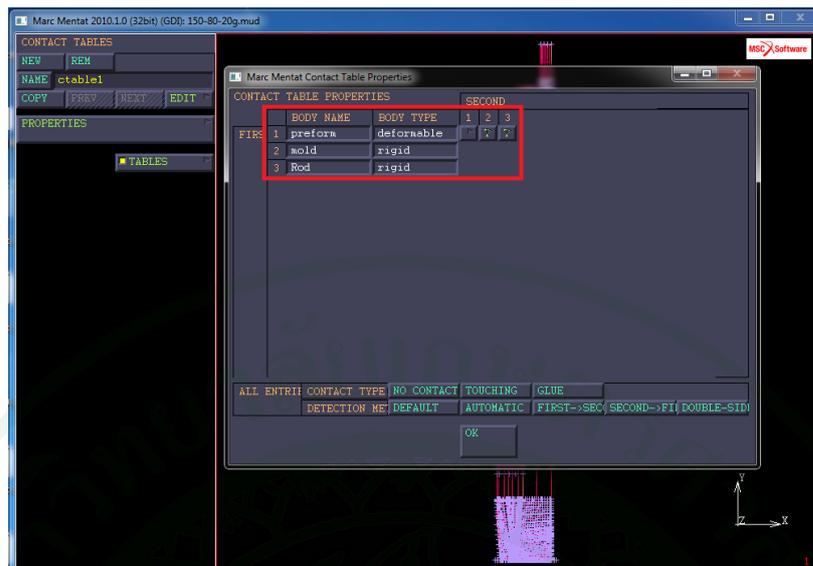
ภาพที่ 43 การกำหนดลักษณะพื้นผิวของเอลิเมนต์และการกระจายตัวความหนาของหลอดพรีฟอร์ม

11.2 ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหลอดพรีฟอร์ม และพาริสัน ในระหว่างเป่าขึ้นรูป และการกระจายตัวความหนาผนังของผลิตภัณฑ์หลังจากการเป่าขึ้นรูป ต้องการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียด เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองไฮเปอร์-อีลาสติก Mooney Rivlin โดยการใช้คำสั่ง Experiment data fit กำหนดประเภทวัสดุเป็น Elastomers ดังแสดงในภาพที่ 44 ซึ่งสามารถหาได้จากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงที่อุณหภูมิสูงของวัสดุ ตามมาตรฐาน ASTM D 638 type IV อุณหภูมิทดสอบเท่ากับ 80 85 และ 90°C โดยให้ความร้อนแก่ชิ้นงานทดสอบเป็นเวลา 15 นาที และความเร็วในการดึงเท่ากับ 150 320 และ 500 mm/min ตามลำดับ



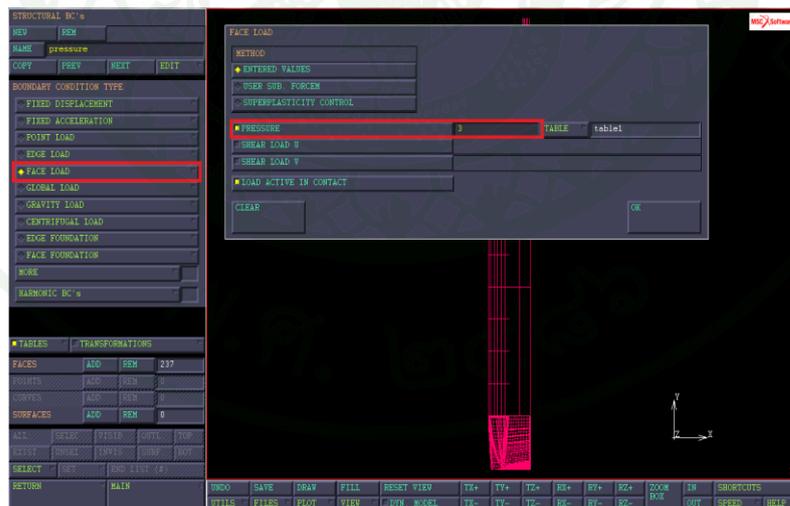
ภาพที่ 44 การสร้างแบบจำลอง Mooney Rivlin

11.3 ขั้นตอนการกำหนดเงื่อนไขการสัมผัส เนื่องจากการวิเคราะห์การเป่าขึ้นรูปมีการสัมผัสระหว่างแม่พิมพ์ และวัสดุ โดยสามารถเลือกใช้ได้ 2 แบบ คือ แบบ Glue ที่ชิ้นงานสัมผัสกับแม่พิมพ์แล้วไม่เกิดการเคลื่อนตัวที่ผนัง (no slip at wall) และแบบ Touch ที่ชิ้นงานสัมผัสกับแม่พิมพ์แล้วสามารถเคลื่อนตัวที่ผนังได้ (slip at wall) โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้เงื่อนไขการสัมผัสแบบ Touch ดังแสดงในภาพที่ 45

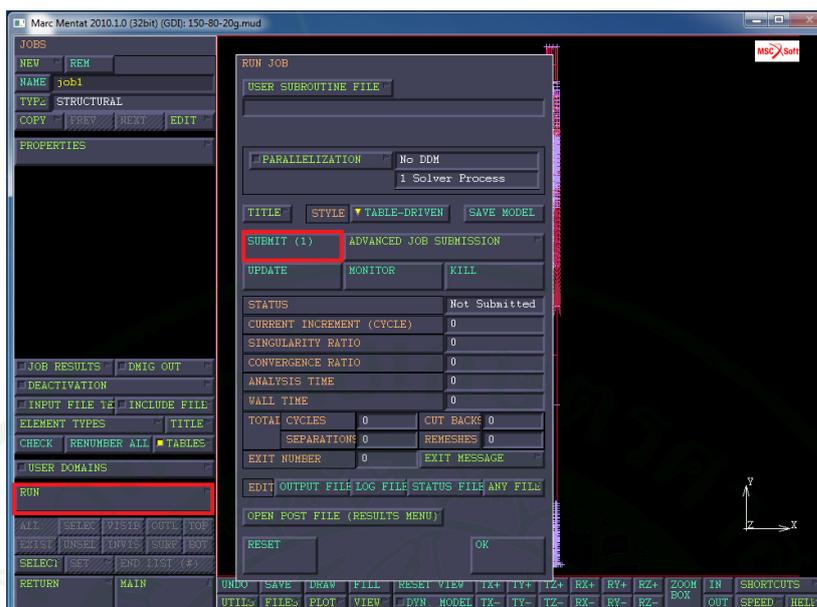


ภาพที่ 45 กำหนดเงื่อนไขการสัมผัสแม่พิมพ์

11.4. ขั้นตอนการวิเคราะห์กระบวนการเป่าขึ้นรูป โดยกำหนดให้อุณหภูมิ และแรงดันเป่าคงที่ตลอดกระบวนการวิเคราะห์ ดังแสดงในภาพที่ 46 จากนั้นใช้คำสั่ง Run เพื่อเริ่มต้นการวิเคราะห์ ดังแสดงในภาพที่ 47



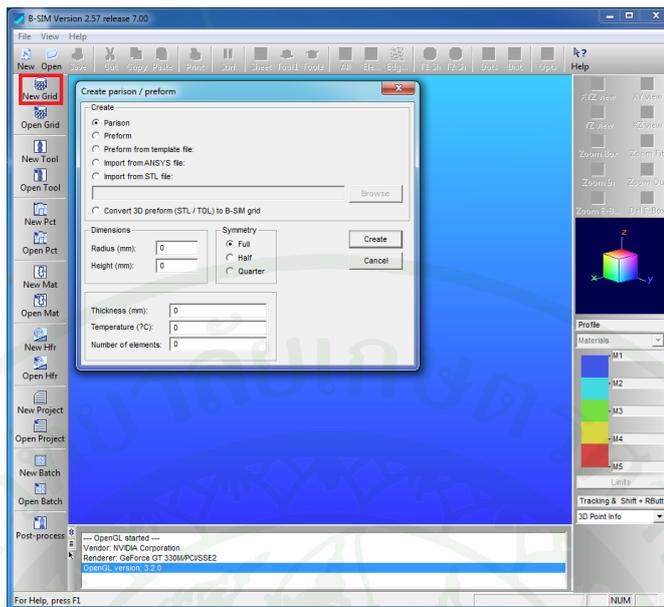
ภาพที่ 46 กำหนดแรงดันเป่าของชิ้นงาน



ภาพที่ 47 การเริ่มต้นการวิเคราะห์การเป่าขึ้นรูป โดยโปรแกรม MSC MARC

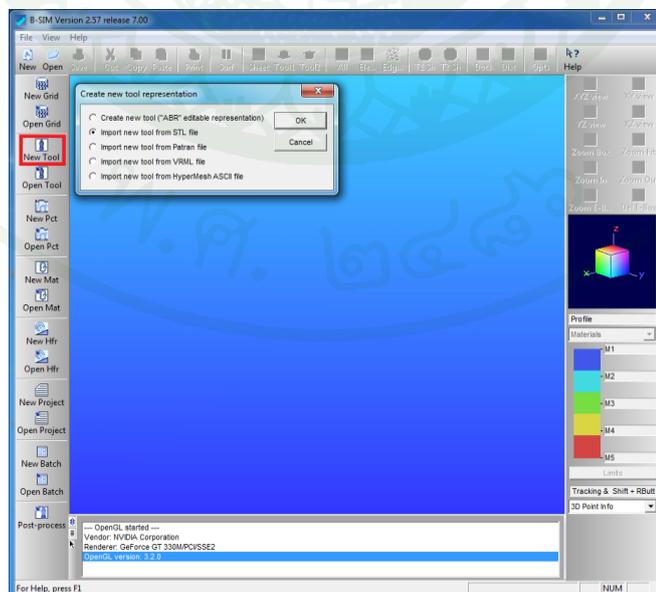
12. ขั้นตอนการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และการกระจายตัวความหนาผนังของ กระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบดึงยืด โดยใช้โปรแกรม B-SIM

12.1 การสร้างแบบจำลองของหลอดพรีฟอร์ม หรือพาริสันเพื่อใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ โดยใช้คำสั่ง New grid จากนั้นกำหนดครีมี ความหนา อุณหภูมิเริ่มต้น และจำนวนเอลิเมนต์ของ หลอดพรีฟอร์ม หรือพาริสัน ดังแสดงในภาพที่ 48 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้เอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม (triangular element)



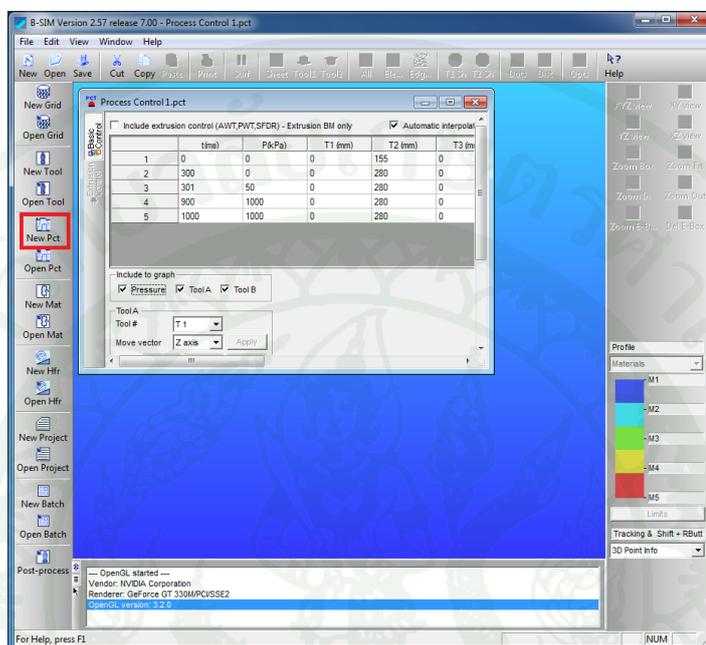
ภาพที่ 48 การสร้างแบบจำลองของหลอดพรีฟอร์ม หรือพาริสัน

12.2 ในการวิเคราะห์กระบวนการเป่าขึ้นรูปโดยโปรแกรม T-SIM จำเป็นต้องใช้แบบจำลองของแม่พิมพ์ซึ่งได้จากโปรแกรม SolidWorks และทำการบันทึกไฟล์ในรูปแบบ Standard Tessellation Language (STL) จากนั้นนำแบบจำลองของแม่พิมพ์เข้าสู่โปรแกรม T-SIM โดยใช้คำสั่ง New tool แล้วเลือกประเภทไฟล์เป็น STL ดังแสดงในภาพที่ 49



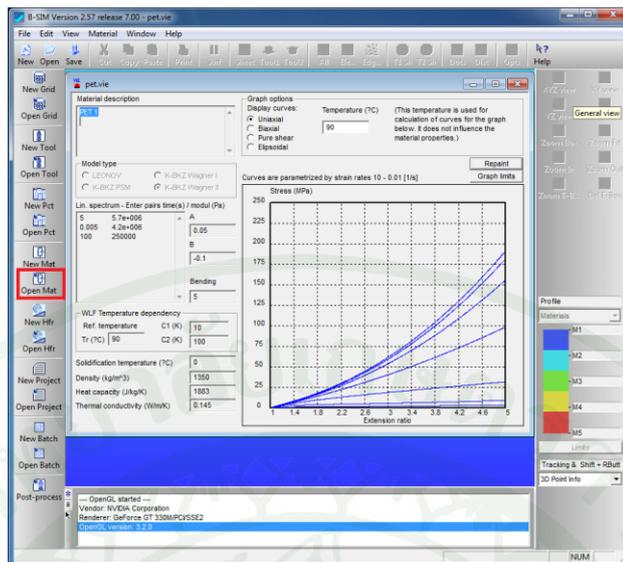
ภาพที่ 49 การนำแบบจำลองของแม่พิมพ์เข้าสู่โปรแกรม

12.2 ขั้นตอนการกำหนดเงื่อนไขที่ใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการเป่าขึ้นรูป โดยใช้คำสั่ง New pct ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ระยะเวลาของกระบวนการเป่าขึ้นรูป t (ms) แรงดันเป่า P (kPa) ระยะเคลื่อนที่ของแท่งยึด T (mm) ดังแสดงในภาพที่ 50



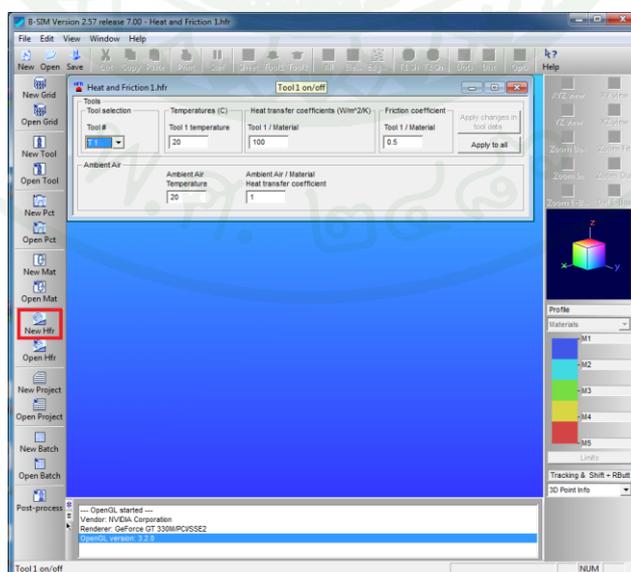
ภาพที่ 50 การกำหนดเงื่อนไขในกระบวนการเป่าขึ้นรูป

12.3 ขั้นตอนการกำหนดแบบจำลองของวัสดุ โดยในโปรแกรม B-SIM ได้เก็บข้อมูลการทดสอบของวัสดุชนิดต่างๆ เช่น วัสดุ PET PS HDPE และ PP เป็นต้น โดยผู้วิจัยสามารถเลือกวัสดุชนิดที่ต้องการใช้ในการวิเคราะห์ ดังแสดงในภาพที่ 51 เพื่อกำหนดพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และการกระจายตัวความหนาผนังของ และความเค้นตักค้างที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน



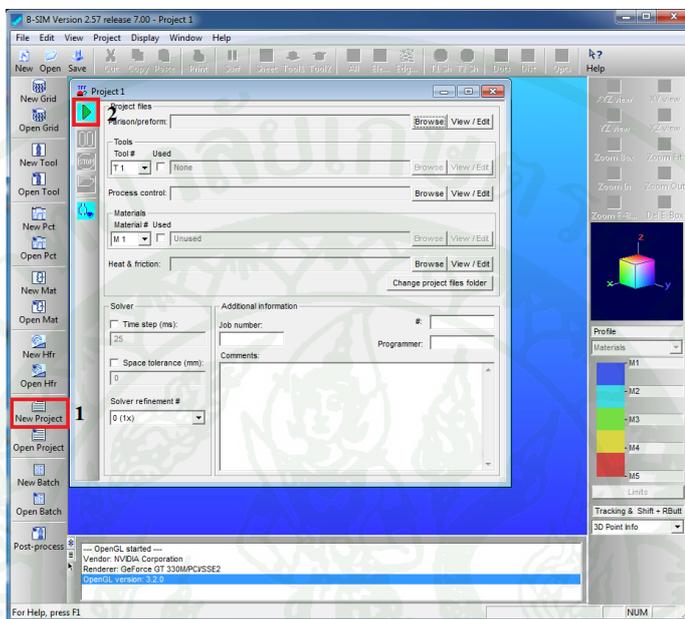
ภาพที่ 51 การกำหนดแบบจำลองของวัสดุ

12.4 ขั้นตอนการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (heat transfer coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (friction coefficient) ระหว่างชิ้นงาน และแม่พิมพ์ โดยผู้วิจัยได้ใช้แม่พิมพ์ที่ทำจากอลูมิเนียม ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเท่ากับ $500 \text{ W/m}^2/\text{K}$ และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานประมาณ 0.5 จากนั้นกำหนดอุณหภูมิของระบบเท่ากับ 30°C และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างแผ่นพลาสติกกับระบบ (ambient air temperature) เท่ากับ $5.7 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ดังแสดงในภาพที่ 52



ภาพที่ 52 การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

12.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์กระบวนการเป่าขึ้นรูป โดยการตั้งค่าและเลือกใช้ข้อมูลที่ได้สร้างไว้ตามหัวข้อที่ 12.1-12.4 ดังแสดงในภาพที่ 53 ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับจำนวนของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

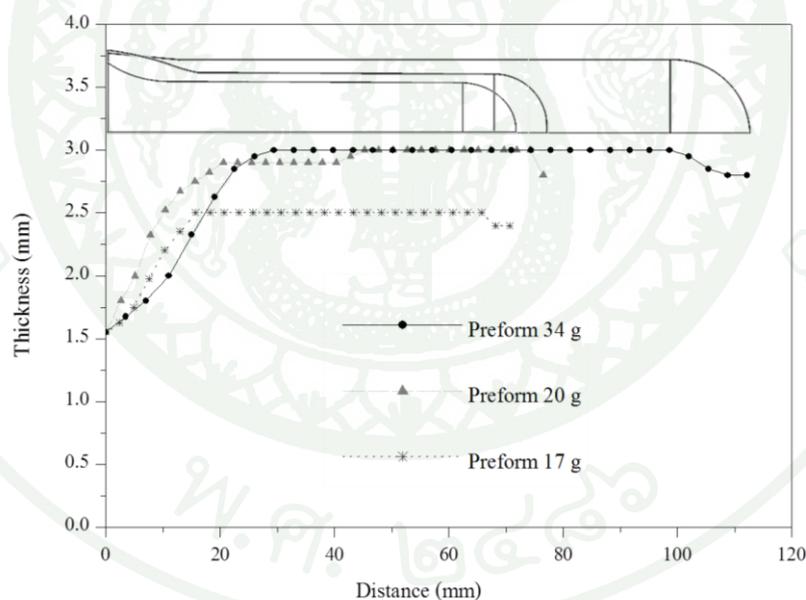


ภาพที่ 53 ขั้นตอนการเริ่มต้นการวิเคราะห์ โดยโปรแกรม B-SIM

ผลและวิจารณ์

1. อิทธิพลของขนาดหลอดพรีฟอร์มที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การกระจายตัวความหนาผนัง และความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน

