



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การวิเคราะห์ความหนาของพาริสันสำหรับการเป่าขึ้นรูปแบบเอ็กทรูชัน

Parison Thickness Analysis for Extrusion Blow Molding

นามผู้วิจัย นายรวิวัฒน์ รัชต์จ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( รองศาสตราจารย์สัจจาทิพย์ ทศนีย์พันธุ์, M.S. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธำรงค์ พุทธาพิทักษ์ผล, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

( รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

สืบสงวี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การวิเคราะห์ความหนาของพาริสันสำหรับ

การเป่าขึ้นรูปแบบเอ็กทรูชัน

Parison Thickness Analysis for

Extrusion Blow Molding

โดย

นายรวิวัฒน์ รักสัจ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รวีวัฒน์ รัชส์จ 2557: การวิเคราะห์ความหนาของพาริสันสำหรับการเป่าขึ้นรูปแบบ  
เอ็กทรูชัน ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขา  
วิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:  
รองศาสตราจารย์สัจจาทิพย์ ทศนีย์พันธุ์, M.S. 123 หน้า

กระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบเอ็กทรูชันเป็นกรรมวิธีที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานกลวงหรือภาชนะ  
บรรจุของเหลว สายท่อพลาสติกหรือพาริสันถูกเป่าไปสัมผัสแม่พิมพ์แล้วเมื่อเย็นตัวลงจึงได้เป็น  
รูปทรงของชิ้นงานที่ต้องการ การควบคุมความหนาของพาริสันทั่วทั้งหมัดของชิ้นงานจึงมี  
ความสำคัญในการออกแบบผลิตภัณฑ์ให้ได้ชิ้นงานที่แข็งแรงตามต้องการ งานวิจัยนี้ได้  
ทำการศึกษาการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ของกระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบ  
เอ็กทรูชันเพื่อทำนายความหนาของผนังภาชนะ โดยตัวอย่างขวดที่ใช้ผลิตจากวัสดุ HDPE  
แบบจำลองคณิตศาสตร์ของวัสดุชนิดไฮเปอรอีลาสติก และวิสโคอีลาสติกได้นำมาใช้ในการ  
อธิบายพฤติกรรมของพาริสันที่อุณหภูมิสูง การจำลองได้ดำเนินการโดยใช้เงื่อนไขตามสภาวะ  
ของกระบวนการผลิต ได้แก่ ความหนาเริ่มต้นของพาริสัน อุณหภูมิ และความดันเป่า ผลการ  
วิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองวิสโคลาสติกสามารถทำนายความ  
หนาของผนังได้สอดคล้องกับความเป็นจริง โดยใช้ได้ทั้งขบวนการแบบสมมาตรรอบแกน  
และแบบไม่สมมาตร โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 33.17% ในขณะที่แบบจำลองไฮเปอร-  
อีลาสติกให้ผลที่แม่นยำกว่า โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 29.15% อย่างไรก็ตาม ได้พบว่า  
แบบจำลองไฮเปอรอีลาสติกไม่เหมาะสมสำหรับรูปทรงแบบไม่สมมาตร เนื่องจากมีความยุ่งยาก  
ในการปรับตั้งเงื่อนไขเชิงตัวเลข ซึ่งส่งผลให้การคำนวณเกิดการลู่ออกได้ ความเที่ยงตรงของ  
แบบจำลองวิสโคอีลาสติกสามารถพัฒนาให้ดีขึ้นได้ จากค่าพารามิเตอร์ของวัสดุที่ได้จากการ  
ทดสอบแรงดึงที่ควรศึกษาเพิ่มเติม การประยุกต์ใช้ในการคาดคะเนเวลาในการเป่า และการ  
เปลี่ยนความหนาของพาริสัน สามารถทำได้ด้วยวิธีที่ได้นำเสนอ

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Ravivat Rugsaj 2014: Parison Thickness Analysis for Extrusion Blow Molding.  
Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical  
Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor:  
Associate Professor Satjarthip Thusneyapan, M.S. 123 pages.

Extrusion blow molding is a process used to produce hollow workpieces or liquid containers. The parison is blown against the wall of the mold, and set to the required shape as it is cooled. The control of the parison thickness distributed along the body of the container is critical in obtaining the desired strength of the product. In this research, the finite element model (FEM) of the extrusion blow molding process is developed for predicting the wall thickness of containers. The sampled bottles were made from HDPE (High Density Polyethylene). The mathematical model of the hyperelastic and viscoelastic materials are used to describe the behavior of the parison at high temperature. The simulation is then performed by applied process conditions, they are initial parison thickness, temperature and blowing pressure. The finite element analysis (FEA) results show that the viscoelastic model is a good approximation to predict the final wall thickness for both axisymmetric and non-symmetric bottle shapes. The predicted wall thickness from the viscoelastic model is in good comparable with the actual bottle with the average error of 33.17%. While, the hyperelastic model yield better accuracy with the average error 29.15%. However, the hyperelastic model was found not suitable for non-symmetrical shape due to the complexity in setting of the numerical conditions which frequently caused the divergence of the calculation. The accuracy of the viscoelastic model can be improved by obtaining the material parameters by further tensile testing. The application for prediction the blowing time and the variation of the parison thickness were shown possible by using the presented method.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์สัจจาทิพย์ ทัศนียพันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาและให้คำปรึกษา แนะนำ ตรวจสอบ จนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ โดยมีความสมบูรณ์ทั้งทางวิชาการและรูปแบบการนำเสนอผลงานวิจัย

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์อภังค์ พุทธาพิทักษ์ผล ผู้ช่วยศาสตราจารย์เวชพงศ์ ชูติชูเดช และผู้ช่วยศาสตราจารย์ชาคริต สุวรรณจรัส สำหรับคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และจากบริษัทปัญญาวัฒนาพลาสติก จำกัด ภายใต้ชุดโครงการสนับสนุนผู้ประกอบการวิจัยในภาคอุตสาหกรรม ชื่อโครงการ การจำลองการเปลี่ยนแปลงความหนาของพาริสันภายใต้การเป่าขึ้นรูปแบบเอ็กทรูชั่น จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณอาจารย์กัณฑ์กร เขาทอง คุณประพันธ์ ธรรมนนทิกุล คุณคณิต อรรวรรณโณทัย คุณธนวรรษ สุนทรเอกจิต หน่วยปฏิบัติการวิจัยการออกแบบทางกลและผลิตภัณฑ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำหรับคำแนะนำ และความช่วยเหลือในระหว่างการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อฉัฐติวัฒน์ รักสัจ คุณแม่ศลิพร เนตรพุกภณะ น้องสาว ปณิดา รักสัจ และคุณย่าศรีเนตร รักสัจ ที่ให้การส่งเสริม สนับสนุน เป็นกำลังใจให้ จนข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษา

รววิวัฒน์ รักสัจ

มิถุนายน 2557

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(10)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	40
อุปกรณ์	40
วิธีการ	44
ผลการทดลองและวิจารณ์	64
สรุป	111
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	114
ภาคผนวก	119
ภาคผนวก ก สารบัญหัวข้องานวิจัย	120
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	123

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	รายละเอียดของแบบจำลองโครงร่างตาข่ายของพาริสันแบบสมมาตรครึ่งใบและแบบเต็มใบ	48
2	ตัวแปรของสมการอาร์เรเนียสของวัสดุ HDPE ในช่วงอุณหภูมิ 140 ถึง 200°C	49
3	ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกชนิดมูนี่-ริฟลิน ของ HDPE ในช่วงอุณหภูมิ 140 ถึง 200°C	51
4	เสปคตรัมการคลายความเค้นเฉือนของวัสดุชนิด HDPE ที่อุณหภูมิ 150°C	52
5	ตัวแปรของฟังก์ชันเลื่อนเวลาของอุณหภูมิโดยใช้สมการ WLF ของวัสดุ HDPE ในช่วงอุณหภูมิ 140 ถึง 200°C	53
6	ค่าฟังก์ชันเลื่อนเวลาของอุณหภูมิโดยใช้สมการ WLF ของวัสดุ HDPE ในช่วงอุณหภูมิ 140 ถึง 200°C	54
7	ความสัมพันธ์ของโมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นกับเวลาคลายตัวที่อุณหภูมิต่างๆ	55
8	รายละเอียดของแบบจำลองโครงร่างตาข่ายของพาริสันแบบไม่สมมาตรรอบแกน	62
9	ข้อมูลเปรียบเทียบของผลการวิเคราะห์ของแบบจำลอง	83
10	ผลการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนจากความหนาจริงของขวด เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ความหนาของแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก และวิสโคอีลาสติกที่ตำแหน่งต่างๆ	91
11	ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก และวิสโคอีลาสติก	91
12	ข้อมูลของแบบจำลอง FEM ของขวดทดสอบรูปทรงไม่สมมาตร	92
13	ผลการเปรียบเทียบความหนาขวดกับเวลาที่พาริสันเกิดการสัมผัสกับแม่พิมพ์ ณ จุดต่างๆ	98

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
14	ผลเปรียบเทียบอัตราส่วนความหนาที่ความสูงต่างๆ ของพาริสันที่มีความหนา 2.2 ถึง 2.6 mm ตามแนวเส้น $0^\circ$ ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์	103
15	ผลเปรียบเทียบอัตราส่วนความหนาที่ความสูงต่างๆ ของพาริสันที่มีความหนา 2.2 ถึง 2.6 mm ตามแนวเส้น $45^\circ$ ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์	104
16	ผลเปรียบเทียบอัตราส่วนความหนาที่ความสูงต่างๆ ของพาริสันที่มีความหนา 2.2 ถึง 2.6 mm ตามแนวเส้น $90^\circ$ ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์	105

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	รายละเอียดขั้นตอนการเป่าขวด โดยพาริสันในขณะรีดออกจากหัวตาย (ภาพ ก และ ข) แม่พิมพ์เคลื่อนที่มาประกบสายท่อและเป่าลมเข้าภายในสายท่อ (ภาพ ค) และขวดภายหลังแม่พิมพ์เปิดและลำเลียงออกจากเครื่อง (ภาพ ง)	6
2	รายละเอียดของหัวตายที่สามารถโปรแกรมความหนาของพาริสัน	8
3	ลักษณะของหัวตายชนิด Diverging และ Converging	8
4	รายละเอียดของเอลิเมนต์ชนิด 1 มิติลำดับที่หนึ่ง (ก) และลำดับที่สอง (ข)	22
5	รายละเอียดของเอลิเมนต์ชนิด 2 มิติรูปทรงสามเหลี่ยมลำดับที่หนึ่ง (ก) และลำดับที่สอง (ข) และรูปทรงสี่เหลี่ยมลำดับที่หนึ่ง (ค) และลำดับที่สอง (ง)	23
6	รายละเอียดของเอลิเมนต์ชนิด 3 มิติรูปทรงสี่หน้าลำดับที่หนึ่ง (ก) และลำดับที่สอง (ข) และรูปทรงหกหน้าลำดับที่หนึ่ง (ค) และลำดับที่สอง (ง)	24
7	รายละเอียดของเอลิเมนต์ชนิดสมมาตรรอบแกน รูปทรงสามเหลี่ยม (ก) และรูปทรงสี่เหลี่ยม (ข)	24
8	แผนภาพของแบบจำลองแมกซ์เวล	27
9	แผนภาพของแบบจำลองเคลวิน	29
10	แผนภาพของแบบจำลองทั่วไปของแมกซ์เวล	32
11	ขวดทดสอบที่ใช้ในการวิจัย ขนาด (ก) 0.9 ลิตร และ (ข) 1 ลิตร	41
12	เครื่องอัดรีดเป่าขึ้นรูป (ก) ชุดอัดรีด และ (ข) ชุดเป่าขึ้นรูปผลิตภัณฑ์	41
13	แม่พิมพ์ของขวดทดสอบ ขนาด 0.9 ลิตร	42
14	ไมโครมิเตอร์สำหรับวัดความหนาของขวดทดสอบ	42
15	เวอร์เนียร์ชนิดดิจิตอลสำหรับวัดความหนาของขวดทดสอบ	42
16	หน่วยปฏิบัติการวิจัยการออกแบบทางกลและผลิตภัณฑ์ (MPDRL) อาคาร 6 ห้อง 6309 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน	43
17	แสดงตำแหน่งการตัดขวดเพื่อใช้ในการวัดการกระจายตัวของความหนา (ก) ภาพมุมมองด้านข้าง และ (ข) ภาพด้านล่าง	44
18	ภาพ 2 มิติแสดงตำแหน่งของการวัดการกระจายตัวของความหนาในแนวต่างๆ	44

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
19	แบบจำลองพื้นผิวของขวดทดสอบขนาด 0.9 ลิตร (ก) ภาพไอโซเมทริก (ข) ภาพด้านหน้า (ค) ภาพด้านล่าง	45
20	แบบจำลองพื้นผิวของกระบวนการเป่าขวด แสดงทั้งแม่พิมพ์และพาริสัน	46
21	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูป (ก) แบบเต็มใบ และ (ข) แบบสมมาตรครึ่งใบ	48
22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของ HDPE โดยใช้แบบจำลองอาร์เรเนียส ที่อุณหภูมิ 140, 150, 160, 170, 180, 190 และ 200°C	50
23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟังก์ชันเลื่อนเวลาและอุณหภูมิ ( $a_T(T)$ ) ที่คำนวณโดยใช้ตัวแปรจากสมการ WLF ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิ 140 ถึง 200°C	54
24	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นเมื่อเทียบกับเวลา ที่อุณหภูมิ 140, 150, 160, 170, 180, 190 และ 200°C ในช่วง 0 ถึง 300 วินาที	55
25	กราฟของภาพที่ 24 ในช่วงเวลา 0 ถึง 10 วินาที	56
26	กราฟของภาพที่ 24 เมื่อแสดงแบบลอการิทึม ในช่วงเวลา 0 ถึง 100 วินาที	56
27	เงื่อนไขการสัมผัสและการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูป	59
28	ขวดทดสอบแบบรูปทรงไม่สมมาตรรอบแกน ขนาด 1 ลิตร	59
29	แบบ CAD จำลองพื้นผิวของขวดทดสอบแบบไม่สมมาตรรอบแกน (ก) ภาพไอโซเมทริก (ข) ภาพด้านหน้า (ค) ภาพด้านล่าง	60
30	แบบจำลองพื้นผิวของกระบวนการเป่าขวดแบบไม่สมมาตรรอบแกน แสดงทั้งแม่พิมพ์และพาริสัน	61
31	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูปแบบไม่สมมาตรรอบแกน	62
32	ผลการวัดการกระจายตัวของความหนาของขวดทดสอบ (ก) 0° (ข) 45° และ (ค) 90° จากแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์	65

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
33	การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยผลความหนาของขวดทดสอบ ที่ $0^\circ$ , $45^\circ$ และ $90^\circ$ จากแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์	66
34	ผลการวัดการกระจายตัวของความหนาของผนังขวดทดสอบเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์ความสูงของขวด (ก) $0^\circ$ หรือในแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์, (ข) $45^\circ$ จากแนวเส้นแบ่งพิมพ์ และ (ค) $90^\circ$ จากแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์	67
35	ผลการวัดการกระจายตัวของความหนาของฐานขวดทดสอบเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์รัศมีของฐานขวด (ก) $0^\circ$ , (ข) $45^\circ$ และ (ค) $90^\circ$ จากแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์	68
36	ผลการเปรียบเทียบผลการวัดความหนาของผนังขวดทดสอบ ที่ $0^\circ$ , $45^\circ$ และ $90^\circ$ จากแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์กับอัตราส่วนความสูงของขวด	69
37	ผลการเปรียบเทียบผลการวัดความหนาของฐานขวดทดสอบ ที่ $0^\circ$ , $45^\circ$ และ $90^\circ$ จากแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์กับอัตราส่วนรัศมีของฐานขวด	69
38	แผนภาพแสดงการลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์ โดย (ก) แสดงแบบจำลองของแม่พิมพ์และพาริสันเมื่อแม่พิมพ์เริ่มปิด (ข) แสดงรูปทรงของพาริสันเมื่อแม่พิมพ์ปิดแล้ว (ค) แสดงรูปทรงของพาริสันที่ได้ตัดเนื้อพลาสติกส่วนเกิน (pitch-off) แล้วเพื่อนำไปใช้จำลองการเป่าต่อไป	71
39	ผลการจำลองการปิดแม่พิมพ์โดยใช้แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกแบบสมมาตรครึ่งใบ ที่เวลา 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 วินาที	72
40	ผลการจำลองการปิดแม่พิมพ์โดยใช้วัสดุวิสโคอีลาสติกแบบจำลองเต็มใบ ที่เวลา 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 วินาที	73
41	ผลการจำลองการปิดแม่พิมพ์โดยใช้วัสดุวิสโคอีลาสติกแบบจำลองสมมาตรครึ่งใบ ที่เวลา 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 วินาที	74
42	ผลการวิเคราะห์ความหนาของพาริสัน โดยใช้แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกแบบสมมาตรหนึ่งโนส ที่เวลา 0, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4 และ 0.6 วินาที	75

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
43	ผลการวิเคราะห์ FEA ของความหนาขวด โดยใช้วัสดุไฮเปอร์อีลาสติก ที่ตำแหน่ง $0^\circ$ , $45^\circ$ และ $90^\circ$ จากแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์	76
44	กราฟของภาพที่ 43 เป็นเปอร์เซ็นต์ความสูงของผนังขวด จากตำแหน่ง b ถึง c	77
45	กราฟของภาพที่ 43 เป็นเปอร์เซ็นต์รัศมีของฐานขวด จากตำแหน่ง a ถึง b	77
46	ผลการวิเคราะห์ความหนาของพาริสัน โดยใช้วัสดุวิสโคอีลาสติกแบบจำลองเต็มใบ ที่เวลา 0, 0.1, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5 และ 0.6 วินาที	78
47	ผลการวิเคราะห์ความหนาของพาริสัน โดยใช้วัสดุวิสโคอีลาสติกแบบจำลองสมมาตรครึ่งใบ ที่เวลา 0, 0.1, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5 และ 0.6 วินาที	79
48	ผล FEA ของความหนาผนังขวดที่ตำแหน่งต่างๆ ของแบบจำลองเต็มใบกับแบบจำลองสมมาตรครึ่งใบ โดยใช้วัสดุวิสโคอีลาสติก ที่ตำแหน่ง $0^\circ$ , $45^\circ$ และ $90^\circ$ จากเส้นแบ่งแม่พิมพ์	80
49	ผล FEA ของความหนาขวดแบบครึ่งใบ โดยใช้วัสดุวิสโคอีลาสติก ที่ตำแหน่ง $0^\circ$ , $45^\circ$ และ $90^\circ$ จากเส้นแบ่งแม่พิมพ์	81
50	เปรียบเทียบผล FEA ของความหนาขวดแบบครึ่งใบ โดยใช้วัสดุวิสโคอีลาสติก ที่ $0^\circ$ , $45^\circ$ และ $90^\circ$ จากแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์ กับเปอร์เซ็นต์ความสูงของผนังขวด	82
51	เปรียบเทียบผล FEA ของความหนาขวดแบบครึ่งใบ โดยใช้วัสดุวิสโคอีลาสติก ที่ $0^\circ$ , $45^\circ$ และ $90^\circ$ จากแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์ กับเปอร์เซ็นต์รัศมีของฐานขวด	82
52	ผลเปรียบเทียบความหนาของขวดจริง (Experiment) และผล FEA ตามแนวเส้น $0^\circ$ ของแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์	85
53	กราฟของภาพที่ 52 เป็นเปอร์เซ็นต์ความสูงขวด จากตำแหน่ง b ถึง c	85
54	กราฟของภาพที่ 52 เป็นเปอร์เซ็นต์รัศมีฐานขวด จากตำแหน่ง a ถึง b	86
55	ผลเปรียบเทียบความหนาของขวดจริง (Experiment) และผล FEA ตามแนวเส้น $45^\circ$ ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์	86

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	เนื้อหา	หน้า
56	กราฟของภาพที่ 55 เป็นเปอร์เซ็นต์ความสูงขวด จากตำแหน่ง b ถึง c	87
57	กราฟของภาพที่ 55 เป็นเปอร์เซ็นต์รัศมีฐานขวด จากตำแหน่ง a ถึง b	87
58	ผลเปรียบเทียบความหนาของขวดจริง (Experiment) และผล FEA ตามแนวเส้น 90° ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์	88
59	กราฟของภาพที่ 58 เป็นเปอร์เซ็นต์ความสูงขวด จากตำแหน่ง b ถึง c	89
60	กราฟของภาพที่ 58 เป็นเปอร์เซ็นต์รัศมีฐานขวด จากตำแหน่ง a ถึง b	89
61	ผลการจำลองการปิดของแม่พิมพ์โดยใช้แบบจำลองเต็มใบ ที่เวลา 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 วินาที	93
62	ผลการวิเคราะห์ความหนาของพาริสัน โดยใช้วัสดุวิสโคอีลาสติกแบบจำลองเต็มใบ ที่เวลา 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 วินาที	94
63	ผลการวิเคราะห์ FEA ของความหนาขวดรูปทรงไม่สมมาตรรอบแกน ที่ตำแหน่งต่างๆ จากเส้นแบ่งของแม่พิมพ์ กับเปอร์เซ็นต์ความสูงขวด	95
64	ผล FEA แสดงระดับชั้นสีของความหนาขวดที่เวลา (ก) 1.1 วินาที (ข) 1.2785 วินาที และ (ค) 1.3831 วินาที	96
65	การเปลี่ยนแปลงความหนาพาริสันของขวด 0.9 ลิตร เมื่อเทียบกับเวลา ณ ตำแหน่ง 5, 50 และ 95 เปอร์เซ็นต์ของความสูงขวด ในแนว 90° จากเส้นแบ่งแม่พิมพ์	97
66	การเปลี่ยนแปลงความหนาพาริสันของขวด 0.9 ลิตร เมื่อเทียบกับเวลา ที่ความสูง 5 เปอร์เซ็นต์ของความสูงขวด ณ ตำแหน่ง 0°, 45° และ 90° จากแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์	98
67	ผลเปรียบเทียบความหนาขวดที่ความหนาพาริสันจาก 2.2 ถึง 2.6 mm ตามแนวเส้น 0° ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์ กับเปอร์เซ็นต์ความสูงขวด	99
68	ผลเปรียบเทียบความหนาขวดที่ความหนาพาริสันจาก 2.2 ถึง 2.6 mm ตามแนวเส้น 45° ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์ กับเปอร์เซ็นต์ความสูงขวด	100

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
69	ผลเปรียบเทียบความหนาขดที่ความหนาพาริสันจาก 2.2 ถึง 2.6 mm ตามแนวเส้น 90° ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์ กับเปอร์เซ็นต์ความสูงขด	100
70	ผลเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์อัตราส่วนระหว่างความหนาขดต่อความหนาพาริสันจาก 2.2 ถึง 2.6 mm ตามแนวเส้น 0° ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์ กับเปอร์เซ็นต์ความสูงขด	101
71	ผลเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์อัตราส่วนระหว่างความหนาขดต่อความหนาพาริสันจาก 2.2 ถึง 2.6 mm ตามแนวเส้น 45° ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์ กับเปอร์เซ็นต์ความสูงขด	101
72	ผลเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์อัตราส่วนระหว่างความหนาขดต่อความหนาพาริสันจาก 2.2 ถึง 2.6 mm ตามแนวเส้น 45° ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์ กับเปอร์เซ็นต์ความสูงขด	102
73	ผลเปรียบเทียบความหนาขดที่อุณหภูมิเริ่มต้นของพาริสันที่ 160, 170, 180, 190 และ 200°C ตามแนวเส้น 0° ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์ กับเปอร์เซ็นต์ความสูงขด	106
74	ผลเปรียบเทียบความหนาขดที่อุณหภูมิเริ่มต้นของพาริสันที่ 160, 170, 180, 190 และ 200°C ตามแนวเส้น 45° ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์ กับเปอร์เซ็นต์ความสูงขด	106
75	ผลเปรียบเทียบความหนาขดที่อุณหภูมิเริ่มต้นของพาริสันที่ 160, 170, 180, 190 และ 200°C ตามแนวเส้น 90° ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์ กับเปอร์เซ็นต์ความสูงขด	107
76	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และความหนาของพาริสัน เมื่อเทียบกับเวลา เมื่ออุณหภูมิพาริสันเริ่มต้นเท่ากับ 180°C	108
77	กราฟแสดงอุณหภูมิพาริสันเทียบกับเวลา เมื่ออุณหภูมิพาริสันเริ่มต้นเท่ากับ 160, 180 และ 200°C	109

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$a_t(T)$	=	ฟังก์ชันเลื่อนเวลาและอุณหภูมิ (time-temperature shift function, $a_T$ )
ARE	=	Area Ratio of Element
$C_1$	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิของสมการวิลเลียม-แลนเดอ-เฟอริ (William-Landel-Ferry coefficient, ไม่มีหน่วย)
$C_2$	=	ค่าคงที่ของสมการวิลเลียม-แลนเดอ-เฟอริ (William-Landel-Ferry constant, °C)
$C_{ij}$	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองมูนี-ริฟลิน (Mooney-Rivlin model coefficient, Pa)
$C_{ijk}$	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองพหุนาม (polynomial model coefficient, Pa)
$\overline{e}_\%$	=	percent average absolute error (%)
$E$	=	ค่ายังมอดุลัส (Pa)
$E(t)$	=	ฟังก์ชันยังมอดุลัสที่ขึ้นกับเวลา (Pa)
$E(t,T)$	=	ฟังก์ชันยังมอดุลัสที่ขึ้นกับเวลาและอุณหภูมิ (Pa)
FEA	=	Finite Element Analysis
FEM	=	Finite Element Model
$G$	=	มอดุลัสเฉือน (Pa)
$G(t)$	=	ฟังก์ชันมอดุลัสเฉือนที่ขึ้นกับเวลา (Pa)
$G(t,T)$	=	ฟังก์ชันมอดุลัสเฉือนที่ขึ้นกับเวลาและอุณหภูมิ (Pa)
HDPE	=	High Density Polyethylene
$I_i$	=	อินวาเรียนท์ความเครียดลำดับที่ 1 ของเทนเซอร์การเสียรูปเคาชี-กรีนซ้าย (1 <sup>st</sup> strain invariant of left Cauchy-Green deformation tensor, ไม่มีหน่วย)
$J$	=	จาโคเบียนอีลาสติก (Elastic Jacobian, ไม่มีหน่วย)
LDPE	=	Low Density Polyethylene
PET	=	Polyethylene Terephthalate
t	=	เวลา (sec)
$t_{EXP,i}$	=	ความหนาเฉลี่ยวัดจากขดจริงที่ตำแหน่งต่างๆ
$t_{FEA,i}$	=	ความหนาจากผลการวิเคราะห์ FEA ที่แต่ละโหนด
$T$	=	อุณหภูมิ (°C)
TR	=	thickness ratio หรือ อัตราส่วนความหนา (ไม่มีหน่วย)

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$W$	=	ฟังก์ชันความหนาแน่นของพลังงานความเครียด (strain energy density function, $J/m^3$ )
WLF	=	ฟังก์ชันเลื่อนเวลาและอุณหภูมิของวิลเลียม-แลนเดรล-เฟอรี (William-Landrel-Ferry Function, WLF)
$\varepsilon$	=	ความเครียด (ไม่มีหน่วย)
$\varepsilon_E$	=	ความเครียดของสปริง (ไม่มีหน่วย)
$\varepsilon_\eta$	=	ความเครียดของตัวหน่วง (ไม่มีหน่วย)
$\dot{\varepsilon}$	=	อัตราความเครียด ( $sec^{-1}$ )
$\dot{\varepsilon}_E$	=	อัตราความเครียดของสปริง ( $sec^{-1}$ )
$\dot{\varepsilon}_\eta$	=	อัตราความเครียดของตัวหน่วง ( $sec^{-1}$ )
$\eta$	=	ค่าคงที่ของตัวหน่วง, ค่าความหนืด (viscosity, poise หรือ $Pa \cdot sec$ )
$\mu$	=	มอดูลัสเฉือนเริ่มต้น (Pa)
$\sigma$	=	ความเค้น (Pa)
$\sigma(t)$	=	ฟังก์ชันความเค้นที่ขึ้นกับเวลา (Pa)
$\sigma(T)$	=	ฟังก์ชันความเค้นที่ขึ้นกับอุณหภูมิ (Pa)
$\sigma_E$	=	ความเค้นของสปริง (Pa)
$\sigma_\eta$	=	ความเค้นของตัวหน่วง (Pa)
$\lambda$	=	อัตราส่วนการยืด (stretch ratio, ไม่มีหน่วย)
$\tau$	=	เวลาคลายตัว (relaxation time, sec)

## การวิเคราะห์ความหนาของพาริสัน สำหรับการเป่าขึ้นรูปแบบเอ็กทรูชั่น

### Parison Thickness Analysis for Extrusion Blow Molding

#### คำนำ

ภาชนะพลาสติกบรรจุของเหลวและผลิตภัณฑ์พลาสติกกวดต่างๆ เช่น ถังน้ำมันในรถยนต์ ท่อส่งอากาศ ถัง และกระป๋อง มีกรรมวิธีการผลิตโดยการเป่าขึ้นรูปแบบเอ็กทรูชั่น (extrusion blow molding) ซึ่งใช้การเป่าอากาศให้เกิดการยืดตัวของท่อพลาสติกร้อนที่อ่อนนุ่มหรือ พาริสัน (parison) ให้เป็นรูปทรงของภาชนะหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ การเป่าพาริสันจำเป็นต้องออกแบบรูปทรงเริ่มต้นของพาริสันในแบบต่างๆ เพื่อใช้เป่า เช่น รูปทรงกวดที่มีหน้าตัดเป็นรูป วงกลม วงรี ฯลฯ การกำหนดความหนาของพาริสันที่ระดับความสูงต่างๆ ของภาชนะสามารถควบคุมได้จากตัวเครื่องเป่าเอง และจากการออกแบบรูปร่างของหัวตาย (die)

ปัจจุบันโรงงานผลิตภาชนะกวดภายในประเทศที่ใช้การเป่าขึ้นรูป ประสบปัญหาจากความยุ่งยากในการกำหนดความหนาของพาริสัน เนื่องจากใช้วิธีลองผิดลองถูก (trial-and-error) ผู้ควบคุมเครื่องเป่าที่มีความชำนาญ จะใช้เวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง ในการการลองผิดลองถูกเพื่อปรับขนาดความหนาของพาริสัน ให้ได้ขนาดที่ต้องการ จึงทำให้สิ้นเปลืองพลาสติก และพลังงาน คิดเป็นมูลค่ากว่า 100,000 บาทต่อหนึ่งผลิตภัณฑ์ (ข้อมูลจากบริษัทปัญญาวัฒนา-พลาสติก จำกัด) ยิ่งถ้าเป็นภาชนะที่มีรูปทรงซับซ้อน การกำหนดความหนาของพาริสันจะยากยิ่งขึ้น ทำให้สิ้นเปลืองวัสดุและเวลามากขึ้น ในบางผลิตภัณฑ์เช่นกระป๋องน้ำมันเครื่องที่มีหู ใช้เวลาถึงหนึ่งสัปดาห์ถึงจะกำหนดความหนาที่เหมาะสมได้

นอกจากนี้ การกำหนดความหนาของพาริสันเพื่อให้ได้ความหนาตามต้องการ ถ้าสามารถกำหนดได้อย่างแม่นยำ จะเป็นผลทำให้ใช้วัตถุดิบได้อย่างมีคุณค่า นั่นคือการช่วยลดการใช้พลาสติกที่เป็นผลจากการ overdesign ได้

ประโยชน์ของการใช้ซอฟต์แวร์ด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis หรือ FEA) เพื่อจำลองกระบวนการเป่าพาริสัน คือ ความสามารถในการ คำนวณเวลา แรงดันลม และ อุณหภูมิของพาริสันที่กำลังเกิดขึ้นในกระบวนการได้ รวมถึงผลกระทบจากอุณหภูมิในการหล่อ เย็น และปริมาณการไหลของน้ำหล่อเย็นภายในแม่พิมพ์ (mold) จึงเหมาะสม สะดวก และ รวดเร็วในการศึกษาความหนาของภาชนะ น้ำหนัก และรูปทรงของภาชนะ จากรูปแบบและขนาด ของพาริสัน จึงทำให้ลดเวลา พลังงาน และวัสดุดิบ จากการลองผิดลองถูกที่ปฏิบัติบนเครื่องเป่า และทำให้ลดต้นทุนของการผลิตลงได้อย่างมาก

## วัตถุประสงค์

1. นำไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้กำหนดความหนาของพาริสัน เพื่อให้ได้ขวดที่มีความหนาผนังที่ตำแหน่งต่างๆ ตามความต้องการได้
2. ศึกษาเงื่อนไข และตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อความแม่นยำสำหรับการจำลองการเปลี่ยนแปลงความหนาผนังของพาริสัน ในขณะที่เป่าขึ้นรูป
3. ประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของประโยชน์ที่จะได้รับ
4. สามารถนำหลักการ และกระบวนการที่ได้จากผลงานวิจัยนี้ ไปประยุกต์ใช้ได้กับผลิตภัณฑ์รูปทรงหลากหลายได้

## ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาและสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูป โดยใช้แบบจำลองเชิงโครงสร้างของวัสดุชนิดไฮเปอร์อีลาสติก (hyperelastic) และวิสโคอีลาสติก (viscoelastic) ในการอธิบายพฤติกรรมของพาริสัน ซึ่งเป็นพลาสติกชนิด HDPE ที่อุณหภูมิสูง

## ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ลดการสูญเสียพลาสติก พลังงานและเวลาในการทดสอบการผลิต
2. ลดเวลาการผลิตชิ้นงานต่อหนึ่งชิ้น
3. สามารถกำหนดความหนาของพาริสันของผลิตภัณฑ์รูปแบบอื่นๆ ได้ก่อนทำการทดสอบการผลิต

4. ได้องค์ความรู้ในการวิเคราะห์การเป่า และสามารถถ่ายทอดสู่บริษัทปัญญาพัฒนาพลาสติกได้
5. ทำให้บริษัทฯ มีเทคโนโลยีขั้นสูงของการออกแบบ ซึ่งส่งผลให้บริษัทสามารถแข่งขันได้ทั้งตลาดภายในและภายนอกประเทศได้



## การตรวจเอกสาร

### 1. กระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูป

กระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูปหรือกระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบเอ็กทรูชัน (extrusion blow molding) เป็นกระบวนการในการผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะกลวง (hollow parts) หรือเป็นภาชนะบรรจุของเหลว (fluid containers) ยกตัวอย่างเช่น ขวด ถัง กระจังใส่ น้ำมันเครื่อง และถังน้ำมัน ในรถยนต์ เป็นต้น โดยวัสดุที่ใช้ในกระบวนการเป่า คือพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) (Lee, 1990) กระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบเอ็กทรูชันประกอบด้วยลำดับขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1. การหลอมเหลวเม็ดพลาสติกด้วยความดันและความร้อน (melting and plasticizing) โดยเครื่องอัดรีด (extrusion machine หรือ extruder)

2. การขึ้นรูปพาริสัน (parison formation) โดยพลาสติกซึ่งถูกหลอมเหลวจะถูกรีด (extrude) ผ่านหัวตาย (die head) ออกมามีลักษณะเป็นสายท่อที่ร้อนและนุ่ม หรือพาริสัน (parison)

3. การเป่าขึ้นรูป (blowing and molding) โดยเมื่อสายท่อไหลลงมาได้ความยาวที่เหมาะสม แม่พิมพ์ (mold) จะเคลื่อนที่มาประกบ และมีใบมีดเคลื่อนที่มาตัดด้านบนของพาริสัน พาริสันที่อยู่ภายในแม่พิมพ์ไปทำการเป่าจากเข็มเป่า (blow pin) ทำให้ผนังของสายท่อโป่งตัวตามรูปทรงของแม่พิมพ์ แม่พิมพ์จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของสายท่อ ทำให้สายท่อเย็นตัวลงเมื่อสัมผัสกับแม่พิมพ์ หลังจากนั้นแม่พิมพ์จะเปิดออก และชิ้นงานที่เป่าได้จะถูกนำออกจากแม่พิมพ์ และเครื่องเป่า ชิ้นงานที่ได้จะทำการตัดเนื้อพลาสติกส่วนเกิน (flash) ออกก่อนที่จะนำไปสู่กระบวนการตกแต่งชิ้นงานต่อไป

รายละเอียดขั้นตอนกระบวนการขึ้นรูปพาริสัน จนถึงการเป่าขึ้นรูปได้แสดงไว้ในภาพที่ 1



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 1 รายละเอียดขั้นตอนการเป่าขวด โดยพาริสันในขณะรีดออกจากหัวตาย (ภาพ ก และ ข) แม่พิมพ์เคลื่อนที่มาประกบสายท่อและเป่าลมเข้าภายในสายท่อ (ภาพ ค) และขวดภายหลังจากแม่พิมพ์เปิดและลำเลียงออกจากเครื่อง (ภาพ ง)

## 2. การควบคุมความหนาของพาริสัน

การควบคุมความหนาในส่วนต่างๆ ของชิ้นงานเป็นหัวใจสำคัญของกระบวนการเป่า ซึ่งกระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบเอ็กทริงชันมีข้อได้เปรียบมากกว่ากระบวนการผลิตอื่นๆ และกระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบอื่นๆ คือสามารถปรับเปลี่ยนความหนาที่ตำแหน่งต่างๆ ของพาริสันได้ ซึ่งจะส่งผลโดยตรงกับความหนาของชิ้นงาน ทำให้สามารถควบคุมความหนาในส่วนต่างๆ รวมถึงน้ำหนักของชิ้นงานได้ (สัจจาทิพย์, 2546)

การควบคุมความหนาเป็นปัจจัยสำคัญของการควบคุมความแข็งแรงและน้ำหนักของขวด ในกระบวนการเป่าขวด วิธีการควบคุมความหนาของพาริสันมี 2 วิธีหลัก ได้แก่ วิธีการโปรแกรมความหนาของพาริสัน (parison programming) และวิธีการปรับแต่งหัวตาย (die shaping) (ชาคริต, 2546) โดยวิธีการโปรแกรมสามารถควบคุมความหนาของผนังได้ตลอดความสูงจากล่างถึงบนของสายท่อหรือ parison ในขณะที่วิธีการแต่งหัวตาย เป็นการปรับแต่งหน้าตัดของ bushing หรือ mandrel เพื่อเพิ่มความหนาของสายท่อ หรือเพื่อให้รูปทรงหรือพื้นที่หน้าตัดของพาริสัน มีความเหมาะสมกับชิ้นงานที่ต้องการเป่า

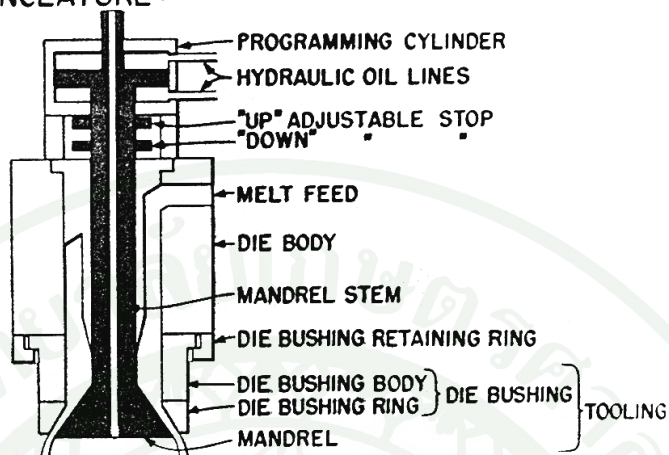
### 2.1 วิธีการโปรแกรมความหนาของพาริสัน (Parison Programming)

วิธีการโปรแกรมสามารถควบคุมความหนาของพาริสัน ได้โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของหัวตาย โดย mandrel ซึ่งอยู่ภายใน bushing จะถูกบังคับให้เคลื่อนที่ขึ้นลงโดยแรงดันไฮดรอลิก ซึ่งตัว bushing นี้ อาจมีลักษณะเป็นลู่ออก (diverging) หรือ ลู่เข้า (converging) รายละเอียดของหัวตายที่มีการโปรแกรมความหนาของพาริสัน ได้แสดงไว้ในภาพที่ 2 และลักษณะของ bushing ชนิด converging และ diverging ได้แสดงไว้ในภาพที่ 3

### 2.2 วิธีการปรับแต่งหัวตาย (Die Shaping)

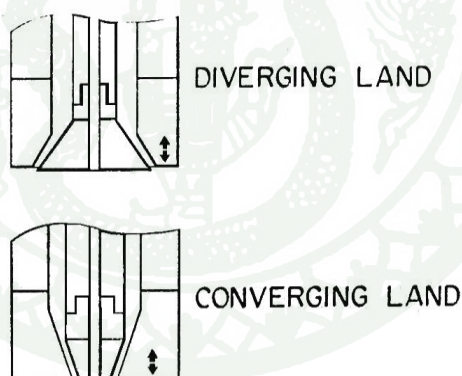
วิธีการแต่งหัวตายเป็นเทคนิคระดับพื้นฐานที่นิยมใช้ในการปรับความหนา โดยการปรับแต่งพื้นที่หน้าตัดของหัวตาย เพื่อให้พื้นที่หน้าตัดของพาริสันที่รีดออกมา มีความเหมาะสมกับรูปทรงของชิ้นงาน การปรับแต่งสามารถทำได้ด้วย mandrel หรือ bushing โดย diverging กับ

### BLOW MOLD PROGRAMMING DIE HEAD NOMENCLATURE :



ภาพที่ 2 รายละเอียดของหัวดายที่สามารถโปรแกรมความหนาของพาริสัน

### TYPICAL BUSHING & MANDREL CONFIGURATION FOR MOVING DIE PROGRAMMING



ภาพที่ 3 ลักษณะของหัวดายชนิด Diverging และ Converging

bushing หรือ converging กับ mandrel (Lee, 2006) หรืออาจแก้ไขหน้าตัดให้มีความรีขึ้น เพื่อให้มีความเหมาะสมกับรูปทรงของชิ้นงาน ในกรณีที่พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานไม่ได้เป็นทรงกลม หรือเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า การเลือกบริเวณที่จะทำการปรับแต่งนิยมใช้การทำเครื่องหมายไว้ที่พาริสันที่รีดอกมา แล้วเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่เป่าเสร็จแล้ว ซึ่งตำแหน่งบนหัวดายที่ตรงกับพาริสัน จะถูกทำเครื่องหมาย และนำไปปรับแต่งเพื่อให้เหมาะสมกับรูปทรงของชิ้นงาน

### 3. การจำลองกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูป

ในปัจจุบันถึงแม้กระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบเป็ด (injection stretch blow molding) จะมีการพัฒนาขึ้นอย่างมาก แต่กระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูปหรือการเป่าขึ้นรูปแบบเอ็กซ์ทรูชัน (extrusion blow molding) ยังคงมีข้อได้เปรียบอย่างมากในการผลิตชิ้นงานขนาดใหญ่ หรือสำหรับชิ้นงานที่มีรูปทรงหรือมีลักษณะการใช้งานเฉพาะด้านบางประเภท โดยผลิตภัณฑ์ที่เห็นได้ชัด ได้แก่ แท็งค์บรรจุน้ำ (water tank) หลอดหรือท่อที่มีการโค้งงอ (bent tube) หรือขวดชนิดมีหูหิ้ว (bottle with handle) เป็นต้น โดยขั้นตอนการอัดรีดพาริสันถือเป็นขั้นตอนสำคัญของกระบวนการ เพราะเป็นขั้นตอนที่นำไปสู่การกระจายตัวของความหนาและรูปทรงเริ่มต้นของพาริสันก่อนเริ่มกระบวนการเป่า ดังนั้นงานวิจัยหลายงานจึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาขั้นตอนการอัดรีด (extrusion stage) โดยอาศัยวิธีการทดลองและวิธีเชิงตัวเลข (numerical) ขั้นตอนต่อจากการอัดรีดขึ้นรูปพาริสัน คือขั้นตอนการเป่า (inflation stage) ซึ่งพาริสันจะถูกเป่าภายในแม่พิมพ์จนเป็นรูปทรงของชิ้นงานที่มีความซับซ้อน โดยการเสียรูปของโพลีเมอร์หลอมเหลวที่ถูกเป่าอาจมีพฤติกรรมการไหล (rheological response) ซึ่งอาจนำไปสู่การกระจายตัวของความหนาที่ไม่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะในบริเวณรอยประสานของเนื้อพลาสติก (weld lines) และบริเวณหูหิ้ว (handles) (Debbaut and Homerin, 1999)

การกระจายตัวของความหนาสุดท้ายถือเป็นเกณฑ์ในการวัดคุณภาพของชิ้นงานเป่าที่สำคัญ โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ผ่านมาได้มุ่งเน้นไปที่การวัดความหนาของชิ้นงานเป่า นอกจากนั้น การยืดตัวของพลาสติกในระหว่างการเป่ายังส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ ในระหว่างการนำไปใช้งาน ทั้งนี้ยังต้องอาศัยหลักการทางกลศาสตร์และทางเศรษฐศาสตร์รวมถึงนำความสามารถในการผลิตมาพิจารณาประกอบกันเป็นหลักเกณฑ์เพิ่มเติม ผลที่ตามมาคือในบางครั้งมีความจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนรูปทรงของชิ้นงานเป่าหรือแม่พิมพ์ บ่อยครั้งที่จำเป็นต้องมีการลองผิดลองถูก (trial and error) ในระหว่างการออกแบบแม่พิมพ์ (Debbaut and Homerin, 1999)

การจำลองเชิงตัวเลข (numerical simulation) สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบชิ้นงานและจำลองกระบวนการเป่าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยแบบจำลองกระบวนการเป่าสามารถจำแนกตามประเภทของแบบจำลองเชิงโครงสร้าง (constitutive model) ที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของวัสดุ โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ ได้แก่ แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก

(hyperelastic model) และแบบจำลองของไหล (fluid model) โดยอุณหภูมิที่สูงในกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูป ทำให้แบบจำลองชนิดของไหลสามารถนำมาใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของโพลีเมอร์ที่อุณหภูมิสูง และสามารถจำลองการพองตัวของพาริสันได้อย่างเหมาะสม เช่น แบบจำลองชนิดนิวโตเนียน (Newtonian model) และประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ของแบบจำลองยังสามารถพัฒนาขึ้นได้อีก หากนำแบบจำลองวิสโคอีลาสติกชนิดอินทิกรัล (integral type viscoelastic model) ที่ได้ถูกพัฒนาในช่วงเวลาที่ผ่านมามาประยุกต์ใช้ (Debbaut and Homerin, 1999)

พาริสันสามารถจำลองได้โดยใช้เอลิเมนต์แบบผนังบางหรือ shell element และแบบเยื่อ-บาง หรือ membrane element ข้อดีของเอลิเมนต์ชนิดผนังบาง คือสามารถวิเคราะห์การเสียรูปแบบดัด (flexural deformation) ที่อาจเกิดขึ้นในขั้นตอนการปิดของแม่พิมพ์ (clamping stage) ได้ดีกว่าเอลิเมนต์ชนิดเยื่อบาง การเสียรูปของพาริสันสามารถจำลองได้ด้วยสมการแบบลากรางจ์ (Lagrangian formulation) โดยใช้สมการเชิงโครงสร้างชนิดของแข็งหรือของเหลว (solid or liquid based) ในการอธิบายพฤติกรรมของวัสดุ (Laroche et al., 1999)

DeLorenzi and Nied (1987) เป็นกลุ่มวิจัยกลุ่มแรกที่ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง (thermoforming) และกระบวนการเป่าขึ้นรูป ในแบบสองมิติและแบบสมมาตรรอบแกน (axisymmetric) โดยกำหนดให้โพลีเมอร์ที่อุณหภูมิสูงมีพฤติกรรมเป็นวัสดุอีลาสติกแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear elastic) มีสมบัติบีบอัดตัวไม่ได้ (incompressible) และใช้เอลิเมนต์ชนิดเยื่อบาง (membrane) ในการสร้างแบบจำลองของกระบวนการ พบว่าผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแม่นยำ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดลองจริงของกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

Poslinski and Tsamopoulos (1990) ได้ทำการจำลองการพองตัวของพาริสันแบบอุณหภูมิไม่คงที่ (nonisothermal) และจำลองการเย็นตัวกับการแข็งตัว (cooling and solidification) ของพาริสันทั้งก่อนการสัมผัสและในขณะสัมผัสกับแม่พิมพ์ โดยใช้สมการโมเมนตัมแบบไม่สม่ำเสมอ (unsteady momentum equation) และสมการอนุรักษ์พลังงาน (energy conservation) ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าอัตราเร็วในการพองตัวของพาริสัน

(inflation rate) มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นของพาริสัน แต่รูปร่างของพาริสันที่เวลาใดๆ ในระหว่างกระบวนการเป่า และการกระจายตัวของความหนาของพาริสันหลังสัมผัสกับแม่พิมพ์ยังคงไม่เปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่าปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของพาริสันคือการกระจายตัวของอุณหภูมิเริ่มต้นของพาริสัน

Cohen and Seitz (1991) ได้ทำการเปรียบเทียบการวิเคราะห์กระบวนการฉีดเป่าขึ้นรูปแบบยืด โดยใช้เอลิเมนต์แบบ solid element และแบบ shell element ด้วยซอฟต์แวร์ไฟไนต์-เอลิเมนต์ ABAQUS พบว่าการวิเคราะห์โดยใช้เอลิเมนต์ทั้งสองชนิดให้ผลการวิเคราะห์การพองตัวของพรีฟอร์มที่สอดคล้องกัน แต่แบบ shell มีข้อได้เปรียบตรงที่ใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อยกว่าแบบ solid

Schmidt et al. (1996) ได้พัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการฉีดเป่าขึ้นรูปแบบยืด แบบ 2 มิติโดยมีอุณหภูมิคงที่ (isothermal) และใช้แบบจำลองเชิงโครงสร้างวิสโคอีลาสติคชนิด Oldroyd B type ในการอธิบายพฤติกรรมของวัสดุ พบว่าแบบจำลองสามารถทำนายการกระจายตัวของความหนา จลพลศาสตร์ของการสัมผัส (contact kinetic) และการกระจายตัวของความเค้นตลอดทั้งกระบวนการได้ โดยผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของความหนา และแรงที่ใช้ในการยืดตัวของแกนยืดให้ผลที่สอดคล้องกับค่าที่วัดได้จากผลการทดสอบเป่าจริง ผู้วิจัยมีความเห็นว่าแบบจำลองยังไม่เหมาะสมต่อการนำมาหาค่าเหมาะสมที่สุดของกระบวนการ เพราะแบบจำลองไม่มีการนำผลของอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนมาพิจารณา ต่อมา Schmidt et al. (1998) จึงได้ทำการพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการฉีดเป่าขึ้นรูปแบบยืด โดยมีอุณหภูมิไม่คงที่ ซึ่งถึงแม้แบบจำลองจะสามารถแสดงถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเป่าจริงได้ดีกว่าแบบจำลองอุณหภูมิคงที่ แต่ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของความหนาและแรงที่ใช้ในการยืดตัวของแกนยืดของแบบจำลองอุณหภูมิไม่คงที่กลับมีความเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองอุณหภูมิคงที่

Debbaut and Homerin (1999) ได้นำเสนอแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกระบวนการเป่าขึ้นงานอุตสาหกรรมที่ผลิตจากพลาสติกชนิด high density polyethylene (HDPE) โดยใช้แบบจำลองของไหลวิสโคอีลาสติคชนิดอินทิกรัล (integral type viscoelastic model) ในการอธิบายพฤติกรรมของวัสดุโพลีเมอร์ที่อุณหภูมิสูง และสมบัติในเชิงวิทยาศาสตร์การ

ไหล (rheology) ของวัสดุสามารถอธิบายด้วยสเปกตรัมการผ่อนคลายความเค้น (relaxation spectrum) เอลิเมนต์แบบ membrane ได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง และกำหนดให้มีการสัมผัสกัน (contact) ระหว่างพาริสันและแม่พิมพ์ที่เคลื่อนที่เข้ามาประกบปิด แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการจำลองกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูปของขวดพลาสติก HDPE แบบมีหูหิ้ว โดยมุ่งเน้นไปที่การทำนายการกระจายตัวของความหนาของขวด และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของความหนากับผลการทดลองเป่าจริง

Laroche et al. (1999) ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขของกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูปของแท็งค์บรรจุเชื้อเพลิง (fuel tank) โดยทำการวิเคราะห์กระบวนการย่อยในแต่ละขั้นตอนต่อเนื่องกันไปตั้งแต่ต้นจนจบทั้งกระบวนการ (integrated process modeling) ได้แก่ ขั้นตอนการขึ้นรูปพาริสัน (parison formation), การปิดแม่พิมพ์ (clamping), การพองตัวของพาริสัน (inflation), การแข็งตัว (solidification) และการบิดตัว (warpage) ของชิ้นงาน รวมไปถึงการวิเคราะห์ความเค้นตกค้าง (residual stress) ที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน โดยขั้นตอนการขึ้นรูปพาริสันได้ถูกวิเคราะห์โดยใช้สมการเชิงโครงสร้าง (constitutive equation) วิสโคอีลาสติกชนิดอินทิกรัล (integral type viscoelastic) เพื่อจำลองพฤติกรรมความยืดหยุ่น และใช้สมการจากการทดลอง (empirical equation) เพื่อจำลองพฤติกรรมความบวมตัว (swell) และใช้สมการวิสโคอีลาสติกชนิดอนุกรมไม่คงที่ ในการวิเคราะห์กระบวนการปิดและการพองตัวของพาริสัน เนื่องจากการเย็นตัวของพาริสันในระหว่างขั้นตอนการเป่ามีผลกระทบอย่างมากต่อพฤติกรรมความพองตัวไปติดแม่พิมพ์ของพาริสัน และทำการวิเคราะห์การบิดตัวและความเค้นของชิ้นงานด้วยแบบจำลองของเชิงวิสโคอีลาสติกชนิดเชิงเส้น โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในแต่ละขั้นตอนจะถูกกำหนดให้เป็นพารามิเตอร์เริ่มต้นในการวิเคราะห์ขั้นตอนถัดไป ผลการทำนายเชิงตัวเลขให้ผลที่ใกล้เคียงกับการทดลองเป่าจริง แบบจำลองเชิงตัวเลขแบบต่อเนื่องทั้งกระบวนการได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าเหมาะสมที่สุด (optimization) ของกระบวนการ โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) คือ ชิ้นงานมีการกระจายตัวของความหนาอย่างสม่ำเสมอ (uniform thickness distribution) และมีน้ำหนักน้อยที่สุด

Tanifuji et al. (2000) ได้ทำการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขโดยรวม (overall numerical simulation) ของกระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบอัดรีด โดยประกอบด้วยขั้นตอนการขึ้นรูปพาริสัน (parison formation) และขั้นตอนการเป่า (inflation) ผลกระทบจากที่เกิดขึ้นจากผลรวมของการ

บวม (swell) และการไหลย้อยลงมา (drawdown) ในขั้นตอนการขึ้นรูปพาริสันได้ถูกวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบลากรางจ์-ออยเลอร์ (Lagrangian Eulerian, LE) โดยใช้เทคนิคการปรับปรุงโครงร่างตาข่าย (remeshing technique) แบบอัตโนมัติ ผู้วิจัยได้จำลองพฤติกรรมของพาริสันที่ถูกอัดรีดผ่านหัวตายแบบวงแหวน (annular die) ด้วยแบบจำลองการไหลชนิดไม่คงตัว (unsteady flow) แบบสมมาตรรอบแกน โดยมีอุณหภูมิไม่คงที่ และสมบัติของวัสดุอธิบายด้วยสมการเชิงโครงสร้างวิสโคอีลาสติกชนิดอินทิกรัลแบบ K-BKZ (K-BKZ integral constitutive equation) แบบจำลองเชิงตัวเลขดังกล่าวได้ถูกนำไปใช้ในการจำลองปรากฏการณ์บวมตัวผ่านหัวตาย (die swell) ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการขึ้นรูปพาริสัน โดยทำนายรูปทรงของพาริสันที่เวลาใดๆ หลังจากถูกอัดรีดออกมาจากหัวตาย โดยมีตัวแปร คืออิทธิพลของแรงดึงดูและความหนาของพาริสันที่ถูกปรับตั้งจากตัวควบคุม (parison controller) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของขั้นตอนการขึ้นรูปพาริสันได้ถูกนำไปใช้เป็นตัวแปรเริ่มต้นของแบบจำลองของขั้นตอนการเป่า โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ membrane ในการจำลองปรากฏการณ์การเสียรูปอย่างมากแบบไม่คงตัว (unsteady large deformation analysis) ที่พบในขั้นตอนการเป่าพาริสัน และใช้วัสดุวิสโคอีลาสติกในการอธิบายพฤติกรรมของพาริสันในระหว่างการเป่า ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของแต่ละขั้นตอนได้ถูกนำไปตรวจสอบความแม่นยำโดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง พบว่าการจำลองแบบโดยรวมทั้งกระบวนการมีข้อดี คือ การเปลี่ยนแปลงของรูปทรงของพาริสันที่เกิดขึ้นจากผลของการบวมและการไหลย้อยลงมา สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ขั้นตอนการเป่าต่อได้ เพื่อให้การทำนายเชิงตัวเลขมีความแม่นยำมากขึ้น จากงานวิจัยพบว่าเทคนิคการจำลองแบบโดยรวมทั้งกระบวนการได้ให้ผลที่น่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์ รวมถึงหาค่าเหมาะสมที่สุดของสภาวะการผลิต (optimal process condition) ของกระบวนการได้

Marckmann et al. (2001) ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบพลศาสตร์ (dynamic finite element procedure) สำหรับจำลองกระบวนการเป่าขึ้นรูปและกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกที่มีลักษณะกลวง แบบจำลองเชิงโครงสร้างไฮเปอร์อีลาสติก (hyperelastic) ชนิด Mooney-Rivlin ได้ถูกนำมาอธิบายพฤติกรรมของพาริสันที่อ่อนตัวเพราะความร้อน โดยพาริสันได้ถูกจำลองด้วยเอลิเมนต์เยื้องบางรูปทรงสามเหลี่ยมแบบเชิงเส้น (linear triangular element) เงื่อนไขการสัมผัสระหว่างพาริสันและแม่พิมพ์ได้ถูกกำหนดให้เป็นแบบติดแน่น (sticky) หรือองศาความเป็นอิสระ (degree of freedom) ของพาริสันส่วนที่มีการสัมผัสกับแม่พิมพ์จะถูกกำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนที่ไปจนจบการวิเคราะห์ และกำหนดให้มีการ

ปรับปรุงโครงร่างตาข่าย (remesh) ในระหว่างการวิเคราะห์โดยใช้รูปทรงของเอลิเมนต์เป็นเกณฑ์ (geometric criterion) การปรับปรุงโครงร่างตาข่ายใช้วิธีการอย่างง่ายโดยการเพิ่มโหนด (node) ลงบนจุดกึ่งกลางของขอบด้านที่ยาวที่สุดของเอลิเมนต์ที่ต้องการปรับปรุง การวิเคราะห์แบบ พลศาสตร์มีส่วนช่วยลดความซับซ้อนของการวิเคราะห์การสัมผัสและการปรับปรุงโครงร่างตาข่าย อย่างมาก ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบพลศาสตร์ได้ถูกนำมา เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงพบว่า ให้ผลที่ค่อนข้างสอดคล้องกันทั้งกระบวนการเป่าขึ้นรูป และกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

Yang et al. (2004a, 2004b, 2004c) ได้ทำการจำลองกระบวนการฉีดเป่าขึ้นรูปแบบดึง ยืดแบบ 2 มิติ ชนิดอุณหภูมิไม่คงที่ โดยใช้แบบจำลองวัสดุวิสโคอีลาสติกแบบไม่เชิงเส้น (non linear viscoelastic material law) ชนิด Buckley (Buckley model) ในการอธิบายพฤติกรรม การเสียรูปของ PET (polyethylene terephthalate) ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการ กระจายตัวของอุณหภูมิและความเครียดอย่างไม่สม่ำเสมอตลอดชิ้นงาน ทั้งในทิศทางความหนา และตลอดแนวความสูงของขวด และพบว่า การกระจายตัวของความหนาจากการวิเคราะห์แบบ อุณหภูมิคงที่และแบบอุณหภูมิไม่คงที่มีความแตกต่างกันเล็กน้อย แต่ผลการวิเคราะห์การ กระจายตัวของความหนาทั้งสองแบบมีความสอดคล้องกับผลการวัดการกระจายตัวของความหนา ของชิ้นงานจริง ซึ่งเป็นการยืนยันว่าแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนไม่ส่งผลกระทบต่ออย่างมี นัยสำคัญต่อผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของความหนาของชิ้นงาน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการ จำลองกระบวนการเป่าโดยใช้การวิเคราะห์แบบอุณหภูมิคงที่เพียงพอต่อการวิเคราะห์การกระจายตัว ของความหนาของชิ้นงานเป่า อย่างไรก็ตามแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนจะมีความจำเป็น หาก ต้องการวิเคราะห์การจัดเรียงตัวและความเป็นผลึกของชิ้นงานเป่า เพราะการเย็นตัวและการ กระจายตัวของอุณหภูมิส่งผลกระทบบ่อยมากต่อสมบัติของชิ้นงาน

Pham et al. (2004) ได้สร้างแบบจำลอง 2 มิติของกระบวนการฉีดเป่าขึ้นรูปแบบยืดโดยใช้ซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์ BLOWSIM แบบจำลองวัสดุชนิดวิสโคไฮเปอร์อีลาสติก (viscohyperelastic material) ได้ถูกนำมาอธิบายพฤติกรรม การเสียรูปของพลาสติก PET จากผล การวิเคราะห์พบว่า การกระจายตัวของความหนามีค่ามากกว่าค่าที่วัดได้จากการทดลองเป่าจริง ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากความหนาแน่นจำเพาะ (specific density) ของ PET ที่เพิ่มขึ้นโดยเป็นผล มาจากการเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (strain induced crystallization) ดังนั้นการวิเคราะห์การ

กระจายตัวของความหนาจึงอาจพัฒนาให้มีความถูกต้องมากขึ้นได้หากนำการกระจายตัวของอุณหภูมิ (temperature profile) ในทิศทางความหนาและการเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวเข้ามาพิจารณาเพิ่มเติม

Menary et al. (2010) ได้สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติของกระบวนการฉีดเป่าขึ้นรูปแบบยืดของพลาสติกชนิด PET โดยใช้ซอฟต์แวร์ ABAQUS วิธีที่นำมาใช้ในการจำลองการเป่าของอากาศเข้าไปในแม่พิมพ์ (blowing air) ได้ถูกจำลองเป็นสองวิธี ได้แก่ วิธีกำหนดความดันโดยตรง (direct pressure method) ซึ่งนำค่าความดันที่วัดได้จากเครื่องเป่ามา กำหนดให้กับแบบจำลองโดยตรง และวิธีอัตราการไหลของมวลอากาศคงที่ (constant mass flow rate) ซึ่งอาศัยหลักการความสัมพันธ์ของความดัน ปริมาตร และเวลา ผลการวิเคราะห์โดยใช้วิธีกำหนดความดันทั้งสองวิธีได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงของกระบวนการเป่าโดยไม่มีแม่พิมพ์ (free blow) แบบมีแกนยืด และแบบไม่มีแกนยืด ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการจำลองโดยใช้วิธีอัตราการไหลของมวลอากาศคงที่ ให้ผลการทำนายของปริมาตรของพรีฟอร์มต่อเวลา และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพรีฟอร์มที่เวลาต่างๆ ได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่าผลการวิเคราะห์โดยใช้วิธีกำหนดความดันโดยตรง โดยเห็นได้ชัดจากพฤติกรรมการพองตัวของอย่างรวดเร็วภายในเวลาอันสั้น (ประมาณ 0.03 วินาที) จากการวิเคราะห์โดยใช้วิธีกำหนดความดันโดยตรง ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่ไม่พบในกระบวนการเป่าจริง

Fukuzawa et al. (2010) ได้ทำการสร้างแบบจำลองของขั้นตอนการหนีบพาริสัน (pinch-off stage) จากการประกบปิดของแม่พิมพ์ในกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูปแบบพาริสันหลายชั้น (multilayer parison) โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองการไหลหนืดแบบนอนนิวโตเนียน (viscous non-Newtonian) ชนิดอุณหภูมิไม่คงที่ แบบจำลองเชิงโครงสร้างของ Carreau ได้ถูกนำมาอธิบายพฤติกรรมการเสียรูปของพาริสันโดยกำหนดให้เป็นปัญหาการไหล (flow problem) โดยพาริสันหลายชั้นประกอบด้วยชั้นของพลาสติกชนิด HDPE ที่ผิวนอกและผิวในของพาริสัน และชั้นกลางประกอบด้วยพลาสติกชนิด LDPE (Low Density Polyethylene) ซึ่งมีความหนืดต่ำกว่า HDPE ประมาณห้าเท่า ผลการวิเคราะห์สามารถแสดงรูปร่างและการกระจายของความหนาของพาริสันในแต่ละชั้นหลังจากขั้นตอนการหนีบได้อย่างชัดเจน พบว่าความหนืดหลอมเหลว (melt viscosity) มีผลกระทบอย่างมากต่อพฤติกรรมการไหลแบบหนืดที่พบในขั้นตอนการหนีบพาริสัน และผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของความหนาให้ผลสอดคล้องกับความหนา

ที่วัดได้จากการทดลองเป่าจริง และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แต่การกระจายตัวของความหนาที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่ามากกว่าความหนาที่วัดได้จากผลการทดลองเป่าจริงเล็กน้อย

งานวิจัยหลายงานได้สมมุติให้โพลีเมอร์ที่อุณหภูมิสูงมีความประพฤติคล้ายวัสดุคล้ายยาง (rubber-like material) โดยได้นำแบบจำลองเชิงโครงสร้างชนิดไฮเปอร์อีลาสติก (hyperelastic) มาใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของโพลีเมอร์ที่อุณหภูมิสูง (Khayat and Derdouri, 1995) อย่างไรก็ตาม แม้ว่าแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกจะสามารถจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียดที่อุณหภูมินั้นๆ ภายใต้อัตราความเครียดนั้นๆ ได้เป็นอย่างดี แต่การนำแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกไปใช้ในการจำลองเชิงตัวเลขของกระบวนการยังคงมีความเสถียรในการวิเคราะห์ต่ำ

DeLorenzi and Nied (1987) พบว่าเวลาในการพองตัว (inflation) ของพาริสันจากการสังเกตการณ์ในกระบวนการเป่าจริงมีเวลาค่อนข้างสั้น (ประมาณ 1 วินาที) ดังนั้นจึงสามารถสมมุติให้พาริสันมีพฤติกรรมเป็นของแข็งชนิดไฮเปอร์อีลาสติก โดยใช้หลักการงานเสมือน (principle of virtual work) และใช้การวิเคราะห์แบบสมดุลกึ่งสถิตยในการจำลองการเสียรูปของพาริสันในขั้นตอนการเป่าได้ อย่างไรก็ตามการใช้แบบจำลองวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกมีข้อเสียคือ ยังไม่สามารถจำลองคุณสมบัติเด่น (characterizations) ของวัสดุได้อย่างถูกต้อง และผลการทำนายความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่ามากเกินไปกว่าความเป็นจริง (overprediction of stress) รวมถึงไม่สามารถทำนายผลกระทบที่ขึ้นต่อเวลา (time dependent effects) ตัวอย่างเช่น การขึ้นกับอัตราความเครียด (strain rate dependencies) เป็นต้น นอกจากนี้การทำนายความเค้นได้มากกว่าความเป็นจริงอาจทำให้เกิดความไม่เสถียรในเชิงตัวเลข (numerical instabilities) จากการหักงอ (buckling) และการพับ (fold) ของพาริสันที่เกิดขึ้นบริเวณรอยหนีบของแม่พิมพ์ (mold pinch zone) (Laroche et al., 1999)

Kouba et al. (1992) ได้ทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งโดยใช้เอลิเมนต์แบบ membrane ในการวิเคราะห์ ผลกระทบจากอุณหภูมิและสมบัติวิสโคอีลาสติกถูกสมมุติให้มีผลกระทบต่อการกระจายตัวของความหนาของชิ้นงานน้อยมากจนไม่นำมาพิจารณา แบบจำลองเชิงโครงสร้างไฮเปอร์อีลาสติกชนิด Ogden จึงถูกนำมาใช้ในการ

อธิบายพฤติกรรมของวัสดุ จากการวิเคราะห์พบว่า การจำลองให้ผลสอดคล้องกับผลการทดลองจริง โดยการปรับปรุงโครงสร้างตาข่าย (remeshing) ที่บริเวณขอบและมุม การปรับตั้งเงื่อนไขการสัมผัส และความเหมาะสมของสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์มีความจำเป็นอย่างมากต่อการจำลองกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งที่รูปทรงมีความซับซ้อน และมีผลกระทบอย่างมากต่อเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์

Khayat and Derdouri (1995) ได้สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการพองตัวโดยใช้เอลิเมนต์ชนิด membrane และใช้แบบจำลองเชิงโครงสร้างไฮเปอร์อีลาสติกชนิด Mooney-Rivlin ในการอธิบายพฤติกรรมของวัสดุ แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการเป่าได้ถูกสร้างขึ้นโดยแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ การเป่าแบบไม่มีแม่พิมพ์ (free inflation) และการเป่าแบบมีแม่พิมพ์ (confined inflation) โดยมีแกนยึด จากการนำผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบเป่าจริง แสดงให้เห็นว่าการจำลองกระบวนการเป่าโดยใช้แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกให้ผลสอดคล้องกับผลการทดลองเป่าจริง และแบบจำลองสามารถประยุกต์ใช้กับรูปทรงของชิ้นงานได้อย่างหลากหลาย ได้แก่ ขวดที่มีขนาดต่างๆ หรือขวดที่มีหูหิ้วแบบต่างๆ เป็นต้น อย่างไรก็ตามนักวิจัยพบว่ายังคงมีข้อจำกัดในการวิเคราะห์ ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากการใช้เอลิเมนต์ชนิด membrane ในการจำลองพฤติกรรมโดยใช้วัสดุไฮเปอร์อีลาสติก

งานวิจัยหลายงานได้มุ่งเน้นไปที่การควบคุมการกระจายตัวของความหนาของพาริสัน (parison thickness controller) โดยนำเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุด (optimization technique) มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบและการจำลองกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูป เพื่อให้ได้น้ำหนักและการกระจายตัวของความหนาสุดท้ายของชิ้นงานที่ต้องการ รวมถึงการควบคุมน้ำหนักและสมรรถนะทางกลของชิ้นงานให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด โดย Gauvin et al. (2003) ได้ทำการวิเคราะห์หาค่าเหมาะสมที่สุดของสภาวะการผลิตในกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูปโดยใช้วิธีเกรเดียนท์ (gradient based) หรือวิธีอิงตามความชัน เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ นักวิจัยได้ทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นงานเป่าขึ้นมาก่อน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาค่าเหมาะสมที่สุดของการกระจายตัวของความหนาของชิ้นงาน โดยมีจุดประสงค์คือ ต้องการหาการกระจายตัวของความหนาที่น้อยที่สุด ที่ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงและมีสมรรถนะทางกลเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนด ได้แก่ ชิ้นงานมีการเสียรูปและเกิดความเค้นสูงสุดภายใต้เงื่อนไขการไม่เกินค่าที่กำหนด และมีน้ำหนักโดยรวมของชิ้นงานน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

หลังจากนั้นจึงได้ทำการวิเคราะห์หาค่าเหมาะสมที่สุดของสภาวะการผลิต เช่น ระยะเปิดของหัวตายที่เหมาะสม ที่ทำให้ชิ้นงานเป่ามีการกระจายตัวของความหนาที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์สมบัติทางกลในขั้นตอนแรก จากผลการวิเคราะห์พบว่า การนำวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการเป่า เพื่อให้ได้ชิ้นงานเป่ามีน้ำหนักน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขทางกลที่กำหนด

Yu et al. (2004) ได้นำเสนอวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของระยะเปิดของหัวตาย (die gap programming) ในกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูป โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมให้ชิ้นงานเป่ามีการกระจายตัวของความหนาอย่างสม่ำเสมอ นักวิจัยได้ทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูปทั้งกระบวนการ โดยใช้ซอฟต์แวร์ BlowSim ซึ่งพัฒนาโดย National Research Council (NRD) ประเทศแคนาดา และเพื่อลดจำนวนครั้งในการจำลอง นักวิจัยจึงได้พัฒนาวิธีการในการหาค่าเหมาะสมที่สุดขึ้นมา โดยใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (neural network) แบบแพร่ค่าย้อนกลับ (back propagation) ในการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายของความหนาของพาริสันกับชิ้นงานเป่า ร่วมกับวิธีการทาคุชิ (Taguchi method) ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการลดจำนวนครั้งในการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่จะนำมาป้อนเป็นข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม หลังจากนั้นนักวิจัยได้ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm) ในการวิเคราะห์หาค่าเหมาะสมที่สุดของระยะเปิดของหัวตายจากฟังก์ชันความสัมพันธ์ที่ได้มาจากโครงข่ายประสาทเทียม และประยุกต์ใช้กฎเกณฑ์ฟัซซี (fuzzy rule) ในการปรับแก้ฟังก์ชันความเหมาะสม (fitness function) ให้มีประสิทธิภาพในการหาค่าเหมาะสมที่สุดมากขึ้น

Huang and Huang (2007) ได้ทำการพัฒนาวิธีการผสมผสาน (hybrid method) ซึ่งประกอบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โครงข่ายประสาทเทียม (artificial neural network) และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของความหนาที่เหมาะสมที่สุดของพาริสันในกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูป เพื่อให้ได้ชิ้นงานเป่าที่มีการกระจายตัวของความหนาตามที่กำหนด นักวิจัยได้เริ่มจากการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของขั้นตอนการเป่าพาริสันโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้ซอฟต์แวร์ POLYFLOW 3.10 และใช้สมการเชิงโครงสร้าง (constitutive equation) ชนิด K-BKZ ซึ่งเป็นสมการเชิงปริพันธ์ (integral type equation) ในการอธิบายพฤติกรรมของพาริสันที่อุณหภูมิสูง หลังจากนั้นผลการวิเคราะห์การ

กระจายตัวของความหนาของชิ้นงานได้ถูกนำไปป้อน เพื่อใช้ในการเรียนรู้ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม โดยใช้วิธีการเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับ เพื่อนำไปใช้ในการประมาณค่าการกระจายตัวของความหนาของชิ้นงานเป่า ความแม่นยำในการทำนายผลของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมได้ถูกวัดโดยเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้เงื่อนไขที่แตกต่างจากข้อมูลที่ป้อนในขั้นตอนการเรียนรู้ (learning stage) ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์หากการกระจายตัวของความหนาที่เหมาะสมที่สุดพบว่าวิธีการผสมผสานสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการหาการกระจายตัวของความหนาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดเวลาในการพัฒนาชิ้นงานและลดการสูญเสียวัสดุได้อย่างมาก

Attar et al. (2008) ได้นำหลักการวิศวกรรมคู่ขนาน (concurrent engineering, CE) มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูป โดยทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการและดำเนินการทดลองเป่าจริง เพื่อทดสอบในเบื้องต้นไปด้วยพร้อมๆกัน แบบจำลองได้ถูกนำไปปรับปรุงกระบวนการผลิตด้วยการหาค่าเหมาะสมที่สุด โดยแบ่งฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) ออกเป็นสองขั้นตอน โดยเริ่มจากการหาค่าเหมาะสมที่สุดของน้ำหนักก่อน แล้วจึงหาค่าเหมาะสมที่สุดของความหนา โดยการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ในกระบวนการเป่า เช่น ขนาดและความหนาของพาริสัน อย่างเป็นระบบ วิธีการจำลองกระบวนการ (process modeling methodology) ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เวลาในการพัฒนาชิ้นงานที่ลดลง โดยใช้แบบจำลองเป็นพื้นฐาน ผลแสดงให้เห็นว่าเวลาในวงจรกระบวนการพัฒนาชิ้นงานลดลงประมาณ 60% ในขณะที่ชั่วโมงทำงานจริง (actual man-hour) ลดลง 30% โดยประมาณจากการใช้หลักการวิศวกรรมคู่ขนาน

Yu and Juang (2010) ได้นำวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีการคำนวณแบบอ่อน (soft computing method) มาประยุกต์ใช้ในการหาค่าเหมาะสมที่สุดในการตั้งระยะเปิดของหัวตาย (die gap programming) ของกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูป นักวิจัยได้นำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงเชิงโครงสร้าง (structural analysis) ของชิ้นงานเป่า และจำลองกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูป โดย แบ่งขั้นตอนการหาค่าเหมาะสมที่สุดออกเป็นสองขั้นตอน ได้แก่ ทำการวิเคราะห์เชิงโครงสร้างเพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุดของการกระจายตัวของความหนาของชิ้นงานเป่า ที่ทำให้ชิ้นงานเป่ามีน้ำหนักน้อยที่สุดและยังมีความแข็งแรงพอจะรองรับเงื่อนไขภาระที่กำหนด และทำการวิเคราะห์กระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูปเพื่อการหาค่า

เหมาะสมที่สุดของระยะเปิดของหัวตาย เพื่อให้ได้การกระจายตัวของความหนาของชิ้นงานเป่าที่  
 เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงโครงสร้าง ในการลดจำนวนครั้งในการวิเคราะห์ด้วย  
 แบบจำลองไฟ-ไนต์เอลิเมนต์ โครงข่ายระบบประสาทเทียม (neural network) ได้ถูกนำมา  
 ประยุกต์ใช้ เพื่อจำลองผลตอบสนองของระบบ (system response) ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วย  
 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ต่อมาขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm) ได้ถูกนำมา  
 ประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุดของแบบจำลอง เนื่องจากความสามารถในการทำนายของ  
 โครงข่ายประสาทเทียมค่อนข้างจำกัดในกรณีที่ข้อมูลป้อนมีจำนวนน้อย หลักการให้เหตุผลตาม  
 กฎเกณฑ์ฟัซซี (fuzzy reasoning) จึงได้ถูกมาประยุกต์ใช้ร่วมกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการนำ  
 ร่อง (guide) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (quasi-optimum) ค่าเหมาะสมที่สุดจะถูกทวนสอบ  
 (verification) แบบวนซ้ำ (iteration) เพื่อทำการสอนเพิ่มเติม (retrain) ให้กับแบบจำลองจนกว่า  
 ผลเฉลยของค่าเหมาะสมจะมีค่าลู่เข้า (convergence) โดยทุกครั้งของการทำซ้ำจะมีการกระจาย  
 ตัวอย่าง (sample) เพิ่มเติมจากปริภูมิความน่าจะเป็น (probable space) ของค่าเหมาะสมที่สุด  
 เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการสุ่มตัวอย่าง (sampling) พบว่าผลการออกแบบขวดชนิด HDPE  
 โดยใช้วิธีการคำนวณแบบอ่อนสามารถวิเคราะห์ค่าเหมาะสมที่สุดที่เป็นไปได้ (feasible optimum)  
 อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับการออกแบบโดยใช้วิธีการทาคุชิ (Taguchi method)  
 และแบบโครงข่ายประสาท-เทียมร่วมกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมทั่วไป

#### 4. การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis, FEA) คือ ระเบียบวิธีเชิง  
 ตัวเลข (numerical method) เพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณ (approximate solution) ของปัญหา  
 ทางวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์กายภาพ (physics) โดยทั่วไปที่มีความซับซ้อนจนไม่เหมาะสมต่อ  
 การแก้ปัญหาด้วยวิธีการวิเคราะห์โดยตรง ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำไปประยุกต์ใช้  
 ได้กับปัญหาทางวิศวกรรมได้อย่างกว้างขวาง ได้แก่ การวิเคราะห์โครงสร้าง (structural analysis)  
 แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetics) กลศาสตร์ของไหล (fluid mechanics) และการวิเคราะห์  
 ถ่ายเทความร้อน (heat transfer) เป็นต้น นอกจากนี้ระเบียบวิธีไฟไนต์ยังสามารถประยุกต์ใช้ได้  
 กับปัญหาทางวิศวกรรมอื่นๆ ได้อีกมากมาย (Logan, 2007)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลักๆ ได้แก่

- 1) Preprocessing เป็นขั้นตอนที่แบ่งขอบเขตรูปร่างของปัญหาออกเป็นส่วนย่อยๆ (discretization) ได้แก่ โหนด (node) และเอลิเมนต์ (element) เลือกฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ (shape function) สร้างสมการของแต่ละเอลิเมนต์และนำมาประกอบเข้าด้วยกันเป็นเมทริกซ์ความยืดหยุ่นรวม (global stiffness matrix) เพื่อแสดงถึงระบบโดยรวมของปัญหา และทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) เงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) และเงื่อนไขภาระ (loading condition)
- 2) Processing คือ การคำนวณระบบสมการโดยรวม (system of simultaneous equation) เพื่อหาผลลัพธ์ของค่าต่างๆ ของปัญหาในแต่ละโหนด (nodal result) โดยใช้ numerical method
- 3) Postprocessing คือ การนำคำตอบที่ได้ของแต่ละโหนดไปทำการคำนวณและแสดงผลเป็นตัวเลข กราฟ และภาพขึ้นสี

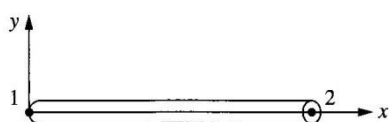
ขั้นตอนสำคัญในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือการสร้างสมการไฟไนต์-เอลิเมนต์ (finite element formulation) ซึ่งวิธีการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่โดยกันทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธี ได้แก่ วิธีการโดยตรง (direct method) วิธีการพลังงานศักย์รวมต่ำสุด (minimum total potential energy method) และวิธีเศษส่วนตกค้าง (weighted residual method) (Moaveni, 1999)

เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สามารถแบ่งออกได้เป็นหลายชนิด (เดช, 2541) โดยเอลิเมนต์แต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model หรือ FEM) จึงต้องเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับพฤติกรรมและลักษณะทางกายภาพของรูปทรงที่สนใจ (Logan, 2007) ชนิดของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สามารถแบ่งคร่าวๆ ได้เป็น 4 ชนิด คือ

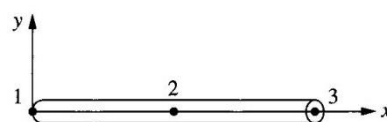
1) เอลิเมนต์ชนิด 1 มิติ เช่น เอลิเมนต์ชนิดแท่ง (bar element) เอลิเมนต์ชนิดคาน (beam element) เป็นต้น เอลิเมนต์ชนิดนี้มีความเหมาะสมต่อการนำไปวิเคราะห์ปัญหาที่โครงสร้างของชิ้นงานมีเพียงมิติเดียว เช่น ปัญหาโครงถัก (truss) หรือปัญหาการโก่งตัวและการบิดตัวของคาน เอลิเมนต์ชนิด 1 มิติจะมีลักษณะเป็นเส้น รายละเอียดของเอลิเมนต์ชนิด 1 มิติได้แสดงไว้ในภาพที่ 4

2) เอลิเมนต์ชนิด 2 มิติ เช่น เอลิเมนต์ชนิดความเค้นระนาบ (plane stress element) เอลิเมนต์ชนิดความเครียดระนาบ (plane strain element) เอลิเมนต์ผิวนั่งบาง (shell element) และเอลิเมนต์เยื่อบาง (membrane element) เป็นต้น เอลิเมนต์ชนิดนี้มักใช้ในการวิเคราะห์ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแผ่นผิว รูปทรงของเอลิเมนต์ชนิดสองมิติโดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็นรูปทรงสามเหลี่ยม (triangular element) และรูปทรงสี่เหลี่ยม (quadrilateral element) โดยเอลิเมนต์รูปทรงสี่เหลี่ยมจะมีความแม่นยำมากกว่าเอลิเมนต์รูปทรงสามเหลี่ยมในโครงร่างตาข่าย (mesh) ที่มีองศาความเป็นอิสระ (degree of freedom) เท่ากัน รูปทรงสี่เหลี่ยมง่ายต่อการสร้างสมการของเอลิเมนต์มากกว่า แต่ในกรณีที่รูปทรงของชิ้นงานมีความซับซ้อน แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์อาจมีความจำเป็นต้องประกอบขึ้นจากเอลิเมนต์รูปทรงสามเหลี่ยม เนื่องจากโครงร่างตาข่ายของเอลิเมนต์รูปทรงสามเหลี่ยมสามารถสร้างบนรูปทรงที่มีความซับซ้อนได้ง่ายกว่าเอลิเมนต์ชนิดสี่เหลี่ยม รายละเอียดของเอลิเมนต์ชนิด 2 มิติได้แสดงไว้ในภาพที่ 5

เอลิเมนต์ชนิด 2 มิติที่เหมาะสมต่อการนำมาจำลองพฤติกรรมของพาริสันในแบบจำลองของกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูปได้แก่ เอลิเมนต์ผิวนั่งบาง และเอลิเมนต์เยื่อบาง (Laroche et al., 1999) โดยเอลิเมนต์ผิวนั่งบางมีข้อดี คือสามารถวิเคราะห์การเสียรูปแบบบิด (flexural deformation) ที่อาจเกิดขึ้นในขั้นตอนการปิดของแม่พิมพ์ (clamping stage) ได้ดีกว่า

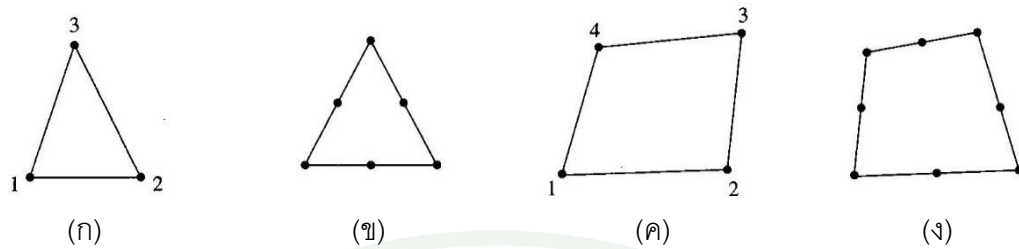


(ก)



(ข)

ภาพที่ 4 รายละเอียดของเอลิเมนต์ชนิด 1 มิติลำดับที่หนึ่ง (ก) และลำดับที่สอง (ข)

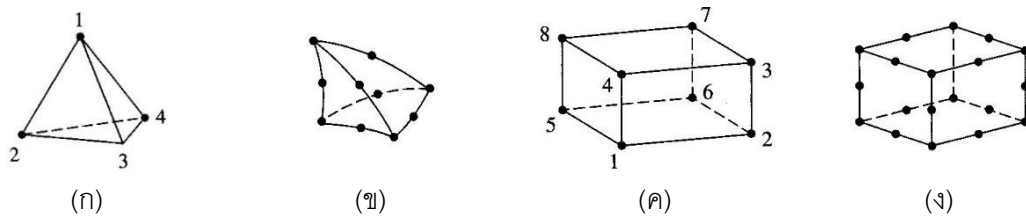


ภาพที่ 5 รายละเอียดของเอลิเมนต์ชนิด 2 มิติ รูปทรงสามเหลี่ยมลำดับที่หนึ่ง (ก) และลำดับที่สอง (ข) และรูปทรงสี่เหลี่ยมลำดับที่หนึ่ง (ค) และลำดับที่สอง (ง)

เอลิเมนต์ชนิดเยื่อบาง เอลิเมนต์ผนังบางสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ แบบบาง (thin shell element) และแบบหนา (thick shell element) โดยเอลิเมนต์แบบบางจะใช้ในกรณีที่เอลิเมนต์มีอัตราส่วนระหว่างความหนาต่อความยาวของเอลิเมนต์น้อยกว่า 0.05 เอลิเมนต์แบบบางจะไม่คำนึงถึงการเสียรูปที่เกิดจากผลของความเค้นภาคตัดขวาง (transverse shear)

เอลิเมนต์ชนิดเยื่อบางต่างจากเอลิเมนต์ชนิดผนังบางตรงที่สามารถรองรับภาระในแนวระนาบเดียวกับแผ่นผิวเท่านั้น (membrane strain) เอลิเมนต์ชนิดเยื่อบางมีข้อดีตรงที่สามารถจำลองพฤติกรรมการยืดตัวในแนวระนาบที่เกิดขึ้นในการจำลองกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูปได้ดีกว่าเอลิเมนต์ชนิดเปลือก แต่เอลิเมนต์ชนิดเยื่อบางมีข้อจำกัดที่ไม่รองรับภาระในแนวที่ตั้งฉากกับระนาบของผิว และไม่รองรับโมเมนต์ดัด (bending moment)

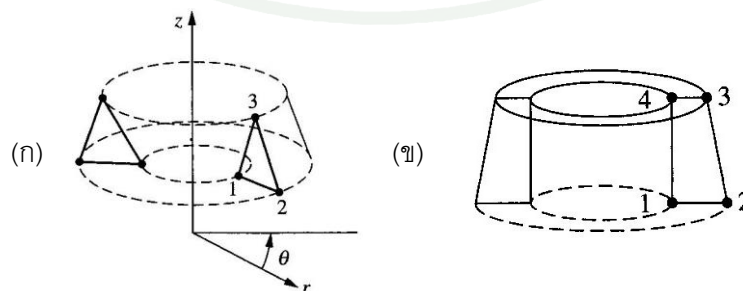
3) เอลิเมนต์ชนิด 3 มิติ เช่น เอลิเมนต์ชนิดสามมิติหรือเอลิเมนต์ทรงตัน (solid element) เป็นต้น โดยเอลิเมนต์ชนิด 3 มิติที่นิยมใช้กันทั่วไปมีลักษณะรูปทรงสี่หน้า (tetrahedral element) และรูปทรงหกหน้า (hexagonal element) เอลิเมนต์ชนิดสามมิติสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาชนิดไม่เชิงเส้น (nonlinear) ปัญหาที่มีการเสียรูปอย่างมาก (large deformation) และปัญหาที่มีเงื่อนไขการสัมผัส (contact condition) ได้เป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตามเอลิเมนต์ชนิดสามมิติมีข้อจำกัดคือ อาจเกิดการล็อกคัตว์ของการเฉือน (shear locking) และการล็อกคัตว์ของปริมาตร (volumetric locking) ได้ ซึ่งทำให้เอลิเมนต์เกิดการต่อต้านการดัดงอหรือต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรและเกิดความเค้นมากกว่าความเป็นจริง รายละเอียดของเอลิเมนต์ชนิด 3 มิติได้แสดงไว้ในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 รายละเอียดของเอลิเมนต์ชนิด 3 มิติ รูปทรงสี่หน้าลำดับที่หนึ่ง (ก) และลำดับที่สอง (ข) และรูปทรงหกหน้าลำดับที่หนึ่ง (ค) และลำดับที่สอง (ง)

4) เอลิเมนต์ชนิดสมมาตรรอบแกน (axisymmetric element) ใช้วิเคราะห์เฉพาะหน้าตัด (cross section) ของชิ้นงานที่มีรูปทรงสมมาตรรอบแกน ซึ่งให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ทั้งชิ้นงาน แต่สามารถลดภาระในการคำนวณลงไปได้อย่างมาก รายละเอียดของเอลิเมนต์ชนิดสมมาตรรอบแกนได้แสดงไว้ในภาพที่ 7

เอลิเมนต์ยังสามารถจำแนกตามลำดับของฟังก์ชันการประมาณภายใน โดยเอลิเมนต์ทั่วไปที่ฟังก์ชันการประมาณภายในเป็นฟังก์ชันอันดับหนึ่ง (first-order function) หรือเป็นฟังก์ชันเชิงเส้น (linear function) เรียกว่าเอลิเมนต์ลำดับที่หนึ่ง (first-order element) หรือเอลิเมนต์ชนิดเชิงเส้น (linear element) และเรียกเอลิเมนต์ที่ฟังก์ชันการประมาณภายในที่มีลำดับมากกว่าหนึ่งว่า เอลิเมนต์ลำดับสูง (higher-order element) โดยเอลิเมนต์ลำดับสูงแต่ละชนิดจะมีชื่อเรียกตามลำดับของฟังก์ชันการประมาณภายใน เช่น เอลิเมนต์ลำดับสอง (quadratic element) หรือเอลิเมนต์ลำดับสาม (cubic element) เป็นต้น โดยเอลิเมนต์ลำดับสูงจะมีจำนวนโหนดมากกว่าเอลิเมนต์ลำดับหนึ่ง จึงสามารถทำนายความเค้นในชิ้นงานที่มีความโค้งหรือเกิดการงอตัวได้ดี แต่ไม่เหมาะสมกับการวิเคราะห์ปัญหาที่มีเงื่อนไขสัมผัสผิวด (contact condition) และชิ้นงานที่เกิดการบิดตัว (distort) (Logan, 2007)



ภาพที่ 7 รายละเอียดของเอลิเมนต์ชนิดสมมาตรรอบแกน รูปทรงสามเหลี่ยม (ก) และรูปทรงสี่เหลี่ยม (ข)

## 5. วัสดุวิสโคอีลาสติกเชิงเส้น

วัสดุวิสโคอีลาสติกเชิงเส้น (linear viscoelastic) เป็นสมบัติของวัสดุที่พบได้ในวัสดุประเภทพอลิเมอร์อสัณฐาน (amorphous polymers) เช่น เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) หรือยางสังเคราะห์ (synthetic rubber) รวมถึงวัสดุชนิดเส้นใย (fibrous material ได้แก่ เส้นไหม เส้นใยสังเคราะห์ เป็นต้น) แก้ว เซรามิกส์ วัสดุชีวภาพ (biomaterial ได้แก่ ผิวหนัง หรือกล้ามเนื้อ เป็นต้น) นอกจากนี้ส่วนประกอบของวัสดุยุคใหม่ยังสามารถพิจารณาเป็นวัสดุวิสโคอีลาสติกชนิดเชิงเส้นได้ เช่น วัสดุเชิงประกอบ (composite material) วัสดุแบบโครงสร้างแซนด์วิช (sandwich structure) ซึ่งใช้แกนกลาง (core) เป็นวัสดุอ่อน ทำให้มีพฤติกรรมแบบวิสโคอีลาสติกชนิดเชิงเส้น นอกจากนี้ความเค้นที่เกิดขึ้นในคอนกรีตหรือซีเมนต์ และครีป (creep) ที่เกิดขึ้นในโลหะ ยังสามารถอธิบายได้ด้วยหลักการของทฤษฎีวิสโคอีลาสติกชนิดเชิงเส้นได้ (Shames and Cozzarelli, 1992)

แบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมวิสโคอีลาสติกของวัสดุโพลีเมอร์สามารถจำแนกกว้างๆ ออกได้เป็นสองประเภทคือ แบบจำลองเชิงกลศาสตร์ (mechanical analog model) และแบบจำลองทฤษฎีโครงสร้างโมเลกุล (molecular theories model) โดยแบบจำลองเชิงกลศาสตร์เกิดจากการนำ elements แบบ สปริง (spring) และตัวหน่วง (dashpot) มาประกอบกันเพื่ออธิบายพฤติกรรมวิสโคอีลาสติก ในขณะที่แบบจำลองทฤษฎีโครงสร้างโมเลกุลจะนำหลักการเคลื่อนที่เชิงโมเลกุลของโพลีเมอร์ในตัวกลางแบบหนืด (viscous medium) มาใช้ในการอธิบายพฤติกรรมวิสโคอีลาสติกของโพลีเมอร์ (Shaw and Macknight, 2005)

วัสดุอีลาสติก (elastic material) หมายถึงวัสดุที่ เมื่อปลดภาระงานที่กระทำ (unloaded) แล้วกลับคืนสู่สภาพเดิม โดยความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด ในขณะที่เพิ่มภาระงานและปลดภาระงานมีลักษณะเดียวกัน ซึ่งบ่งชี้ว่าไม่มีการสูญเสียพลังงานไปในกระบวนการเพิ่มและลดภาระงาน หรือเป็นการอนุรักษ์พลังงานนั่นเอง (Shames and Cozzarelli, 1992)

กรณีที่วัสดุมีความสัมพันธ์ของความเค้น (stress หรือ  $\sigma$ ) และความเครียด (strain หรือ  $\epsilon$ ) เป็นแบบเชิงเส้น และไม่มีผลกระทบจากความเฉื่อย (inertia effect) วัสดุนั้นจะเรียกว่า วัสดุ

อีลาสติกเชิงเส้น (linear elastic material) และเรียกแบบจำลองของวัสดุเป็นแบบจำลองฮุกเกียน (Hookean model) ซึ่งสามารถใช้สัญลักษณ์สปริง แทนวัสดุนี้ได้ สมการของความเค้นมีดังนี้

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

โดย  $E$  คือ ค่ายังมอดุลัส (Young modulus) ของวัสดุ

สำหรับวัสดุที่มีความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดแบบไม่เชิงเส้น จะเรียกวัดุนั้นว่าเป็นวัสดุอีลาสติกแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear elastic material) และเรียกแบบจำลองของวัสดุแบบนี้ว่า แบบจำลองเฮงก์ (Hencky model) ซึ่งสามารถใช้สัญลักษณ์สปริงแบบไม่เชิงเส้น (หรือสัญลักษณ์สปริงที่มีเส้นตัดผ่าน) ในกรณีที่ใช้สปริงเป็นแบบจำลองของวัสดุ เราสามารถใช้แรงของสปริงแทนความเค้น และการยืดของสปริงแทนความเครียดได้

เมื่อความเค้น ( $\sigma$ ) ของวัสดุขึ้นอยู่กับอัตราความเครียด (strain rate หรือ  $\dot{\varepsilon}$ ) หรือในกรณีของของไหลโดยทั่วไป สมการของความเค้นจะอยู่ในรูปของ

$$\sigma = \eta\dot{\varepsilon} \quad (2)$$

โดย  $\eta$  คือ ค่าคงที่ของตัวหน่วง หรือค่าความหนืด (viscosity) ของวัสดุ มีหน่วยเป็น Pa·sec หรือ Poise และ

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3)$$

เนื่องจากวัสดุมีพฤติกรรมแบบของไหล (fluid) ซึ่งมีความหนืด (viscous) และวัสดุมีการสูญเสียพลังงาน และไม่คืนรูปเมื่อปลดภาระ วัสดุหนืดในอุดมคติ คือ วัสดุหนืดเชิงเส้น (linear viscous material) หรือ นิวโตเนียน (Newtonian material)

สำหรับวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบกึ่งหนืด (quasi-viscous) หรือ นันิวโตเนียน (Non-Newtonian) จะเรียกวัดุนี้เป็นวัสดุสโตรค (stroke material) เนื่องจากวัสดุประเภทนี้จะแสดง

การไหลแบบหนืด (viscous-flow) จึงเรียกแบบจำลองของวัสดุประเภทนี้ว่า แบบจำลองรีโอโลยี (rheological model) (Shames and Cozzarelli, 1992)

## 6. แบบจำลองวัสดุวิสโคอีลาสติกชนิดเชิงเส้น

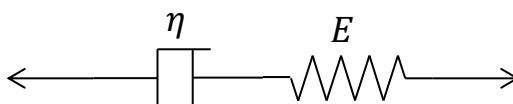
วัสดุวิสโคอีลาสติก (viscoelastic material) หมายถึงวัสดุที่มีความหนืด (viscous) และความยืดหยุ่น หรืออีลาสติก (elastic) ร่วมกัน ตัวอย่างเช่น เหล็กหรือหินที่อุณหภูมิสูง พลาสติกที่อุณหภูมิต่ำ วัสดุวิสโคอีลาสติกจึงประกอบด้วยสปริงและตัวหน่วง ซึ่งหากประกอบกันแบบอนุกรมจะเรียกว่า แบบจำลองแมกซ์เวลล์ (Maxwell model) และเมื่อประกอบกันแบบขนานจะเรียกว่าแบบจำลองเคลวิน (Kelvin model) (Shames and Cozzarelli, 1992)