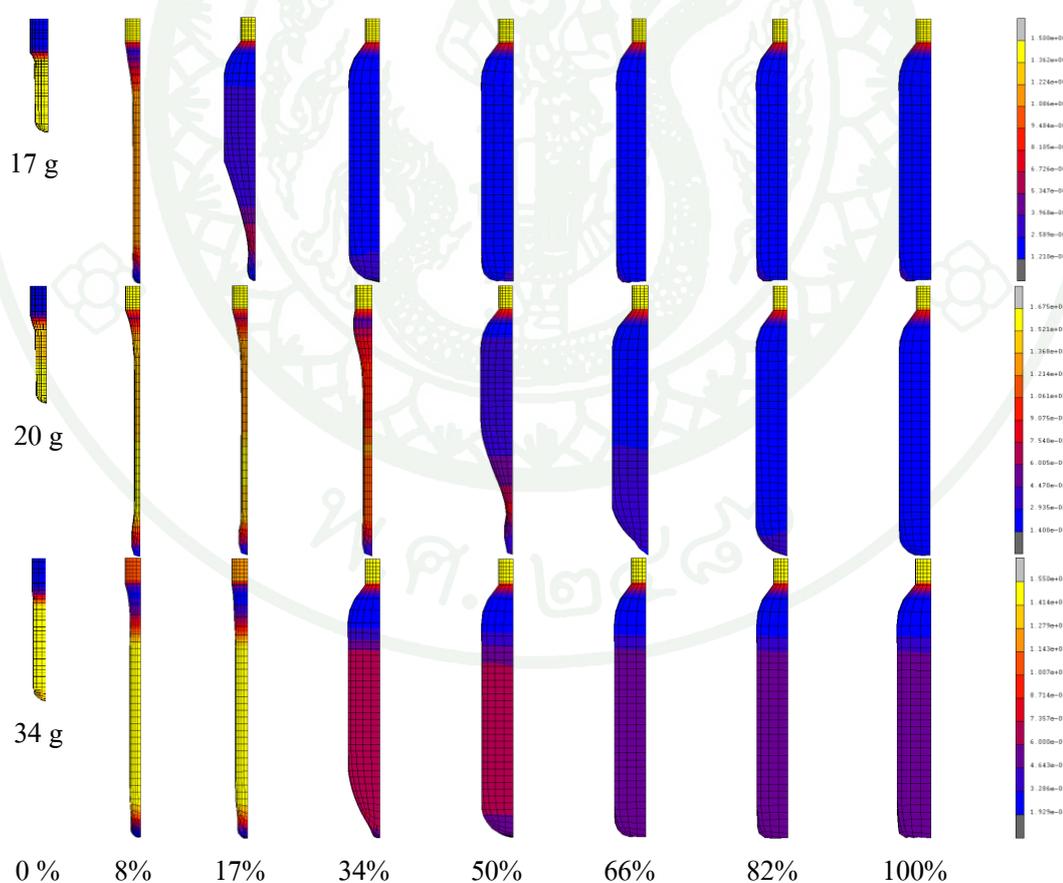
จากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบการกระจายตัวความหนาผนังหลอดพรีฟอร์มที่ขนาด 17 g 20 g และ 34 g ดังแสดงในภาพที่ 54 พบว่า หลอดพรีฟอร์มขนาด 17 g และ 20 g มีความยาวใกล้เคียงกัน แต่หลอดพรีฟอร์มขนาด 20 g มีความหนาผนังมากกว่าหลอดพรีฟอร์ม 17 g ในขณะที่หลอดพรีฟอร์มขนาด 20 g และ 34 g มีความหนาผนังใกล้เคียงกัน แต่หลอดพรีฟอร์ม 20 g มีความยาวที่น้อยกว่า นอกจากนี้หากพิจารณาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดพรีฟอร์ม 17 g 20 g และ 34 g พบว่า หลอดพรีฟอร์มขนาด 17 g และ 20 g มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกัน ในขณะที่หลอดพรีฟอร์มขนาด 34 g มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุด



ภาพที่ 54 การเปรียบเทียบการกระจายตัวความหนาผนังของหลอดพรีฟอร์มขนาด 17 g 20 g และ 34 g

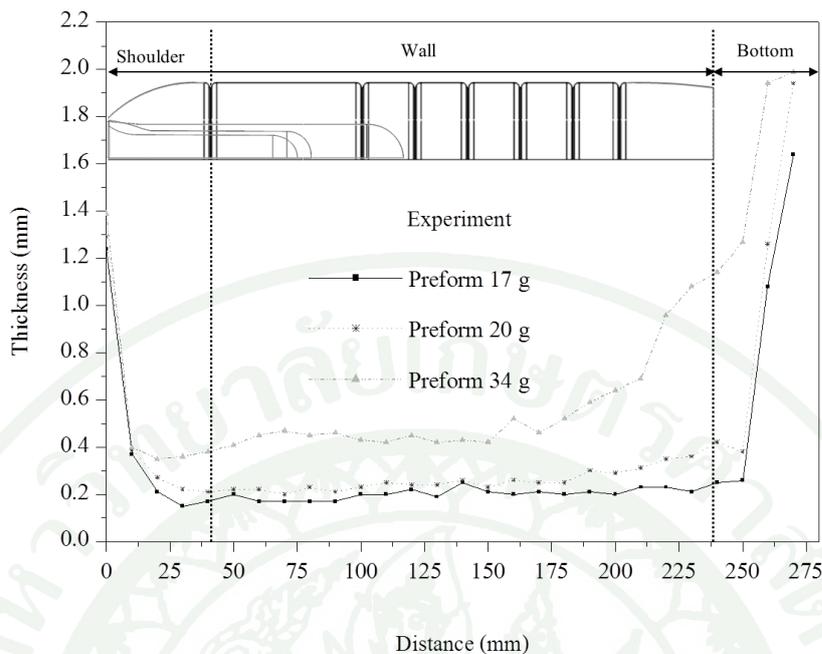
ภาพที่ 55 แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหลอดพรีฟอร์มขนาด 17 g 20 g และ 34 g ในระหว่างกระบวนการเป่าขึ้นรูปที่อุณหภูมิหลอดพรีฟอร์มเท่ากับ 80°C โดยผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง Mooney Rivlin เมื่อเปรียบเทียบหลอดพรีฟอร์มขนาด 20 g และ 17 g พบว่า หลอด

พรีฟอร์มขนาด 20 g ใช้เวลาในการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และขยายตัวติดผนังแม่พิมพ์ที่นานกว่า หลอดพรีฟอร์มขนาด 17 g ทั้งนี้เนื่องจากหลอดพรีฟอร์มขนาด 20 g มีความหนาผนังที่มากกว่า หลอดพรีฟอร์มขนาด 17 g ถึงแม้ว่าจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใกล้เคียงกันก็ตาม นอกจากนี้หากเปรียบเทียบเวลาในการเป่าขึ้นรูปของหลอดพรีฟอร์มขนาด 20 g และ 34 g พบว่า หลอดพรีฟอร์มขนาด 34 g ใช้เวลาในการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และขยายตัวติดผนังแม่พิมพ์ได้น้อยกว่าหลอดพรีฟอร์ม 20 g ถึงแม้ว่าหลอดพรีฟอร์มขนาด 20 g และ 34 g จะมีความหนาผนังที่ใกล้เคียงกันแต่เนื่องจากหลอดพรีฟอร์มขนาด 34 g มีความยาวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มากกว่าหลอดพรีฟอร์ม 20 g ทำให้ใช้เวลาการยึดตัวที่น้อยกว่าทั้งในแนวตั้ง และแนวรัศมี ทั้งนี้จากผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหลอดพรีฟอร์มแสดงให้เห็นว่า ความหนาผนัง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของหลอดพรีฟอร์มมีอิทธิพลอย่างมากต่อเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ ซึ่งอาจหมายถึงอัตราการผลิตที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อลดความหนาผนังของหลอดพรีฟอร์ม รวมถึงการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของหลอดพรีฟอร์ม

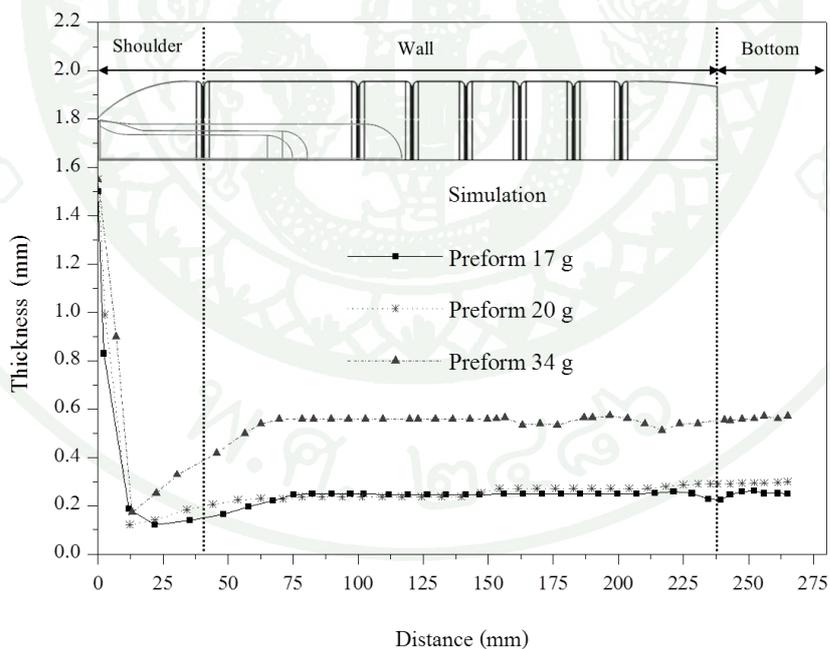


ภาพที่ 55 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างขณะเป่าขึ้นรูปของหลอดพรีฟอร์มที่ขนาดต่างๆ กันซึ่งได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin

จากภาพที่ 56 แสดงการกระจายตัวความหนาแน่นของขวด เมื่อเป่าขึ้นรูปหลอดพรีฟอร์ม ขนาด 17 g 20 g และ 34 g จากผลการทดสอบ พบว่า ความหนาแน่นของชิ้นงานขวด มีแนวโน้มลดลงจากบริเวณคอขวดจนถึงบริเวณไหล่ขวด (shoulder) จากนั้นจึงเริ่มมีความหนาแน่นคงที่ตลอดความยาว และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่บริเวณฐานของขวด โดยชิ้นงานขนาด 20 g มีความหนาแน่นของขวดน้อยกว่าชิ้นงานขนาด 34 g ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากอัตราการยืดตัวที่มากกว่าหลอดพรีฟอร์ม 34 g ดังที่กล่าวไปแล้ว ในขณะที่ขวด 20 g และ 17 g มีความหนาแน่นของขวดไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากหลอดพรีฟอร์มขนาด 20 g มีความยาว และรัศมีที่ใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าหลอดพรีฟอร์มขนาด 20 g มีความหนาแน่นที่มากกว่าก็ไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นขวดมากนัก แต่ส่งผลต่อเวลาในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างดังที่กล่าวมาข้างต้น และหากพิจารณาผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin ดังแสดงในภาพที่ 57 พบว่าให้ผลที่สอดคล้องกับผลการตรวจวัดความหนาแน่นที่วัดได้จากการทดสอบ ตั้งแต่บริเวณคอขวดจนถึงบริเวณขอบมุม อย่างไรก็ตามหากพิจารณาในส่วนบริเวณฐานขวดผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมมีค่าความหนาแน่นที่แตกต่างกับผลการทดสอบจริง กล่าวคือ ค่าความหนาแน่นบริเวณฐานของขวดที่ได้จากการตรวจวัดจริงมีความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น แต่ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin มีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากข้อกำหนดของแบบจำลอง Mooney Rivlin ที่สมบัติของวัสดุไม่ขึ้นกับเวลาหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (time independent) และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในขณะขึ้นรูป (isothermal condition) เช่น วัสดุพอลิเมอร์มีความหนืดคงที่ตลอดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงแล้ววัสดุพอลิเมอร์มีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและอุณหภูมิ เช่น เมื่อแท่งยืดเคลื่อนที่ดันหลอดพรีฟอร์มให้ยืดออกจนสัมผัสแม่พิมพ์ในฐานซึ่งทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างแม่พิมพ์และ ชิ้นงานส่งผลให้ส่วนที่สัมผัสแม่พิมพ์ก่อนเกิดการเย็นตัวทำให้บริเวณฐานขวดมีความหนาแน่นมาก นอกจากนี้การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกที่ใช้สำหรับเป็นข้อมูลเพื่อหาค่าคงที่ของสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันพลังงานความเครียด โดยในงานวิจัยนี้ ได้ทดสอบแบบดึงในแนวแกนเดียว (uniaxial test) โดยในความเป็นจริงในกระบวนการเป่าขึ้นรูป หลอดพรีฟอร์มขยายตัวในสองทิศทาง กล่าวคือ เกิดการขยายตัวทั้งแนวตั้ง และแนวนอน แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบไม่สามารถทำการทดสอบแบบสองแกนได้ (biaxial test)

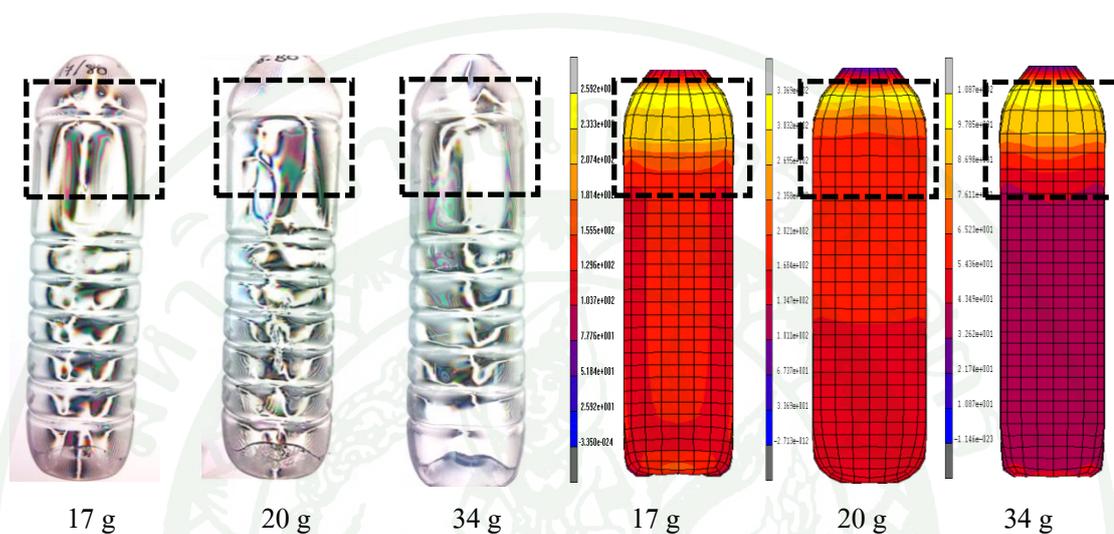


ภาพที่ 56 การกระจายตัวความหนาของผนังที่ได้จากการเป่าขึ้นรูปหลอดพรีฟอร์มขนาดต่างๆ กัน



ภาพที่ 57 ผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวความหนาผนังที่ได้จากแบบจำลอง Mooney Rivling เมื่อใช้หลอดพรีฟอร์มขนาดต่างๆ กัน

หากพิจารณาผลการวิเคราะห์ความเค้นตึงที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานซึ่งได้จากการทดสอบจริง และจากแบบจำลอง Mooney Rivlin ดังแสดงในภาพที่ 58 พบว่า ให้ผลที่สอดคล้องกัน กล่าวคือ หลอดพรีฟอร์มที่มีความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางที่มาก ส่งผลให้เกิดความเค้นตึงที่น้อยกว่า เมื่อ เทียบกับหลอดพรีฟอร์มที่มีความยาว และเส้นผ่านศูนย์กลางที่น้อย

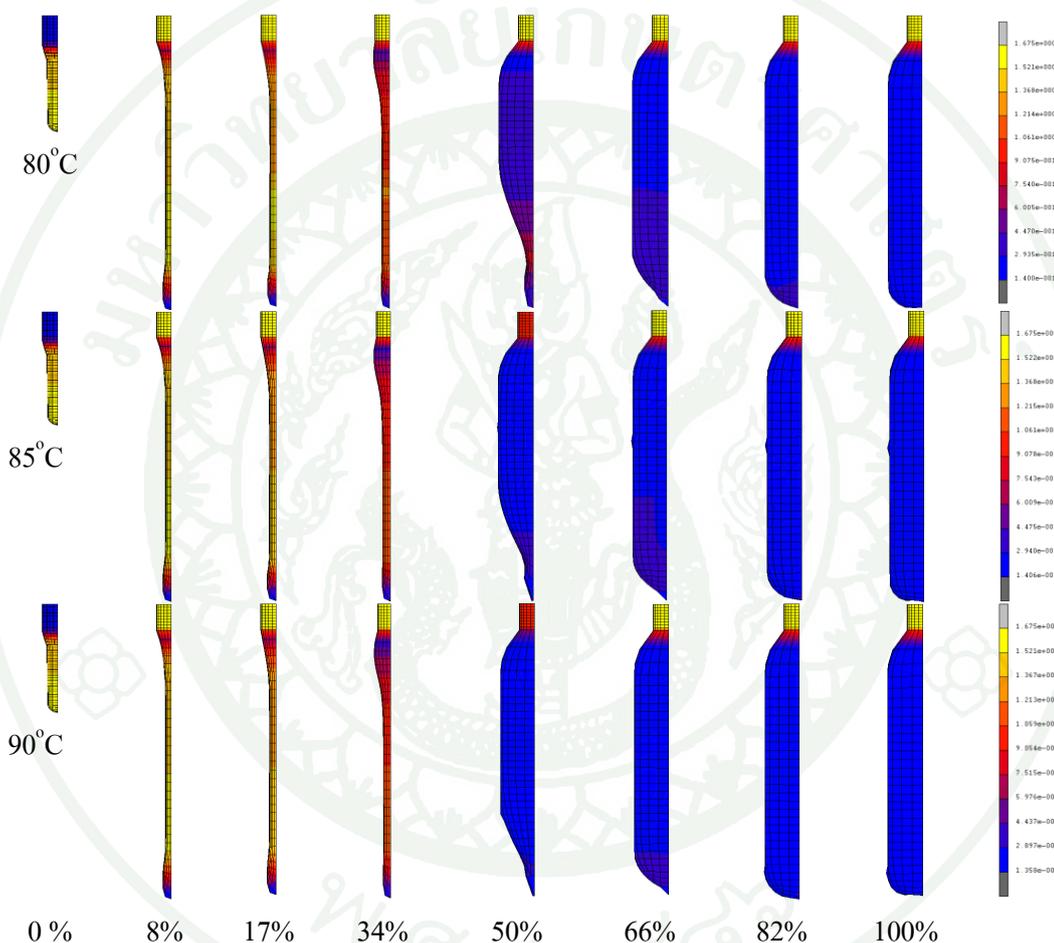


ภาพที่ 58 ผลการวิเคราะห์ความเค้นตึงภายในชิ้นงานทดสอบที่ได้จากเครื่อง Stress viewer และผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin เมื่อใช้หลอดพรีฟอร์มขนาดต่างๆ กัน

2 อิทธิพลของอุณหภูมิหลอดพรีฟอร์มที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การกระจายตัวความหนาผนัง และความเค้นตึงที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน

ภาพที่ 59 แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหลอดพรีฟอร์มขนาด 20 g เมื่อทำการเป่าขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 80°C 85°C และ 90°C ตามลำดับ โดยใช้ความเร็วของแท่งยึดเท่ากับ 1.92 m/s จากผลการวิเคราะห์พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหลอดพรีฟอร์มโดยรวม อย่างไรก็ตามหากพิจารณาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหลอดพรีฟอร์มในระหว่างกระบวนการเป่าขึ้นรูปที่ 50% พบว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้หลอดพรีฟอร์มมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้เร็วขึ้น ทั้งนี้การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลโดยตรงต่อสมบัติความเป็นวิสคัส (viscous) ทำให้มีการสูญเสียรูปร่างที่ง่ายขึ้น เมื่อพิจารณาที่อัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation/strain rate) ที่เท่ากัน อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการเป่าขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้ใช้เวลาในการเป่าขึ้นรูปลดลง แต่การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลโดยตรงต่อเวลาในการเย็นตัวของชิ้นงานภายในแม่พิมพ์เช่นเดียวกัน

นอกจากนี้ยังอาจทำให้ชิ้นงานที่ได้มีลักษณะขาวขุ่น เนื่องจากการเกิดผลึกใหม่ (recrystallization) ซึ่งจัดว่าเป็นข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นบนผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในภาพที่ 60(ก) และหากพิจารณาผลการทดสอบการเป่าขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 70°C พบว่าไม่สามารถเป่าขึ้นรูปหลอดพรีฟอร์มให้เต็มแม่พิมพ์ได้ ดังแสดงในภาพที่ 60(ข) เนื่องจากวัสดุยังคงมีสถานะเป็นของแข็งซึ่งสายโซ่โมเลกุลยังไม่เกิดการคลายตัวออกจึงเคลื่อนที่ผ่านกันได้ยาก