### 6.1 แบบจำลองวิสโคอีลาสติกของแมกซ์เวลล์

แบบจำลองแมกซ์เวลล์ (Maxwell model) คือ แบบจำลองวัสดุวิสโคอีลาสติกที่ประกอบด้วยสปริงและตัวหน่วง (หรือ ประกอบด้วยสมบัติแบบฮุคเกี้ยนและนิวโตเนียน) มาประกอบกันแบบอนุกรม ดังแสดงในภาพที่ 8 เนื่องจากแรงของสปริงและตัวหน่วงเท่ากัน ดังนั้นความเค้นในสปริงและตัวหน่วงจึงมีค่าเท่ากัน สรุปสมการของความเค้น ( $\sigma$ ) ได้ดังสมการที่ 4

$$\sigma = \sigma_E = \sigma_\eta \quad (4)$$

โดย  $\sigma_E$  คือ ความเค้นของสปริง  
 $\sigma_\eta$  คือ ความเค้นของตัวหน่วง



ภาพที่ 8 แผนภาพของแบบจำลองแมกซ์เวลล์

ในขณะที่ความเครียดหรือการยืดตัว และอัตราความเครียด คือผลรวมของความเครียดของสปริง และตัวหน่วง ดังนั้น สมการของความเครียดคือ

$$\varepsilon = \varepsilon_E + \varepsilon_\eta \quad (5)$$

โดย  $\varepsilon_E$  คือ ความเครียดของสปริง  
 $\varepsilon_\eta$  คือ ความเครียดของตัวหน่วง

และสมการของ strain rate หรืออัตราความเครียด คือ

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_E + \dot{\varepsilon}_\eta \quad (6)$$

จากสมการ (1) ความเค้นของสปริงจะได้เป็น

$$\sigma_E = E\varepsilon_E \quad (7)$$

และอัตราความเค้นของสปริงเป็น

$$\dot{\sigma}_E = E\dot{\varepsilon}_E \quad (8)$$

จากสมการ (2) ความเค้นของตัวหน่วง  $\sigma_\eta$  เท่ากับ

$$\sigma_\eta = \eta\dot{\varepsilon}_\eta \quad (9)$$

แทนค่าจากสมการ (8), (9) ลงในสมการ (6) จะได้

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (10)$$

สมการ (10) คือ สมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัสดุ ในรูปของสมการแมกซ์เวลล์

## 6.2 แบบจำลองวัสดุโคอีลาสติกของเคลวิน

แบบจำลองเคลวิน (Kelvin model) คือ แบบจำลองวัสดุวิสโคอีลาสติกที่ประกอบด้วยสปริงและตัวหน่วง (หรือ ประกอบด้วยสมบัติแบบฮุกเกี้ยน และนิวโตเนียน) มาประกอบกันแบบขนาน ดังแสดงในภาพที่ 9 ความเครียดจากการยืดตัวของสปริงและตัวหน่วงต่างมีค่าเท่ากัน สรุปลสมการของความเครียด ( $\varepsilon$ ) ได้ดังสมการที่ 11

$$\varepsilon = \varepsilon_E = \varepsilon_\eta \quad (11)$$

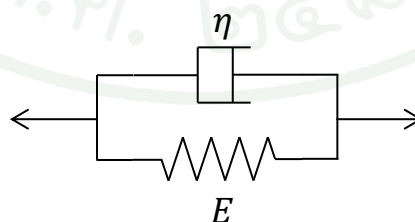
ในขณะที่แรงหรือความเค้นคือผลรวมของสปริงและตัวหน่วง ดังนั้น สมการของความเค้นคือ

$$\sigma = \sigma_E + \sigma_\eta \quad (12)$$

แทนค่าจากสมการ (1), (2) ลงในสมการ (12) จะได้

$$\sigma = \eta \dot{\varepsilon} + E\varepsilon \quad (13)$$

สมการ (13) คือ สมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัสดุ ในรูปของสมการเคลวิน



ภาพที่ 9 แผนภาพของแบบจำลองเคลวิน

## 7. การทดสอบการผ่อนคลายความเค้นของวัสดุ

การทดสอบการผ่อนคลายความเค้น (Relaxation Test) คือ การทดสอบด้วยการดึงวัสดุให้ยืดออก โดยมีระยะยืดคงที่ หรือมีอัตราความเครียด หรือ strain rate เป็นศูนย์ จากสมการวิสโคอีลาสติกของแมกซ์เวลล์ (สมการ 10) เมื่อแทนค่า  $\dot{\epsilon} = 0$  จะได้สมการ

$$\dot{\sigma} = -\frac{E}{\eta}\sigma \quad (14)$$

หรือ

$$\frac{d\sigma}{dt} = -\frac{E}{\eta}\sigma \quad (15)$$

ทำการอินทิเกรต สมการ (15) จะได้

$$\int_{\sigma_0}^{\sigma} \frac{1}{\sigma} d\sigma = \int_0^t -\frac{E}{\eta} dt \quad (16)$$

$$\ln \sigma - \ln \sigma_0 = -\frac{E}{\eta} t \quad (17)$$

$$\ln \frac{\sigma}{\sigma_0} = -\frac{E}{\eta} t \quad (18)$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = e^{-\frac{E}{\eta} t} \quad (19)$$

นำ  $\sigma_0$  คูณทั้งสองข้างของสมการ (19) จะได้

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{-\frac{E}{\eta} t} \quad (20)$$

เนื่องด้วย  $\sigma_0 = E\varepsilon_0$  ดังนั้นสมการ (20) สามารถเขียนเป็น

$$\sigma(t) = E\varepsilon_0 e^{-\frac{t}{\eta}} \quad (21)$$

หรือ

$$\frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} = E e^{-\frac{t}{\eta}} \quad (22)$$

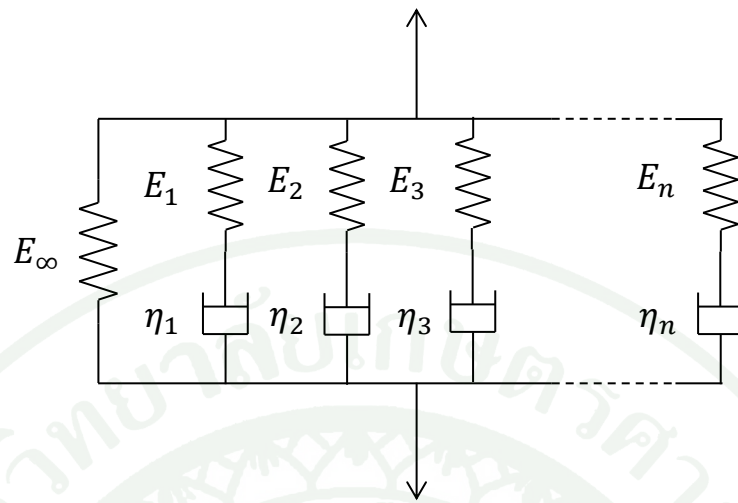
เนื่องจาก  $\sigma(t) = E(t)\varepsilon_0$  ดังนั้น

$$E(t) = E e^{-t/\tau} \quad (23)$$

โดย  $\tau = \frac{\eta}{E}$  คือ เวลาคลายตัว (relaxation time) มีหน่วยเป็นวินาที และ  $E(t)$  คือ ฟังก์ชันโมดูลัสการผ่อนคลายความเค้น (stress relaxation modulus function) ที่ขึ้นกับเวลา มีหน่วยเป็นปาสคาล (Pa)

## 8. แบบจำลองทั่วไปของแมกซ์เวลล์

แบบจำลองทั่วไปของแมกซ์เวลล์ (Generalized Maxwell model) คือแบบจำลองวัสดุวิสโคอีลาสติกที่นำแบบจำลองของแมกซ์เวลล์ประกอบรวมกันแบบขนาน ดังแสดงในภาพที่ 10 ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองของแมกซ์เวลล์จำนวน  $n$  ชั้นประกอบ โดยแบบจำลองของแมกซ์เวลล์แต่ละชั้นประกอบจะมีค่าคงที่ของสปริงเท่ากับ  $E_i$  และค่าคงที่ของตัวหน่วงเท่ากับ  $\eta_i$  ภายใต้ภาวะแบบผ่อนคลายความเค้น ความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นประกอบของแบบจำลองแมกซ์เวลล์จะมีค่าเท่ากัน และความเค้นของแบบจำลองทั่วไปของแมกซ์เวลล์จะมีค่าเท่ากับผลรวมของความเค้นที่เกิดขึ้นในชั้นประกอบของแมกซ์เวลล์แต่ละชั้น สรุปสมการของความเค้นและความเครียดได้ดังนี้



ภาพที่ 10 แผนภาพของแบบจำลองทั่วไปของแมกซ์เวลล์

$$\epsilon_0 = \epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3 = \dots = \epsilon_n \quad (24)$$

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \dots + \sigma_n \quad (25)$$

โดยแต่ละชิ้นประกอบของแมกซ์เวลล์จะมีสมการอัตราความเครียด

$$\dot{\epsilon}_i = \frac{1}{E_i} \frac{d\sigma_i}{dt} + \frac{\sigma_i}{\eta_i} = 0 \quad (26)$$

ดังนั้น

$$\frac{d\sigma_i}{dt} = -\frac{E_i}{\eta_i} \sigma_i \quad (27)$$

ทำการคำนวณตามสมการ 16 ถึง 20 จะได้

$$\sigma_i(t) = \sigma_0 e^{-\frac{E_i t}{\eta_i}} \quad (28)$$

เนื่องด้วย  $\sigma_0 = E_i \varepsilon_0$  และ  $\tau_i = \frac{\eta_i}{E_i}$  ดังนั้นสมการ 28 สามารถเขียนเป็น

$$\sigma_i(t) = E_i \varepsilon_0 e^{-t/\tau_i} \quad (29)$$

แทนค่าสมการ 29 ลงในสมการ 25 จะได้

$$\sigma(t) = E_1 \varepsilon_0 e^{-t/\tau_1} + E_2 \varepsilon_0 e^{-t/\tau_2} + E_3 \varepsilon_0 e^{-t/\tau_3} + \dots + E_n \varepsilon_0 e^{-t/\tau_n} \quad (30)$$

นำ  $\varepsilon_0$  ไปหารทั้งสองฝั่งของสมการ 30 จะได้

$$E(t) = E_1 e^{-t/\tau_1} + E_2 e^{-t/\tau_2} + E_3 e^{-t/\tau_3} + \dots + E_n e^{-t/\tau_n} \quad (31)$$

หรือ

$$E(t) = \sum_{i=1}^n E_i e^{-t/\tau_i} \quad (32)$$

ดังนั้นแบบจำลองสมการทั่วไปของแมกซ์เวลล์จึงสามารถแสดงถึงสเปกตรัมของการผ่อนคลายความเค้นแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete relaxation spectrum) ของวัสดุวิสโคอีลาสติก โดยเวลาคลายตัว ( $\tau_i$ ) ในแต่ละระดับชั้น (spectral) หรือแต่ละชั้นประกอบของแมกซ์เวลล์จะสัมพันธ์กับโมดูลัสการผ่อนคลายความเค้น ( $E_i$ ) ในระดับชั้นหรือชั้นประกอบเดียวกัน

โดยหากวัสดุเป็นของแข็งวิสโคอีลาสติก (viscoelastic solid) ภายใต้การทดสอบการผ่อนคลายความเค้น จะพบว่าความเค้นมีค่าเข้าใกล้ค่าคงที่ค่าหนึ่งหรือวัสดุเข้าสู่ภาวะสมดุล ดังนั้นสมการทั่วไปของแมกซ์เวลล์สำหรับวัสดุของแข็งวิสโคอีลาสติก จึงประกอบด้วยพจน์ที่มีเวลาคลายตัวในช่วงเวลายาวนานมาก หรือ  $t = \infty$  จนเข้าใกล้ภาวะสมดุล (equilibrium condition) เพื่อแสดงถึงโมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นที่ภาวะสมดุล (equilibrium modulus) หรือ  $E_\infty$  (Ferry, 1980) หรือเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$E(t) = E_\infty + \sum_{i=1}^n E_i e^{-t/\tau_i} \quad (33)$$

จากสมการ 33 ที่เวลา  $t = 0$  จะได้

$$E(0) = E_\infty + \sum_{i=1}^n E_i \quad (34)$$

เมื่อให้  $E_0 = E(0)$  จะได้

$$E_\infty = E_0 - \sum_{i=1}^n E_i \quad (35)$$

แทนค่าสมการ 35 ลงในสมการ 33 จะได้ว่า

$$E(t) = E_0 - \sum_{i=1}^n E_i + \sum_{i=1}^n E_i e^{-t/\tau_i} \quad (36)$$

หรือ

$$E(t) = E_0 - \sum_{i=1}^n E_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (37)$$

ในทำนองเดียวกันสำหรับความเค้นเฉือน

$$G(t) = G_0 - \sum_{i=1}^n G_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (38)$$

โดย  $G(t)$  คือ ฟังก์ชันโมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นเฉือน (shear relaxation modulus function) ขึ้นกับเวลา มีหน่วยเป็นปาสคาล (Pa)

โดยสมการ 37 และ 38 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทดสอบสมบัติของวัสดุของแข็งวิสโคอีลาสติก โดยแยกสมบัติในช่วงอีลาสติกออกจากสมบัติการผ่อนคลายความเค้นของวัสดุ

ความสัมพันธ์ของโมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นที่อุณหภูมิที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับอุณหภูมิเดิมของวัสดุวิสโคอีลาสติกสามารถหาได้ โดยการใช้ฟังก์ชันเลื่อนเวลาและอุณหภูมิ (time-temperature shift function,  $a_t(T)$ ) โดยใช้สมการของวิลเลียม-แลนเดล-เฟอริ (Williams-Landel-Ferry หรือ WLF) ซึ่งค่าโมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นของวัสดุเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปจะเท่ากับผลคูณของค่าโมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นของวัสดุที่อุณหภูมิเดิมกับฟังก์ชันเลื่อนเวลาและอุณหภูมิ โดยมีสมการคือ

$$\log a_t(T) = \frac{-C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad (39)$$

โดย  $a_t(T)$  คือ ฟังก์ชันเลื่อนเวลาและอุณหภูมิ  
 $C_1$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ (ไม่มีหน่วย)  
 $C_2$  คือ ค่าคงที่ ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T$  คือ อุณหภูมิที่สนใจ ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T_{ref}$  คือ อุณหภูมิอ้างอิง ( $^{\circ}\text{C}$ )

เมื่อนำอุณหภูมิเข้ามาพิจารณา สามารถใช้หลักการเลื่อนเวลาและอุณหภูมิอธิบายได้ โดยใช้สมการ WLF (สมการ 39) เป็นฟังก์ชันเลื่อนเวลาและอุณหภูมิ ส่วนสมการโมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นที่ขึ้นอยู่กับเวลา เมื่อแทนฟังก์ชันเลื่อนเวลาและอุณหภูมิ จะได้สมการใหม่เป็น

$$E(t, T) = E_0 - \sum_{i=1}^n E_i \left(1 - e^{-t/a_T \tau_i}\right) \quad (40)$$

ในทำนองเดียวกันสำหรับโมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นเฉือน

$$G(t, T) = G_0 - \sum_{i=1}^n G_i \left(1 - e^{-t/a_T \tau_i}\right) \quad (41)$$

## 9. แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก

แบบจำลองเชิงโครงสร้างชนิดไฮเปอร์อีลาสติก (hyperelastic model) สามารถนำมาใช้อธิบายพฤติกรรมการเสียรูปอีลาสติกแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear elastic deformation) ของวัสดุอีลาสโตเมอร์ หรือวัสดุที่มีสมบัติคล้ายยาง (rubber-like material) ได้ ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกสามารถอธิบายโดยเขียนในรูปฟังก์ชันความหนาแน่นของพลังงานความเครียด (strain energy density function,  $W$ ) (Mase, 2010) โดยพลังงานความเครียดสามารถเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของอัตราส่วนการยืด (stretch ratio,  $\lambda$ ) ได้ดังนี้

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (42)$$

พลังงานความเครียดสามารถเขียนให้อยู่ในรูปอินวาเรียนท์ของความเครียด (strain invariant,  $I$ ) ของเทนเซอร์การเสียรูปแบบ Left Cauchy-Green deformation tensor ได้ดังนี้

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \quad (43)$$

โดย  $I_1$ ,  $I_2$  และ  $I_3$  คือ อินวาเรียนท์ลำดับที่หนึ่ง, สอง, และสาม (first, second, and third invariant) ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างอินวาเรียนท์และอัตราส่วนการยืดสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (44)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 \quad (45)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \quad (46)$$

สำหรับวัสดุที่เป็นยางเมื่อพิจารณาให้วัสดุมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตร หรือกำหนดให้เป็นวัสดุแบบอัดตัวไม่ได้ (incompressible) จะได้ว่า

$$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1 \quad (47)$$

เมื่อให้จาโคเบียนอีลาสติก (elastic jacobian),  $J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3$

ทำให้อินวาเรียนท์ลำดับที่สาม มีค่า

$$I_3 = J^2 = 1 \quad (48)$$

ดังนั้น  $W$  หรือฟังก์ชันพลังงานความเครียดของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกแบบอัดตัวไม่ได้ จึงเขียนเป็นฟังก์ชันได้เป็น

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2) \quad (49)$$

แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกสามารถจำแนกกว้างๆ ได้เป็นสองประเภท คือ แบบจำลองเชิงปรากฏการณ์ (phenomenological model) หรือแบบจำลองเชิงประจักษ์ (empirical model) และแบบจำลองเชิงกลไกระดับจุลภาค (micromechanics model) หรือแบบจำลองเชิงกายภาพ (physical based model) (Holzapfel, 2000) โดยแบบจำลองเชิง-ปรากฏการณ์ เป็นการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากข้อมูลของผลการทดสอบและการสังเกตพฤติกรรมของวัสดุ โดยไม่พิจารณาถึงโครงสร้างภายในโมเลกุล สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองเชิงปรากฏการณ์สามารถหาได้โดยการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบผ่านสมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลอง ในขณะที่แบบจำลองเชิงกายภาพมีพื้นฐานมาจากกลไกโครงสร้างของวัสดุในระดับจุลภาค โดยอาศัยทฤษฎีจลศาสตร์ (kinetic theory) และทฤษฎีกลศาสตร์สถิติ (statistical mechanics theory) เพื่อการอธิบายความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล และการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (entropy) ของวัสดุอีลาสโตเมอร์

## 10. แบบจำลองมูนี่-ริฟลิน

โพลีเมอร์ที่อุณหภูมิสูงมีพฤติกรรมคล้ายวัสดุคล้ายยาง (rubber-like material) และเกิดการเสียรูปอย่างมาก สามารถอธิบายโดยกำหนดให้เป็นวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกได้ โดยใช้แบบจำลองพหุนาม ในรูปแบบของแบบจำลองมูนี่-ริฟลินได้ (Khayat and Derdouri, 1995)

แบบจำลองพหุนาม คือ แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกเชิงปรากฏการณ์ ที่เกิดจากการนำฟังก์ชันพลังงานความเครียดมาเขียนให้อยู่ในรูปสมการพหุนามของอินวาเรียนท์ของเทนเซอร์การเสียรูป Left Cauchy-Green หรืออาจเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$W = \sum_{i+j+k=1}^N C_{ijk} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j (I_3 - 3)^k \quad (50)$$

โดย  $C_{ijk}$  คือ สัมประสิทธิ์ของวัสดุ

เมื่อวัสดุมีพฤติกรรมแบบอัดตัวไม่ได้ จากสมการ (47) ฟังก์ชันพลังงานความเครียดจะสามารถเขียนเป็น

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (51)$$

โดยในช่วงที่เกิดการเสียรูปน้อย (small deformation) โดยความเครียดอยู่ในช่วงความเครียดจำกัด (finite strain) และความเครียดวิศวกรรม (engineering strain)  $C_{ij}$  จะมีความสัมพันธ์กับโมดูลัสเฉือนเริ่มต้น (initial shear modulus,  $\mu$ ) ของวัสดุ ได้ดังนี้

$$\mu = 2 \sum_{i+j=1}^N C_{ij} \quad (52)$$

เมื่อให้แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก เป็นแบบจำลองพหุนามอันดับที่ 1 ( $N = 1$ ) และกำหนดให้  $C_{01}$  มีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งทำให้  $C_{10}$  มีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของโมดูลัสเฉือนของวัสดุ

แบบจำลองที่เป็นไปตามเงื่อนไขนี้เรียกว่า แบบจำลองนีโอฮุคเกียน (Neo-Hookean model) (Holzapfel, 2000) โดยสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังแสดงในสมการที่ (53)

$$W = C_{10}(I_1 - 3) \quad (53)$$

แบบจำลองมูนีร์ฟลิน (Mooney-Rivlin model) คือ แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกที่อธิบายโดยแบบจำลองพหุนามลำดับที่ 1 ( $N = 1$ ) (กฤษกร, 2551) ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดได้ดีในช่วงการยืดตัวไม่สูงมาก แบบจำลองมูนีร์ฟลินสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังแสดงในสมการที่ (54)

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (54)$$

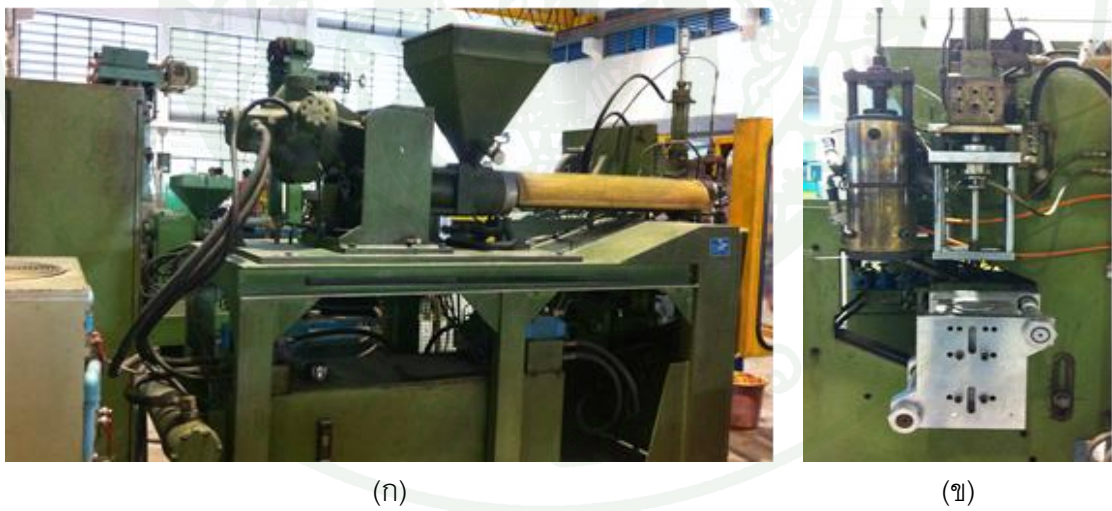
## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. ขวดผลิตจากพลาสติก HDPE แบบสมมาตรรอบแกน ความจุ 0.9 ลิตร และแบบไม่สมมาตรรอบแกนความจุ 1 ลิตร (ภาพที่ 11 ก และ ข ตามลำดับ)
2. เครื่องอัดรีดเป่าขึ้นรูป ผลิตโดยบริษัท S.M.C. Machinery CO., LTD. รุ่น SMC 1500 ประกอบด้วยชุดอัดรีดและชุดเป่าขึ้นรูป รายละเอียดของเครื่องอัดรีดเป่าขึ้นรูปได้แสดงในภาพที่ 12
3. แม่พิมพ์ของขวดขนาด 0.9 ลิตร (ภาพที่ 13)
4. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลหน่วยประมวลผลกลาง Pentium IV ความเร็ว 3.00 GHz. หน่วยความจำ RAM 2.00 GB การ์ดแสดงผลหน่วยความจำ วิดีโอ 64 MB จอภาพ ขนาด 19 นิ้ว
5. เครื่องพิมพ์ชนิด inkjet และ laserjet
6. ไมโครมิเตอร์ ยี่ห้อ Mitutoyo สำหรับวัดความหนาของขวดทดสอบ ความละเอียด  $\pm 0.01$  mm (ภาพที่ 14)
7. เวอร์เนีย ยี่ห้อ Mitutoyo ชนิดดิจิตอล สำหรับวัดความหนาของขวดทดสอบ ในบริเวณที่ไม่เหมาะต่อการวัดด้วยไมโครมิเตอร์ เช่น บริเวณที่มีความโค้งหรือมีพื้นที่เล็ก ความละเอียด  $\pm 0.01$  mm (ภาพที่ 15)
8. ซอฟต์แวร์ CAD ชื่อ Pro/ENGINEER Wildfire V.3.0 ของ บริษัท Parametric Technology Corporation (PTC), USA.
9. ซอฟต์แวร์ CAE ชื่อ MSC.Patran 2005 ของบริษัท MSC Software Corporation, USA. สำหรับการวิเคราะห์ทาง FEA
10. ซอฟต์แวร์ CAE ชื่อ MSC.Marc 2005 ของบริษัท MSC Software Corporation, USA. สำหรับการวิเคราะห์ทาง FEA
11. ซอฟต์แวร์ MATLAB ของ บริษัท Mathworks สำหรับประมวลผลทางสถิติและพล็อตกราฟเส้น



ภาพที่ 11 ขวดทดสอบที่ใช้ในการวิจัย ขนาด (ก) 0.9 ลิตร และ (ข) 1 ลิตร



ภาพที่ 12 เครื่องอัดรีดเป่าขึ้นรูป (ก) ชุดอัดรีด และ (ข) ชุดเป่าขึ้นรูปผลิตภัณฑ์



ภาพที่ 13 แม่พิมพ์ของขวดทดสอบ ขนาด 0.9 ลิตร



ภาพที่ 14 ไมโครมิเตอร์สำหรับวัดความหนาของขวดทดสอบ



ภาพที่ 15 เวอร์เนียชนิดดิจิตอลสำหรับวัดความหนาของขวดทดสอบ

การดำเนินการการวิเคราะห์นี้ใช้สถานที่และอุปกรณ์ของหน่วยปฏิบัติการวิจัยการ  
ออกแบบทางกลและผลิตภัณฑ์ (MPDRL) อาคาร 6 ห้อง 6309 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน (ภาพที่ 16) และบริษัทปัญญาวัฒนาพลาสติก จำกัด

งานวิจัยของวิทยานิพนธ์นี้ เป็นส่วนหนึ่งภายใต้ชุดโครงการสนับสนุนผู้ปฏิบัติการวิจัยใน  
ภาคอุตสาหกรรม ซึ่งได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย  
(สกว.) และจากบริษัทปัญญาวัฒนาพลาสติก จำกัด ภายใต้โครงการ การจำลองการเปลี่ยนแปลง  
ความหนาของพาริสันภายใต้การเป่าขึ้นรูปแบบเอ็กทรูชั่น สัญญาเลขที่ MRG-WI525E030

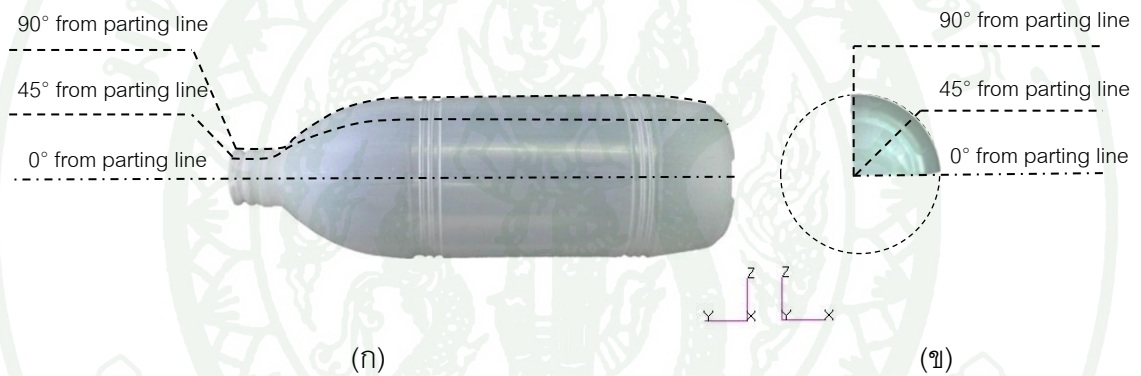


ภาพที่ 16 หน่วยปฏิบัติการวิจัยการออกแบบทางกลและผลิตภัณฑ์ (MPDRL) อาคาร 6 ห้อง  
6309 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน

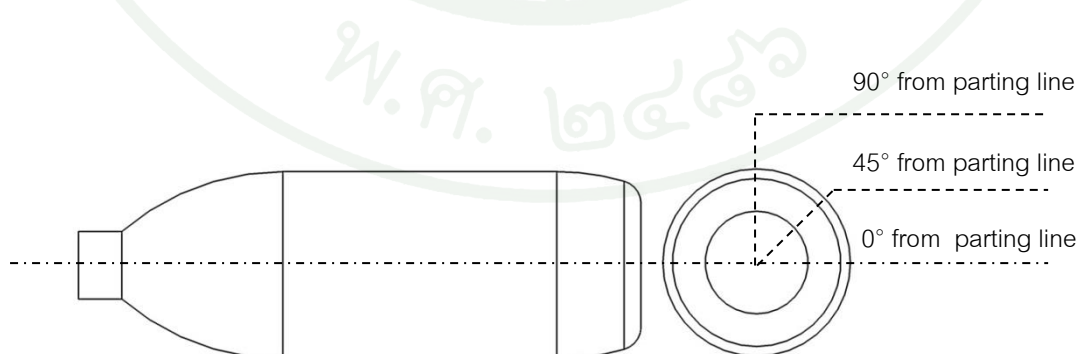
## วิธีการ

### 1. การวัดการกระจายตัวของความหนาของขวดทดสอบ

ขวดทดสอบความจุ 0.9 ลิตร จะถูกนำมาตัดแบ่งเพื่อวัดการกระจายตัวของความหนาของผนังขวดและฐานขวด โดยทำการวัดความหนาจากแนวเส้นประกบแม่พิมพ์ หรือเส้นแบ่งแม่พิมพ์ (parting line) ที่  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $90^\circ$  โดยภาพที่ 17 แสดงขวดทดสอบที่ถูกตัดแบ่งเพื่อใช้ในการวัดการกระจายตัวของความหนา และรายละเอียดของการวัดการกระจายตัวของความหนาในแนวต่างๆ ได้แสดงในแผนภาพที่ 18



ภาพที่ 17 แสดงตำแหน่งการตัดขวดเพื่อใช้ในการวัดการกระจายตัวของความหนา (ก) ภาพมุมมองด้านข้าง และ (ข) ภาพด้านล่าง

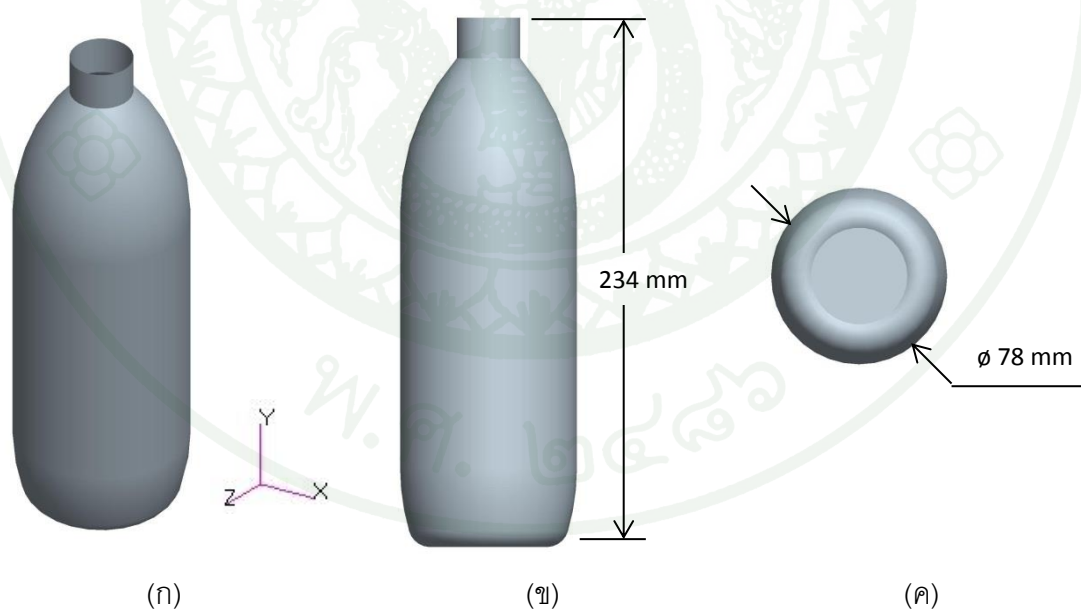


ภาพที่ 18 ภาพ 2 เมตรแสดงตำแหน่งของการวัดการกระจายตัวของความหนาในแนวต่างๆ

## 2. การสร้างแบบจำลองพื้นผิวของกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูป

แบบจำลองพื้นผิว (surface model) ของขวดทดสอบได้ถูกสร้างขึ้นโดยซอฟต์แวร์ CAD ชื่อ Pro/ENGINEER WILDFIRE V3.0 โดยทำการดัดแปลงรูปทรงของแบบจำลองพื้นผิวให้เหมาะสมต่อการนำไปวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เนื่องจากขวดทดสอบมีลายร่องบางบริเวณของผนังขวด เกือบที่ปากขวด (ภาพ 17) ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กเกินความจำเป็น และทำให้เกิดความยุ่งยากเมื่อวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงต้องดัดแปลงรูปทรงของแบบจำลองพื้นผิวให้เหมาะสม โดยรายละเอียดของแบบจำลองพื้นผิวของขวดทดสอบที่ได้รับการดัดแปลงได้แสดงไว้ในภาพที่ 19

หลังจากนั้น จึงได้นำแบบจำลองพื้นผิวของขวดทดสอบ ไปสร้างแบบจำลองพื้นผิวของกระบวนการเป่าขวด โดยแบบจำลองของกระบวนการเป่าขวดมีส่วนประกอบ 2 ส่วน ได้แก่

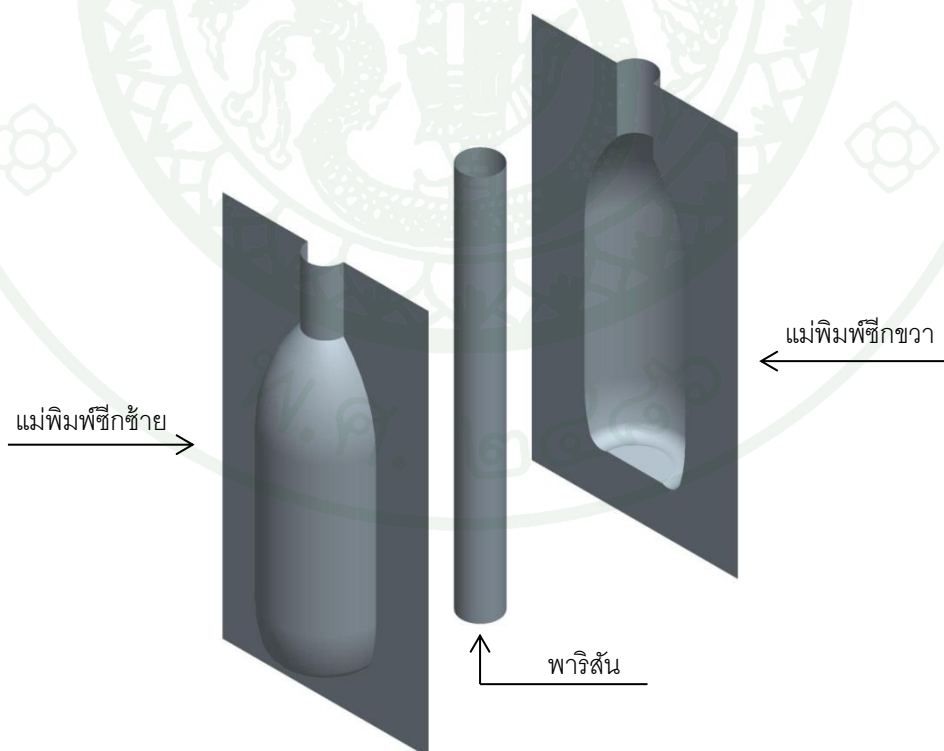


ภาพที่ 19 แบบจำลองพื้นผิวของขวดทดสอบขนาด 0.9 ลิตร (ก) ภาพไอโซเมตริก  
 (ข) ภาพด้านหน้า (ค) ภาพด้านล่าง

1) แบบจำลองพื้นผิวของแม่พิมพ์ (mold) โดยแบบจำลองพื้นผิวของแม่พิมพ์ประกอบ ด้วยแบบจำลองซี่ก้ำยและซี่กขวา รายละเอียดของแบบจำลองพื้นผิวของแม่พิมพ์ได้แสดงไว้ใน ภาพที่ 20

2) แบบจำลองพื้นผิวของพาริสัน (parison) โดยแบบจำลองพื้นผิวของพาริสันจะถูก กำหนดให้เป็นพื้นผิวกึ่งกลาง (mid surface) ของพาริสัน เพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปวิเคราะห์ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้เอลิเมนต์ชนิด shell และชนิด membrane พื้นผิวกึ่งกลาง ของพาริสันสำหรับขวดทดสอบความจุ 0.9 ลิตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 28.8 มิลลิเมตร รายละเอียด ของแบบจำลองพื้นผิวของพาริสันได้แสดงไว้ในภาพที่ 20

ภาพแบบจำลองพื้นผิวของกระบวนการเป่าขวด ได้แสดงในภาพที่ 20 แบบจำลองพื้นผิว ทั้งหมดจะถูกแปลงเป็นไฟล์แลกเปลี่ยนมาตรฐานแบบ STEP และ IGES เพื่อนำไปใช้ในการสร้าง แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยซอฟต์แวร์ MSC. Patran 2005 ต่อไป



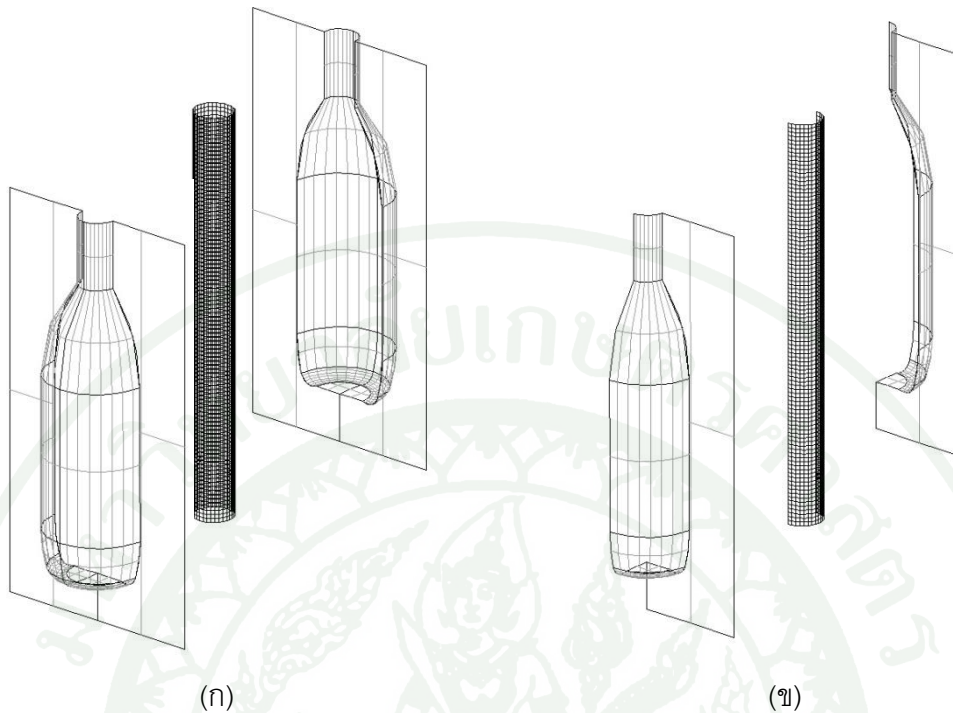
ภาพที่ 20 แบบจำลองพื้นผิวของกระบวนการเป่าขวด แสดงทั้งแม่พิมพ์และพาริสัน

### 3. การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูป

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูป สร้างขึ้นโดยใช้ซอฟต์แวร์ MSC. PATRAN 2005 และทำการกำหนดเงื่อนไขภาระและเงื่อนไขขอบเขต ส่วนการวิเคราะห์ใช้ซอฟต์แวร์ MSC. MARC 2005 สำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูป ต้องการวิเคราะห์เฉพาะพาริสันเท่านั้น และไม่สนใจการเปลี่ยนแปลงที่แม่พิมพ์ จึงมีความจำเป็นต้องสร้าง elements ในส่วนของพาริสันเท่านั้น ส่วนแม่พิมพ์สามารถนำแบบจำลองพื้นผิวที่ได้จากซอฟต์แวร์ CAD มากำหนดคุณสมบัติเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (rigid body) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เงื่อนไขการสัมผัสได้

เนื่องจากขวดทดสอบ มีรูปทรงสมมาตรรอบแกน จึงสามารถกำหนด เงื่อนไขขอบเขตแบบสมมาตร (symmetry) ในแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์ (parting line) เพื่อลดจำนวนชิ้นประกอบ รวมถึงลดความซับซ้อนของแบบจำลอง และทำให้เวลาในการวิเคราะห์ลดลง แต่ไม่สามารถกำหนดเงื่อนไขสมมาตรในแนวตั้งฉากกับเส้นแบ่งแม่พิมพ์ได้ เพราะจำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสของแม่พิมพ์ทั้งสองฝั่ง ดังนั้นจึงทำการศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่างของผลการวิเคราะห์ของแบบจำลอง โดยกำหนดให้แบบจำลองของขวดทดสอบแบ่งออกเป็นแบบเต็มใบ และแบบสมมาตรครึ่งใบ รายละเอียดของแบบจำลองทั้งสองแบบได้แสดงไว้ในภาพที่ 21

แบบจำลองโครงร่างตาข่าย (mesh) ของพาริสันจะถูกสร้างขึ้นจากแบบจำลองพื้นผิวของพาริสัน ซึ่งนำเข้ามาในโปรแกรม MSC. PATRAN 2005 โดยใช้ไฟล์แลกเปลี่ยนมาตรฐาน รายละเอียดของแบบจำลองโครงร่างตาข่ายของพาริสันได้แสดงไว้ในภาพที่ 21 โดยแบบจำลองโครงร่างตาข่ายของพาริสันแบบสมมาตรครึ่งใบจะประกอบด้วยเอลิเมนต์ชนิดพื้นผิวรูปทรงสี่เหลี่ยม (quadrilateral elements) จำนวน 1600 ชิ้นประกอบ มีอัตราส่วนพื้นที่เอลิเมนต์ต่อพื้นที่ผิวรวม (Area Ratio of Element, ARE) เท่ากับ  $3.12 \times 10^{-4}$  และจุดเชื่อมต่อหรือ nodes จำนวน 1717 โหนด และแบบจำลองโครงร่างตาข่ายของพาริสันแบบสมมาตรครึ่งใบจะประกอบด้วยเอลิเมนต์ชนิดพื้นผิวรูปทรงสี่เหลี่ยมจำนวน 3200 ชิ้นประกอบ มีค่า ARE เท่ากับ  $3.12 \times 10^{-4}$  และโหนดจำนวน 3232 โหนด โดยกำหนดให้คุณสมบัติของเอลิเมนต์เป็นแบบเปลือกหนา (thick shell approximation) เพื่อความเหมาะสมในการวิเคราะห์ และกำหนดให้เอลิเมนต์ทุกชิ้นมีความหนาเท่ากับ 2.4 มิลลิเมตร รายละเอียดของแบบจำลองโครงร่างตาข่ายของพาริสันทั้งสองแบบได้แสดงไว้ในตารางที่ 1



ภาพที่ 21 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูป (ก) แบบเต็มใบ และ (ข) แบบสมมาตรครึ่งใบ

ตารางที่ 1 รายละเอียดของแบบจำลองโครงร่างตาข่ายของพาริสันแบบสมมาตรครึ่งใบ และแบบเต็มใบ

parison	สมมาตรครึ่งใบ	เต็มใบ
จำนวน node	1717	3232
จำนวน element	1600	3200
ชนิดของ element	shell	shell
รูปทรงของ element	quad	quad
ขนาดของ element (mm)	3 x 3	3 x 3
Area Ratio ของ element	$3.12 \times 10^{-4}$	$3.12 \times 10^{-4}$
เส้นผ่าศูนย์กลางกลาง (mm)	28.8	28.8
ความหนาของ element (mm)	2.4	2.4
หมายเหตุ	สามารถวิเคราะห์ได้แต่ชิ้นงานที่สมมาตร ในระนาบซ้ายขวาเท่านั้น แต่ต้องกำหนด เงื่อนไขสมมาตร	มีความซับซ้อนในการสร้างแบบจำลอง มากกว่าแบบสมมาตรครึ่งใบ แต่ สามารถวิเคราะห์ชิ้นงานที่ไม่สมมาตรได้

### 3.1 การกำหนดสมบัติเชิงกลของวัสดุ

#### 3.1.1 แบบจำลองวัสดุชนิดไฮเปอร์อีลาสติก

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของพาริสันถูกกำหนดให้มีคุณสมบัติเป็นวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกชนิดมูนี-ริฟลิน (Mooney-Rivlin) ในการอธิบายพฤติกรรมการเสียรูปของโพลีเมอร์ที่อุณหภูมิสูง โดยพฤติกรรมของโพลีเมอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการแบบจำลองอาร์เรเนียส (Arrhenius' model) ได้ดังแสดงในสมการ 55 (Liu, 2012)

$$\sigma(T) = \sigma_{ref} e^{-b(T-T_{ref})} \quad (55)$$

โดย  $\sigma(T)$  คือ พังค์ชันความเค้นที่ขึ้นกับอุณหภูมิ มีหน่วยเป็นปาสคาล (Pa)

$\sigma_{ref}$  คือ ความเค้นที่อุณหภูมิอ้างอิง มีหน่วยเป็นปาสคาล (Pa)

$b$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ (ไม่มีหน่วย)

$T$  คือ อุณหภูมิที่สนใจ ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{ref}$  คือ อุณหภูมิที่อ้างอิง ( $^{\circ}\text{C}$ )

โดยสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองอาร์เรเนียสของ HDPE ในช่วงอุณหภูมิ 140 ถึง  $200^{\circ}\text{C}$  ได้แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวแปรของสมการอาร์เรเนียสของวัสดุ HDPE ในช่วงอุณหภูมิ 140 ถึง  $200^{\circ}\text{C}$

parameter	value
$T_{ref}$ , $^{\circ}\text{C}$	125
$b$	1.8

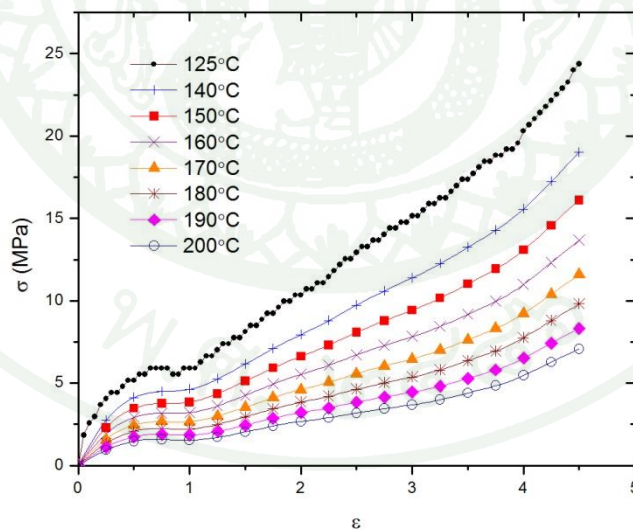
ที่มา: Liu (2012)

ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดที่ประมาณโดยใช้ตัวแปรของสมการอาร์เรเนียสของวัสดุ HDPE ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิ 140 ถึง 200°C สามารถเขียนในรูปสมการได้ดังแสดงในสมการที่ 56

$$\sigma(T) = \sigma_{T=125^{\circ}\text{C}} e^{-1.8(T-125)} \quad (56)$$

โดย  $\sigma(T)$  คือ ฟังก์ชันความเค้นที่ขึ้นกับอุณหภูมิ มีหน่วยเป็นปาสคาล (Pa)  
 $\sigma_{T=125^{\circ}\text{C}}$  คือ ความเค้นที่อุณหภูมิอ้างอิง ที่ 125°C มีหน่วยเป็นปาสคาล (Pa)  
 $T$  คือ อุณหภูมิที่สนใจ (°C) ในช่วง 140 ถึง 200°C

ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิ 140 ถึง 200°C ที่ประมาณโดยใช้สมการอาร์เรเนียส สามารถสรุปเป็นกราฟได้ดังแสดงในภาพที่ 22



ภาพที่ 22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของ HDPE โดยใช้แบบจำลองอาร์เรเนียส ที่อุณหภูมิ 125, 140, 150, 160, 170, 180, 190 และ 200°C

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของ HDPE ที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถอธิบายด้วยแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกชนิดมูนี-ริฟลินได้ ดังแสดงในสมการที่ 57

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (57)$$

โดย  $I_1$  และ  $I_2$  คือ first และ second deviatoric strain invariant ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนการยืดได้ ( $\lambda$ ) ดังสมการ 58 และ 59

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (58)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad (59)$$

โดยสัมประสิทธิ์ของสมการมูนี-ริฟลินของ HDPE ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 140 ถึง 200°C ที่คำนวณจากสมการ 57 ได้แสดงในตารางที่ 3

**ตารางที่ 3** ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกชนิดมูนี-ริฟลิน ของ HDPE ในช่วงอุณหภูมิ 140 ถึง 200°C

$T$ (°C)	$C_{10}$	$C_{01}$
140	1.33295	0.44696
150	1.11146	0.3729
160	0.92652	0.31156
170	0.77214	0.26068
180	0.57871	0.21839
190	0.49137	0.18321
200	0.42063	0.15388

### 3.1.2 แบบจำลองวัสดุชนิดวิสโคอีลาสติก

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของพาริสันถูกกำหนดให้เป็นวัสดุวิสโคอีลาสติก ในการอธิบายพฤติกรรมการเสียรูปของโพลีเมอร์ที่อุณหภูมิสูง โดยแบบจำลองทั่วไปของแมกซ์เวลล์ของ HDPE ที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$  สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเสปคตรัมการผ่อนคลายความเค้นเฉือนหรือความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นเฉือนและเวลาคลายตัว ได้แสดงในตารางที่ 4 (Laroche, 1999)

ฟังก์ชันการเลื่อนเวลาและอุณหภูมิ ( $a_T$ ) ได้ถูกนำมาใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ของโมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นที่อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับอุณหภูมิเดิมของวัสดุวิสโคอีลาสติก โดยใช้สมการวิลเลียม-แลนเดล-เฟอรี (WLF) ในการอธิบายพฤติกรรมวิสโคอีลาสติกที่ขึ้นกับอุณหภูมิของ HDPE ในช่วงอุณหภูมิ 140 ถึง  $200^{\circ}\text{C}$  ได้ โดยตัวแปรของสมการ WLF ได้แสดงไว้ดังในตารางที่ 5

ตารางที่ 4 เสปคตรัมการคลายความเค้นเฉือนของวัสดุชนิด HDPE ที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$

$i$	$\tau_i$ (sec)	$G_i$ (MPa)
1	0.03906	0.2457
2	0.3125	0.07243
3	2.5	0.03046
4	20	0.007814
5	160	0.003188

ที่มา: Laroche (1999)

ตารางที่ 5 ตัวแปรของฟังก์ชันเลื่อนเวลาและอุณหภูมิโดยใช้สมการ WLF ของวัสดุ HDPE ในช่วงอุณหภูมิ 140 ถึง 200°C

parameter	value
$C_1$	6.928
$C_2$	350
$T_{ref}, ^\circ\text{C}$	150

ที่มา: Laroche (1999)

สมการความสัมพันธ์ของโมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นเทียบกับเวลาคลายตัวที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$G(t, T) = 0.2457e^{-\frac{t}{0.03906a_T}} + 0.07243e^{-\frac{t}{0.3125a_T}} + 0.03046e^{-\frac{t}{2.5a_T}} + 0.007814e^{-\frac{t}{20a_T}} + 0.003188e^{-\frac{t}{160a_T}} \quad (60)$$

หรือ

$$G(t, T) = 0.2457e^{-25.60146t/a_T} + 0.07243e^{-3.2t/a_T} + 0.03046e^{-0.4t/a_T} + 0.007814e^{-0.05t/a_T} + 0.003188e^{-0.00625t/a_T} \quad (61)$$

โดยมีฟังก์ชันเลื่อนเวลาและอุณหภูมิคือ

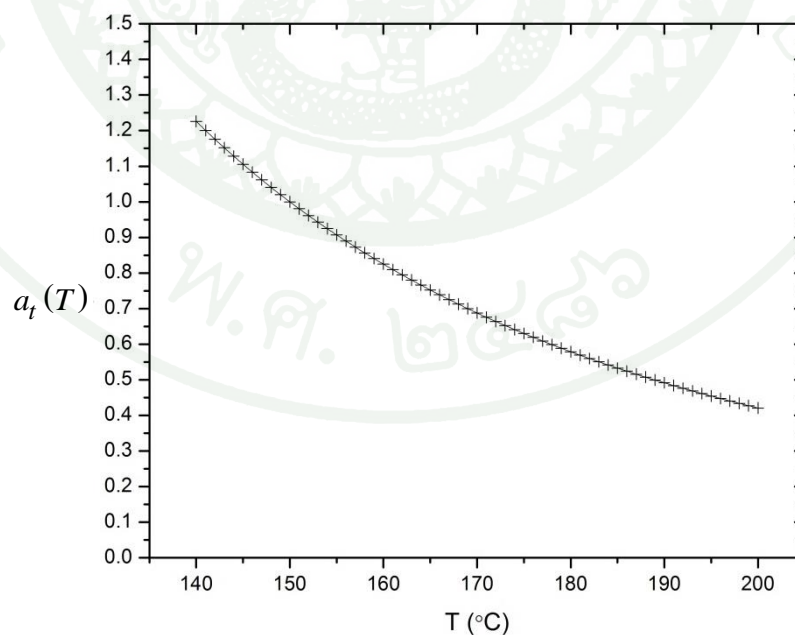
$$\log(a_T) = -\frac{6.928(T-150)}{350+(T-150)} \quad (62)$$

โดย  $T$  คือ อุณหภูมิของวัสดุซึ่งอยู่ระหว่างอุณหภูมิ 140 ถึง 200°C

ค่าฟังก์ชันการเลื่อนเวลาและอุณหภูมิ ( $a_t(T)$ ) ที่คำนวณโดยใช้ตัวแปรจากสมการ WLF ในช่วงอุณหภูมิ 140 ถึง 200°C (สมการ 62) ได้แสดงดังตารางที่ 6 และแสดงเป็นกราฟได้ดังภาพที่ 23

ตารางที่ 6 ค่าฟังก์ชันการเลื่อนเวลาและอุณหภูมิโดยใช้สมการ WLF ของวัสดุ HDPE ในช่วงอุณหภูมิ 140 ถึง 200°C

$T$ (°C)	$a_t(T) = e^{-\frac{6.928(T-150)}{350+(T-150)}}$
140	1.22601
150	1
160	0.82494
170	0.68764
180	0.57871
190	0.49137
200	0.42063

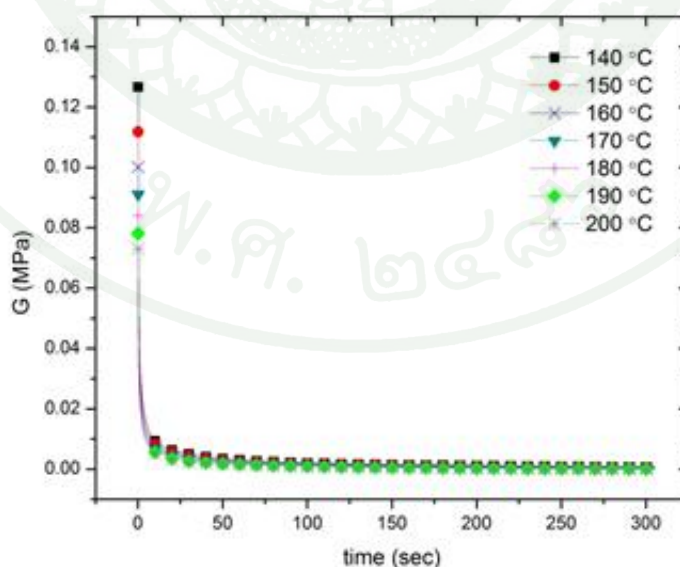


ภาพที่ 23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟังก์ชันการเลื่อนเวลาและอุณหภูมิ ( $a_t(T)$ ) ที่คำนวณโดยใช้ตัวแปรจากสมการ WLF ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิ 140 ถึง 200°C

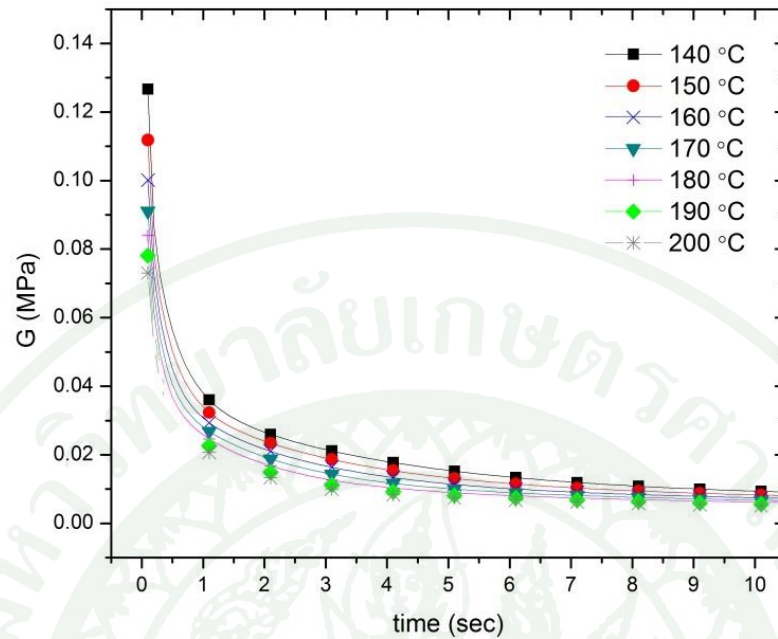
ความสัมพันธ์ของโมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นกับเวลาคลายตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิ 140 ถึง 200°C โดยใช้ฟังก์ชันเลื่อนเวลาและอุณหภูมิของสมการ WLF (สมการ 61) สามารถเขียนในรูปสเป็คตรัมการผ่อนคลายความเค้นได้ดังแสดงในตารางที่ 7 และแสดงเป็นกราฟที่อุณหภูมิ 140, 150, 160, 170, 180, 190 และ 200°C ในช่วงเวลา 0 ถึง 300 วินาที และ 0 ถึง 10 วินาที ได้ดังแสดงในภาพที่ 24 และภาพที่ 25 ตามลำดับ และแสดงเป็นรูปกราฟแบบลอการิทึมได้ดังแสดงในภาพที่ 26

ตารางที่ 7 ความสัมพันธ์ของโมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นกับเวลาคลายตัวที่อุณหภูมิต่างๆ

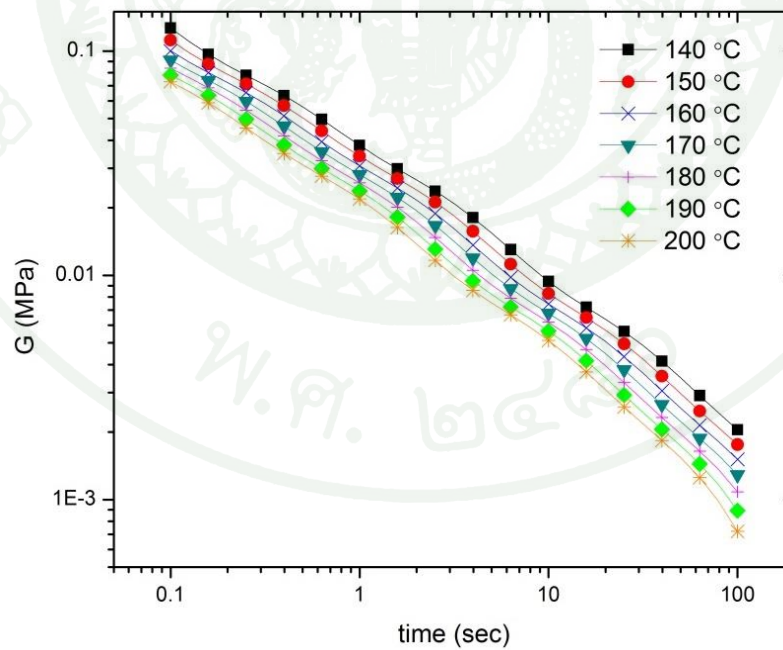
$i$	$\tau_i$ (sec)	$G_i(T)e^{-\frac{t}{\lambda_i a_T}}$ (MPa)						
		140°C	150°C	160°C	170°C	180°C	190°C	200°C
1	0.01	0.133703	0.161467	0.18223	0.197543	0.209103	0.218393	0.226449
2	0.1	0.147997	0.127388	0.113036	0.103518	0.097192	0.092599	0.088732
3	1	0.057411	0.052689	0.048291	0.044165	0.040323	0.036795	0.033603
4	10	0.014931	0.013264	0.011905	0.010803	0.009907	0.009172	0.008557
5	100	0.00555	0.004784	0.004129	0.003563	0.003067	0.002632	0.00225



ภาพที่ 24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นเมื่อเทียบกับเวลาที่ อุณหภูมิ 140, 150, 160, 170, 180, 190 และ 200°C ในช่วง 0 ถึง 300 วินาที



ภาพที่ 25 กราฟของภาพที่ 24 ในช่วงเวลา 0 ถึง 10 วินาที



ภาพที่ 26 กราฟของภาพที่ 24 เมื่อแสดงแบบลอการิทึม ในช่วงเวลา 0 ถึง 100 วินาที

### 3.2 การกำหนดภาวะและเงื่อนไขขอบเขต

ขั้นตอนนี้เป็น การกำหนดภาวะและเงื่อนไขขอบเขตให้กับโหนดและเอลิเมนต์ โดยมีเงื่อนไขขอบเขตที่สำคัญดังนี้

ก. เงื่อนไขสมมาตร (symmetry constraint) เป็นการกำหนดให้โหนดบนระนาบสมมาตรไม่มีการเคลื่อนที่เชิงเส้นในทิศทางตั้งฉากกับระนาบสมมาตร และไม่มีการเคลื่อนที่เชิงมุมหรือการหมุน (rotation) ในทิศทางขนานกับระนาบสมมาตร ดังนั้น การกำหนดการเคลื่อนที่เชิงเส้นและเชิงมุมดังกล่าวเป็นการกำหนดเฉพาะโหนดตามรอยต่อที่ถูกแบ่งครึ่ง เพื่อกำหนดให้ช่วงรอยต่อของแบบจำลอง ไม่เคลื่อนที่ในแนวแกนที่สมมาตร และมีพฤติกรรมเสมือนชิ้นงานเต็มใบ

ข. เงื่อนไขตรึง (fixed constraint) คือ การกำหนดให้โหนดไม่มีการเคลื่อนที่เชิงเส้นและการเคลื่อนที่เชิงมุม เงื่อนไขนี้จะกำหนดที่ปากบนของพาริสัน

ค. ภาวะความดัน (pressure load) คือ การกำหนดความดันเป็นบวกให้กับพาริสันจากด้านบน เสมือนกับการเป่าลมเข้าไปอัดพาริสันให้ขยายตัวจนติดแม่พิมพ์

### 3.3 การกำหนดเงื่อนไขสัมผัส

การกำหนดให้เอลิเมนต์มีความสามารถในการสัมผัส (contact) กับเอลิเมนต์ หรือพื้นผิวอื่นๆ ของรูปทรง ที่กำหนดให้เป็นวัตถุแข็งเกร็ง (rigid body) โดยเอลิเมนต์ของพาริสันได้กำหนดให้มีเงื่อนไขการสัมผัสแบบวัตถุยืดหยุ่น (deformable body) หรือสามารถเกิดการเสียรูป (deformation) ได้ ส่วนแบบจำลองพื้นผิวของแม่พิมพ์จะถูกกำหนดให้เป็นวัตถุแข็งเกร็งหรือไม่เกิดการเสียรูป แต่สามารถกำหนดการเคลื่อนที่หรือความเร็วให้กับวัตถุแข็งเกร็งได้ สำหรับแบบจำลองกระบวนการเป่าจะกำหนดความเร็วในการปิดให้กับแม่พิมพ์ตามกระบวนการผลิตจริง

การกำหนดเงื่อนไขสัมผัสของแบบจำลองกระบวนการเป่าแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ เงื่อนไขการสัมผัสระหว่างพาริสันกับเบ้า (cavity) ของแม่พิมพ์ ซึ่งเป็นส่วนที่งานวิจัยนี้ให้ความสนใจ เพราะเป็นตัวกำหนดรูปทรงและการกระจายตัวของความหนาของผนังขวด ดังนั้นเพื่อ

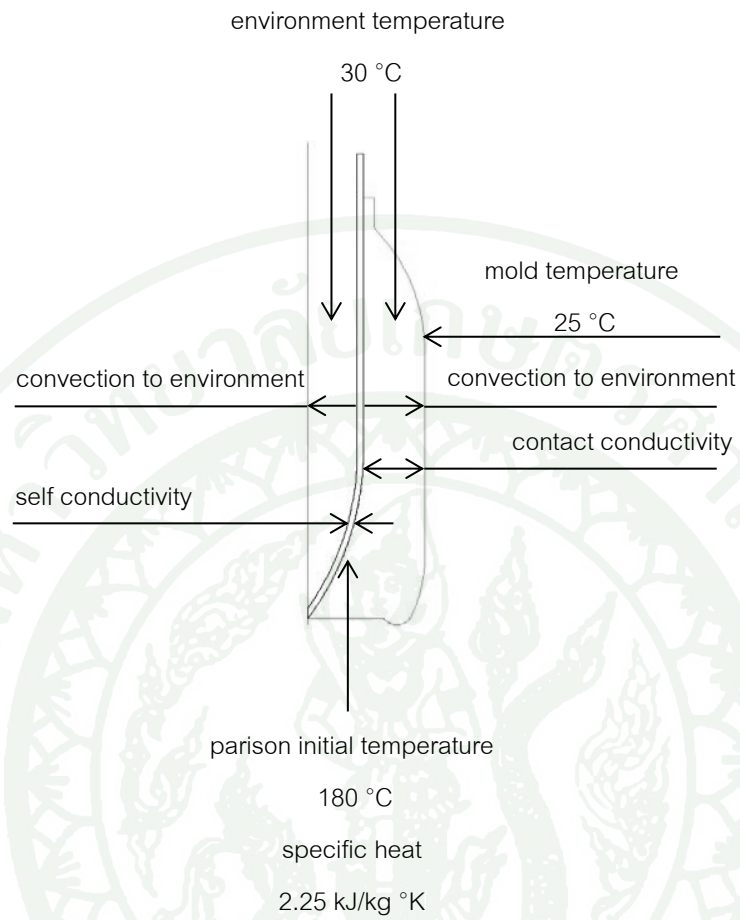
ให้ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของความหนาที่มีความแม่นยำมากที่สุด เงื่อนไขการสัมผัสระหว่างพาริสันและเบ้าแม่พิมพ์จะถูกกำหนดให้เป็นแบบนำความหนามาใช้ในการคำนวณด้วย โดยเอลิเมนต์ของพาริสันจะถือว่ามีสัมผัสกับเบ้าแม่พิมพ์ เมื่อเอลิเมนต์มีระยะห่างจากแม่พิมพ์เท่ากับครึ่งหนึ่งของความหนาของเอลิเมนต์ เนื่องจากเอลิเมนต์ของพาริสันเป็นแบบ mid surface.