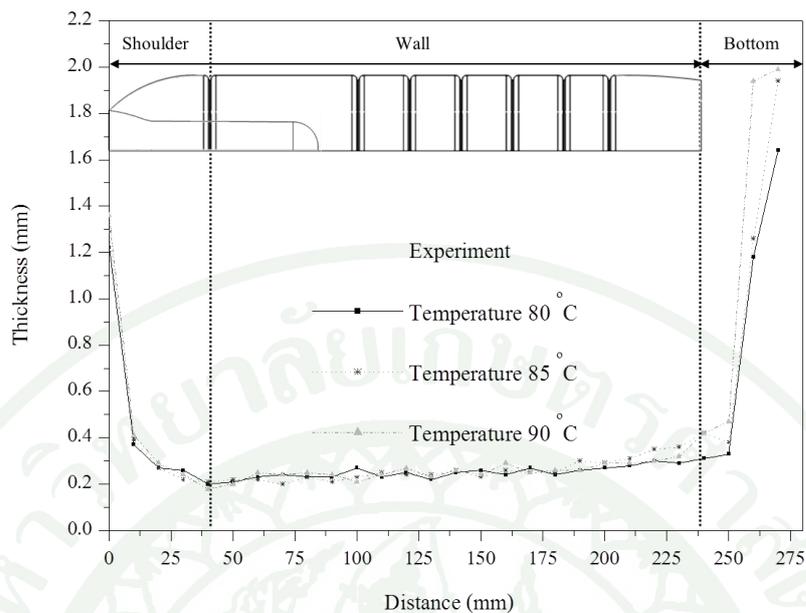


ภาพที่ 59 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างขณะเป่าขึ้นรูปของหลอดพรีฟอร์มที่อุณหภูมิหลอดพรีฟอร์มต่างๆกัน ที่ได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin

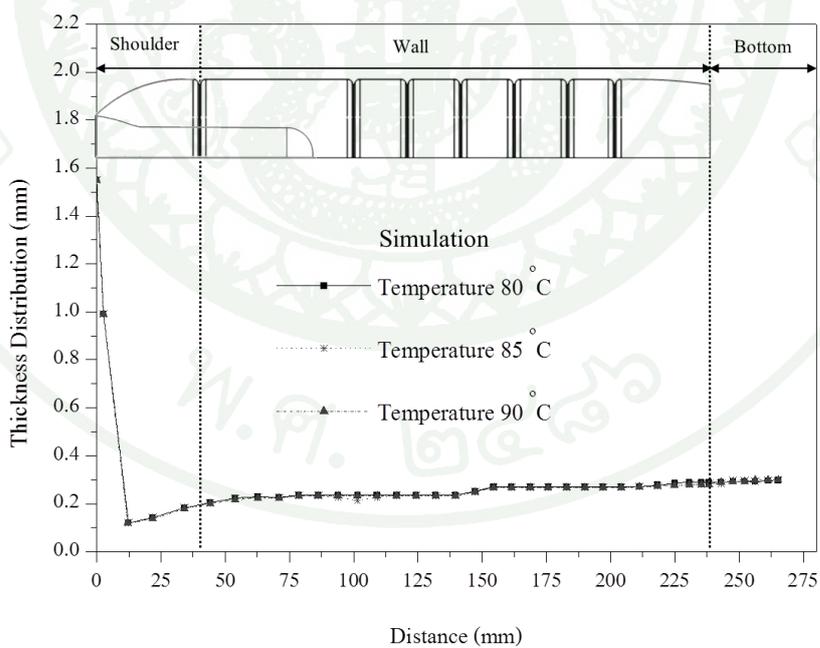


ภาพที่ 60 (ก) การเกิดการตกผลึกใหม่ของขวด PET เมื่อเป่าขึ้นรูปหลอดพรีฟอร์มที่อุณหภูมิ 90°C และ (ข) ปัญหาการเป่าไม่เต็มเบ้าแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิหลอดพรีฟอร์ม 70°C

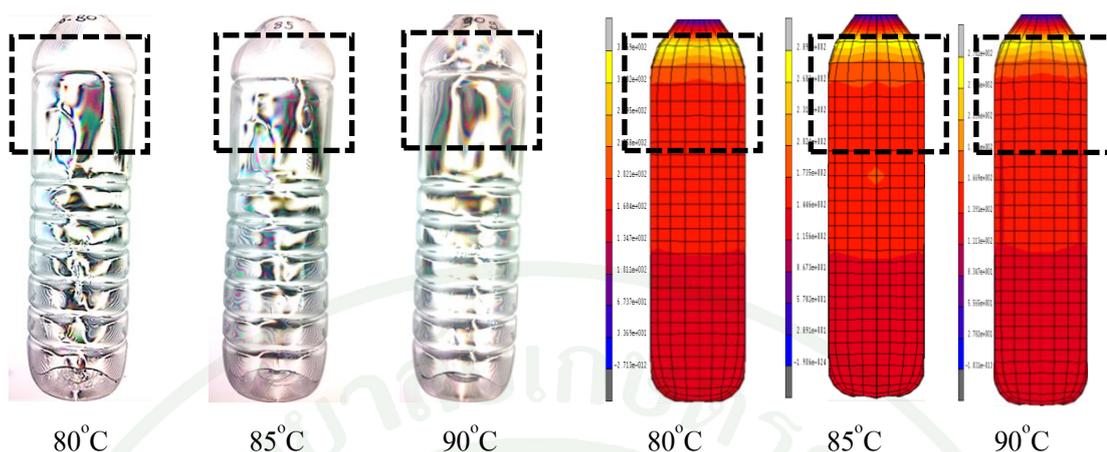
ภาพที่ 61 แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนังของขวดเมื่อใช้อุณหภูมิหลอดพรีฟอร์มต่างๆ กัน จากผลการวิเคราะห์พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิหลอดพรีฟอร์มไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาผนังของขวด ซึ่งให้ผลที่ได้มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin ดังแสดงในภาพที่ 62 ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิหลอดพรีฟอร์มในช่วง 80°C ถึง 90°C ส่งผลให้สมบัติการเสวยรูปของวัสดุในช่วงอีลาสติกเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงดังกล่าวจึงไม่ส่งผลต่อความหนาผนัง นอกจากนี้หากพิจารณาความเค้นตกค้างในภาพที่ 63 พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิของหลอดพรีฟอร์มไม่ส่งผลต่อการเกิดความเค้นตกค้าง ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin ยังคงให้ผลที่สอดคล้องกัน



ภาพที่ 61 การกระจายตัวความหนาของผนังที่ได้จากการเป่าขึ้นรูปเมื่อใช้อุณหภูมิหลอดพรีฟอร์มต่างๆ กัน



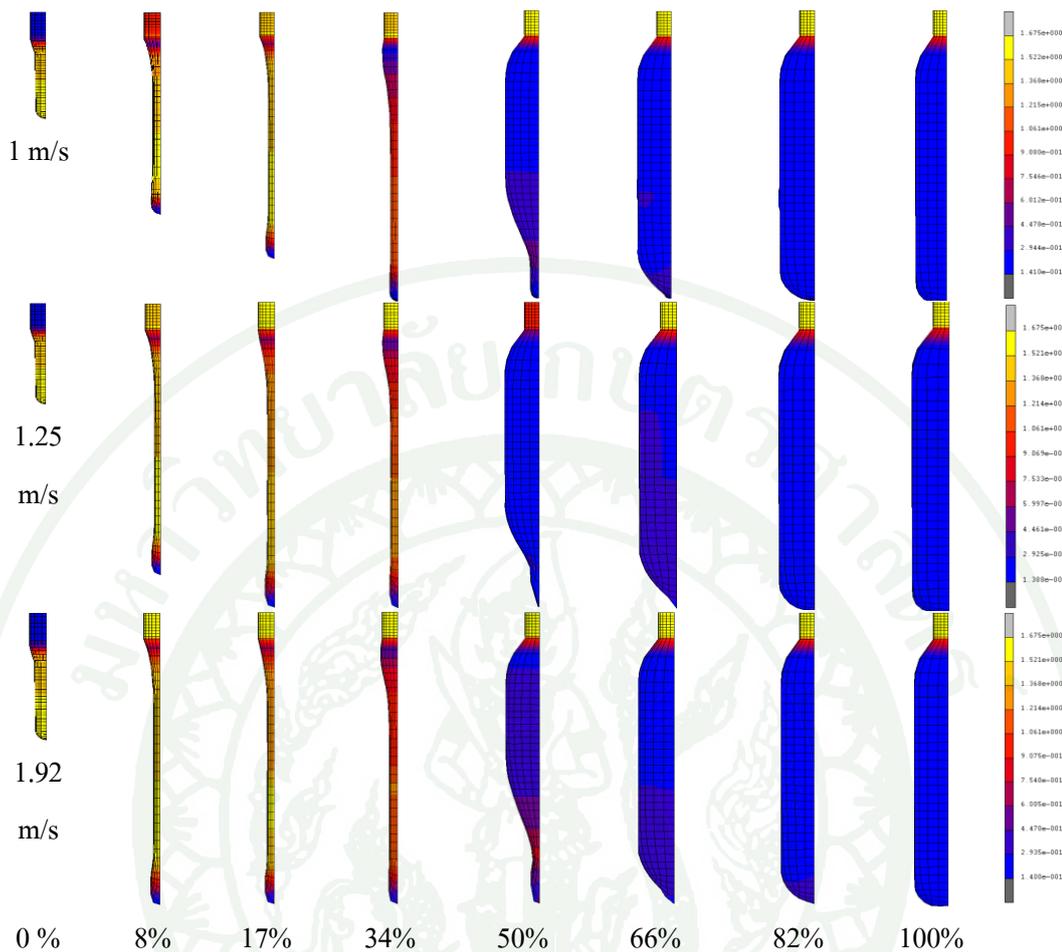
ภาพที่ 62 ผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวความหนาผนังที่ได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin เมื่อใช้อุณหภูมิหลอดพรีฟอร์มต่างๆ กัน



ภาพที่ 63 ผลการวิเคราะห์ความเค้นดก้างภายในชิ้นงานทดสอบที่ได้จากเครื่อง Stress viewer และที่ได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin โดยใช้อุณหภูมิหลอดพรีฟอร์มต่างๆ กัน

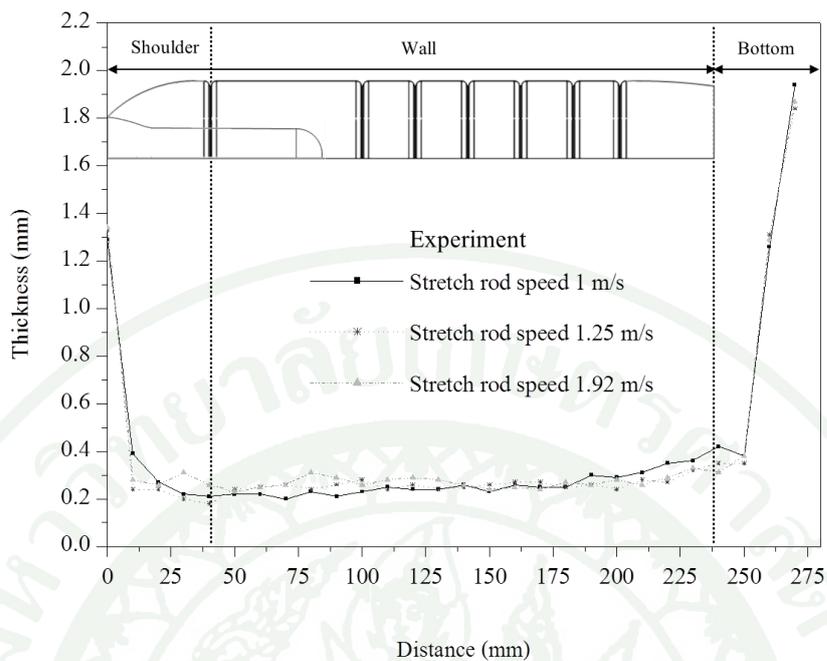
3. อิทธิพลของความเร็วแท่งยืดที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การกระจายตัวความหนาผนัง และความเค้นดก้างที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน

ภาพที่ 64 แสดงผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างในกระบวนการเป่าขึ้นรูปหลอดพรีฟอร์ม ขนาด 20 g ที่อุณหภูมิหลอดพรีฟอร์ม 80°C โดยใช้ความเร็วของแท่งยืดเท่ากับ 1 m/s 1.25 m/s และ 1.92 m/s ตามลำดับ พบว่า ความเร็วของแท่งยืดไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างระหว่างการเป่าขึ้นรูปหลอดพรีฟอร์ม

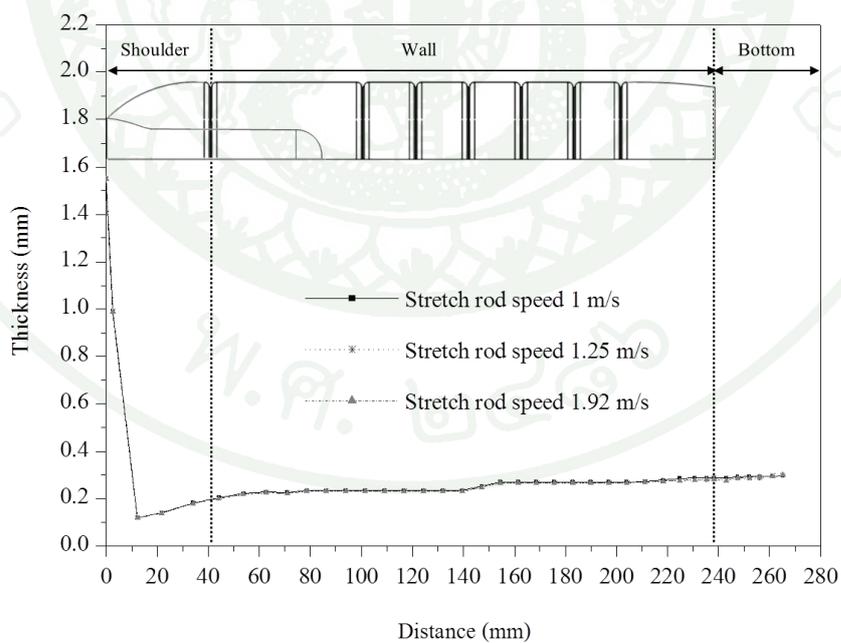


ภาพที่ 64 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานขนาด 20 g ที่อุณหภูมิ 80°C โดยแท่งยึดมีความเร็วต่างๆ กัน

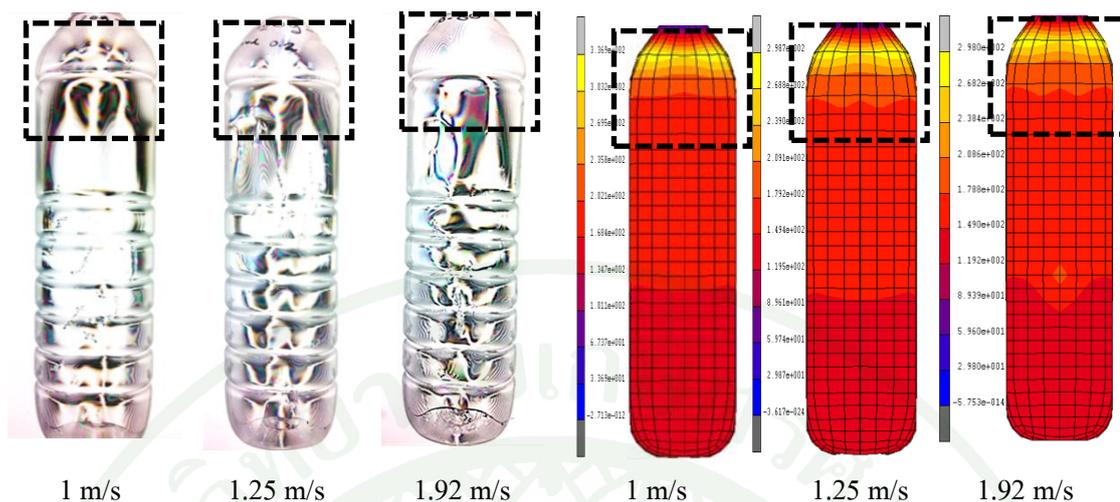
จากการวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาแน่นเมื่อทำการเป่าขึ้นรูปหลอดพรีฟอร์มที่ความเร็วของแท่งยึดต่างๆ กัน พบว่า ความเร็วของแท่งยึดไม่ส่งผลต่อการกระจายตัวความหนาแน่นของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 65 ซึ่งผลการตรวจวัดจากการทดสอบจริงให้ผลที่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลอง Mooney Rivline ดังแสดงในภาพที่ 66 แต่เมื่อพิจารณาความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเร็วของแท่งยึดในช่วงความเร็วดังกล่าวไม่ส่งผลต่อการเกิดความเค้นตกค้างภายในชิ้นงาน กล่าวคือ ความเค้นตกค้างยังคงมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ดังแสดงในภาพที่ 67 และหากพิจารณาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลอง Mooney Rivline ให้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกัน



ภาพที่ 65 การกระจายตัวความหนาของผนังที่ได้จากการเป่าขึ้นรูปหลอดพรีฟอร์มเมื่อใช้ความเร็วต่าง ๆ กัน



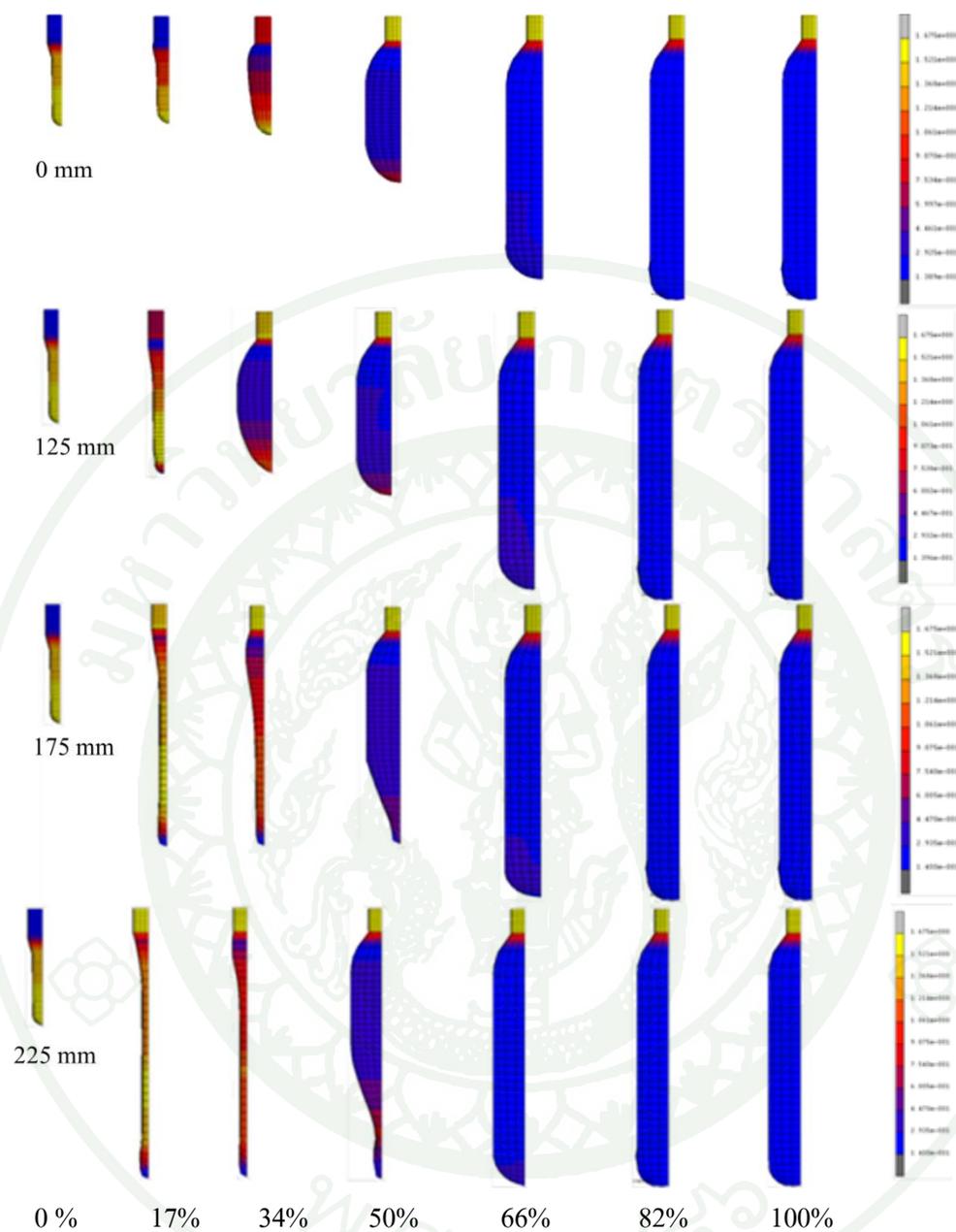
ภาพที่ 66 ผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวความหนาผนังที่ได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin เมื่อใช้ความเร็วของแท่งยืดต่างๆ กัน