ส่วนที่สอง คือ เงื่อนไขการสัมผัสของพาริสันบนผิวประกอบของแม่พิมพ์หรือตามเส้นแบ่งแม่พิมพ์ (parting line) ซึ่งเป็นส่วนที่เนื้อพลาสติกจะถูกตัดออก (pinch off) จากผลิตภัณฑ์ โดยคมขอบของเบ้าแม่พิมพ์ สำหรับขวดที่ใช้วิจัยจะเกิดการ pinch off ที่บริเวณฐานขวดและคอขวด

การสัมผัสระหว่างพาริสันและแม่พิมพ์จะถูกกำหนดให้เป็นแบบติดแน่นหรือไม่มีการเคลื่อนที่หลังการสัมผัส (glued after contact) หรือมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเป็นอนันต์ เพื่อจำลองกระบวนการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างพาริสันสัมผัสกับแม่พิมพ์ โดยในความจริงแล้ว พาริสันจะเกิดการเย็นและแข็งตัวแทบจะในทันทีที่สัมผัสกับแม่พิมพ์ (cooling and solidification) ทำให้ส่วนที่สัมผัสกับแม่พิมพ์ไปแล้วไม่เกิดการเสียรูปหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาอีก จึงสามารถกำหนดให้การสัมผัสระหว่างพาริสันกับแม่พิมพ์เป็นแบบไม่มีการเคลื่อนที่หลังการสัมผัสได้เพื่อจำลองพฤติกรรมของแข็งตัวของโพลีเมอร์เมื่อสัมผัสกับแม่พิมพ์ รายละเอียดของเงื่อนไขการสัมผัสและการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูปได้แสดงดังแผนภาพที่ 27

#### 4. การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของขวดรูปทรงไม่สมมาตร

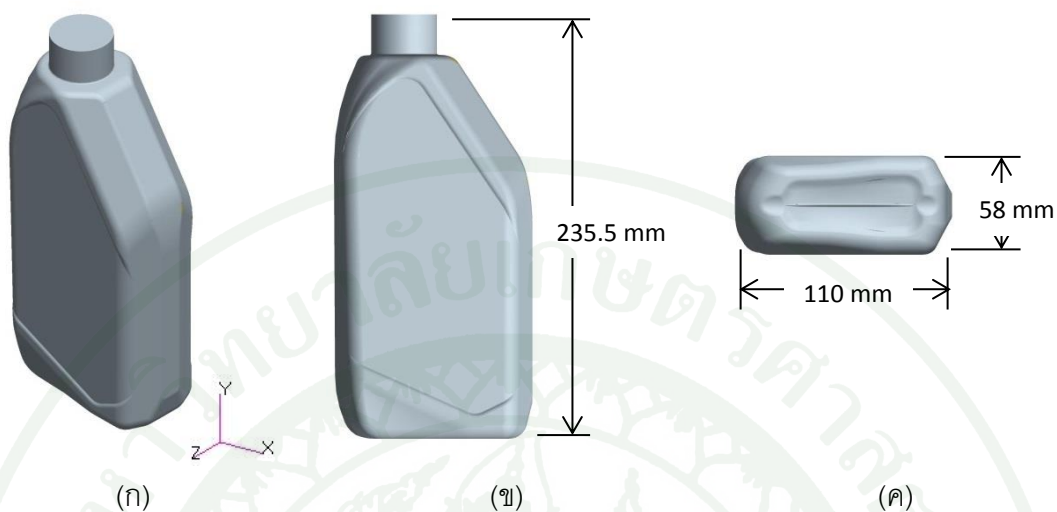
แบบจำลองพื้นผิว (surface model) ของขวดทดสอบแบบรูปทรงไม่สมมาตรรอบแกน (non-axisymmetric shape) ขนาด 1 ลิตร ได้ถูกสร้างขึ้นโดยใช้ CAD ชื่อ Pro/ENGINEER WILDFIRE V3.0 โดยดัดแปลงรูปทรงของแบบจำลองพื้นผิวให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์ด้วย FEA เนื่องจากขวดทดสอบมีลายเกลียวที่ปากขวด จึงดัดแปลงเป็นผิวเรียบเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ โดยรายละเอียดของขวดทดสอบแบบรูปทรงไม่สมมาตรรอบแกนขนาด 1 ลิตร ได้แสดงไว้ในภาพที่ 28 และแบบจำลองพื้นผิวของขวดทดสอบที่ได้รับการดัดแปลงได้แสดงไว้ในภาพที่ 29



ภาพที่ 27 เส้นไขการสัมผัสและการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูป



ภาพที่ 28 ขวดทดสอบแบบรูปทรงไม่สมมาตรรอบแกน ขนาด 1 ลิตร



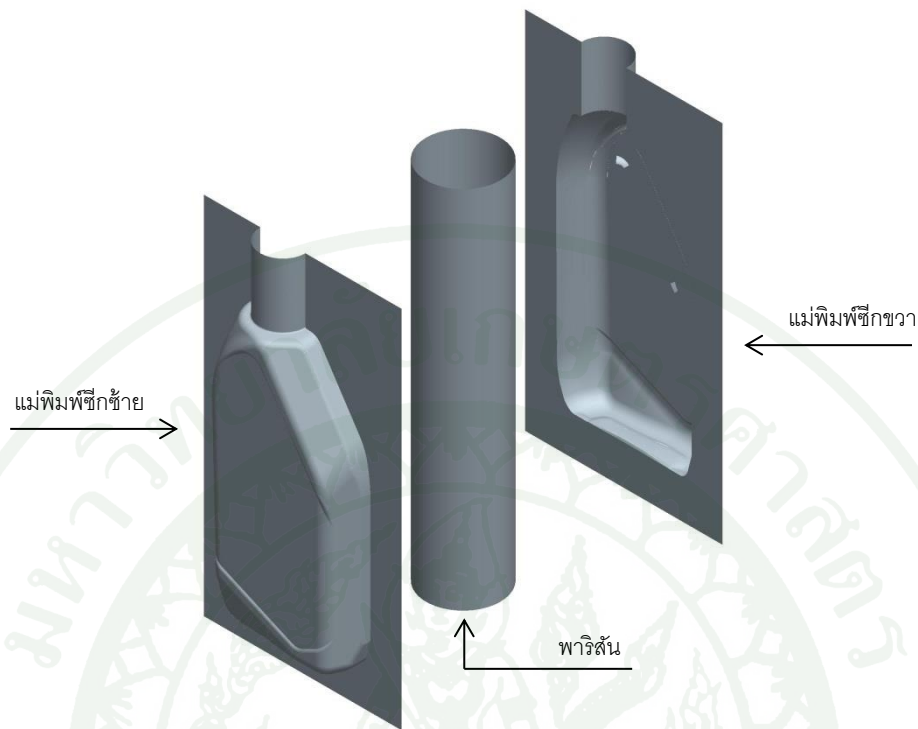
ภาพที่ 29 แบบ CAD จำลองแบบพื้นผิวของขวดทดสอบแบบไม่สมมาตรรอบแกน

(ก) ภาพไอโซเมตริก (ข) ภาพด้านหน้า (ค) ภาพด้านล่าง

แบบจำลองพื้นผิวของขวดทดสอบ ได้นำไปใช้สร้างแบบจำลองพื้นผิวของกระบวนการเป่าขวด โดยแบบจำลองของกระบวนการเป่าขวดประกอบด้วยแบบจำลองพื้นผิวของแม่พิมพ์ และแบบจำลองพื้นผิวของพาริสัน

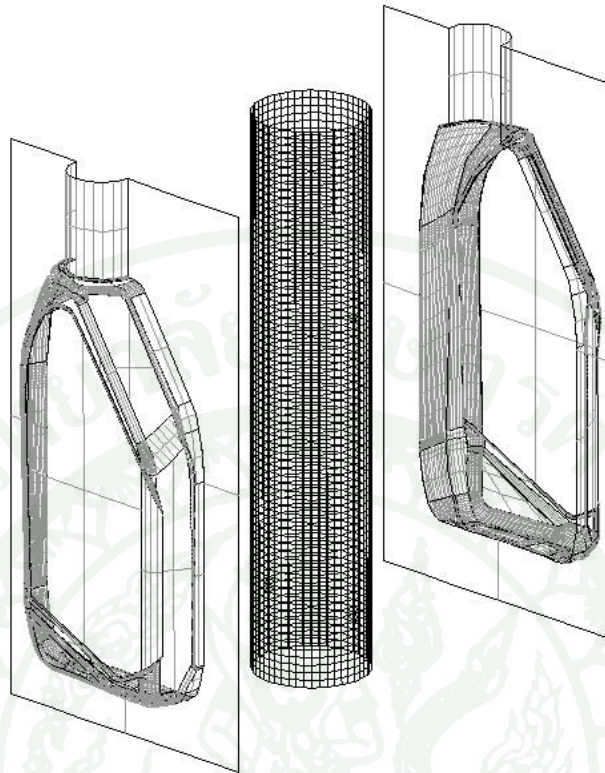
1) แบบจำลองพื้นผิวของแม่พิมพ์ (mold) ประกอบด้วยแบบจำลองซีกซ้ายและซีกขวา รายละเอียดของแบบจำลองพื้นผิวของแม่พิมพ์ได้แสดงไว้ในภาพที่ 30

2) แบบจำลองพื้นผิวของพาริสัน (parison) กำหนดให้เป็นพื้นผิวกึ่งกลาง (mid surface) โดยใช้เอลิเมนต์ชนิด shell และชนิด membrane พาริสันมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 28.8 mm รายละเอียดของแบบจำลองพื้นผิวของกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูปของขวดทดสอบรูปทรงไม่สมมาตรรอบแกนได้แสดงไว้ในภาพที่ 30



ภาพที่ 30 แบบจำลองพื้นผิวของกระบวนการเป่าขวดแบบไม่สมมาตรรอบแกน แสดงทั้งแม่พิมพ์และพาริสัน

แบบจำลองพื้นผิวของกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูปได้นำไปใช้กับซอฟต์แวร์ MSC. PATRAN 2005 เพื่อใช้สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และกำหนดเงื่อนไขขอบเขต แล้วใช้ซอฟต์แวร์ MSC. MARC 2005 สร้างโครงร่างตาข่ายหรือเอลิเมนต์ของพาริสัน ส่วนแบบจำลองพื้นผิวของแม่พิมพ์ได้กำหนดให้เป็นวัตถุแข็งเกร็ง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เงื่อนไขการสัมผัส รายละเอียดของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการอัดรีดแบบไม่สมมาตรรอบแกนได้แสดงไว้ในภาพที่ 31 โดยแบบจำลองโครงร่างตาข่ายของพาริสันประกอบด้วยเอลิเมนต์ชนิดพื้นผิวรูปทรงสี่เหลี่ยม (quadrilateral elements) จำนวน 3562 elements และจุดเชื่อมต่อหรือโหนด จำนวน 3600 nodes โดยกำหนดให้เอลิเมนต์เป็นแบบเปลือกหนา (thick shell-approximation) และมีความหนาเท่ากับ 2 มิลลิเมตร รายละเอียดของแบบจำลอง FEM ของพาริสันได้แสดงไว้ในตารางที่ 8



ภาพที่ 31 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูปแบบไม่สมมาตรรอบแกน

ตารางที่ 8 รายละเอียดของแบบจำลองโครงร่างตาข่ายของพาริสันแบบไม่สมมาตรรอบแกน

parameter	non-axisymmetric
จำนวน node	3600
จำนวน element	3562
ชนิดของ element	shell
รูปทรงของ element	quad
ขนาดของ element (mm)	4 x 4
Area Ratio ของ element	$2.81 \times 10^{-4}$
เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)	60
ความหนาของ element (mm)	2
หมายเหตุ	มีความซับซ้อนในการสร้างแบบจำลองมากกว่าแบบสมมาตรรอบแกน แต่สามารถวิเคราะห์ชิ้นงานที่ไม่สมมาตรรอบแกนได้

#### 4.1 การกำหนดสมบัติเชิงกลของวัสดุ

วัสดุสำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของพาริสันได้กำหนดให้เป็นวัสดุวิสโคอีลาสติก ที่สามารถใช้วิเคราะห์การเสียรูปที่อุณหภูมิสูงได้ โดยแบบจำลองทั่วไปของแมกซ์เวลล์ สำหรับ HDPE ที่อุณหภูมิ 150°C สามารถเขียนเป็นเสป็คตรัมการผ่อนคลายความเค้นเฉือน หรือความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นเฉือนและเวลาคลายตัว โดยนำข้อมูลจากตารางที่ 2 มาใช้

ฟังก์ชันการเลื่อนเวลาและอุณหภูมิ ( $a_r(T)$ ) ได้นำมาใช้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของโมดูลัสการผ่อนคลายความเค้นที่อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับอุณหภูมิเดิมของวัสดุวิสโคอีลาสติก และใช้สมการวิลเลียม-แลนเดล-เฟอริ (WLF) ในการคำนวณพฤติกรรมวิสโคอีลาสติกที่ขึ้นกับอุณหภูมิของ HDPE ในช่วงอุณหภูมิ 140 ถึง 200°C ได้ โดยตัวแปรของสมการวิลเลียม-แลนเดล-เฟอริได้ใช้ข้อมูลจากตารางที่ 3

#### 4.2 การกำหนดภาวะและเงื่อนไขขอบเขต

เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขภาวะของแบบจำลอง FEM ของกระบวนการอัดรีดเป่า ขึ้นรูปแบบรูปทรงไม่สมมาตรรอบแกน ประกอบด้วยเงื่อนไขขอบเขตแบบ เงื่อนไขตรึง และเงื่อนไขภาวะเป็นภาวะความตัน นอกจากนี้ได้กำหนดเงื่อนไขการสัมผัสระหว่างพาริสันกับผิวประกบของแม่พิมพ์ และเงื่อนไขการสัมผัสเมื่อพาริสันถูกเป่าสัมผัสกับแม่พิมพ์ ซึ่งมีเงื่อนไขเช่นเดียวกับการกำหนดเงื่อนไขให้กับแบบจำลองการอัดรีดเป่าขึ้นรูปของขวดทดสอบแบบสมมาตรรอบแกน

## ผลการทดลองและวิจารณ์

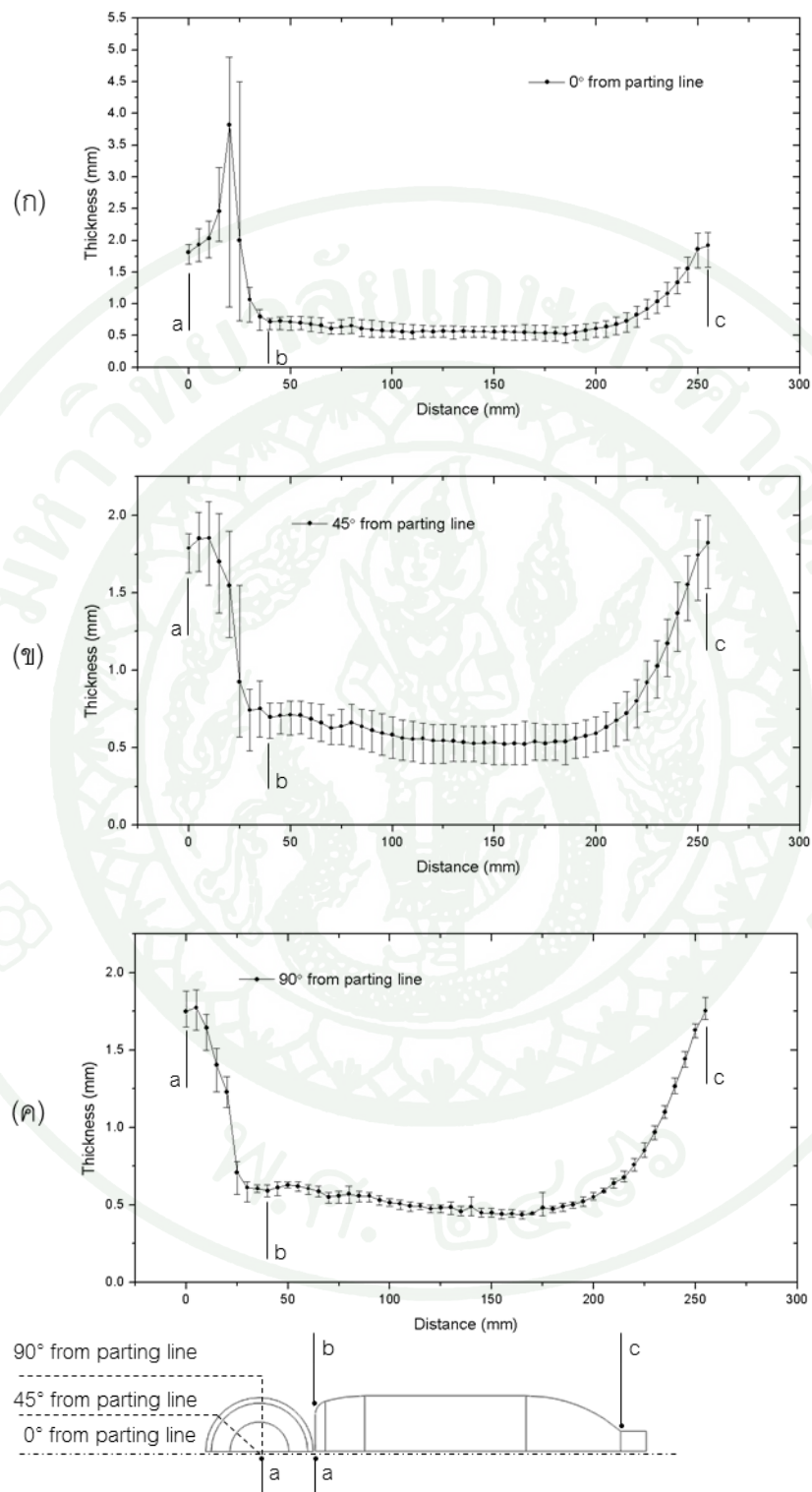
### 1. ผลการวัดความหนาของขวดทดสอบ

ผลการวัดความหนาของขวดทดสอบความจุ 0.9 ลิตร ในแนวความสูงของผนังขวด และแนวรัศมีของฐานขวด โดยเริ่มวัดจากจุดกึ่งกลางของฐานขวด ถึงขอบวงกลมของฐานขวด ความสูงจากขอบวงกลมของฐานขวดถึงคอขวด ที่ตำแหน่ง  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $90^\circ$  จากแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์ โดยความละเอียดในการวัดที่ระยะห่างของแต่ละจุด 5 มิลลิเมตร จำนวนจุดที่วัดรวม 52 จุด ผลการวัดความหนามีความคลาดเคลื่อน  $\pm 0.2$  mm ในแนวระดับความสูง และ  $\pm 1^\circ$  ในแนวรัศมี โดยความคลาดเคลื่อนในการวัดความหนาของขวดทดสอบมีที่มาจากสาเหตุดังนี้

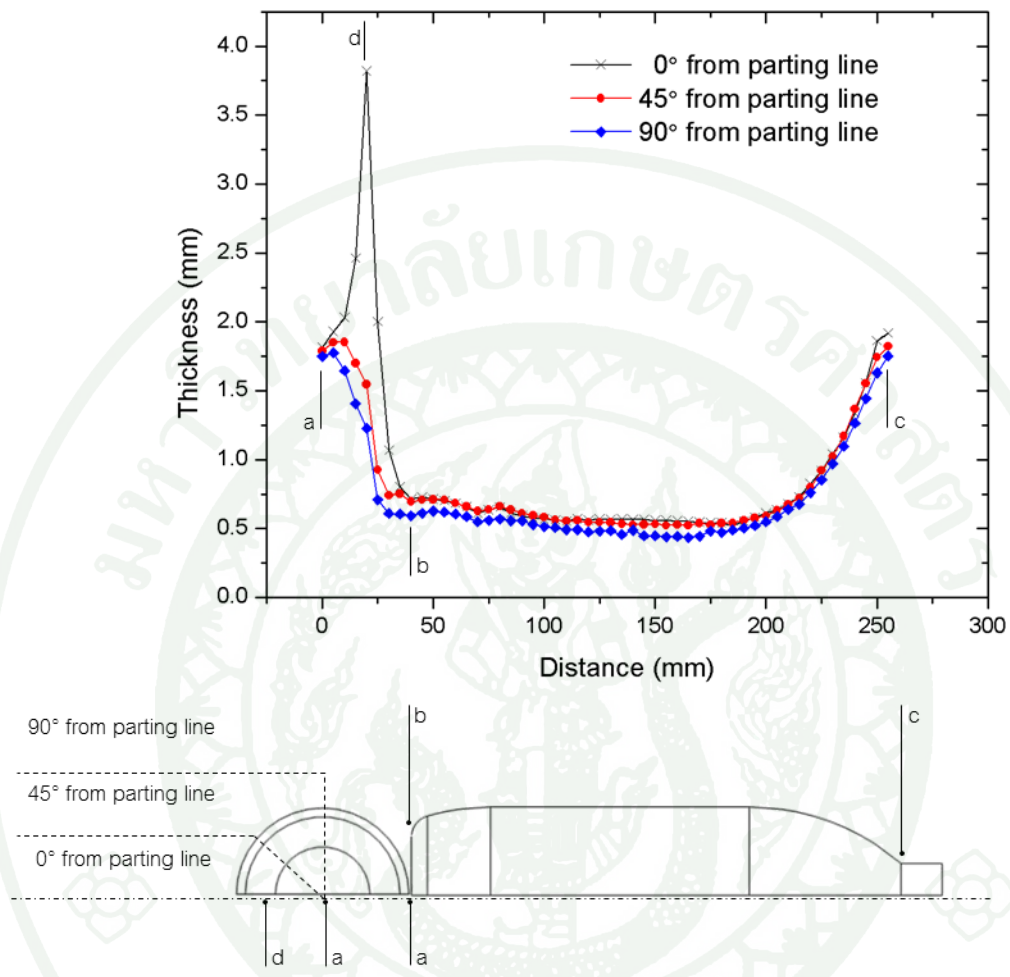
- ก. ความคลาดเคลื่อนจากการตัด
- ข. ความโค้งของขวดทดสอบ
- ค. ลวดลายของขวดทดสอบ
- ง. ข้อบกพร่องหรือรอยตำหนิ (defect) บนผิวของชิ้นงาน เนื่องจากการผลิต

ค่าเฉลี่ยของผลการวัดความหนาของขวดทดสอบ ความจุ 0.9 ลิตร โดยสุ่มวัดจากขวดทดสอบจำนวน 5 ใบ พร้อมทั้งค่าพิสัยสูงสุดต่ำสุด ณ ตำแหน่งต่างๆ สามารถแสดงเป็นกราฟของความหนาที่ตำแหน่งต่างๆ จากปากขวด (จุด a) ถึงฐานขวด (จุด c) ตามแสดงในภาพที่ 32 การเปรียบเทียบการวัดการกระจายตัวของค่าเฉลี่ยความหนาในแนว  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $90^\circ$  จากแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์ (parting line) ได้แสดงไว้ในภาพที่ 33

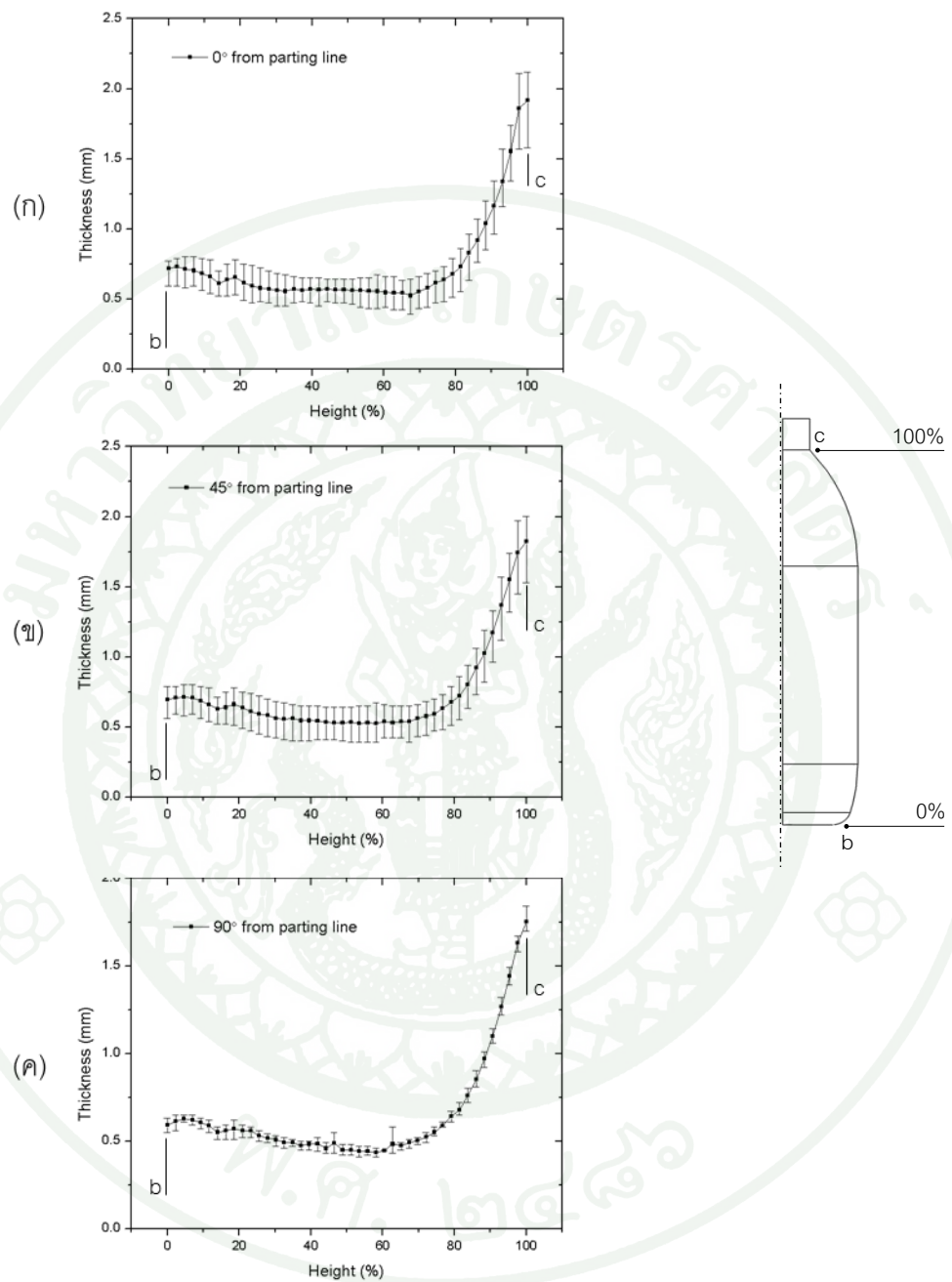
ค่าเฉลี่ยของผลการทดลองวัดความหนาของขวดทดสอบ พร้อมทั้งค่าพิสัยสูงสุดต่ำสุดตามแนวเส้น  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $90^\circ$  จากเส้นแบ่งแม่พิมพ์ สามารถแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ของความหนาและเปอร์เซ็นต์ความสูง 0% ถึง 100% ของขวด ได้ดังภาพที่ 34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเปอร์เซ็นต์รัศมีที่ฐานขวดได้แสดงในภาพที่ 35 และผลการเปรียบเทียบการวัดความหนาในแนวเส้น  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $90^\circ$  จากแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์ โดยเปรียบเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ความสูงของผนังขวด และเปอร์เซ็นต์รัศมีของฐานขวด ได้แสดงในภาพที่ 36 และ 37 ตามลำดับ



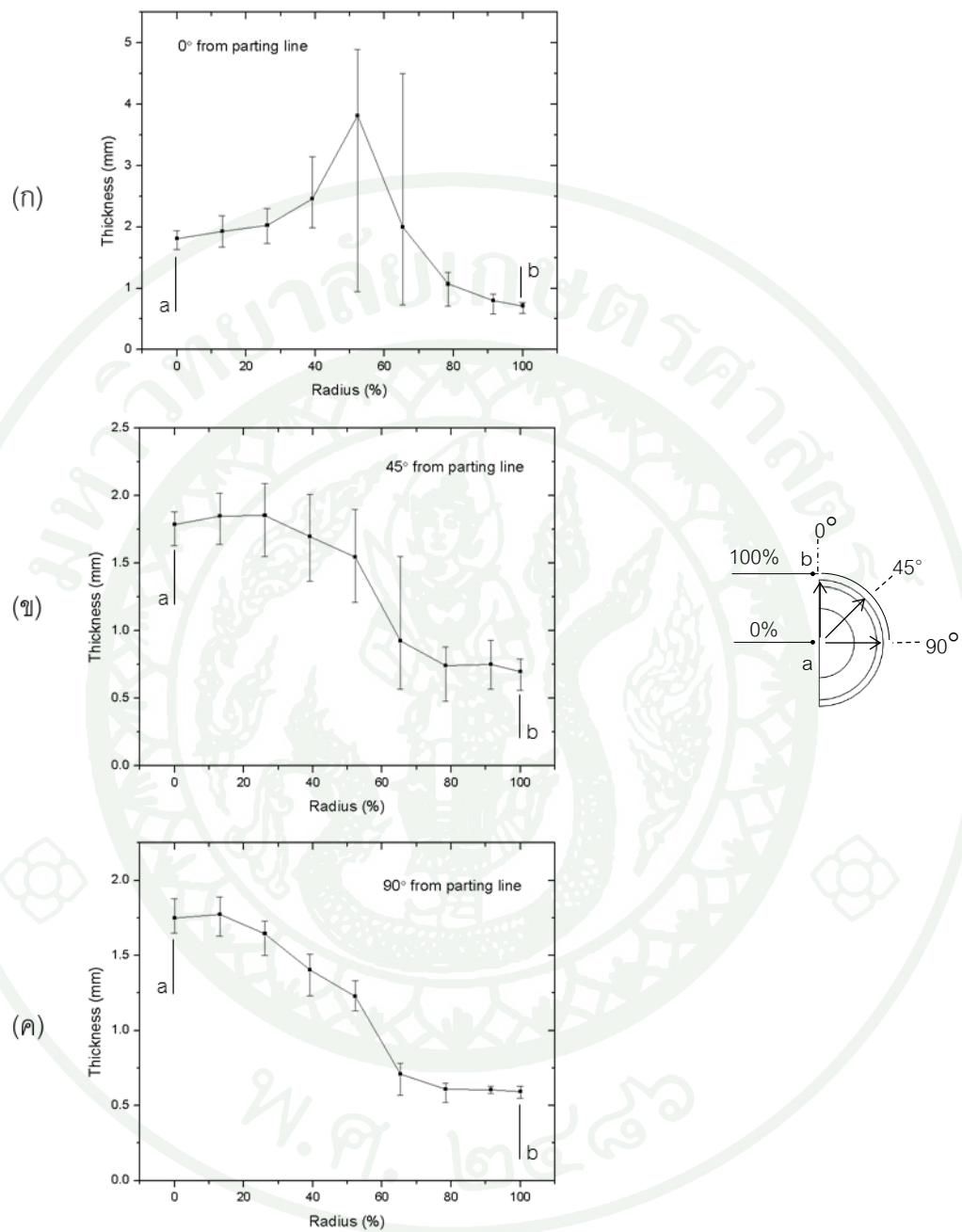
ภาพที่ 32 ผลการวัดการกระจายตัวของความหนาของขวดทดสอบ (ก) 0° (ข) 45° และ (ค) 90° จากแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์



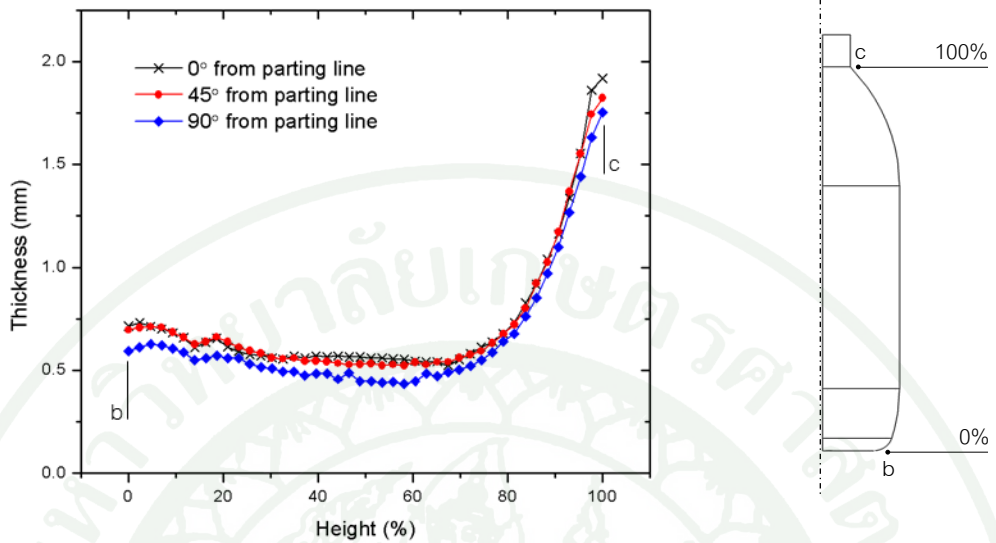
ภาพที่ 33 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยผลความหนาของขวดทดสอบที่ 0°, 45° และ 90° จากแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์