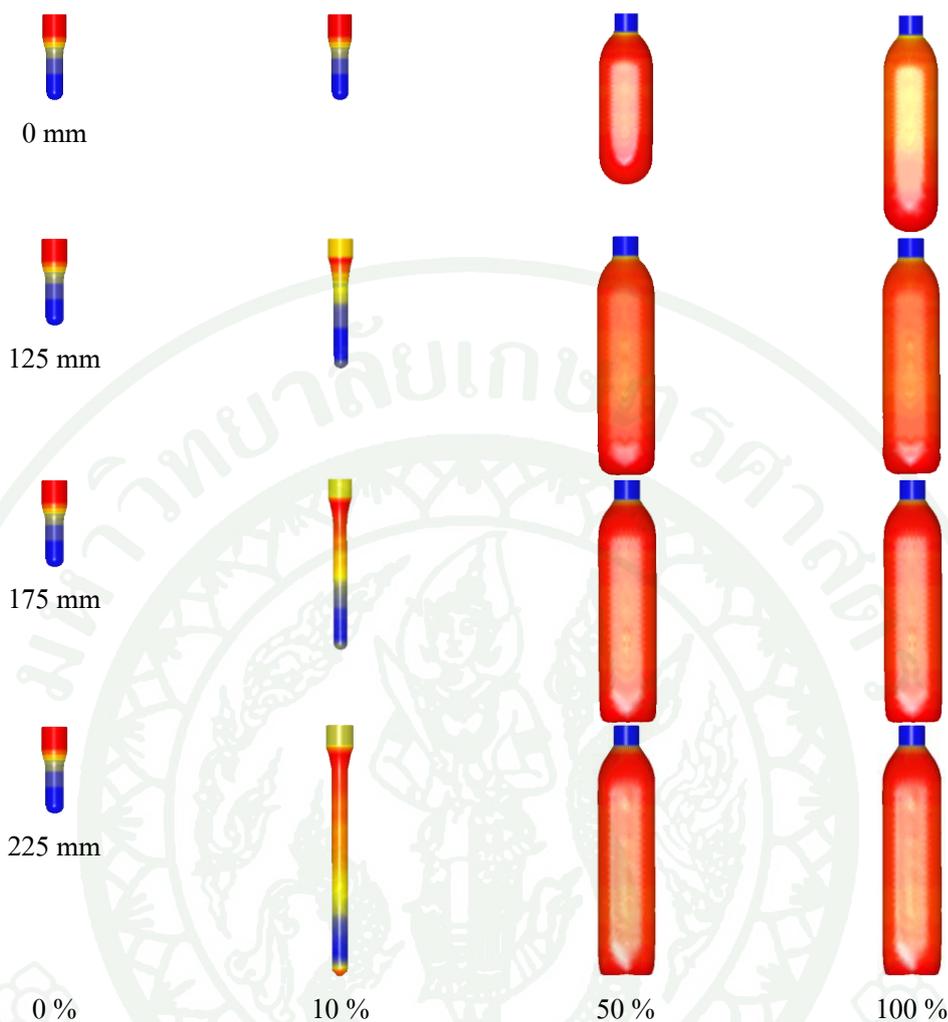
ภาพที่ 67 ผลการวิเคราะห์ความเค้นตัก้างภายในชิ้นงานทดสอบที่ได้จากเครื่อง Stress viewer และผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin เมื่อใช้ความเร็วของแท่งยึดต่างๆ กัน

4 อิทธิพลของระยะเวลาเคลื่อนที่ของแท่งยึดที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การกระจายตัวความหนาผนัง และความเค้นตัก้างที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน

จากผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และการกระจายตัวความหนาผนังที่ได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาเคลื่อนที่ของแท่งยึดไม่ส่งผลต่อการการเปลี่ยนแปลงความหนาผนัง ดังแสดงในภาพที่ 68 เนื่องจากข้อจำกัดของแบบจำลอง Mooney Rivlin ที่ไม่สามารถกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบได้ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้นำโปรแกรม B-SIM ที่ใช้แบบจำลอง K-BKZ มาใช้วิเคราะห์อิทธิพลของระยะเวลาเคลื่อนที่ของแท่งยึดที่มีต่อการกระจายตัวความหนาผนังดังแสดงในภาพที่ 69 ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหลอดพีเอฟเอ็มขนาด 20 g เมื่อใช้แรงดันเป่าเท่ากับ 12 MPa และอุณหภูมิหลอดพีเอฟเอ็ม 80°C ที่ระยะเวลาเคลื่อนที่ของแท่งยึดเท่ากับ 0 mm 125 mm 175 mm 225 mm ตามลำดับ จากการวิเคราะห์พบว่าระยะทางการเคลื่อนที่ของแท่งยึดไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหลอดพีเอฟเอ็ม ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากการใช้แรงดันเป่า เป็น 12 MPa ซึ่งมีค่าสูงมากส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการขยายตัวติดแม่พิมพ์อย่างรวดเร็วทำให้เห็นผลการวิเคราะห์ได้ไม่ชัดเจน นอกจากนี้หากพิจารณาผลการวิเคราะห์เมื่อไม่มีการเคลื่อนที่ของแท่งยึด พบว่า ไม่สามารถเป่าชิ้นงานให้เต็มแม่พิมพ์



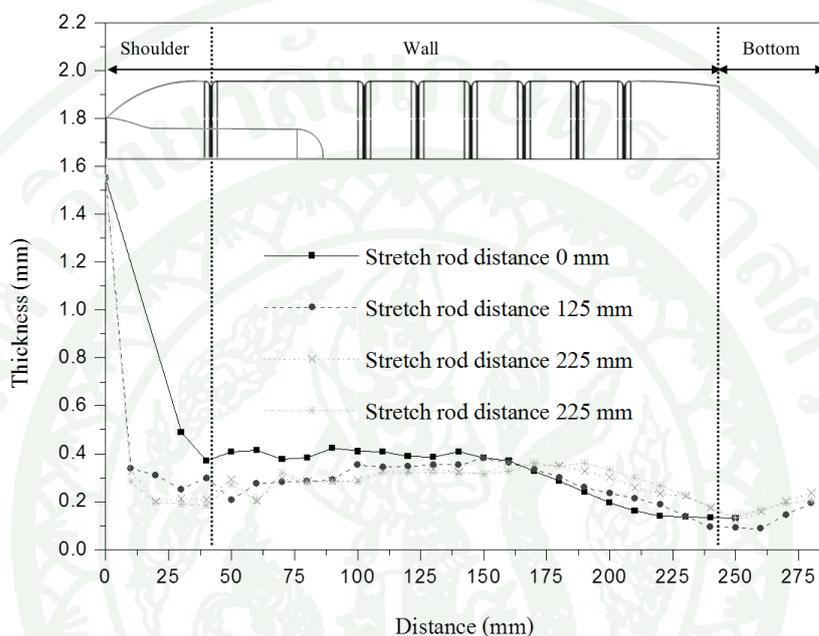
ภาพที่ 68 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานขนาด 20 g ที่อุณหภูมิ 80°C โดยมีระยะการเคลื่อนที่ของแท่งยึดต่างๆ กัน



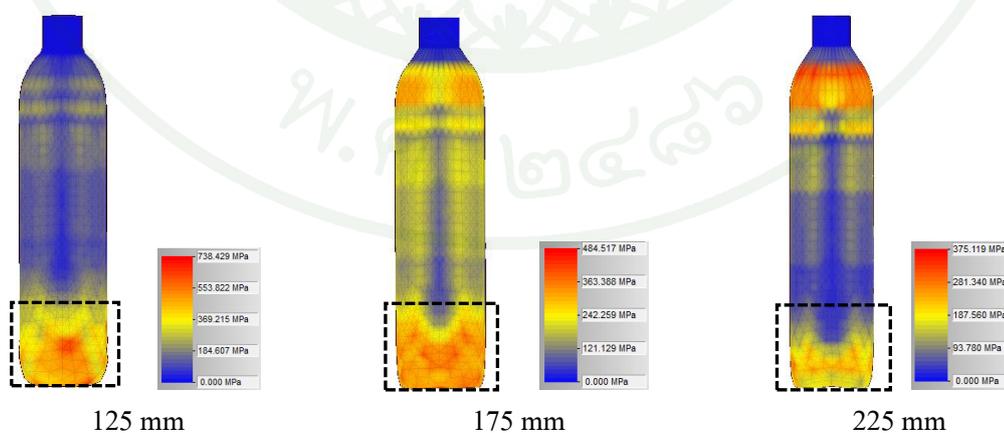
ภาพที่ 69 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานขนาด 20 g ที่อุณหภูมิ 80°C โดยระยะการเคลื่อนที่ของแท่งยึดต่างๆ กัน

ภาพที่ 70 แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาแน่นที่ได้จากแบบจำลอง K-BKZ เมื่อใช้ระยะการเคลื่อนที่ของแท่งยึดต่างๆ กัน จากผลการวิเคราะห์พบว่า การเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของแท่งยึดส่งผลให้ความหนาแน่นช่วงคอขวดถึงไหล่ขวดมีความหนาแน่นลดลง จากนั้นมีความหนาแน่นที่บริเวณผนังใกล้เคียงกัน และความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลงอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากหลอดพรีฟอร์มเริ่มเกิดการขยายตัวภายหลังสิ้นสุดการเคลื่อนที่ของแท่งยึด นอกจากนี้ในกรณีที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของแท่งยึด หลอดพรีฟอร์มจะเกิดการขยายตัวออกและเริ่มสัมผัสแม่พิมพ์ตั้งแต่บริเวณคอขวด และขยายตัวออกใน 2 ทิศทางทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนสู่ผนังแม่พิมพ์ และเกิดการเย็นตัวทำให้บริเวณไหล่ขวด และผนังขวดช่วงแรกมีความหนาแน่นที่มาก ในขณะที่บริเวณฐานขวดจะเกิดการยึดตัวออก เนื่องจากแรงดันเป่า ส่งผลให้มีความหนาแน่นลดลง

อย่างมาก และเมื่อพิจารณาความเค้นตกค้างที่เกิดภายในชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 71 พบว่า การเพิ่มระยะการเคลื่อนที่ของแท่งยึด ส่งผลให้ความเค้นตกค้างที่บริเวณฐานขวดมีค่าลดลง เนื่องจากหลอดพีเอฟเอ็มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากแรงดันเป่าที่บริเวณฐานของขวดลดลงดังที่กล่าวไว้ข้างต้น



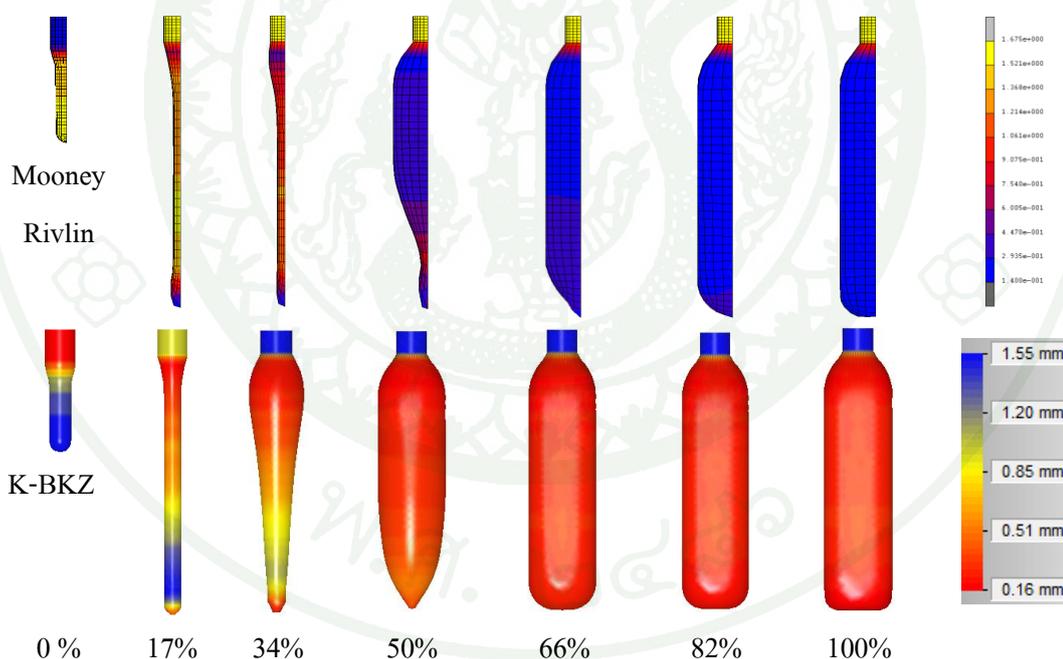
ภาพที่ 70 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานเมื่อใช้ระยะการเคลื่อนที่ของแท่งยึดต่างๆ กันจากโปรแกรม B-SIM โดยใช้แบบจำลอง K-BKZ



ภาพที่ 71 การวิเคราะห์ความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานซึ่งได้จากแบบจำลอง K-BKZ เมื่อใช้ระยะการเคลื่อนที่ของแท่งยึดต่างๆ กัน

5. ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การกระจายตัวความหนาผนัง และความเค้นตึงภายในชิ้นงาน ที่ได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin และ K-BKZ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงในกระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูป

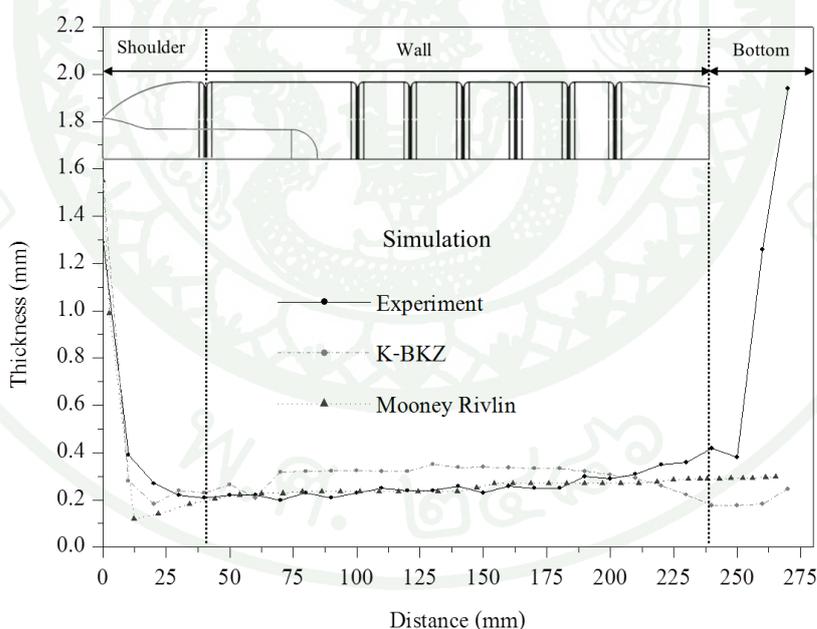
จากผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานขวดระหว่างแบบจำลอง K-BKZ และ Mooney Rivlin เมื่อทำการเป่าขึ้นรูปหลอดพรีฟอร์มขนาด 20 g ที่อุณหภูมิ 80°C โดยใช้ระยะการเคลื่อนที่ของแท่งยึดเท่ากับ 225 mm แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหลอดพรีฟอร์มที่ได้จากผลการวิเคราะห์ของแบบจำลอง K-BKZ ใช้เวลาในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้เร็วกว่าผลการวิเคราะห์ของแบบจำลอง Mooney Rivlin ดังแสดงในภาพที่ 72 (ที่ 34-60%) ทั้งนี้เนื่องจากแบบจำลอง K-BKZ เป็นแบบจำลองที่อธิบายพฤติกรรมของวัสดุที่อยู่ในสภาวะหลอมเหลว ซึ่งทำให้เกิดการยืดตัวในแม่พิมพ์ได้รวดเร็วกว่าแบบจำลอง Mooney Rivlin ที่อธิบายพฤติกรรมของวัสดุที่สภาวะคล้ายยาง



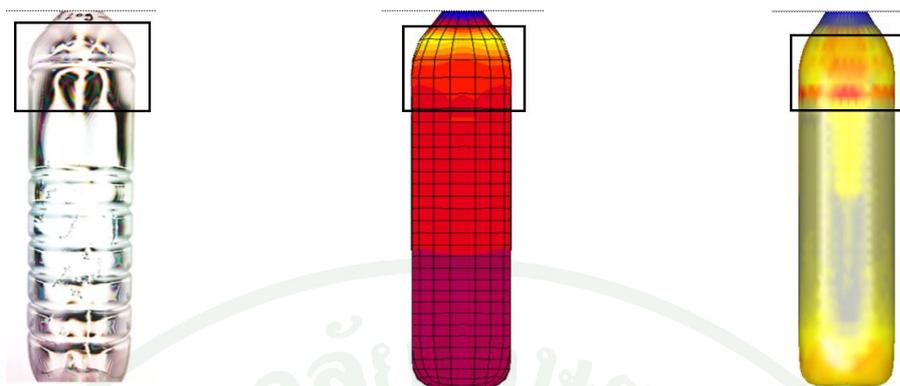
ภาพที่ 72 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหลอดพรีฟอร์มขนาด 20 g ที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin และแบบจำลอง K-BKZ

ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนัง ที่ได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin และ K-BKZ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดจริงแสดงในภาพที่ 73 จากผลการวิเคราะห์พบว่า

แบบจำลอง Mooney Rivlin และ K-BKZ ให้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับผลการทดสอบจริง อย่างไรก็ตามหากพิจารณาถึงความแม่นยำที่ได้ พบว่า แบบจำลอง Mooney Rivlin มีการกระจายตัวความหนาผนังที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริงมากกว่าผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลอง K-BKZ ทั้งนี้เนื่องจากช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการผลิตขวด PET อยู่ในช่วงประมาณ 80 ถึง 90°C ซึ่งวัสดุ PET มีสมบัติคล้ายยาง (rubber like material) (Khayat and Derdouri, 1995 ; Schimidt *et al.*, 1975) ทำให้สามารถนำแบบจำลอง Mooney Rivlin ซึ่งเป็นแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก มาใช้สำหรับทำนายพฤติกรรมกรขึ้นรูปของ PET ได้เป็นอย่างดี (ศิริวัฒน์ 2546) ในขณะที่แบบจำลอง K-BKZ ซึ่งเป็นแบบจำลองวิสโคอีลาสติก ชนิดอินทิกรัล (viscoelastic integral-type) ซึ่งเหมาะสมต่อการนำไปอธิบายพฤติกรรมของวัสดุที่อยู่ในสถานะหลอมเหลว และเมื่อพิจารณาผลการวัดความเค้นตกค้างโดยใช้เครื่อง Stress viewer ดังแสดงในภาพที่ 74 พบว่า บริเวณไหล่ขวดมีความเค้นตกค้างสูงกว่าบริเวณอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีอัตราการยืดตัวที่สูงมาก ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการโปรแกรม MARC ที่ใช้แบบจำลอง Mooney Rivlin และ โปรแกรม B-SIM ที่ใช้แบบจำลอง K-BKZ ยังคงให้ผลที่สอดคล้องกับความเป็นจริง



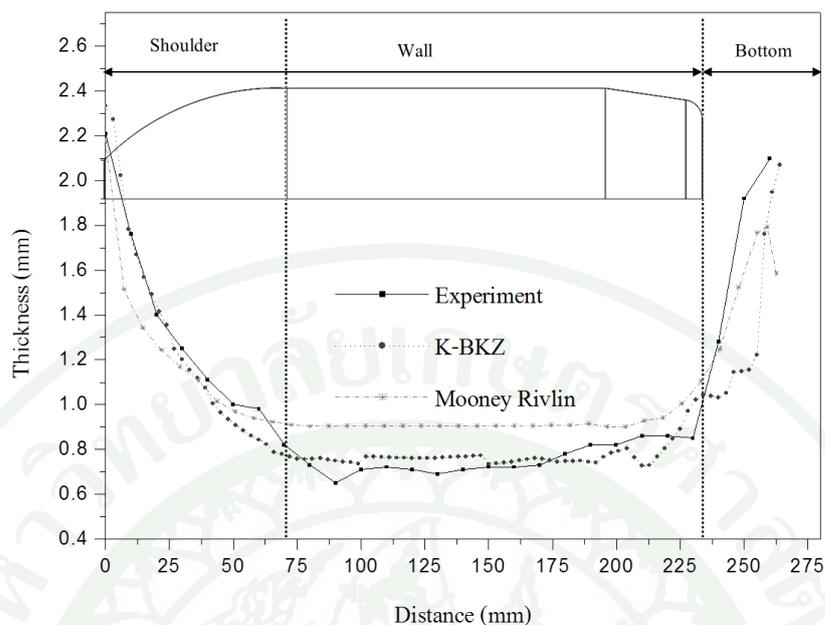
ภาพที่ 73 ผลการวิเคราะห์ความหนาผนังชิ้นงานที่ได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin และ K-BKZ เมื่อเทียบกับผลการตรวจวัดจริง