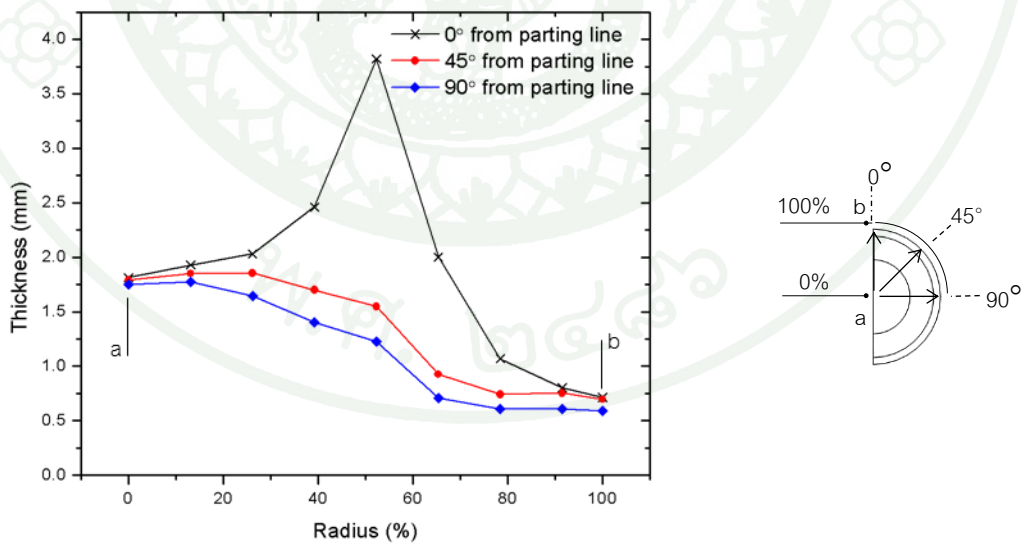
ภาพที่ 34 ผลการวัดการกระจายตัวของความหนาของผนังขวดทดสอบเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์ความสูงของขวด (ก) 0° หรือในแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์, (ข) 45° จากแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์ และ (ค) 90° จากแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์



ภาพที่ 35 ผลการวัดการกระจายตัวของความหนาของฐานขดทดสอบเปรียบเทียบกับ เปรอร์เซ็นต์รัศมีของฐานขด (ก) 0°, (ข) 45° และ (ค) 90° จากแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์



ภาพที่ 36 การเปรียบเทียบผลการวัดความหนาของผนังขวดทดสอบ ที่  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $90^\circ$  จากแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์กับอัตราส่วนความสูงของขวด



ภาพที่ 37 การเปรียบเทียบผลการวัดความหนาของฐานขวดทดสอบ ที่  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $90^\circ$  จากแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์กับอัตราส่วนรัศมีของฐานขวด

## 2. ผล FEA จำลองการปิดแม่พิมพ์

### 2.1 ผล FEA จำลองการปิดแม่พิมพ์โดยใช้วัสดุไฮเปอร์อีลาสติก

การจำลองการเปลี่ยนแปลงความหนาของพาริสันโดยใช้แบบจำลองวัสดุแบบไฮเปอร์อีลาสติก ต้องแยกออกเป็นสองกระบวนการ โดยกระบวนการแรก เป็นการจำลองรูปทรงของพาริสันเมื่อแม่พิมพ์ปิด (ภาพที่ 38 ก และ ข) และ กระบวนการที่สองนำรูปทรงและความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปของพาริสันภายหลังแม่พิมพ์ปิด ไปทำการแก้ไข และปรับปรุงแบบ FEM โดยตัดเนื้อพาริสันส่วนที่ถูกแม่พิมพ์หนีบ (pinch-off) และกำหนดแบบ FEM เป็นแบบหนึ่งในสี่ส่วน เพื่อลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์ แล้วจึงนำแบบจำลองพาริสันใหม่ไปวิเคราะห์ที่ไฟไนต์เอลิเมนต์ (ภาพที่ 38 ค)

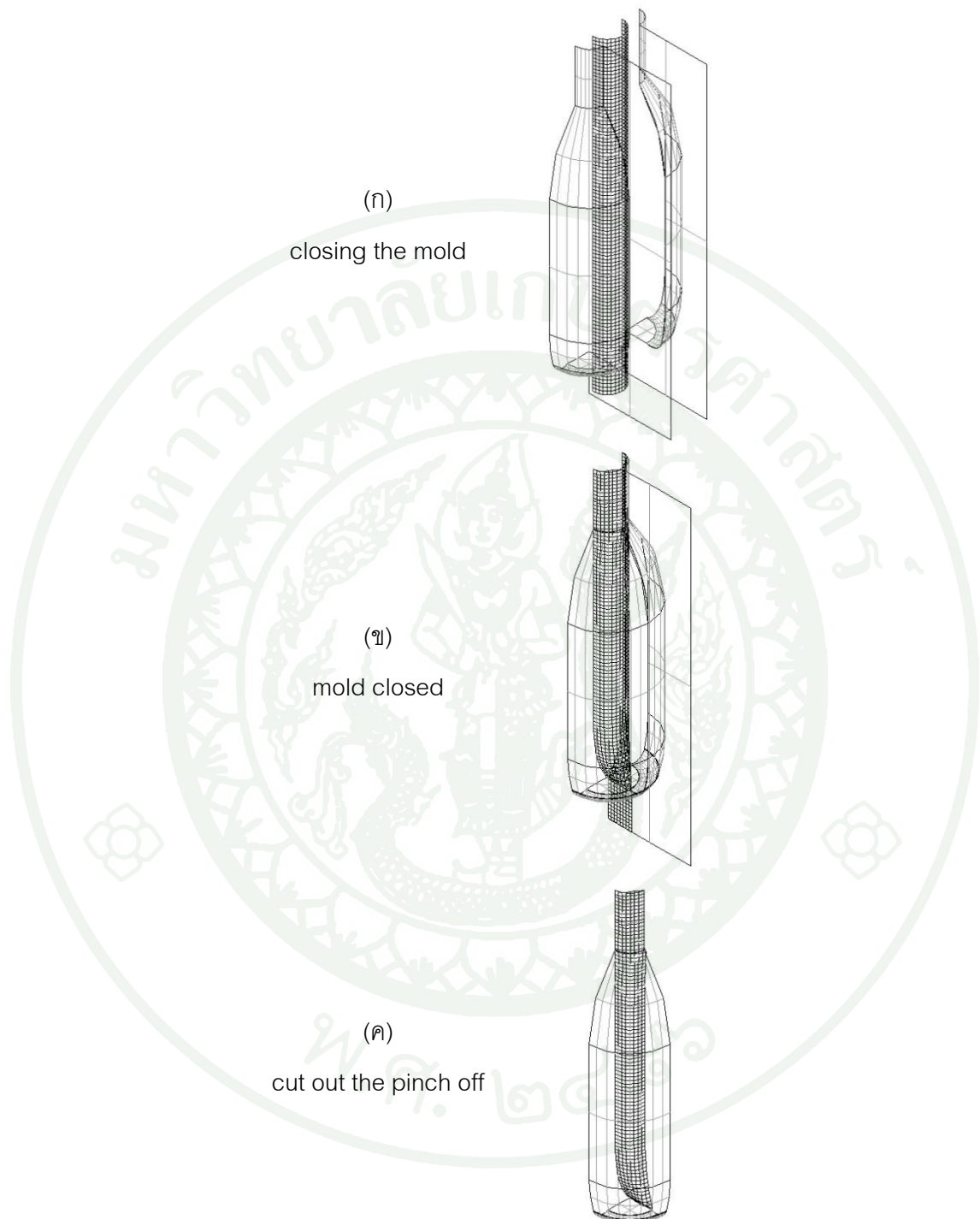
ผลการจำลองแม่พิมพ์เคลื่อนที่ปิดของแบบจำลองสมมาตรครึ่งใบที่เวลา 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 วินาที ได้แสดงในภาพที่ 39 โดยส่วนสีน้ำเงินแสดงเอลิเมนต์ของพาริสันที่ยังไม่เกิดการสัมผัสกับแม่พิมพ์ และส่วนที่เป็นสีเหลืองแสดงเอลิเมนต์ที่เกิดการสัมผัสกับผิวแม่พิมพ์

### 2.2 ผล FEA จำลองการปิดแม่พิมพ์โดยใช้วัสดุวิสโคอีลาสติกแบบจำลองเต็มใบ

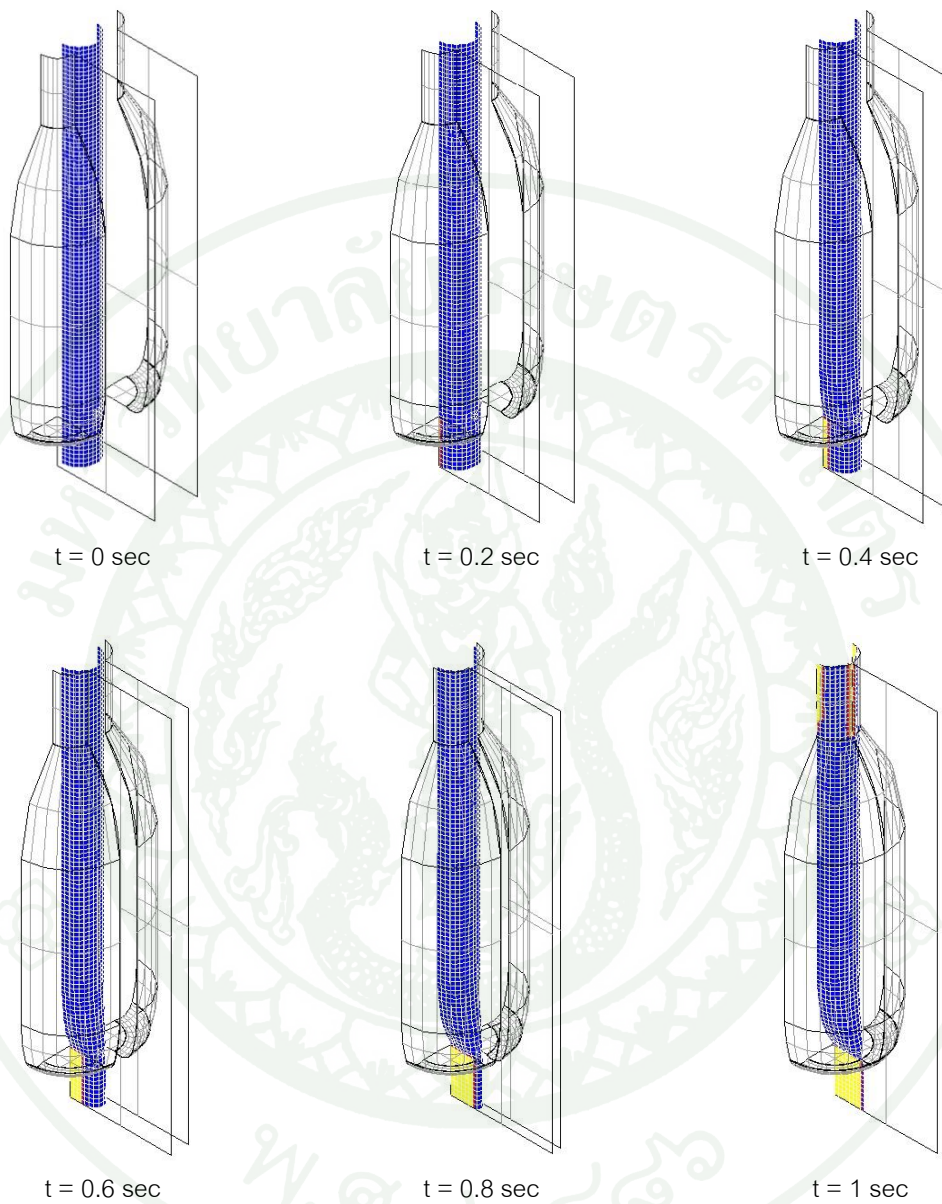
ผลการจำลองการเคลื่อนที่ปิดแม่พิมพ์เมื่อใช้แบบจำลองวัสดุแบบวิสโคอีลาสติก และแบบ FEM แบบจำลองเต็มใบที่เวลา 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 วินาที ได้แสดงในภาพที่ 40 โดยส่วนสีน้ำเงินแสดงเอลิเมนต์ของพาริสันที่ยังไม่เกิดการสัมผัสกับแม่พิมพ์ และส่วนที่เป็นสีเหลืองแสดงเอลิเมนต์ที่เกิดการสัมผัสกับผิวแม่พิมพ์

### 2.3 ผล FEA จำลองการปิดแม่พิมพ์โดยใช้วัสดุวิสโคอีลาสติกแบบจำลองสมมาตรครึ่งใบ

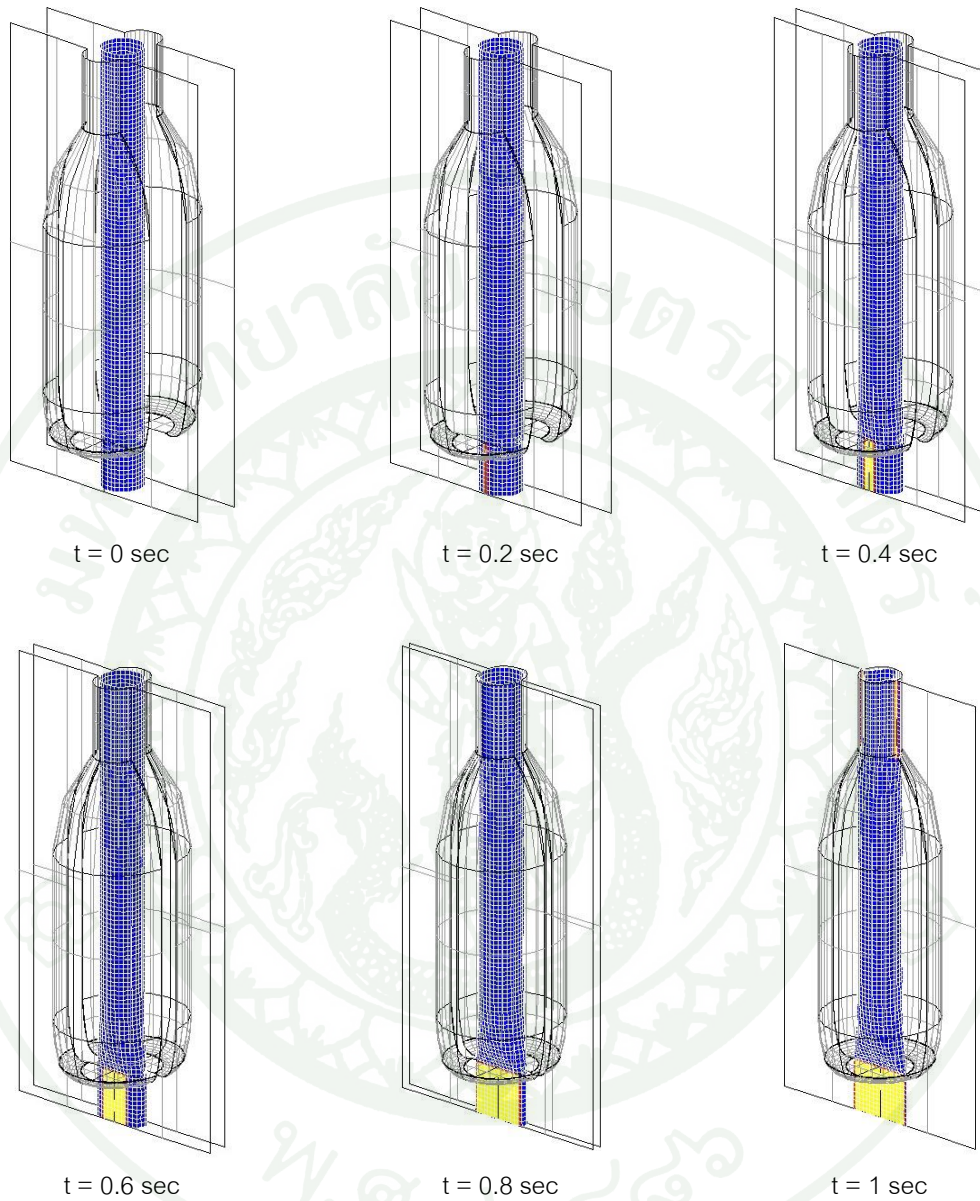
ผลการจำลองการเคลื่อนที่ปิดแม่พิมพ์เมื่อใช้แบบจำลองวัสดุแบบวิสโคอีลาสติก และแบบ FEM แบบจำลองสมมาตรครึ่งใบที่เวลา 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 วินาที ได้แสดงในภาพที่ 41 โดยส่วนสีน้ำเงินแสดงเอลิเมนต์ของพาริสันที่ยังไม่เกิดการสัมผัสกับแม่พิมพ์ และส่วนที่เป็นสีเหลืองแสดงเอลิเมนต์ที่เกิดการสัมผัสกับผิวแม่พิมพ์



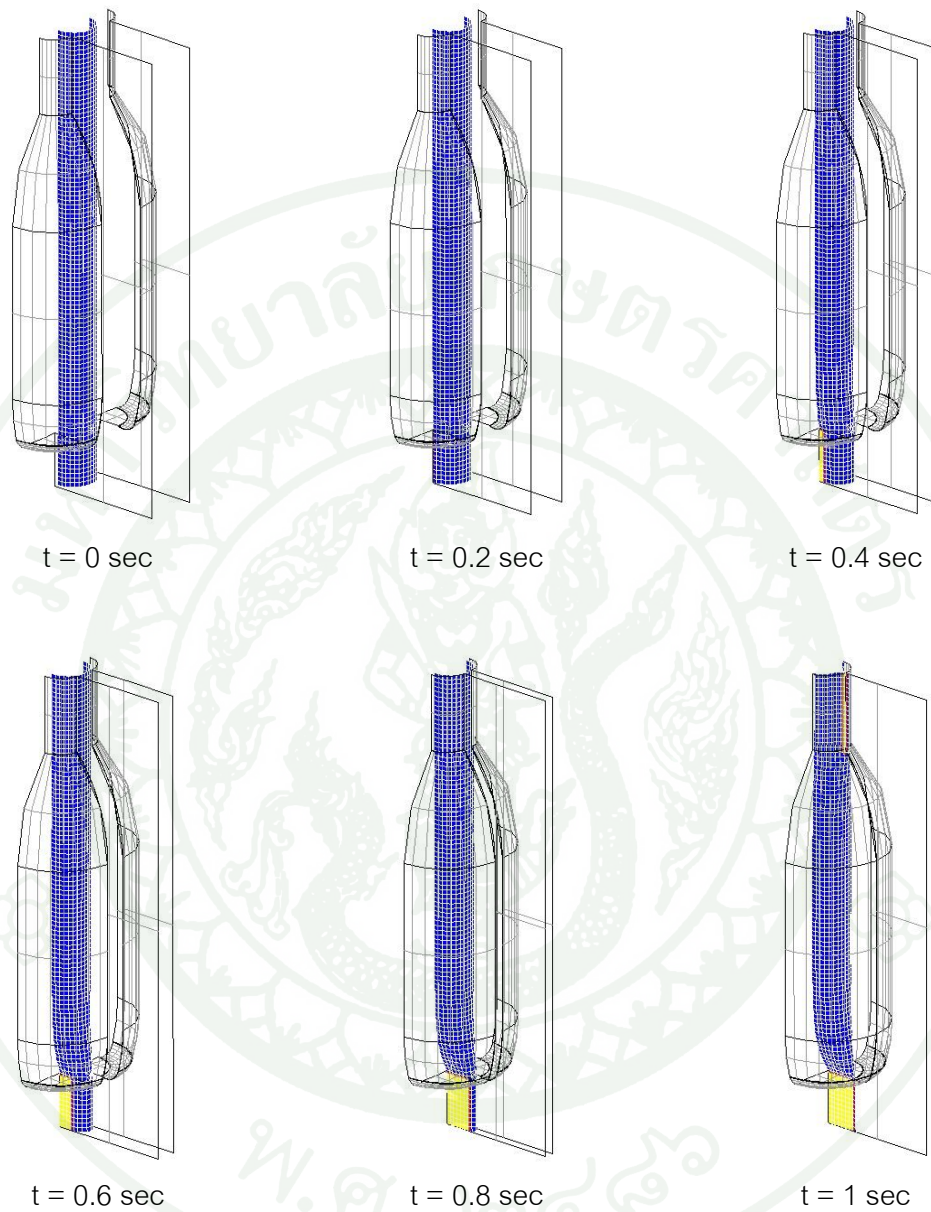
ภาพที่ 38 แผนภาพแสดงการลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์ โดย (ก) แสดงแบบจำลองของแม่พิมพ์และพาริสันเมื่อแม่พิมพ์เริ่มปิด (ข) แสดงรูปทรงของพาริสันเมื่อแม่พิมพ์ปิดแล้ว (ค) แสดงรูปทรงของพาริสันที่ได้ตัดเนื้อพลาสติกส่วนเกิน (pitch-off) แล้วเพื่อนำไปใช้จำลองการเป่าต่อไป



ภาพที่ 39 ผลการจำลองการปิดแม่พิมพ์โดยใช้แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกแบบสมมาตรครึ่งใบ  
ที่เวลา 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 วินาที



ภาพที่ 40 ผลการจำลองการปิดแม่พิมพ์โดยใช้วัสดุวิสโคอีลาสติกแบบจำลองเต็มใบ  
ที่เวลา 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 วินาที

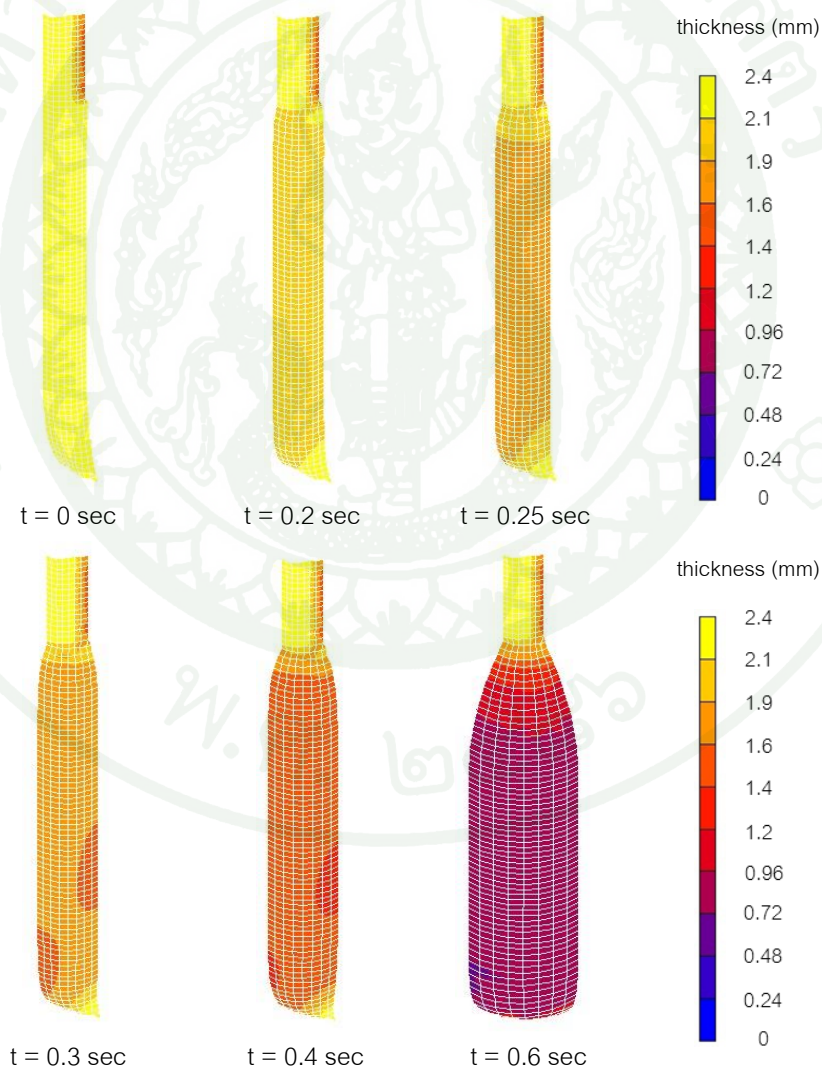


ภาพที่ 41 ผลการจำลองการปิดแม่พิมพ์โดยใช้วัสดุวิสโคอีลาสติกแบบจำลองสมมาตรครึ่งใบ  
ที่เวลา 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 วินาที

### 3. ผล FEA จำลองการเป่าพาริสัน

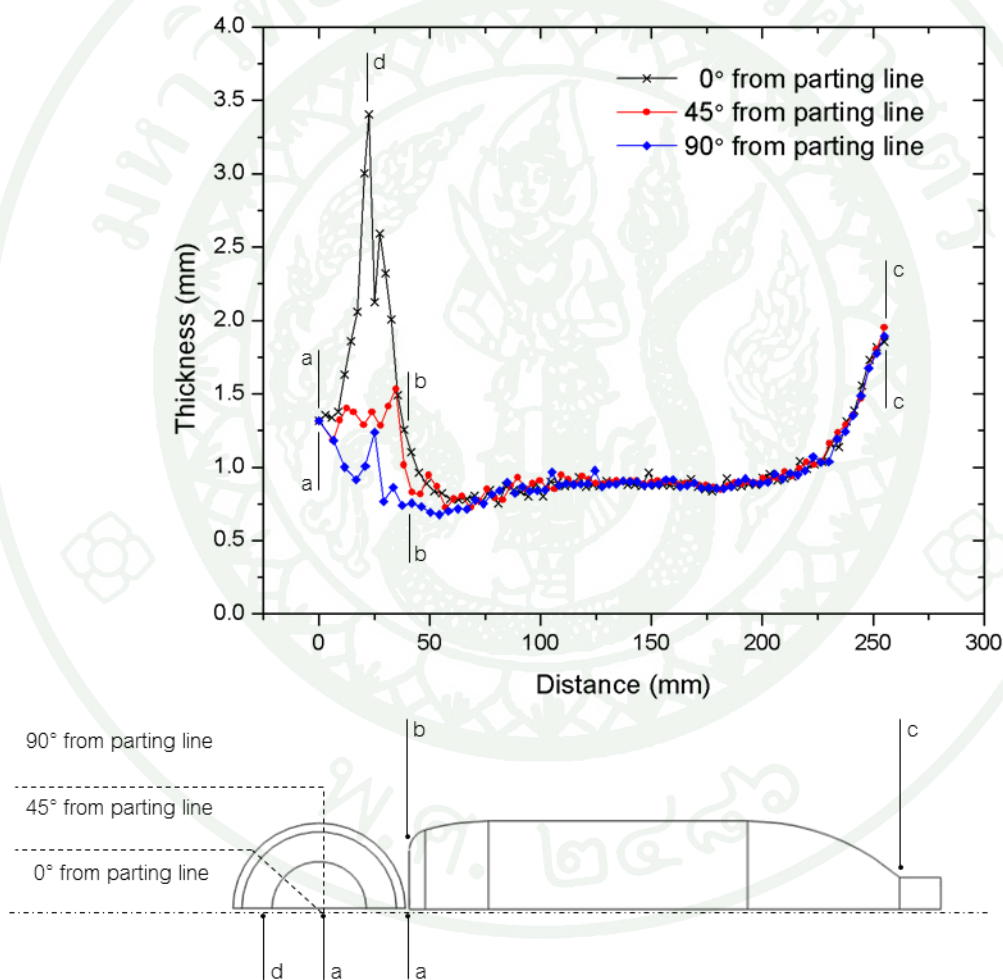
#### 3.1 ผล FEA จำลองการเป่าพาริสันโดยใช้วัสดุไฮเปอร์อีลาสติก

ผลการวิเคราะห์ความหนาเป็นระดับชั้นสีของผนังของพาริสันที่เปลี่ยนแปลงไปในเวลาต่างๆ ในขณะที่ทำการเป่า ภายใต้ความดัน 1 MPa ความหนาเริ่มต้น 2.4 mm และอุณหภูมิเริ่มต้น 180°C ที่เวลา 0, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, และ 0.6 วินาที โดยใช้แบบจำลองวัสดุแบบไฮเปอร์อีลาสติกแบบสมมาตรหนึ่งในสี่ ได้แสดงในภาพที่ 42

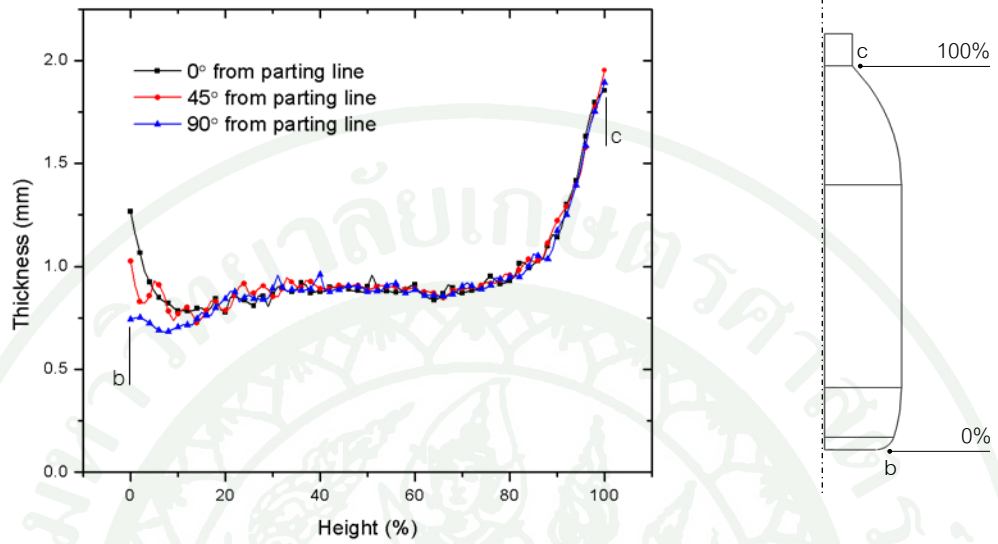


ภาพที่ 42 ผลการวิเคราะห์ความหนาของพาริสัน โดยใช้แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกแบบสมมาตรหนึ่งในสี่ ที่เวลา 0, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4 และ 0.6 วินาที

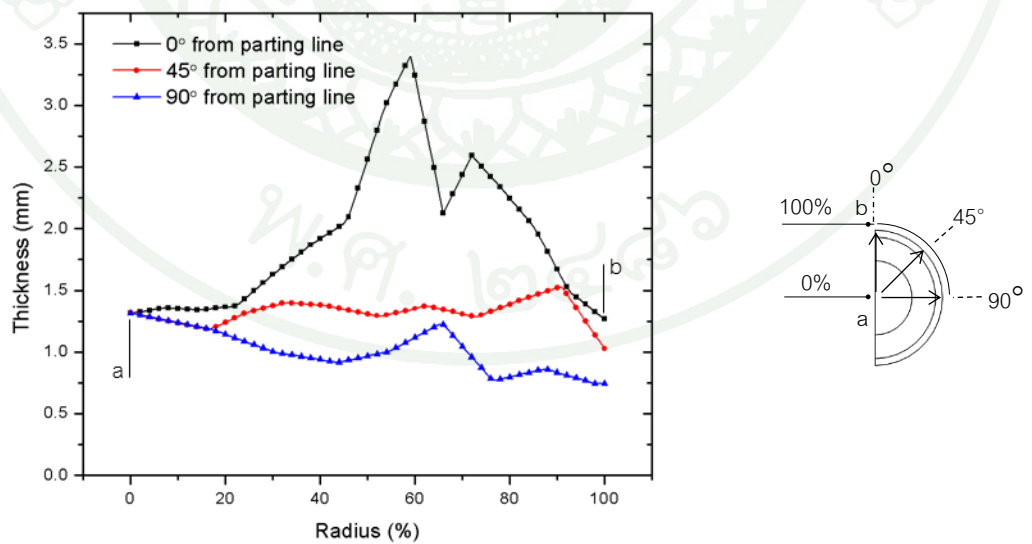
ความหนาของขวดที่เป่าเสร็จแล้ว ณ ตำแหน่งต่างๆ จาก จุดกึ่งกลางขวด ถึงขอบวงกลมของฐานขวด จนถึงคอขวด สามารถแสดงเป็นกราฟในแนว  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $90^\circ$  จากเส้นแบ่งแม่พิมพ์ได้ดังภาพที่ 43 และสามารถแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเปอร์เซ็นต์ความสูงของขวด ได้ดังแสดงในภาพที่ 44 และแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเปอร์เซ็นต์รัศมีของฐานขวด ดังแสดงในภาพที่ 45



ภาพที่ 43 ผลการวิเคราะห์ FEA ของความหนาขวด โดยใช้วัสดุไฮเปอร์อีลาสติก ที่ตำแหน่ง  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $90^\circ$  จากแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์