ภาพที่ 74 ผลการวิเคราะห์ความเค้นตึงภายในชิ้นงานทดสอบที่ได้จากเครื่อง Stress viewer และที่ได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin และแบบจำลอง K-BKZ

6. ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นชิ้นงานที่ได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin และ K-BKZ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงในกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป

ภาพที่ 75 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาแน่นชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูปเมื่อใช้แบบจำลอง Mooney Rivlin และ K-BKZ ที่อุณหภูมิของหลอดพาริสัน 190°C และอุณหภูมิแม่พิมพ์เป่า 30°C โดยใช้หลอดพาริสันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก และภายใน เท่ากับ 28 และ 23 mm ตามลำดับ (ความหนาแน่นหลอดพาริสันเท่ากับ 2.5 mm) และใช้แรงดันเป่า 1 MPa จากผลการทดลองพบว่าในช่วงแรกความหนาแน่นของชิ้นงานมีแนวโน้มลดลงจากช่วงคอขวดถึงบริเวณไหล่ขวด จากนั้นเริ่มคงที่ตลอดความยาวขวดและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกครั้งในส่วนของฐานขวด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์จากแบบจำลอง Mooney Rivlin และแบบจำลอง K-BKZ พบว่า ให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดสอบจริง เช่นเดียวกับในงานวิจัยของ Marckmann *et al.* (2001) ; Tanifuji *et al.* (2000) อย่างไรก็ตามหากพิจารณาถึงความแม่นยำของการวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาแน่นแสดงให้เห็นว่า แบบจำลอง K-BKZ ให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกว่า แบบจำลอง Mooney Rivlin ทั้งนี้เนื่องจาก กระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูป พอลิเมอร์ถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูป ออกมาเมื่ออุณหภูมิประมาณ 180 ถึง 210°C เป็นช่วงพอลิเมอร์อยู่ในสถานะหลอมละลาย สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลอง K-BKZ ซึ่งเป็นแบบจำลองเชิงโครงสร้างชนิดวิสโคอีลาสติก

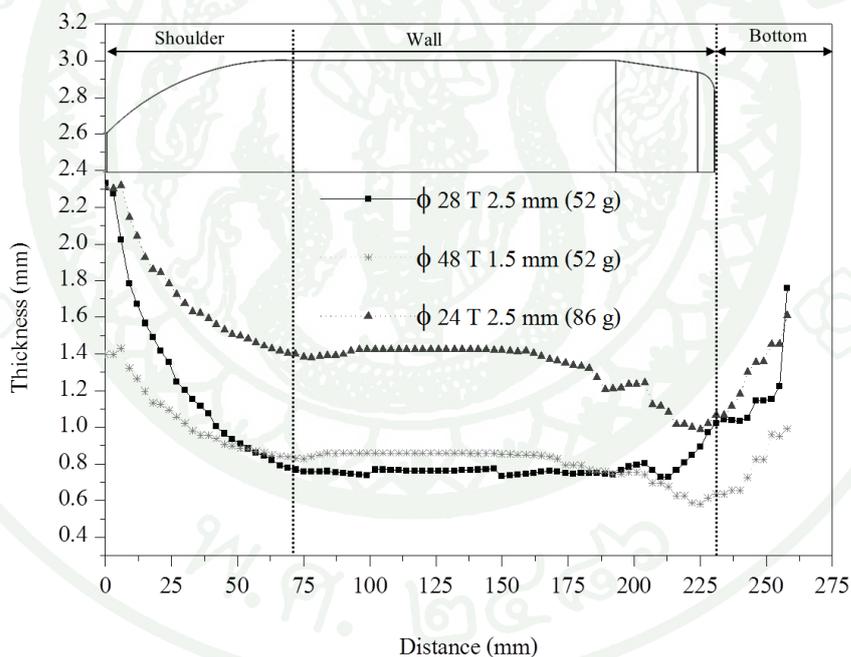


ภาพที่ 75 ผลการวิเคราะห์ความหนาผนังชิ้นงานที่ได้จากแบบจำลอง Mooney Rivlin และ K-BKZ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงในกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป

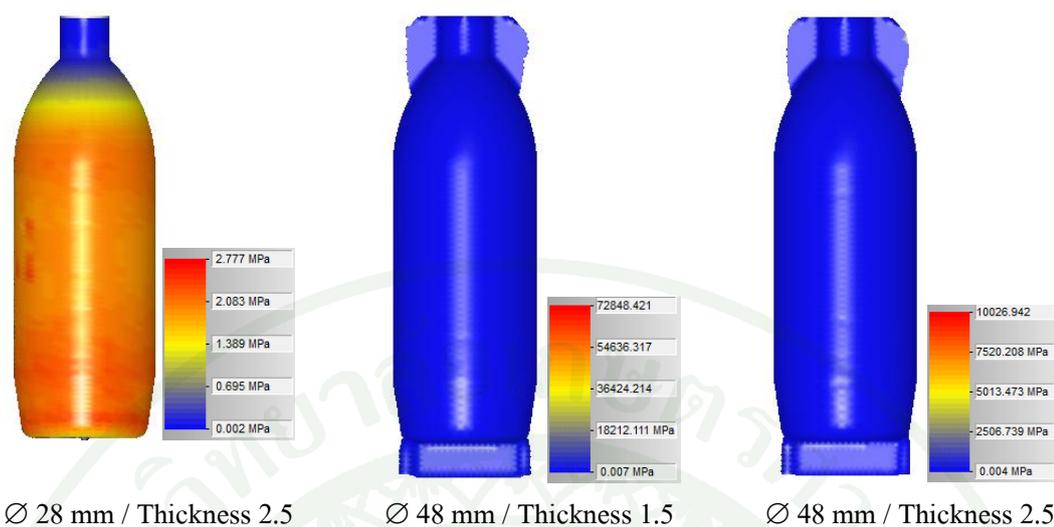
7. อิทธิพลของขนาดหลอดพาริสันที่มีต่อการกระจายตัวของความหนาผนัง และความเค้นตกค้างภายในของชิ้นงาน

จากผลการวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนังของขวดเมื่อทำการเป่าหลอดพาริสันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 28 mm และ 48 mm โดยมีความหนาผนังหลอดพาริสัน 2.5 mm และ 1.5 mm ตามลำดับ และน้ำหนักหลอดพาริสันเท่ากับ 52 g ที่อุณหภูมิหลอดพาริสันเท่ากับ 190°C อุณหภูมิแม่พิมพ์เป่า 30°C โดยใช้แรงดันเป่า 1 MPa ดังแสดงในภาพที่ 76 เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักหลอดพาริสันที่เท่ากัน แต่มีความหนาผนัง และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลอดพาริสันแตกต่างกัน จากผลการวิเคราะห์พบว่าหลอดพาริสันที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่มีค่าความหนาผนังของชิ้นงานช่วงไหล่และส่วนฐานขวดที่น้อยกว่าหลอดพาริสันที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก แต่ชิ้นงานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางหลอดพาริสันที่ใหญ่มีค่าความหนาผนังตลอดช่วงความยาวขวดที่มากกว่า ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากช่วงคอขวดของหลอดพาริสันที่มีขนาดใหญ่กว่าแม่พิมพ์ ดังนั้นเมื่อแม่พิมพ์ประกบหลอดพาริสัน ส่งผลให้เกิดการสูญเสียเนื้อพอลิเมอร์บางส่วนที่ติดไปกับแม่พิมพ์ ทำให้ค่าความหนาผนังส่วนนี้ลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาตลอดความยาวขวดชิ้นงานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางหลอดพาริสันขนาดใหญ่มีค่าความหนาผนังมากกว่า เนื่องจากการยึดตัวของ

กระบวนการเป่าขึ้นรูปนี้ส่วนใหญ่ขยายตัวออกในแนวรัศมี ชิ้นงานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางหลอดพาริสันขนาดใหญ่จึงสามารถขยายตัวออกและติดกับผนังแม่พิมพ์ได้เร็ว หากพิจารณาหลอดพาริสันที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เท่ากัน คือ 48 mm แต่มีความหนาผนังไม่เท่ากัน (1.5 และ 2.5 mm) และน้ำหนักของหลอดพาริสัน (52 และ 86 g) แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานหลังการเป่าขึ้นรูปมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน มีอัตราส่วนการยืดตัวที่เท่ากันตั้งแต่คอขวดจนถึงบริเวณฐานขวด ในขณะที่หากพิจารณาหลอดพาริสันที่มีความหนาผนังที่เท่ากัน มีเส้นผ่านศูนย์กลาง และน้ำหนักไม่เท่ากัน พบว่าช่วงบริเวณคอขวดของหลอดพาริสันขนาดเล็กมีอัตราการยืดตัวที่มากกว่าชิ้นงานขนาดใหญ่ และมีความหนาผนังตลอดทั้งชิ้นงานที่น้อยกว่า และเมื่อพิจารณาความเค้นที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน พบว่าชิ้นงานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางหลอดพาริสันขนาดเล็กมีความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นมากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยมีหลอดพาริสันขนาดใหญ่ เนื่องจากหลอดพาริสันขนาดเล็ก เกิดการยืดตัวในแนวรัศมีที่สูงกว่าดังแสดงในภาพที่ 77



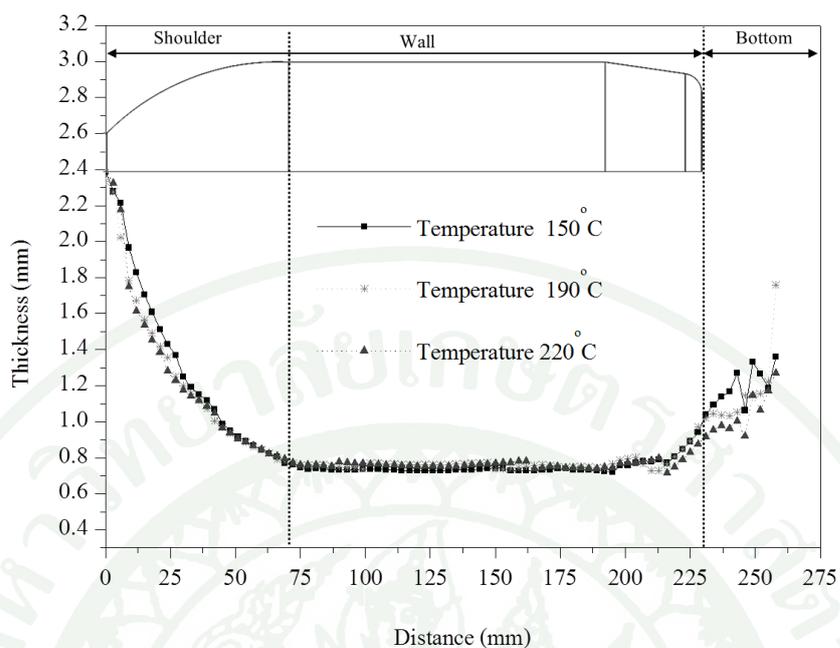
ภาพที่ 76 ผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวความหนาผนังที่ได้จากโปรแกรม B-SIM โดยใช้แบบจำลอง K-BKZ ที่หลอดพาริสันขนาดต่างๆ กัน



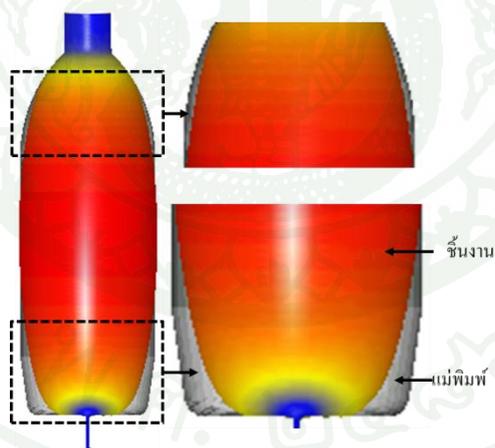
ภาพที่ 77 ผลการวิเคราะห์ความเค้นตึงภายในชิ้นงานที่ได้จากแบบจำลอง K-BKZ เมื่อใช้หลอดพาริสันขนาดต่างๆ กัน

8. อิทธิพลของอุณหภูมิหลอดพาริสันที่มีต่อการกระจายตัวของความหนาผนัง และความเค้นตึงภายในชิ้นงาน

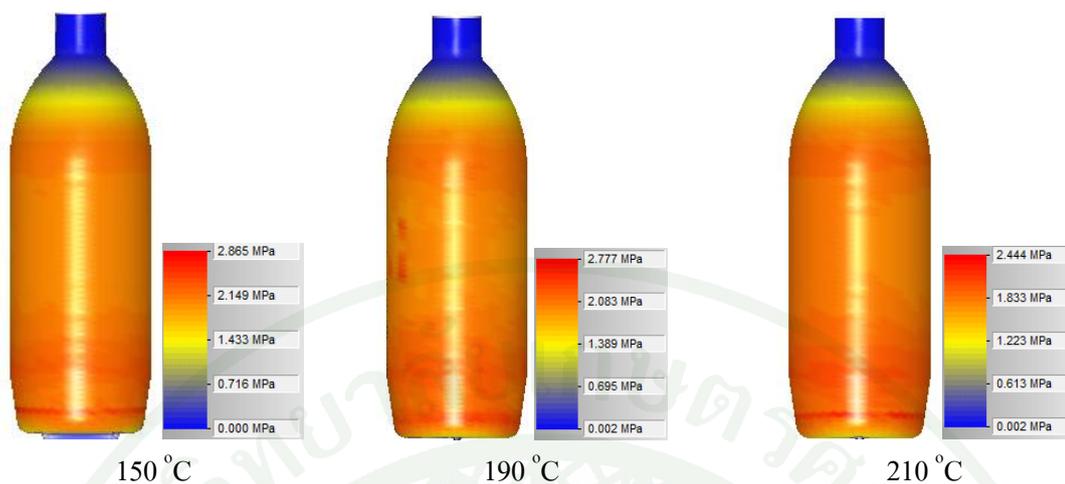
ภาพที่ 78 แสดงผลการกระจายตัวความหนาผนังที่อุณหภูมิหลอดพาริสัน 160°C 190°C และ 220°C ตามลำดับ อุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C แรงดันเป่าเท่ากับ 1 MPa โดยใช้หลอดพาริสันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 28 mm และมีความหนา 2.5 mm จากผลการวิเคราะห์ พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิในช่วงดังกล่าวไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาผนังของชิ้นงาน อย่างไรก็ตาม จากผลการวิเคราะห์ของกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป โดยใช้อุณหภูมิหลอดพาริสัน 150°C พบว่าไม่สามารถเป่าขึ้นรูปชิ้นงานให้เต็มแม่พิมพ์ได้ ดังแสดงในภาพที่ 79 เนื่องจากช่วงอุณหภูมิดังกล่าวสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ยังคงมีการเกี่ยวพันกันอยู่มาก ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่ผ่านได้ยาก และเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ความเค้นตึงดังแสดงในภาพที่ 80 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิหลอดพาริสันในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวไม่ส่งผลต่อการเกิดความเค้นตึงภายในชิ้นงาน



ภาพที่ 78 ผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวความหนาผนังที่ได้จากแบบจำลอง K-BKZ ที่อุณหภูมิหลอดพรีสั่นต่างๆ กัน



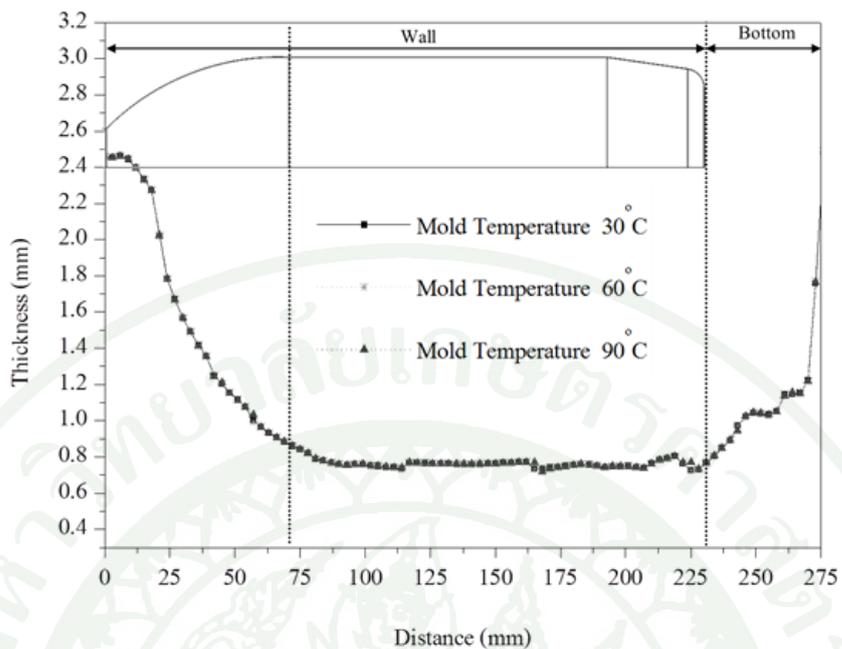
ภาพที่ 79 ปัญหาการเป่าไม่เต็มเบ้าแม่พิมพ์ในกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูปที่อุณหภูมิหลอดพรีสั่นเท่ากับ 150 °C



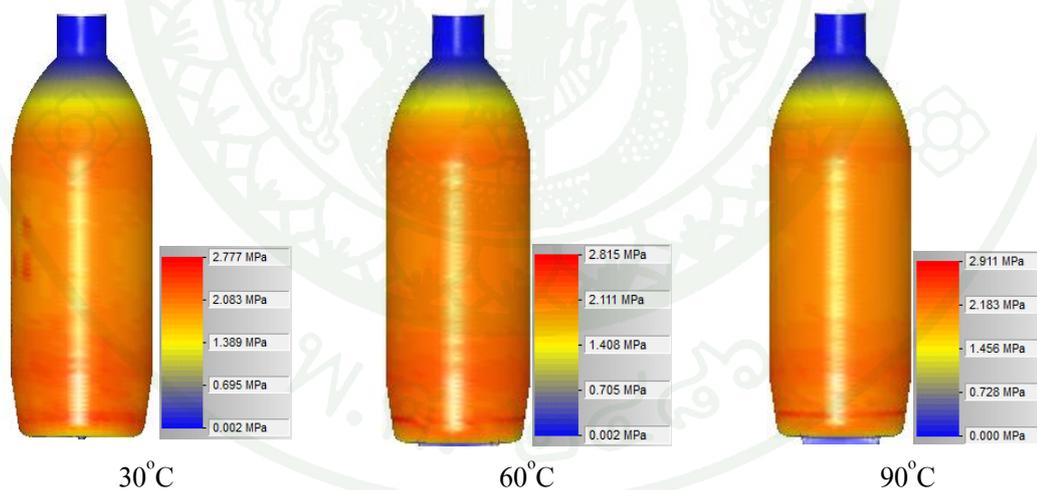
ภาพที่ 80 การวิเคราะห์ความเค้นตัก้างภายในชิ้นงานจากแบบจำลอง K-BKZ เมื่อใช้อุณหภูมิหลอดพาริสันต่างๆ กัน

9. อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์เป่าที่มีต่อการกระจายตัวความหนาผนัง และการเกิดความเค้นตัก้างภายในชิ้นงาน

ภาพที่ 81 และ 82 แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนัง และความเค้นตัก้างที่เกิดขึ้นโดยใช้แบบจำลอง K-BKZ เมื่ออุณหภูมิหลอดพาริสันเท่ากับ 190°C และใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์เป่า 30°C 60°C และ 90°C ตามลำดับ และใช้หลอดพาริสันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 28 mm ความหนาผนัง 2.5 mm ที่แรงดันเป่าเท่ากับ 1 MPa จากผลการวิเคราะห์พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิของแม่พิมพ์เป่าในกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูปไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาผนัง รวมถึงความเค้นตัก้างที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน



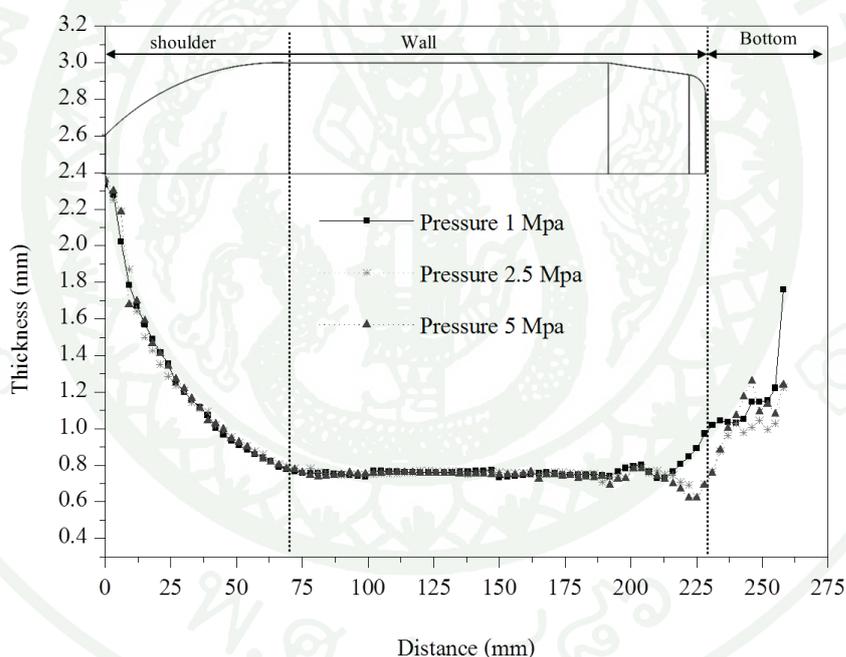
ภาพที่ 81 ผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวความหนาผนังที่ได้จากแบบจำลอง K-BKZ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์เป่าต่างๆ กัน



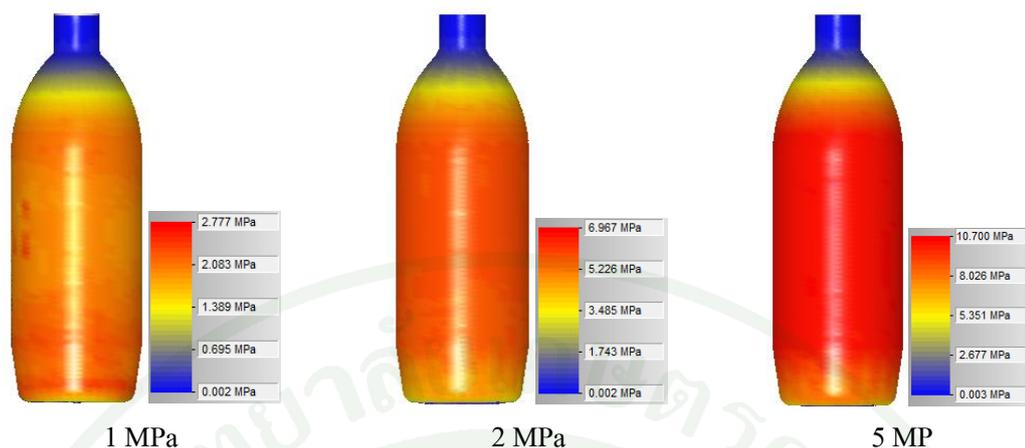
ภาพที่ 82 การวิเคราะห์ความเค้นตึงภายในชิ้นงานจากแบบจำลอง K-BKZ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์เป่าต่างๆ กัน

10. อิทธิพลของแรงดันเป่าที่มีต่อการกระจายตัวของความหนาผนัง และการเกิดความเค้นตกค้างภายในชิ้นงาน

จากผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของความหนาผนังของ และความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานภายหลังจากการเป่าขึ้นรูปที่แรงดันเป่าเท่ากับ 1 MPa 2.5 MPa และ 5 MPa ตามลำดับ ที่อุณหภูมิหลอดพาริสัน 190°C อุณหภูมิแม่พิมพ์เป่า 30°C โดยใช้หลอดพาริสันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 28 mm และความหนา 2.5 mm ดังแสดงในภาพที่ 83 และ 84 พบว่า การเพิ่มแรงดันเป่าในช่วงดังกล่าวไม่ส่งผลต่อการกระจายตัวของความหนาผนังของชิ้นงาน แต่หากพิจารณาว่าความเค้นที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน แสดงให้เห็นว่าเมื่อแรงดันเป่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น

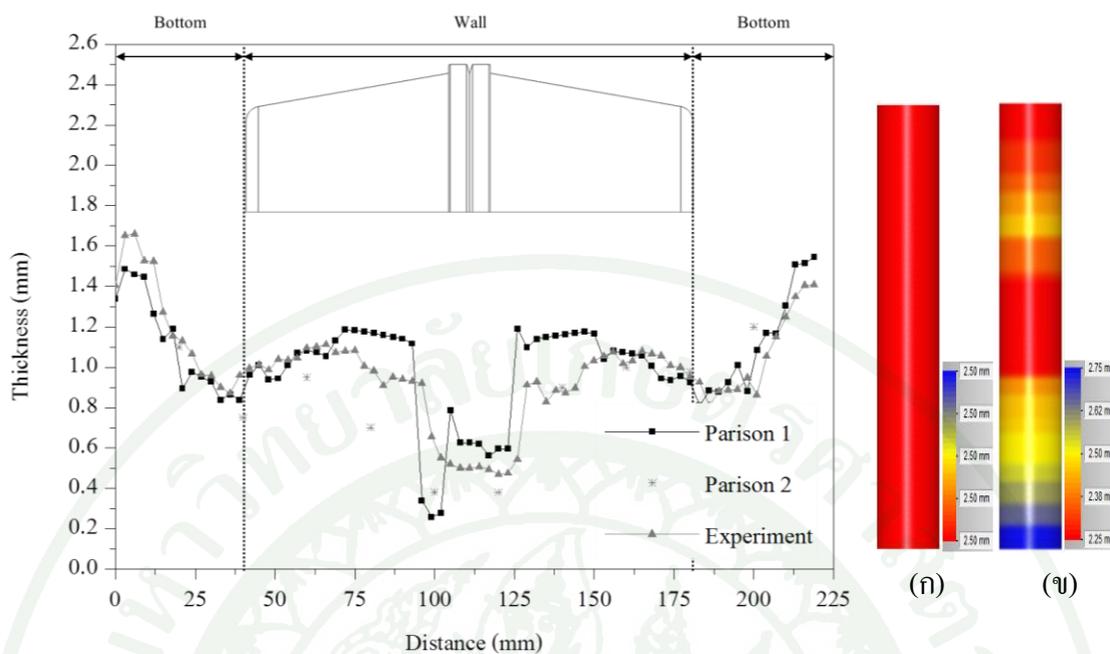


ภาพที่ 83 ผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของความหนาผนังที่ได้จากแบบจำลอง K-BKZ ที่แรงดันเป่าต่างๆ กัน



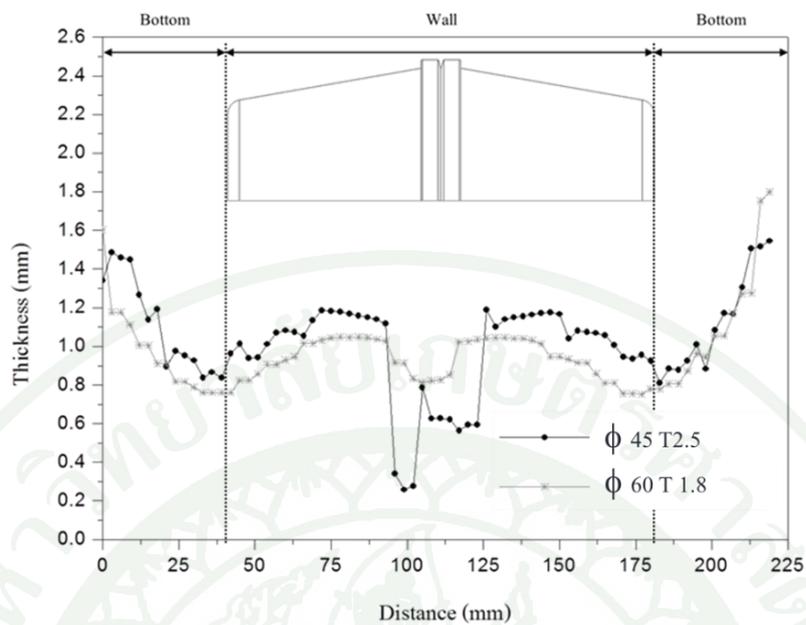
ภาพที่ 84 การวิเคราะห์ความเค้นตึงภายในชิ้นงานที่ได้จากแบบจำลอง K-BKZ เมื่อใช้แรงดัน เป่าต่างๆ กัน

จากผลการวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า การใช้แบบจำลอง K-BKZ ในการวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานขวดในกระบวนการอัด-รีดเป่าขึ้นรูป มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบจริง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ประยุกต์ใช้แบบจำลอง K-BKZ ศึกษาเพิ่มเติมสำหรับชิ้นงานที่มีความซับซ้อนมากขึ้น โดยทดสอบการเป่าขึ้นรูปผลิตภัณฑ์กระถางและเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้กำหนดความหนาของหลอดพาริสันคงที่ และความหนาหลอดพาริสันที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง ที่อุณหภูมิหลอดพาริสัน 200°C เมื่อหลอดพาริสันมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 mm ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง K-BKZ ของทั้ง 2 เงื่อนไข ให้ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนังที่สอดคล้อง และใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดจริง แต่เมื่อพิจารณาถึงความแม่นยำของความหนาผนังชิ้นงานที่วิเคราะห์ได้ พบว่า ในเงื่อนไขของการกำหนดให้หลอดพาริสันมีหน้าตัดไม่คงที่ตลอดความยาว ซึ่งมีความสอดคล้องกับขนาดหลอดพาริสันจริงให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดความผนังของชิ้นงานที่เกิดขึ้นจริง ดังแสดงในภาพที่ 85



ภาพที่ 85 ผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวความหนาผนังที่ได้จากโปรแกรม B-SIM โดยใช้แบบจำลอง K-BKZ เมื่อกำหนดให้ (ก) หลอดพาริสันมีหน้าตัดคงที่ และ (ข) หลอดพาริสันมีหน้าตัดไม่คงที่ตลอดความยาว

จากผลการวิเคราะห์ความหนาผนังของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูปขวด แสดงให้เห็นว่าเมื่อหลอดพาริสันมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มมากขึ้น สามารถทำให้ชิ้นงานมีการกระจายตัวความหนาผนังที่สม่ำเสมอขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทดสอบกับผลิตภัณฑ์กระถางที่มีความซับซ้อน โดยใช้อุณหภูมิหลอดพาริสัน 200°C และเปรียบเทียบหลอดพาริสันที่ปริมาตรเท่ากัน พบว่า การเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดพาริสันส่งผลให้ผลิตภัณฑ์กระถางมีความหนาผนังสม่ำเสมอมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 86



ภาพที่ 86 ผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวความหนาผนังที่ได้จากแบบจำลอง K-BKZ เมื่อเปรียบเทียบขนาดของหลอดพริสันที่เส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ กัน แต่มีปริมาตรเท่ากัน

สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพล และปัจจัยในกระบวนการเป่าขึ้นรูป ซึ่งได้แก่กระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูป และกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูปที่มีต่อการกระจายตัวความหนาผนัง และความเค้นตกค้างของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการเป่าขึ้นรูป โดยเปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการวิเคราะห์ทางวิศวกรรม โดยปัจจัยสำคัญที่ได้ศึกษาสำหรับกระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูป ได้แก่ อุณหภูมิ ขนาดของหลอดพรีฟอร์ม ความเร็วการเคลื่อนที่ของแท่งยึด รวมถึงระยะการเคลื่อนที่ของแท่งยึด และปัจจัยสำคัญที่ได้ศึกษาในกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป ได้แก่ ขนาดและอุณหภูมิหลอดพรีสตัน อุณหภูมิแม่พิมพ์ รวมถึงแรงดันเป่า โดยจากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

จากผลการวิเคราะห์ในกระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูปแสดงให้เห็นว่า อิทธิพลของอุณหภูมิ และเวลาการเคลื่อนที่ของแท่งยึดไม่ส่งผลต่อการกระจายตัวความหนาผนังมากนัก ในขณะที่การเพิ่มขนาดของหลอดพรีฟอร์มส่งผลให้ชิ้นงานมีการกระจายตัวความหนาผนังที่สม่ำเสมอมากขึ้น และผลจากการศึกษาอิทธิพล ของปัจจัยในกระบวนการเป่าขึ้นรูปที่มีผลต่อการเกิดความเค้นตกค้างของชิ้นงานพอลิเมอร์ พบว่า ขนาดของหลอดพรีฟอร์ม และระยะการเคลื่อนที่ของแท่งยึดที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความเค้นตกค้างในชิ้นงานลดลง

ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูปแสดงให้เห็นว่า หลอดพรีสตันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มากส่งผลให้มีการกระจายตัวความหนาผนังที่สม่ำเสมอ ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิหลอดพรีฟอร์ม อุณหภูมิแม่พิมพ์ และแรงดันเป่าไม่ส่งผลต่อการกระจายตัวความหนาผนังและจากผลการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการเป่าขึ้นรูปที่มีผลต่อการเกิดความเค้นตกค้าง จากการทดสอบ พบว่า การเพิ่มขนาดของหลอดพรีฟอร์มส่งผลให้ความเค้นตกค้างในชิ้นงานลดลง แต่การเพิ่มแรงดันเป่าทำให้มีความเค้นตกค้างเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิหลอดพรีฟอร์ม และอุณหภูมิแม่พิมพ์ ไม่ส่งผลต่อการเกิดความเค้นตกค้าง

เมื่อเปรียบเทียบแบบจำลอง Mooney กับแบบจำลอง K-BKZ แสดงให้เห็นว่า แบบจำลอง Mooney Rivlin สามารถวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนัง และอธิบายพฤติกรรมรูปร่างของวัสดุ PET ในกระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูปได้ดีกว่าแบบจำลอง K-BKZ ในขณะที่ผลจากวิเคราะห์ในกระบวนการอัดรีด-เป่าขึ้นรูป แสดงให้เห็นว่า แบบจำลอง K-BKZ สามารถวิเคราะห์การกระจายตัวความหนาผนังได้แม่นยำกว่าแบบจำลอง Mooney Rivlin

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

นเรศ อินต๊ะวงศ์. 2552. การออกแบบและจัดสร้างเครื่องอัดรีดพอลิเมอร์แบบเกลียวหนอนเดี่ยวเพื่อรีไซเคิลแผ่นพลาสติกฟิล์ม. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาลัยเทคโนโลยีภาคพายัพ, เชียงใหม่.

ศิริวัฒน์ เกิดสกุล. 2546. การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จากสมการคอนสตีติวทีฟของพียูทีสำหรับการจำลองกระบวนการฉีดเป่าแบบดิ่งยัด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์, เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร และ มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อรุณยา. 2548. วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน. สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, กรุงเทพฯ.

อริสรา ชัยกิตติรัตน์, จุฬาลักษณ์ คำไม้ และ ศิริวัฒน์ เกิดสกุล. 2546. การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของ PET ด้วยพฤติกรรมแบบไฮเปอร์อีลาสติกสำหรับการจำลองกระบวนการฉีดเป่าแบบดิ่งยัด, ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17. ปราจีนบุรี.

Beaumont, J.P. 2004. **Runner and Gating Design Handbook**. HANSER Publishers, New York.

Belcher, S.L. 2011. **Applied Plastics Engineering Handbook**. William Andrew, Chadds ford.

Bordival, M., Y.Le. Maoult and F.M. Schmidt. 2004. Optimization of preform temperature distribution for the stretch-blow molding of PET bottles. **Polymer Engineering and Science** 783-793.

Boyce, M.C., and E.M. Arruda. 2000. Constitutive models of rubber elasticity: **A Review. Rubber Chemistry and Technology**. 73: 504-523.

Brandau, O. 1998. **Stretch Blow Molding Handbook**. 2nd ed. William Andrew, Waltham.

Crawford, R.J. 1987. **Plastic Engineering**. 2nd ed. Pergamon Press, New York.

Hibbitt, 2002. **CAE User's Manual**. Karlsson & Sorensen.

Hugener, B. 2009. **Deverloping a Low Pressure Blow Molding machine for Demonstration and Production of Plastic Bottle**. Master thesis of engineering, Masser University.

Khayat, R.E. and A. Derdouri. 1995. Stretch and inflation of hyperelastic membranes as applied to blow molding. **Polymer Engineering And Science** 35: 1852-1863.

Lim, L.M., R. Auras and M. Rubino. 2008, Processing technologies for poly(lactic acid). **Progress in Polymer Science** 33: 820–852.

Marckmann, G., E. Verron and B. Peseux. 2001. Finite element analysis of blow molding and thermoforming using a dynamic explicit procedure. **Polymer Engineering And Science** 41: 426-439.

Miller, K. 2004. **Testing Elastomers for Hyperelastic Material Models in Finite Element Analysis**. Available Source: <http://www.axelproducts.com/pages/hyperelastic.html>, Mar 21, 2012.

MSC.Software. 2010. **Nonlinear Finite Element Analysis of Elastomers**. Available Source: <http://www.mscsoftware.com>, Mar 21, 2012.

Osswald, T., A.S. Turng and P.J. Gramann. 2007. **Injection Molding Handbook**. HANSER Publishers, New York.

- Rosato, D.V. 2004. **Blow Molding Handbook**. 2nd ed. HANSER Publishers, New York.
- Schmidt, F.M., J.F. Agassant, M. Bellet and L. Desoutter. 1996. Viscoelastic simulation of PET stretch/blow molding process. **Non-Newtonian Fluid Mechanics** 16: 19-42.
- Schmidt, L.R., and J.F. Carley. 1975. Biaxial Stretching of heat-softened plastic sheet experiments and results. **Polymer Engineering & Science** 15(1): 51-62.
- Shen, Y., K. Chandrashekhara, W. Breig and L.R. Oliver. 2004. Neural network based constitutive model for rubber material. **Rubber Chemistry and Technology** 77(2): 257-277.
- Tan, C.W., Y. Salomeia, C.G. Armstrong, M. Picard, N. Billon, E.M.A. Harkin-Jones, P.J. Martin and K. Maheshwari. 2008. Modelling of the injection stretch blow moulding of PET containers via a pressure-volume-time (PV-t) thermodynamic relationship. **International Journal of Material Forming** 799–802.
- Tanifuji, S.I., J.I. Takimoto and K. Koyama. 2000. Overall numerical simulation of extrusion blow molding process. **Polymer Engineering And Science** 40: 1878-1893.
- Bochsler Creative Solutions. 2008. **PP/PE Properties**. Available Source: http://www.matraplast.com/twinwall/specs/pepp_properties.html, April 27,2012.
- Vennix, R. 2009. **Mechanical and physical and properties of materials**. Available Source: <http://www.matbase.com/material/polymers/engineering>, April 27,2012.



ภาคผนวก



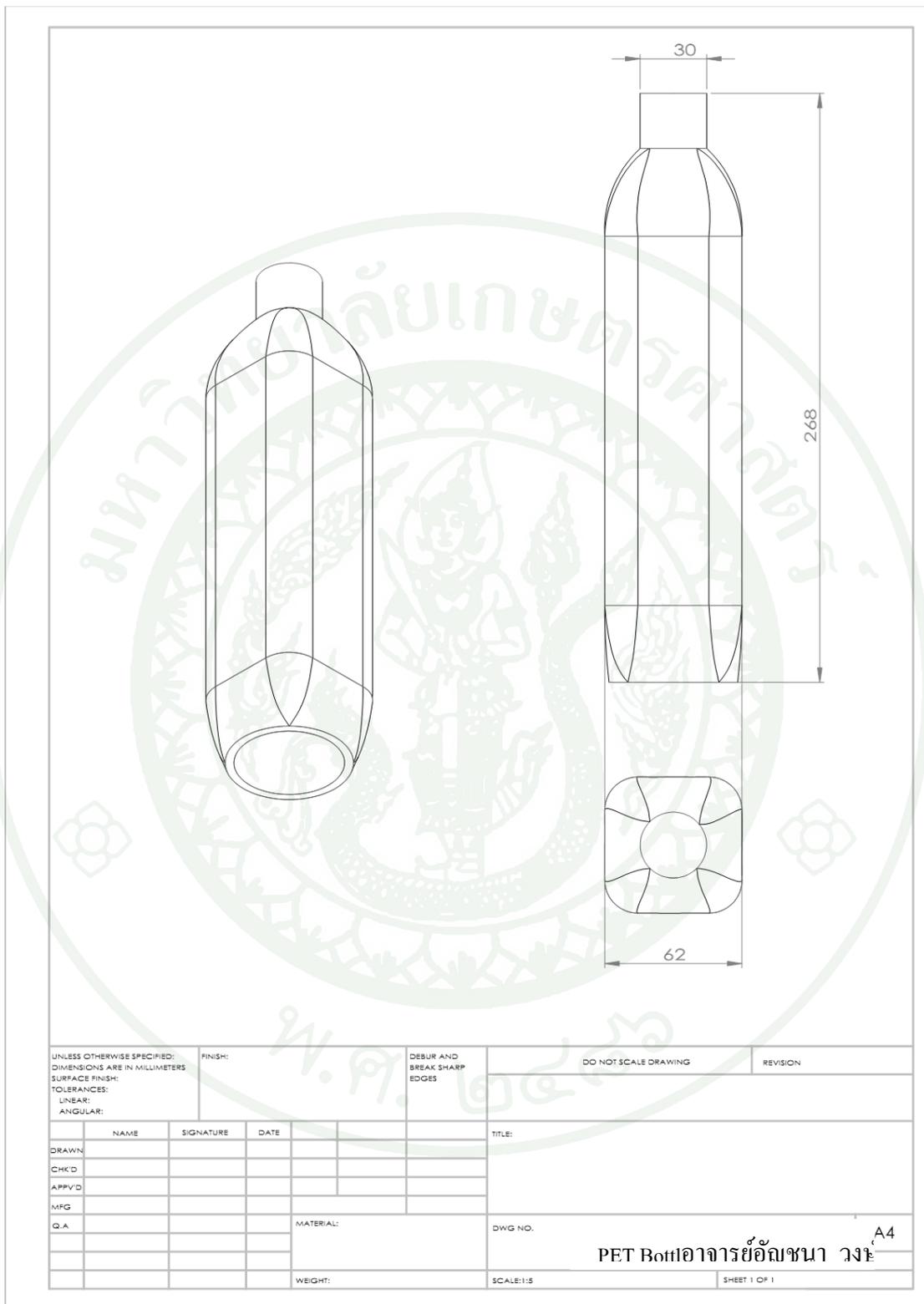
Strain	Stress	λ_1	λ_2	λ_3	I_1	I_2	I_3	U	W (ex)	I (Neo)	W(Mooney)
0	-9.67E-08	1	1	1	3	3	1	0	0	0	0
0.010825779	0.085814488	1.010825779	0.994630667	0.994630667	3.000349082	3.000346585	1	0.000464504	0.000464504	0.000349082	0.000500561
0.021510658	0.168974042	1.021510658	0.989415134	0.989415134	3.001368638	3.001349356	1	0.001361192	0.001825696	0.001368638	0.001957154
0.032131955	0.250144907	1.032131955	0.984311112	0.984311112	3.003033103	3.002969819	1	0.002225793	0.00405149	0.003033103	0.004325687
0.0425528	0.328356103	1.0425528	0.979379413	0.979379413	3.005284408	3.00513961	1	0.003014235	0.007065724	0.005284408	0.00751682
0.052961756	0.405085658	1.052961756	0.974526607	0.974526607	3.008132677	3.007857607	1	0.003817182	0.010882906	0.008132677	0.011538733
0.063165617	0.478971101	1.063165617	0.969838764	0.969838764	3.011495584	3.011035566	1	0.004510396	0.015393302	0.011495584	0.016269687
0.073267488	0.550836612	1.073267488	0.965263786	0.965263786	3.015371455	3.014663553	1	0.005201492	0.020594794	0.015371455	0.02170259
0.08336318	0.621401911	1.08336318	0.960755688	0.960755688	3.019778764	3.018750417	1	0.00591728	0.026512074	0.019778764	0.027858552
0.093263013	0.689395554	1.093263013	0.956395827	0.956395827	3.02460997	3.023189268	1	0.006488338	0.033000412	0.02460997	0.034583296
0.103066837	0.755572485	1.103066837	0.952136219	0.952136219	3.029883207	3.027990836	1	0.007083106	0.040083518	0.029883207	0.041898702
0.112867597	0.820593675	1.112867597	0.947934329	0.947934329	3.035633272	3.033180297	1	0.007723813	0.047807331	0.035633272	0.049489355
0.122480961	0.883284542	1.122480961	0.943866361	0.943866361	3.041730923	3.038635702	1	0.008190001	0.05597332	0.041730923	0.058253536
0.132097165	0.944932078	1.132097165	0.93984914	0.93984914	3.048276805	3.044442205	1	0.008790252	0.064787584	0.048276805	0.067247191
0.141620822	1.004954445	1.141620822	0.935920714	0.935920714	3.055193268	3.050525813	1	0.009285025	0.074072609	0.055193268	0.076720733
0.150963062	1.062849945	1.150963062	0.932114592	0.932114592	3.062391197	3.056804923	1	0.009658962	0.083731571	0.062391197	0.086550276
0.160218746	1.119262221	1.160218746	0.92838916	0.92838916	3.069920403	3.06332019	1	0.01009847	0.093830042	0.069920403	0.096802256
0.16947852	1.174769924	1.16947852	0.924706425	0.924706425	3.077843954	3.07012222	1	0.01062111	0.104451151	0.077843954	0.107560296
0.178565177	1.228349123	1.178565177	0.921134816	0.921134816	3.085994575	3.07706453	1	0.010918159	0.115369311	0.085994575	0.118595646
0.187571999	1.280599458	1.187571999	0.917635117	0.917635117	3.09443567	3.084199289	1	0.011298827	0.126668137	0.09443567	0.129993112
0.196582057	1.332026243	1.196582057	0.914173772	0.914173772	3.103235989	3.091581477	1	0.011769955	0.138438092	0.103235989	0.141843745
0.20542779	1.38170757	1.20542779	0.910813377	0.910813377	3.112218171	3.099060227	1	0.012002482	0.150440574	0.112218171	0.153907527
0.214194992	1.430170002	1.214194992	0.907519115	0.907519115	3.121451367	3.106692027	1	0.012326149	0.162766724	0.121451367	0.166276715
0.222969456	1.477908762	1.222969456	0.904257657	0.904257657	3.131018109	3.114542617	1	0.012758416	0.17552514	0.131018109	0.179060468
0.231585815	1.524054838	1.231585815	0.901088944	0.901088944	3.140726188	3.122452757	1	0.012932998	0.188458138	0.140726188	0.192001085
0.240127622	1.569095975	1.240127622	0.897980301	0.897980301	3.15065376	3.130485596	1	0.013210549	0.201668686	0.15065376	0.205202445
0.248680217	1.613500723	1.248680217	0.894899745	0.894899745	3.160893392	3.138714035	1	0.01360973	0.215278417	0.160893392	0.218786506
0.257077854	1.656436246	1.257077854	0.891905644	0.891905644	3.171236087	3.146969082	1	0.013729872	0.229008289	0.171236087	0.232475419
0.265487306	1.698782334	1.265487306	0.888937246	0.888937246	3.181876977	3.155405552	1	0.014107775	0.243116063	0.181876977	0.246526917
0.273825791	1.740138928	1.273825791	0.88602297	0.88602297	3.192705553	3.163934208	1	0.014337697	0.25745376	0.192705553	0.260794155
0.282016579	1.780159723	1.282016579	0.88318804	0.88318804	3.203608737	3.172466096	1	0.01441701	0.27187077	0.203608737	0.275128204
0.290139999	1.819270097	1.290139999	0.880403134	0.880403134	3.214680574	3.181075012	1	0.01461984	0.28649061	0.214680574	0.289652821
0.298274549	1.857863177	1.298274549	0.877640646	0.877640646	3.226023011	3.189838941	1	0.014955912	0.301446522	0.226023011	0.304501014
0.306269182	1.89524469	1.306269182	0.874950854	0.874950854	3.237417171	3.198588321	1	0.01500236	0.316448882	0.237417171	0.319386006
0.314274903	1.932142681	1.314274903	0.872281964	0.872281964	3.249070169	3.207481826	1	0.015320498	0.33176938	0.249070169	0.334578158
0.322219577	1.968238283	1.322219577	0.869657423	0.869657423	3.260872678	3.216434946	1	0.015493628	0.347263008	0.260872678	0.349934331
0.330026579	2.003211054	1.330026579	0.867101305	0.867101305	3.272700048	3.225353646	1	0.015502556	0.362765564	0.272700048	0.365292639
0.33784508	2.037749418	1.33784508	0.864563879	0.864563879	3.28477086	3.234402609	1	0.015797127	0.378562691	0.28477086	0.380936836
0.345529949	2.071231453	1.345529949	0.862091406	0.862091406	3.296854027	3.243408504	1	0.01578849	0.394351181	0.296854027	0.396567373
0.35323102	2.104328419	1.35323102	0.859634878	0.859634878	3.30917844	3.252541839	1	0.016078142	0.410429322	0.30917844	0.412480286

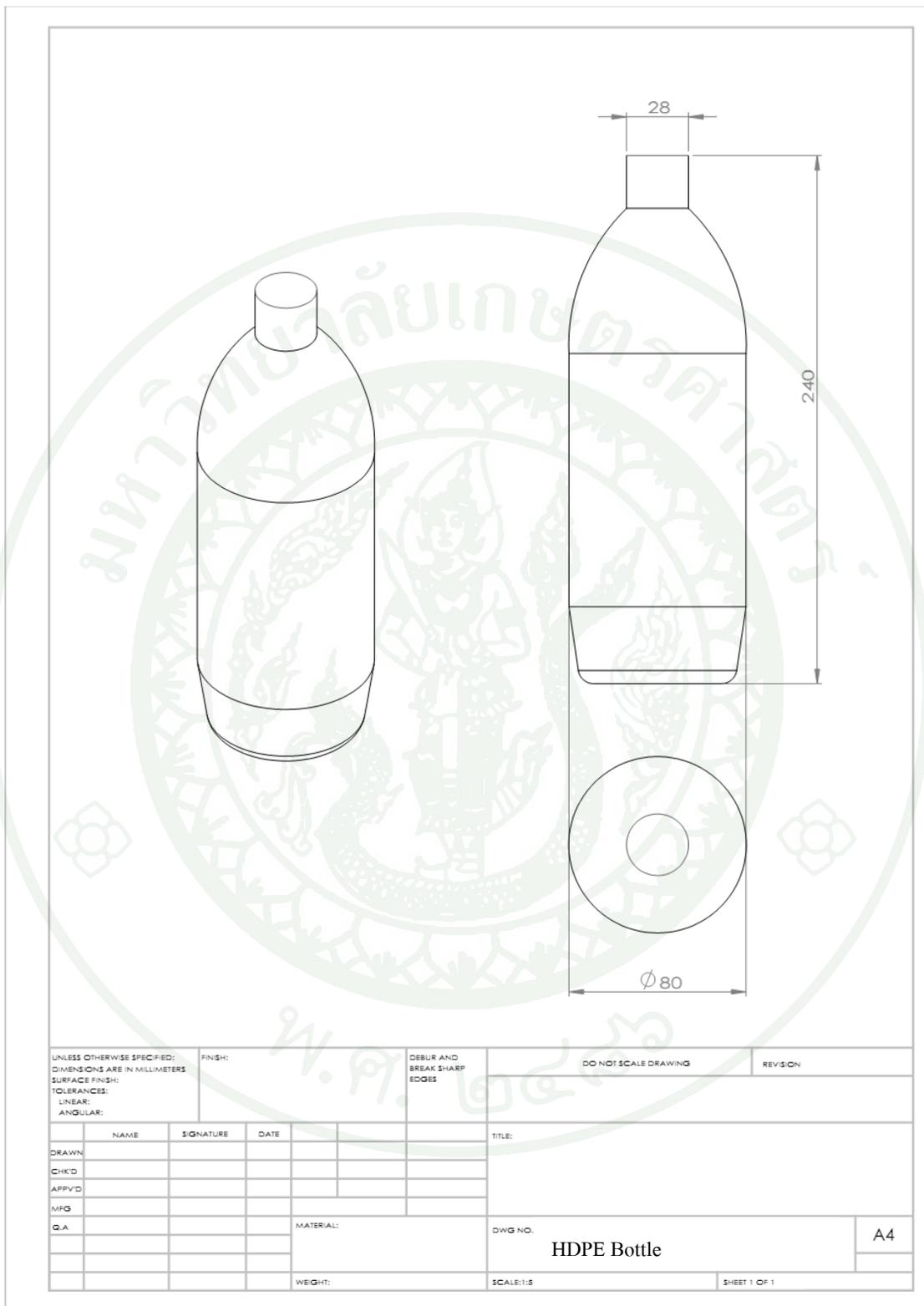
Strain	Stress	λ_1	λ_2	λ_3	I1	I2	I3	U	W (ex)	I (Neo)	W(Mooney)
0.360871705	2.136722726	1.360871705	0.857218249	0.857218249	3.321618049	3.261708436	1	0.016202268	0.42663159	0.321618049	0.428512391
0.368381464	2.168139202	1.368381464	0.85486278	0.85486278	3.334048576	3.270817497	1	0.016164238	0.442795828	0.334048576	0.444503961
0.375836827	2.198920718	1.375836827	0.852543475	0.852543475	3.346587729	3.279956051	1	0.016279008	0.459074836	0.346587729	0.460606862
0.383306544	2.229361498	1.383306544	0.850238535	0.850238535	3.359348126	3.289205545	1	0.016539007	0.475613844	0.359348126	0.476965363
0.390650309	2.258905546	1.390650309	0.847990587	0.847990587	3.372084355	3.298388222	1	0.016480389	0.492094233	0.372084355	0.493264926
0.397940536	2.287864853	1.397940536	0.845776572	0.845776572	3.384913761	3.307589539	1	0.016573494	0.508667727	0.384913761	0.509656212
0.405248351	2.316531322	1.405248351	0.843574528	0.843574528	3.397958898	3.316896859	1	0.016824038	0.525491765	0.397958898	0.526295497
0.412434101	2.344371303	1.412434101	0.841425952	0.841425952	3.410965355	3.32612885	1	0.016746041	0.542237806	0.410965355	0.542858379
0.419567796	2.37167487	1.419567796	0.839309098	0.839309098	3.424052251	3.33537097	1	0.016821418	0.559059223	0.424052251	0.559497063
0.426719035	2.398717053	1.426719035	0.837202993	0.837202993	3.437344908	3.344711288	1	0.017057106	0.576116329	0.437344908	0.576370636
0.433752617	2.424999486	1.433752617	0.835146928	0.835146928	3.450587351	3.353970182	1	0.016964003	0.593080332	0.450587351	0.593154305
0.440803487	2.451039122	1.440803487	0.83310094	0.83310094	3.464029041	3.363322338	1	0.017190157	0.61027049	0.464029041	0.610164392
0.447738337	2.476355843	1.447738337	0.831103215	0.831103215	3.477411402	3.372588136	1	0.017085372	0.627355862	0.477411402	0.627073837
0.454626188	2.501217584	1.454626188	0.829133188	0.829133188	3.490861033	3.381856162	1	0.017142392	0.644498254	0.490861033	0.644043134
0.461533358	2.525871026	1.461533358	0.827171636	0.827171636	3.504505588	3.39121403	1	0.017361478	0.661859732	0.504505588	0.661233145
0.468393146	2.550085318	1.468393146	0.825237255	0.825237255	3.518211484	3.400569802	1	0.017409992	0.679269724	0.518211484	0.678475393
0.475139978	2.573643733	1.475139978	0.823347903	0.823347903	3.531841492	3.409830764	1	0.01728447	0.696554194	0.531841492	0.695597784
0.481842213	2.596799117	1.481842213	0.821483829	0.821483829	3.545527708	3.419087623	1	0.017326762	0.713880955	0.545527708	0.71266803
0.488563144	2.619776731	1.488563144	0.819627213	0.819627213	3.559397769	3.428426436	1	0.017530123	0.731411078	0.559397769	0.730142413
0.49517637	2.642154233	1.49517637	0.817812582	0.817812582	3.573187214	3.437669479	1	0.017399169	0.748810248	0.573187214	0.747393506
0.501810631	2.664376772	1.501810631	0.816004235	0.816004235	3.587160995	3.44699468	1	0.017602456	0.766412704	0.587160995	0.764851732
0.508400566	2.6862315	1.508400566	0.814219795	0.814219795	3.601180017	3.456308972	1	0.01763008	0.784042784	0.601180017	0.782343175
0.514883599	2.707523127	1.514883599	0.812475677	0.812475677	3.615105768	3.465521289	1	0.017483945	0.801526729	0.615105768	0.79969556
0.521324814	2.728477147	1.521324814	0.810753861	0.810753861	3.629072836	3.474721607	1	0.017507223	0.819033952	0.629072836	0.817077126
0.52778775	2.749305783	1.52778775	0.809037195	0.809037195	3.643217773	3.483996659	1	0.01770128	0.836735232	0.643217773	0.834657686
0.53414676	2.769612274	1.53414676	0.807358731	0.807358731	3.657262523	3.493173419	1	0.017547428	0.85428266	0.657262523	0.85209185
0.54052762	2.789806311	1.54052762	0.805684958	0.805684958	3.671481851	3.502422727	1	0.017736936	0.872019595	0.671481851	0.869720901
0.546806325	2.809503153	1.546806325	0.804048101	0.804048101	3.685596503	3.511566299	1	0.017578206	0.889597802	0.685596503	0.887198829
0.553107167	2.829100294	1.553107167	0.802415461	0.802415461	3.699883016	3.520783647	1	0.017763975	0.907361776	0.699883016	0.904868272
0.559368557	2.848411074	1.559368557	0.800802856	0.800802856	3.714200726	3.529983841	1	0.017774556	0.925136333	0.714200726	0.922555159
0.565590987	2.867444211	1.565590987	0.799209879	0.799209879	3.728548001	3.539166203	1	0.017783255	0.942919587	0.728548001	0.940257685
0.571714756	2.886026272	1.571714756	0.797651405	0.797651405	3.742782803	3.54824073	1	0.017616462	0.96053605	0.742782803	0.957801106
0.577861069	2.904531776	1.577861069	0.796096326	0.796096326	3.757184273	3.55738574	1	0.017795291	0.978331341	0.757184273	0.975529653
0.58396989	2.922784392	1.58396989	0.79455971	0.79455971	3.771610877	3.566511202	1	0.017799016	0.996130356	0.771610877	0.993269005
0.589983084	2.94061874	1.589983084	0.79305804	0.79305804	3.785921225	3.575528558	1	0.01762889	1.013759247	0.785921225	1.010845805
0.596017807	2.958388479	1.596017807	0.791555068	0.791555068	3.800391691	3.584612327	1	0.017799437	1.031558684	0.800391691	1.028599717
0.601959312	2.975761633	1.601959312	0.790085805	0.790085805	3.814744797	3.593588683	1	0.017628891	1.049187575	0.814744797	1.046190508
0.607864962	2.99291344	1.607864962	0.788633487	0.788633487	3.829115291	3.602542742	1	0.017624453	1.066812028	0.829115291	1.063783799
0.613792399	3.010015261	1.613792399	0.787183835	0.787183835	3.843642687	3.611561318	1	0.017790991	1.084603019	0.843642687	1.081550329
0.61962948	3.026748936	1.61962948	0.785764065	0.785764065	3.858049984	3.620472795	1	0.017618541	1.10222156	0.858049984	1.099151527

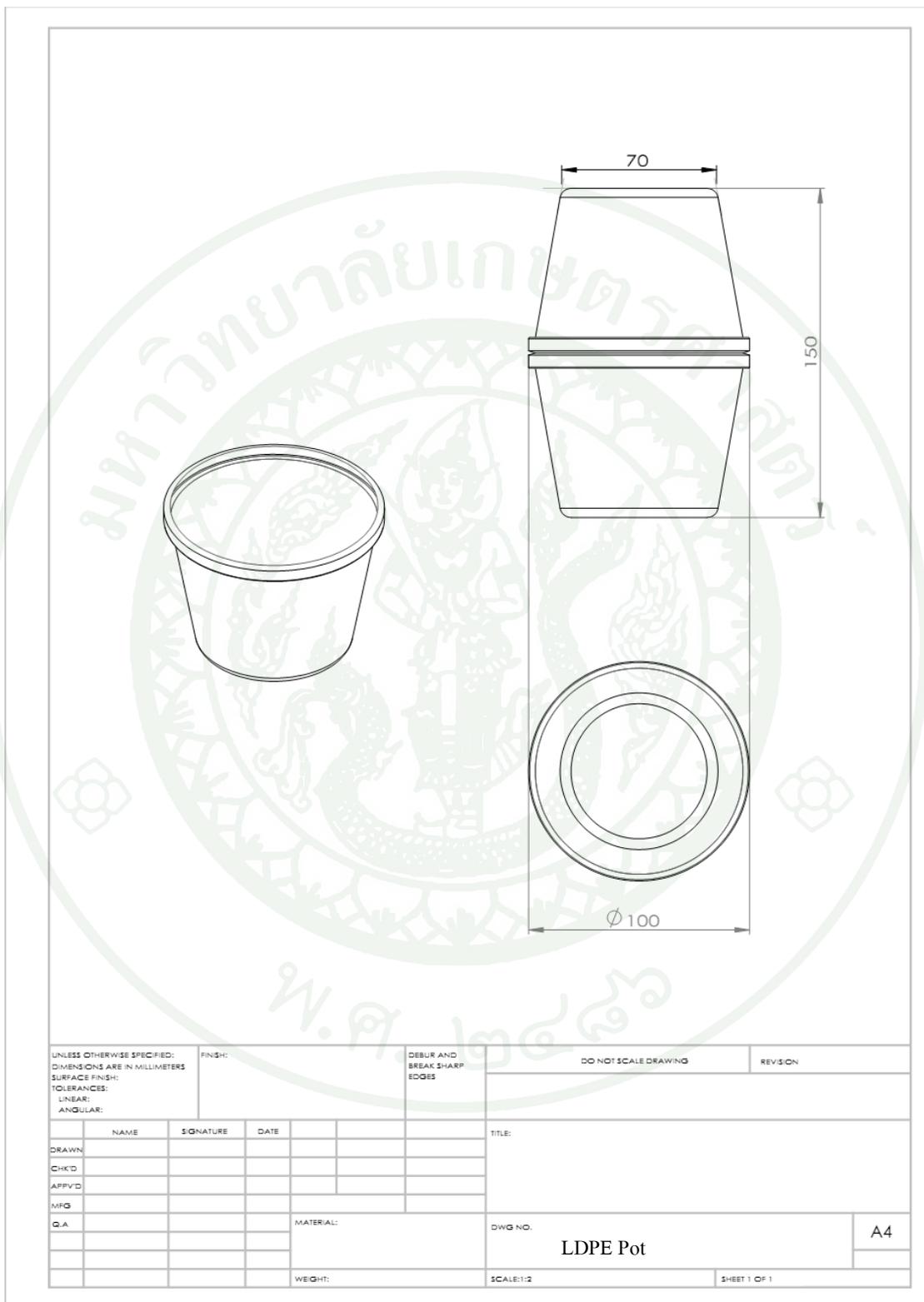
Strain	Stress	λ_1	λ_2	λ_3	I1	I2	I3	U	W (ex)	I (Neo)	W(Mooney)
0.625432742	3.043283323	1.625432742	0.784360109	0.784360109	3.87247316	3.629362093	1	0.017612994	1.119834554	0.87247316	1.116753979
0.631257841	3.059780664	1.631257841	0.782958411	0.782958411	3.88704989	3.638313951	1	0.017775476	1.137610029	0.88704989	1.134525645
0.636993568	3.075930985	1.636993568	0.781585536	0.781585536	3.90149984	3.647156562	1	0.017596383	1.155206413	0.90149984	1.152124943
0.642696531	3.09189859	1.642696531	0.780227638	0.780227638	3.915962226	3.655975915	1	0.017587456	1.172793869	0.915962226	1.169721883
0.648422267	3.107846211	1.648422267	0.778871412	0.778871412	3.930577324	3.664857445	1	0.017749055	1.190542923	0.930577324	1.187487086
0.654060658	3.123467914	1.654060658	0.777542764	0.777542764	3.94506216	3.673629526	1	0.017567293	1.208110216	0.94506216	1.205076774
0.659668005	3.138926541	1.659668005	0.776228151	0.776228151	3.959558172	3.682378583	1	0.017557709	1.225667925	0.959558172	1.222663142
0.665296475	3.154369137	1.665296475	0.774915269	0.774915269	3.974199699	3.691185604	1	0.017710813	1.243378738	0.974199699	1.240409113
0.670841907	3.169514087	1.670841907	0.77362825	0.77362825	3.988714017	3.699886865	1	0.017534332	1.26091307	0.988714017	1.257984321
0.676409738	3.184653428	1.676409738	0.772342463	0.772342463	4.003375369	3.708647091	1	0.017689465	1.278602536	1.003375369	1.275721024
0.68194679	3.199645618	1.68194679	0.77107012	0.77107012	4.018043264	3.717382247	1	0.017675098	1.296277634	1.018043264	1.29344921
0.687399796	3.214351205	1.687399796	0.769823215	0.769823215	4.032573637	3.726007281	1	0.017487782	1.313765415	1.032573637	1.310995178
0.692875894	3.229062898	1.692875894	0.768577099	0.768577099	4.047250305	3.734690986	1	0.017642384	1.331407799	1.047250305	1.32870183
0.698270036	3.243502099	1.698270036	0.767355529	0.767355529	4.06179013	3.743266149	1	0.017456967	1.348864766	1.06179013	1.346227751
0.703634496	3.25781301	1.703634496	0.766146439	0.766146439	4.076331228	3.751814942	1	0.017438022	1.366302789	1.076331228	1.363739828
0.708970824	3.272003156	1.708970824	0.764949343	0.764949343	4.090876271	3.760339241	1	0.01742262	1.383725409	1.090876271	1.381241452
0.714330717	3.286212679	1.714330717	0.763752591	0.763752591	4.105565848	3.768921347	1	0.017575668	1.401301077	1.105565848	1.398901736
0.719610907	3.300171026	1.719610907	0.762579111	0.762579111	4.120115472	3.777395349	1	0.017388679	1.418689755	1.120115472	1.416378829
0.724914222	3.314153204	1.724914222	0.761405919	0.761405919	4.13480702	3.785925721	1	0.017538922	1.436228678	1.13480702	1.434011495
0.730138487	3.327892881	1.730138487	0.760255493	0.760255493	4.149356012	3.794347581	1	0.017349904	1.453578582	1.149356012	1.451458471
0.73533608	3.341531254	1.73533608	0.759116099	0.759116099	4.163905814	3.80274458	1	0.017332476	1.470911058	1.163905814	1.468892055
0.740555915	3.355199123	1.740555915	0.75797697	0.75797697	4.178593066	3.811195501	1	0.017477914	1.488388972	1.178593066	1.486475928
0.745699307	3.368640886	1.745699307	0.756859524	0.756859524	4.193138748	3.819540085	1	0.017291672	1.505680645	1.193138748	1.503876203
0.750816381	3.381990616	1.750816381	0.755752686	0.755752686	4.207682245	3.827858932	1	0.01727174	1.522952385	1.207682245	1.52125998
0.755957647	3.395382406	1.755957647	0.754645491	0.754645491	4.222366893	3.836233946	1	0.017422139	1.540374524	1.222366893	1.538798542
0.761072149	3.408685827	1.761072149	0.753548875	0.753548875	4.237046927	3.844581915	1	0.01739971	1.557774234	1.237046927	1.55631775
0.766111821	3.421778627	1.766111821	0.752472965	0.752472965	4.251582091	3.852823706	1	0.01721165	1.574985884	1.251582091	1.573650577
0.771174782	3.434918163	1.771174782	0.751396711	0.751396711	4.266254144	3.861119357	1	0.017357594	1.592343479	1.266254144	1.591133167
0.776212239	3.447979999	1.776212239	0.750330449	0.750330449	4.280921484	3.86938873	1	0.017336152	1.60967963	1.280921484	1.608596751
0.781176831	3.460843788	1.781176831	0.749284039	0.749284039	4.295444045	3.877553456	1	0.017149746	1.626829376	1.295444045	1.625874903
0.786163823	3.473758617	1.786163823	0.748237302	0.748237302	4.310099324	3.885769814	1	0.017291403	1.644120779	1.310099324	1.643297921
0.791078468	3.486481276	1.791078468	0.747210031	0.747210031	4.32460774	3.893881319	1	0.017103554	1.661224333	1.32460774	1.660533574
0.795968626	3.499137814	1.795968626	0.746192066	0.746192066	4.339108505	3.901966387	1	0.017080391	1.678304724	1.339108505	1.677747573
0.800883023	3.51185635	1.800883023	0.745173236	0.745173236	4.353745965	3.910105424	1	0.017227404	1.695532128	1.353745965	1.695111228
0.805726925	3.524393686	1.805726925	0.744173093	0.744173093	4.368236912	3.918141193	1	0.017041453	1.712573581	1.368236912	1.71228872
0.810593715	3.536993463	1.810593715	0.743172269	0.743172269	4.382859643	3.926228266	1	0.017183144	1.729756725	1.382859643	1.729610082
0.815436935	3.549537344	1.815436935	0.74218029	0.74218029	4.39747443	3.934289302	1	0.017160814	1.746917539	1.39747443	1.746909761
0.820210576	3.561907903	1.820210576	0.741206439	0.741206439	4.411940511	3.942247211	1	0.016973743	1.763891282	1.411940511	1.764021446
0.824961099	3.574227184	1.824961099	0.7402411	0.7402411	4.426396784	3.950178946	1	0.016950187	1.780841469	1.426396784	1.781109749
0.82973496	3.586617502	1.82973496	0.739274808	0.739274808	4.440984506	3.958161945	1	0.017092439	1.797933908	1.440984506	1.798341605

Strain	Stress	λ_1	λ_2	λ_3	I1	I2	I3	U	W (ex)	I (Neo)	W(Mooney)
0.834440993	3.598843894	1.834440993	0.738325939	0.738325939	4.455424142	3.966043462	1	0.016907509	1.814841417	1.455424142	1.815386941
0.839170782	3.611145924	1.839170782	0.737375953	0.737375953	4.469995758	3.973976587	1	0.017050865	1.831892282	1.469995758	1.832576489
0.843877876	3.62340456	1.843877876	0.736434157	0.736434157	4.484556155	3.981883294	1	0.017026855	1.848919137	1.484556155	1.849741286
0.848517973	3.635505713	1.848517973	0.735509288	0.735509288	4.498966521	3.98968872	1	0.016841024	1.865760161	1.498966521	1.866717983
0.853181802	3.647687486	1.853181802	0.734583191	0.734583191	4.513507721	3.997545216	1	0.016983784	1.882743945	1.513507721	1.883837589
0.857823132	3.65983084	1.857823132	0.733665027	0.733665027	4.528035532	4.005374797	1	0.016958302	1.899702247	1.528035532	1.900930272
0.862399117	3.671824759	1.862399117	0.732763151	0.732763151	4.542414142	4.013104769	1	0.016774773	1.91647702	1.542414142	1.917836525
0.866997961	3.683901784	1.866997961	0.731860113	0.731860113	4.556919835	4.020883876	1	0.016913919	1.933390939	1.556919835	1.934881323
0.871577008	3.695951557	1.871577008	0.730964271	0.730964271	4.571418027	4.028639873	1	0.016896348	1.950287287	1.571418027	1.951906484
0.876090627	3.707854907	1.876090627	0.730084441	0.730084441	4.585762622	4.036295083	1	0.016708981	1.966996268	1.585762622	1.96874072
0.880626662	3.719844714	1.880626662	0.729203435	0.729203435	4.60023194	4.043998251	1	0.016846153	1.98384242	1.60023194	1.985710777
0.885099298	3.731695324	1.885099298	0.728337857	0.728337857	4.614551432	4.051603419	1	0.016664013	2.000506434	1.614551432	2.002494772
0.889552428	3.743523766	1.889552428	0.72747911	0.72747911	4.628860089	4.059184862	1	0.016644061	2.017150495	1.628860089	2.019255879
0.894028763	3.755445044	1.894028763	0.726618942	0.726618942	4.643295128	4.066815218	1	0.016783948	2.033934443	1.643295128	2.036154793
0.898441987	3.767230352	1.898441987	0.725773881	0.725773881	4.65757743	4.074347141	1	0.016599626	2.050534069	1.65757743	2.052864866
0.902835819	3.778996999	1.902835819	0.724935456	0.724935456	4.671846984	4.081854906	1	0.016578428	2.067112496	1.671846984	2.069550136
0.90725362	3.790862617	1.90725362	0.724095379	0.724095379	4.686244607	4.089412535	1	0.016721067	2.083833563	1.686244607	2.086375224
0.91165199	3.802712144	1.91165199	0.723261892	0.723261892	4.700628861	4.096945714	1	0.016699676	2.100532329	1.700628861	2.103174804
0.915987886	3.81443003	1.915987886	0.722443055	0.722443055	4.714857515	4.1043804	1	0.016513568	2.117046807	1.714857515	2.119783015
0.920347691	3.826250644	1.920347691	0.7216225	0.7216225	4.729213321	4.111864523	1	0.016655939	2.133702746	1.729213321	2.136530001
0.924646525	3.83794474	1.924646525	0.720816153	0.720816153	4.743416098	4.119252193	1	0.016473552	2.150176298	1.743416098	2.153089014
0.928927352	3.849629476	1.928927352	0.720015862	0.720015862	4.757606413	4.126616947	1	0.016454588	2.166630885	1.757606413	2.16962418
0.933230835	3.861417257	1.933230835	0.719214018	0.719214018	4.771919067	4.134028685	1	0.016592179	2.183223065	1.771919067	2.186292537
0.937474758	3.873083674	1.937474758	0.718425888	0.718425888	4.786079951	4.141345635	1	0.016412313	2.199635378	1.786079951	2.202774962
0.941742471	3.884858645	1.941742471	0.717635947	0.717635947	4.80036653	4.148711336	1	0.016554336	2.216189713	1.80036653	2.219394505
0.945992048	3.896627888	1.945992048	0.716851947	0.716851947	4.81463848	4.156053374	1	0.016534013	2.232732727	1.81463848	2.235987889
0.95018227	3.908277315	1.95018227	0.716081408	0.716081408	4.828756052	4.163300262	1	0.016352143	2.249075869	1.828756052	2.252392864
0.954396208	3.920038576	1.954396208	0.715309008	0.715309008	4.842998492	4.170595512	1	0.016494019	2.265569888	1.842998492	2.268934016
0.95859208	3.93179641	1.95859208	0.714542398	0.714542398	4.857224612	4.177866741	1	0.016472647	2.282042535	1.857224612	2.285447333
0.962771183	3.943555116	1.962771183	0.713781296	0.713781296	4.871438194	4.185116046	1	0.016455953	2.298498488	1.871438194	2.301937297
0.966932514	3.955312512	1.966932514	0.713025842	0.713025842	4.885635218	4.192341538	1	0.016434901	2.314933389	1.885635218	2.318399339
0.9710766	3.967070693	1.9710766	0.712275898	0.712275898	4.899816873	4.199543986	1	0.016415519	2.331348908	1.899816873	2.334834927
0.975163231	3.978715419	1.975163231	0.711538664	0.711538664	4.913844329	4.206653262	1	0.016235748	2.347584656	1.913844329	2.351083384
0.979273418	3.99047809	1.979273418	0.710799484	0.710799484	4.927995077	4.213810157	1	0.016377438	2.363962094	1.927995077	2.367466224
0.983366407	4.002243363	1.983366407	0.710065682	0.710065682	4.94212885	4.22094367	1	0.01635706	2.380319154	1.94212885	2.383821021
0.987403967	4.01390111	1.987403967	0.70934404	0.70934404	4.956112461	4.227986943	1	0.016182832	2.396501986	1.956112461	2.399993864
0.991463879	4.025676409	1.991463879	0.708620616	0.708620616	4.970214736	4.235075529	1	0.016319989	2.412821975	1.970214736	2.416295752
0.995468204	4.037343666	1.995468204	0.707909261	0.707909261	4.984164397	4.242073219	1	0.016143476	2.428965451	1.984164397	2.43241318
0.999456189	4.049016896	1.999456189	0.707202934	0.707202934	4.998097031	4.249048386	1	0.016124142	2.445089594	1.998097031	2.448503006
1.003467928	4.060814699	2.003467928	0.706494528	0.706494528	5.012152776	4.256071124	1	0.016267264	2.461356858	2.012152776	2.46472703









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



1. ค่าความหนาผนังของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูป เมื่อใช้หลอดพรีฟอร์มขนาด 17g ที่อุณหภูมิหลอดพรีฟอร์ม เท่ากับ 80 °C และความเร็วของแท่งยึด 1.92 m/s



Distance	Thickness	Distance	Thickness
0	1.24	140	0.25
10	0.37	150	0.21
20	0.21	160	0.2
30	0.15	170	0.21
40	0.17	180	0.2
50	0.2	190	0.21
60	0.17	200	0.2
70	0.17	210	0.23
80	0.17	220	0.23
90	0.17	230	0.21
100	0.2	240	0.25
110	0.2	250	0.26
120	0.22	260	1.08
130	0.19	270	1.64

2. ค่าความหนาผนังของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูป เมื่อใช้หลอดพรีฟอร์มขนาด 20g ที่อุณหภูมิหลอดพรีฟอร์ม เท่ากับ 80 °C และความเร็วของแท่งยึด 1.92 m/s



Distance	Thickness	Distance	Thickness
0	1.29	140	0.26
10	0.39	150	0.23
20	0.27	160	0.26
30	0.22	170	0.25
40	0.21	180	0.25
50	0.22	190	0.3
60	0.22	200	0.29
70	0.2	210	0.31
80	0.23	220	0.35
90	0.21	230	0.36
100	0.23	240	0.42
110	0.25	250	0.38
120	0.24	260	1.26
130	0.24	270	1.94

3. ค่าความหนาของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูป เมื่อใช้หลอดพรีฟอร์มขนาด 34g ที่อุณหภูมิหลอดพรีฟอร์ม เท่ากับ 80 °C และความเร็วของแท่งยึด 1.92 m/s



Distance	Thickness	Distance	Thickness
0	1.39	140	0.43
10	0.4	150	0.42
20	0.35	160	0.52
30	0.36	170	0.46
40	0.38	180	0.52
50	0.41	190	0.59
60	0.45	200	0.64
70	0.47	210	0.69
80	0.45	220	0.96
90	0.46	230	1.08
100	0.43	240	1.14
110	0.42	250	1.27
120	0.45	260	1.94
130	0.42	270	1.99

4. ค่าความหนาผนังของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูป เมื่อใช้หลอดพรีฟอร์มขนาด 20g ที่อุณหภูมิหลอดพรีฟอร์ม เท่ากับ 85 °C และความเร็วของแท่งยึด 1.92 m/s



Distance	Thickness	Distance	Thickness
0	1.29	140	0.26
10	0.39	150	0.23
20	0.27	160	0.26
30	0.22	170	0.25
40	0.21	180	0.25
50	0.22	190	0.3
60	0.22	200	0.29
70	0.2	210	0.31
80	0.23	220	0.35
90	0.21	230	0.36
100	0.23	240	0.42
110	0.25	250	0.38
120	0.24	260	1.26
130	0.24	270	1.94

5. ค่าความหนาผนังของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูป เมื่อใช้หลอดพรีฟอร์มขนาด 20g ที่อุณหภูมิหลอดพรีฟอร์ม เท่ากับ 90 °C และความเร็วของแท่งยึด 1.92 m/s



Distance	Thickness	Distance	Thickness
0	1.36	140	0.26
10	0.41	150	0.24
20	0.29	160	0.29
30	0.24	170	0.25
40	0.18	180	0.26
50	0.2	190	0.26
60	0.25	200	0.29
70	0.24	210	0.29
80	0.25	220	0.3
90	0.24	230	0.32
100	0.21	240	0.42
110	0.24	250	0.47
120	0.27	260	1.94
130	0.23	270	1.99

6. ค่าความหนาผนังของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูป เมื่อใช้หลอดพรีฟอร์มขนาด 20g ที่อุณหภูมิหลอดพรีฟอร์ม เท่ากับ 80 °C และความเร็วของแท่งยืด 1 m/s



Distance	Thickness	Distance	Thickness
0	1.33	140	0.25
10	0.24	150	0.26
20	0.24	160	0.27
30	0.2	170	0.27
40	0.18	180	0.25
50	0.24	190	0.26
60	0.25	200	0.24
70	0.26	210	0.28
80	0.24	220	0.27
90	0.26	230	0.32
100	0.28	240	0.35
110	0.24	250	0.35
120	0.26	260	1.31
130	0.24	270	1.84

7. ค่าความหนาผนังของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการฉีด-เป่าขึ้นรูป เมื่อใช้หลอดพรีฟอร์มขนาด 20g ที่อุณหภูมิหลอดพรีฟอร์ม เท่ากับ 80 °C และความเร็วของแท่งยึด 1.25 m/s



Distance	Thickness	Distance	Thickness
0	1.34	140	0.26
10	0.28	150	0.24
20	0.26	160	0.25
30	0.31	170	0.24
40	0.26	180	0.27
50	0.23	190	0.26
60	0.25	200	0.28
70	0.26	210	0.26
80	0.31	220	0.29
90	0.29	230	0.33
100	0.26	240	0.31
110	0.28	250	0.38
120	0.29	260	1.29
130	0.28	270	1.87

8. ค่าการกระจายตัวความหนาผนังของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูป เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากัน 28 ที่อุณหภูมิหลอมพาริสัน 190 °C



Distance	Thickness	Distance	Thickness
0	2.21	140	0.56
10	1.76	150	0.57
20	1.4	160	0.57
30	1.1	170	0.58
40	0.96	180	0.63
50	0.85	190	0.67
60	0.83	200	0.67
70	0.67	210	0.71
80	0.58	220	0.71
90	0.5	230	0.7
100	0.56	240	1.83
110	0.57	250	2.12
120	0.56	260	2.1
130	0.54		

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	นายปณัสม์ กาลนิล
วัน เดือน ปี ที่เกิด	12 มิถุนายน 2529
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบุรี
ประวัติการศึกษา	ระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่ปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ทุนการศึกษา	-