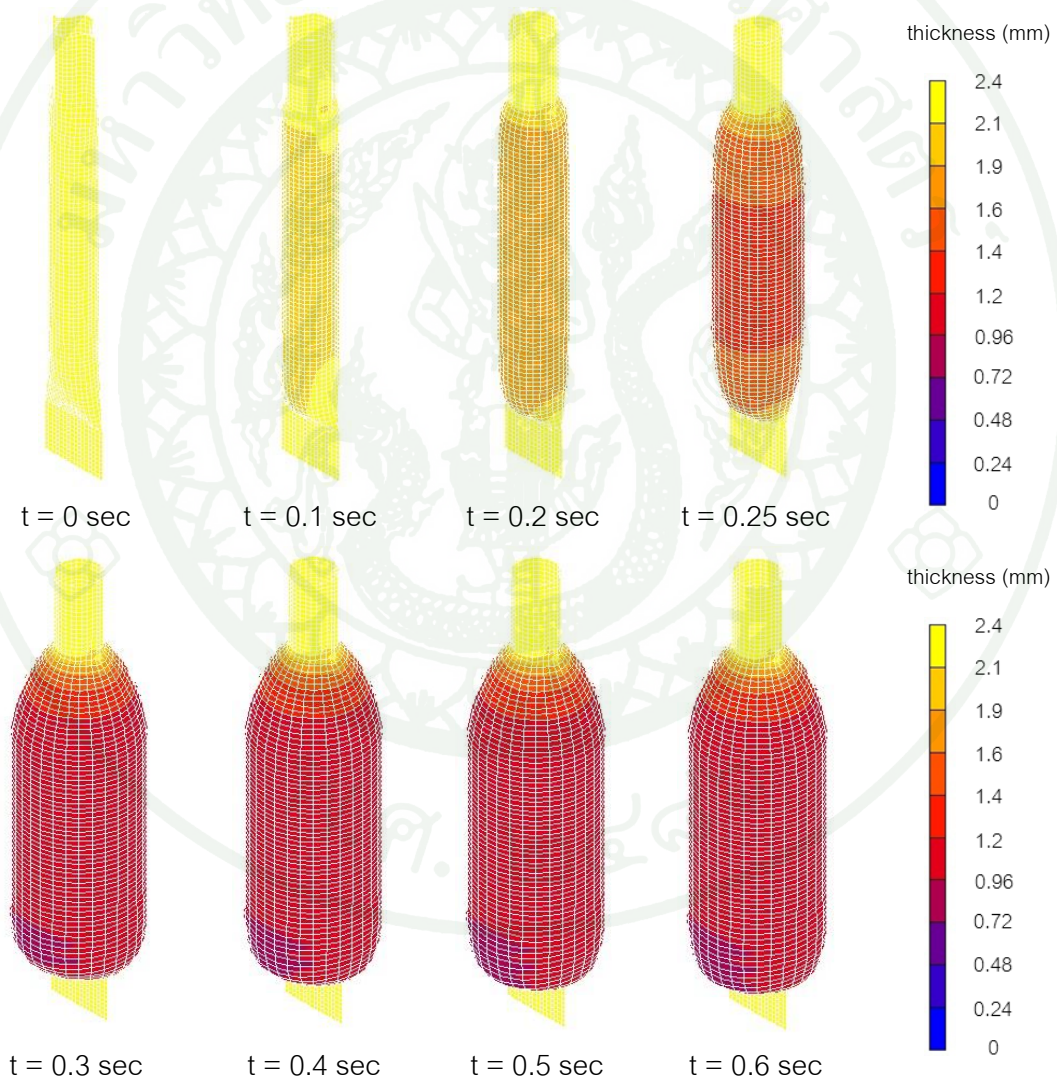
ภาพที่ 44 กราฟของภาพที่ 43 เป็นเปอร์เซ็นต์ความสูงของผนังขวด จากตำแหน่ง b ถึง c



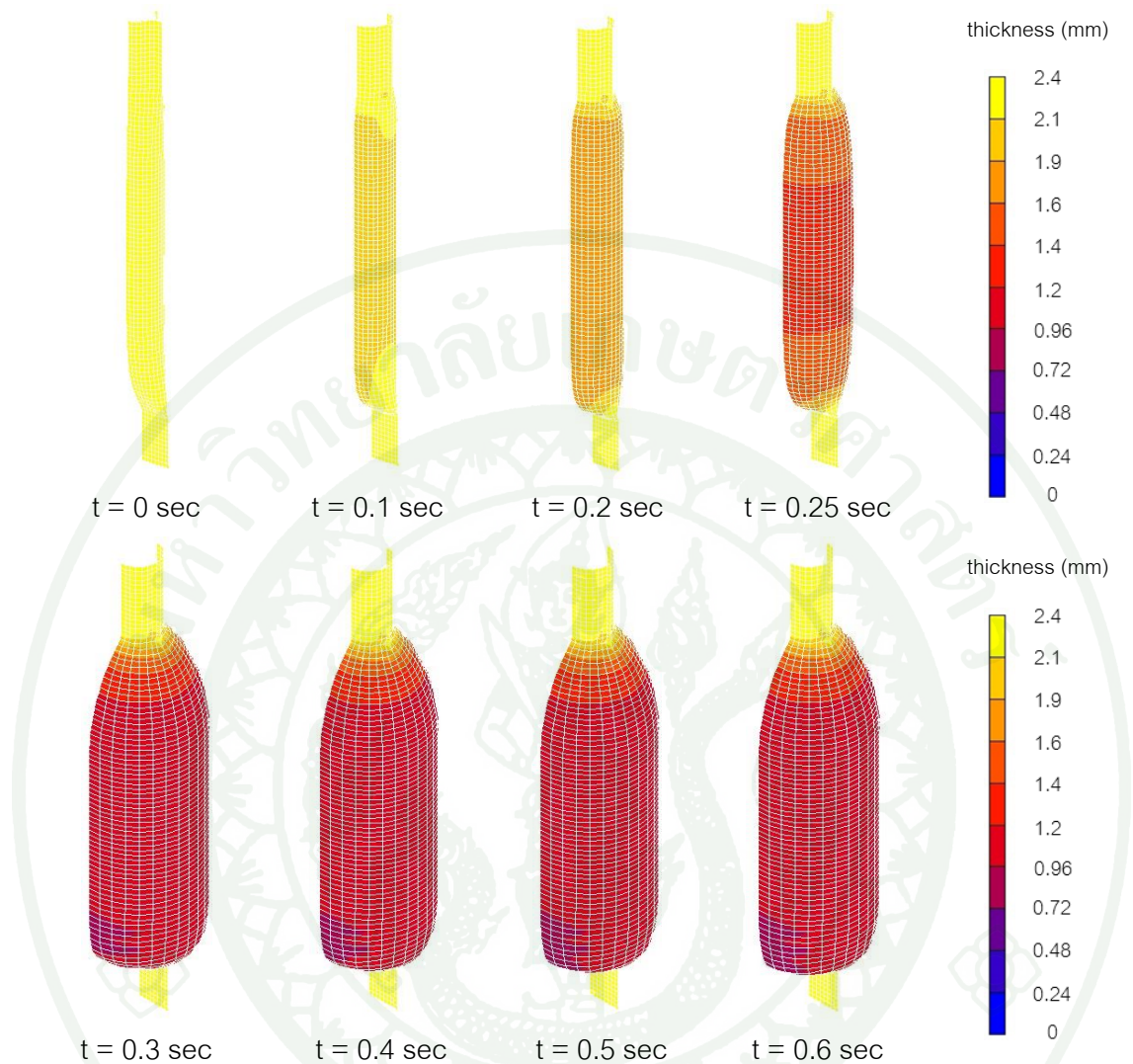
ภาพที่ 45 กราฟของภาพที่ 43 เป็นเปอร์เซ็นต์รัศมีของฐานขวด จากตำแหน่ง a ถึง b

### 3.2 ผล FEA จำลองการเป่าพาริสันโดยใช้วัสดุวิสโคอีลาสติก

ผลการวิเคราะห์ความหนาเป็นระดับชั้นสีของผนังพาริสันที่เปลี่ยนแปลงไปในเวลาต่างๆ ในขณะที่ทำการเป่า ภายใต้ความดัน 1 MPa ความหนาเริ่มต้น 2.4 mm และอุณหภูมิเริ่มต้น 180°C ที่เวลา 0, 0.1, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5 และ 0.6 วินาที โดยให้วัสดุเป็นแบบวิสโคอีลาสติก และจำลองการเปลี่ยนแปลงทั้งใบ ได้แสดงในภาพที่ 46 และแบบครึ่งใบในภาพที่ 47

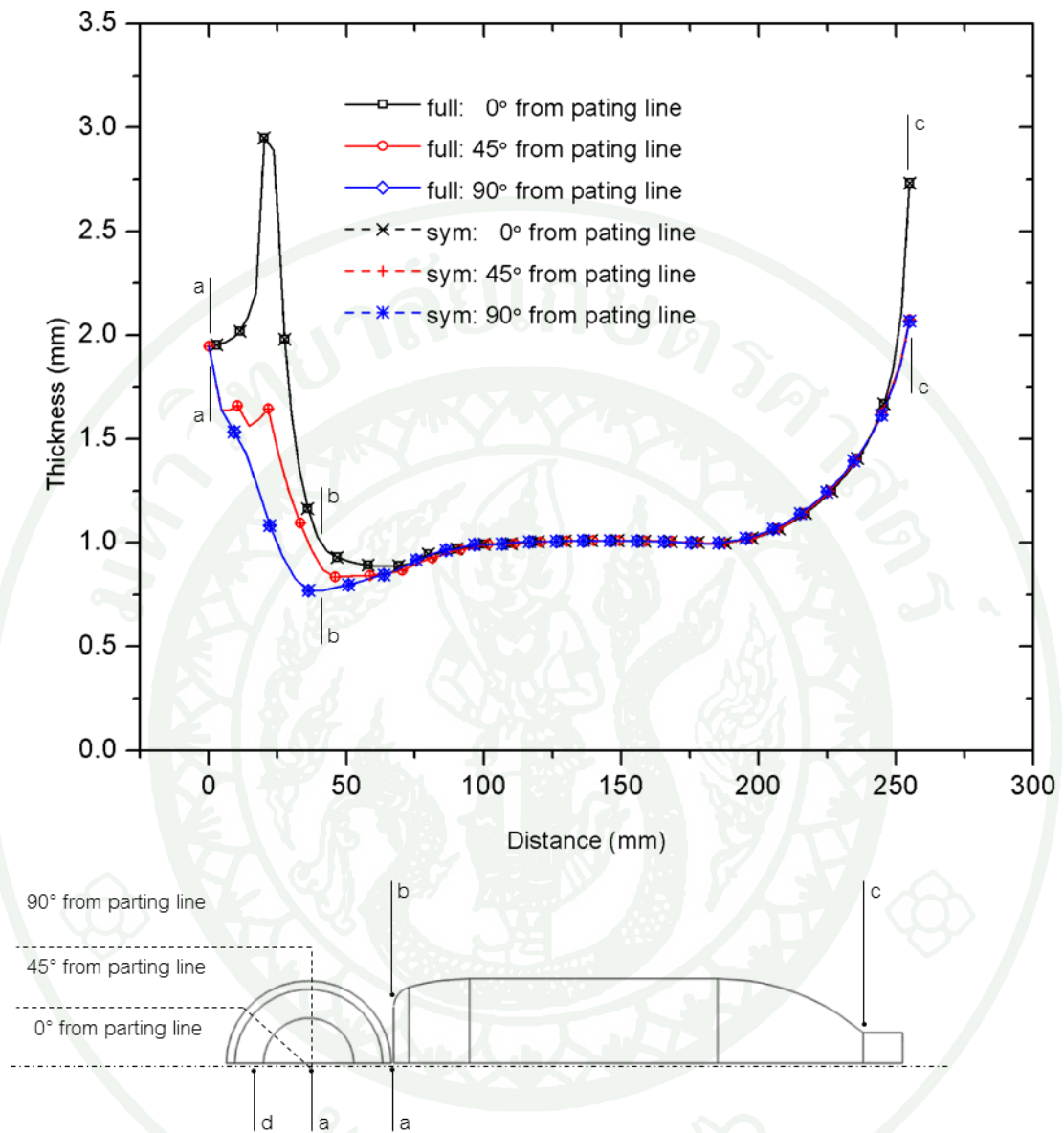


**ภาพที่ 46** ผลการวิเคราะห์ความหนาของพาริสัน โดยใช้วัสดุวิสโคอีลาสติกแบบจำลองเต็มใบ ที่เวลา 0, 0.1, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5 และ 0.6 วินาที



ภาพที่ 47 ผลการวิเคราะห์ความหนาของพาริสัน โดยใช้วัสดุวิสโคอีลาสติกแบบจำลองสมมาตร ครึ่งใบ ที่เวลา 0, 0.1, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5 และ 0.6 วินาที

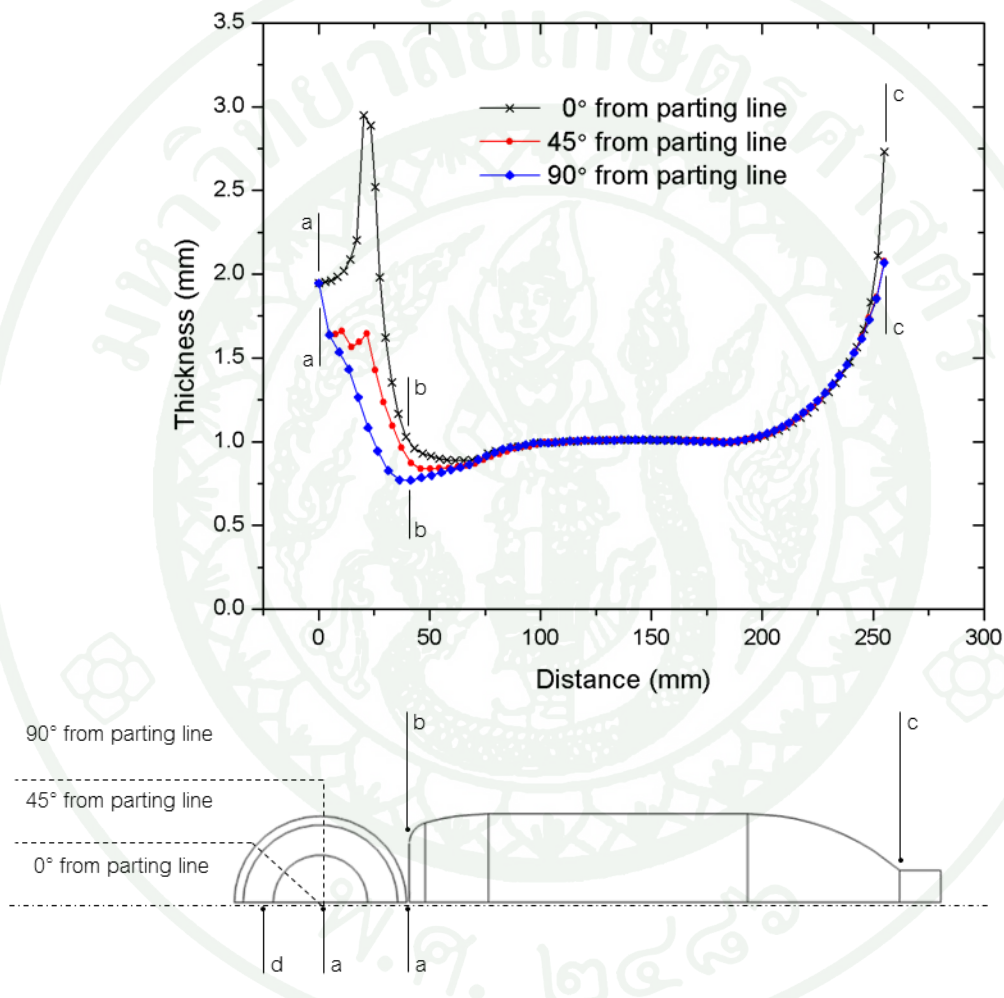
ความหนาของขวดที่เป่าเสร็จแล้ว ณ ตำแหน่งต่างๆ จากจุดกึ่งกลางขวด ถึงขอบวงกลมของฐานขวด จนถึงคอขวด สามารถแสดงเป็นกราฟในแนว  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $90^\circ$  จากเส้นแบ่งแม่พิมพ์ ได้ดังภาพที่ 48 โดยเส้นทึบแสดงผลการวิเคราะห์ความหนาของแบบจำลองเต็มใบ และเส้นประของแบบจำลองสมมาตรครึ่งใบ



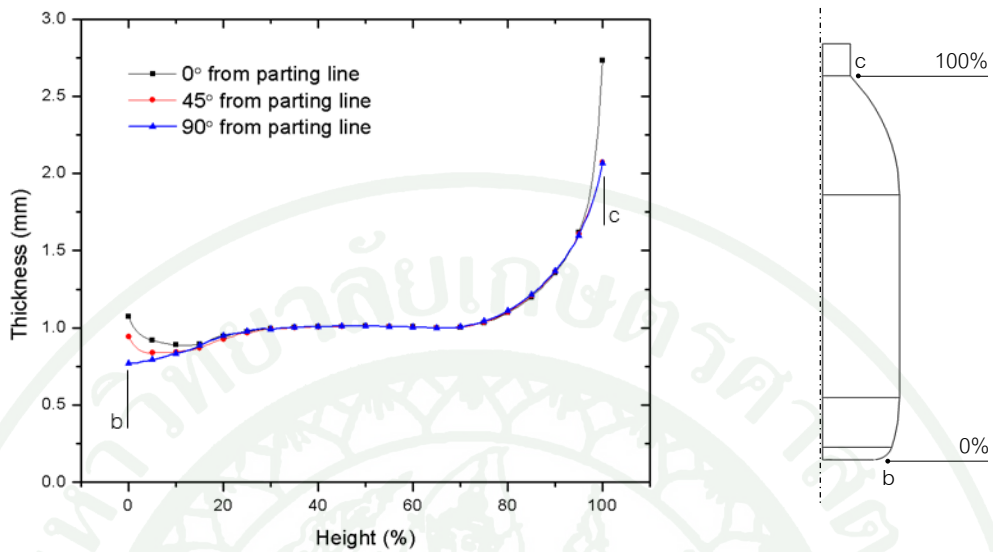
ภาพที่ 48 ผล FEA ของความหนาผนังขวดที่ตำแหน่งต่างๆ ของแบบจำลองเต็มใบกับแบบจำลองสมมาตรครึ่งใบ โดยใช้วัสดุวิสโคอีลาสติก ที่ตำแหน่ง 0°, 45° และ 90° จากเส้นแบ่งแม่พิมพ์

จากการเปรียบเทียบผล FEA ของความหนาผนังขวด ระหว่างแบบจำลองเต็มใบ และแบบสมมาตรครึ่งใบ พบว่าแบบจำลองทั้งสองแบบ ให้ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของความหนาใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะบริเวณลำตัวขวด (20 mm ถึง 175 mm)

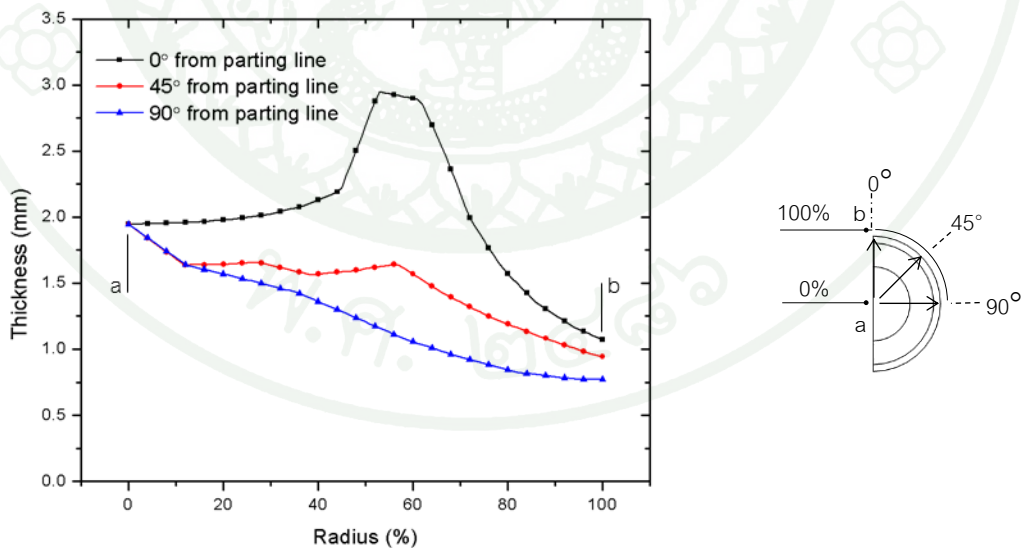
ภาพที่ 49 แสดงกราฟของความหนาขดที่ตำแหน่งต่างๆ ของผล FEA ของขดแบบครึ่งใบ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเปอร์เซ็นต์ความสูงของขด ได้แสดงในภาพที่ 50 และกราฟความหนาและเปอร์เซ็นต์รัศมีของฐานขด ได้แสดงในภาพที่ 51



ภาพที่ 49 ผล FEA ของความหนาขดแบบครึ่งใบ โดยใช้วัสดุวิสโคอีลาสติก ที่ตำแหน่ง 0°, 45° และ 90° จากเส้นแบ่งแม่พิมพ์



ภาพที่ 50 เปรียบเทียบผล FEA ของความหนาขอบแบบครึ่งใบ โดยใช้วัสดุวิสโคอีลาสติก ที่  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $90^\circ$  จากแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์ กับเปอร์เซ็นต์ความสูงของผนังขอบ



ภาพที่ 51 เปรียบเทียบผล FEA ของความหนาขอบแบบครึ่งใบ โดยใช้วัสดุวิสโคอีลาสติก ที่  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $90^\circ$  จากแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์ กับเปอร์เซ็นต์รัศมีของฐานขอบ

### 3.3 ผลเปรียบเทียบแบบจำลองการเป่าพาริสัน

ตารางที่ 9 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบแบบจำลอง FEM ของการจำลองการเป่าของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติก (แบบสมมาตรครึ่งใบ) และวัสดุวิสโคอีลาสติก (แบบสมมาตรครึ่งใบและเต็มใบ) จากผลการจำลองการเป่าพาริสัน โดยกำหนดให้เวลาในการเป่า 1 วินาที พบว่าพาริสันถูกความดันเป่าไปสัมผัสผิวแม่พิมพ์ และทำให้ผนังขวดทั้งใบหยุดการเปลี่ยนแปลง ต้องใช้เวลา 0.6 วินาที เท่ากันทั้ง 3 แบบจำลอง

ตารางที่ 9 ข้อมูลเปรียบเทียบของผลการวิเคราะห์ของแบบจำลอง

parison	ไฮเปอร์อีลาสติก	วิสโคอีลาสติก	
	สมมาตรครึ่งใบ	สมมาตรครึ่งใบ	เต็มใบ
จำนวน node	784	1717	3232
จำนวน element	690	1600	3200
ชนิดของ element	shell	shell	shell
รูปทรงของ element	quad	quad	quad
ขนาดของ element (mm)	3 x 3	3 x 3	3 x 3
Area Ratio ของ element	$3.12 \times 10^{-4}$	$3.12 \times 10^{-4}$	$3.12 \times 10^{-4}$
ความหนาเริ่มต้นของ element (mm)	2.4	2.4	2.4
อุณหภูมิเริ่มต้นของ element (°C)	180	180	180
อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (°C)	ไม่มี	25	25
ความดันเป่า (MPa)	1	1	1
processing time (sec)	20	322	701
หมายเหตุ	ยากต่อการปรับตั้งเงื่อนไขในการวิเคราะห์ และไม่สามารถวิเคราะห์	สามารถวิเคราะห์ได้ แต่ชิ้นงานที่สมมาตร ในระนาบซ้ายขวา เท่านั้น	ใช้เวลานานและยากต่อการวิเคราะห์ แต่สามารถวิเคราะห์ชิ้นงานที่ไม่สมมาตรได้

โดยแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก ถึงแม้จะใช้จำนวน node และ element น้อยกว่า และมีผลการคำนวณที่เร็ว แต่พบความยากในการกำหนดเงื่อนไขทาง FEA ต้องทำแยกสอง ขั้นตอน (ปิดแม่พิมพ์ และเป่า) จึงใช้เวลาในการเตรียมการมาก และเนื่องจากในกระบวนการปิดของแม่พิมพ์ มีโอกาสเกิดการพังของเอลิเมนต์ ซึ่งเป็นปัญหาในการคำนวณเชิงตัวเลขโดยมีผลให้ค่าที่คำนวณได้เกิดการลู่ออก (diverge) ของระบบสมการเชิงตัวเลข เมื่อบริเวณขอบมุมของพาริสันถูกแม่พิมพ์ประกบปิด ดังนั้นรูปทรงขวดที่ซับซ้อนจึงไม่สามารถวิเคราะห์ได้

สำหรับแบบ FEM โดยใช้วัสดุวิสโคอีลาสติก สามารถวิเคราะห์ได้ในขั้นตอนเดียว โอกาสเกิดการ diverge น้อย ผลการวิเคราะห์แบบเต็มใบและครึ่งใบให้ผลที่ใกล้เคียงกัน แต่ถ้ารูปทรงขวดไม่สมมาตรต้องใช้แบบจำลอง FEM แบบเต็มใบ

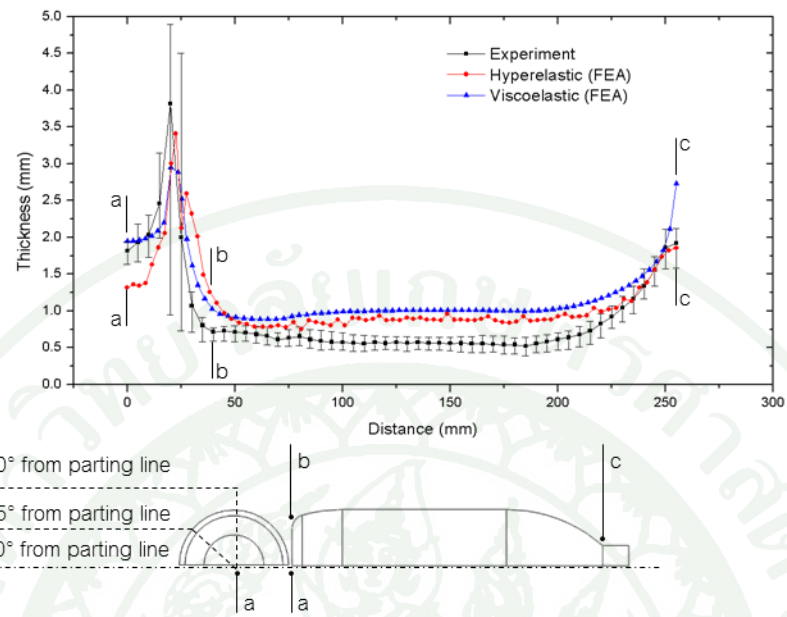
### 3.4 ผลเปรียบเทียบความหนาของขวดจริงและผล FEA

#### 3.4.1 ความหนาตามแนวเส้น $0^\circ$ ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์

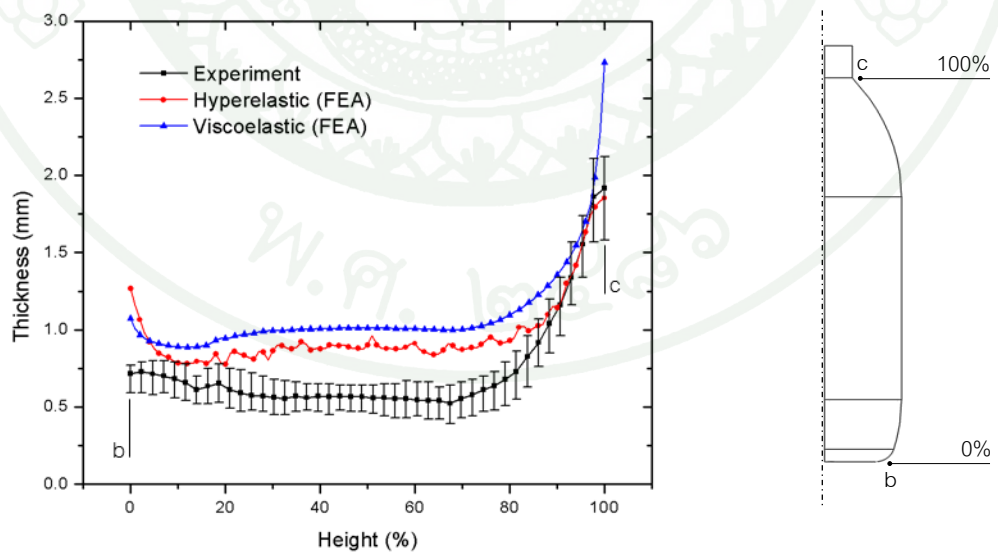
ผลเปรียบเทียบความหนาที่วัดจากขวดจริงตามแนวเส้น  $0^\circ$  ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์กับผล FEA ของกระบวนการเป่า เมื่อใช้วัสดุไฮเปอร์อีลาสติก และวัสดุวิสโคอีลาสติก ภายใต้ความดัน 1 MPa และมีความหนาเริ่มต้น 2.4 mm ได้แสดงในภาพที่ 52 โดยค่าเฉลี่ยจากผลการวัดความหนาของขวดได้แสดงพร้อมค่าพิสัยสูงสุดและต่ำสุด กราฟเปรียบเทียบของความหนากับเปอร์เซ็นต์ความสูงขวด และเปอร์เซ็นต์รัศมีฐานขวด ได้แสดงในภาพที่ 53 และ 54 ตามลำดับ

#### 3.4.2 ความหนาตามแนวเส้น $45^\circ$ ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์

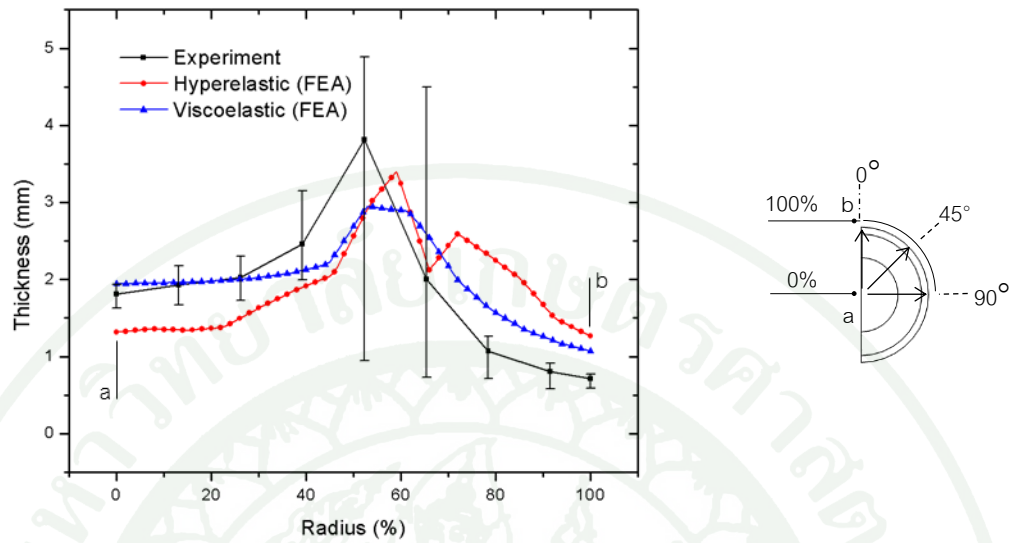
ผลเปรียบเทียบความหนาที่วัดจากขวดจริงตามแนวเส้น  $45^\circ$  ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์กับผล FEA ของกระบวนการเป่า เมื่อใช้วัสดุไฮเปอร์อีลาสติก และวัสดุวิสโคอีลาสติก ภายใต้ความดัน 1 MPa และมีความหนาเริ่มต้น 2.4 mm ได้แสดงในภาพที่ 55 โดยค่าเฉลี่ยจากผลการวัดความหนาของขวดได้แสดงพร้อมค่าพิสัยสูงสุดและต่ำสุด กราฟเปรียบเทียบของความหนากับเปอร์เซ็นต์ความสูงขวด และเปอร์เซ็นต์รัศมีฐานขวด ได้แสดงในภาพที่ 56 และ 57 ตามลำดับ



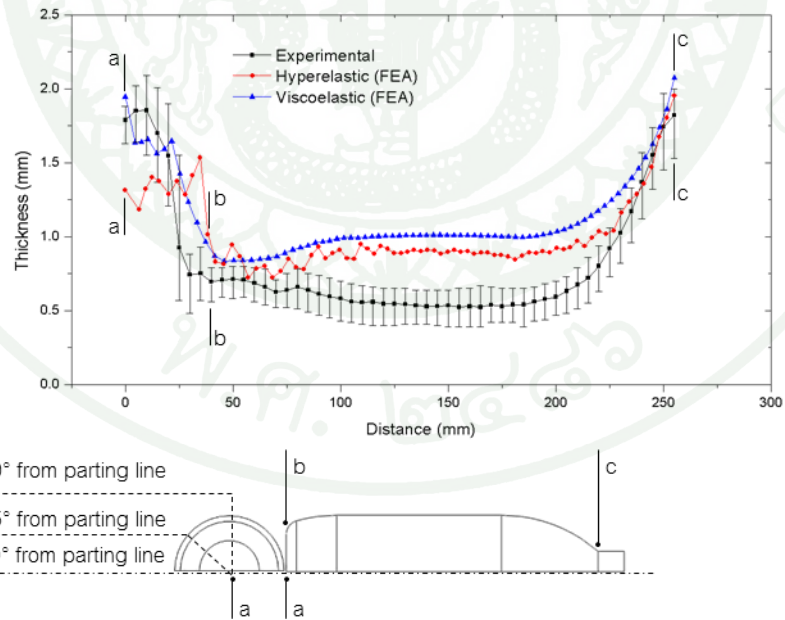
ภาพที่ 52 ผลเปรียบเทียบความหนาของขดจริง (Experiment) และผล FEA ตามแนวเส้น  $0^\circ$  ของแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์



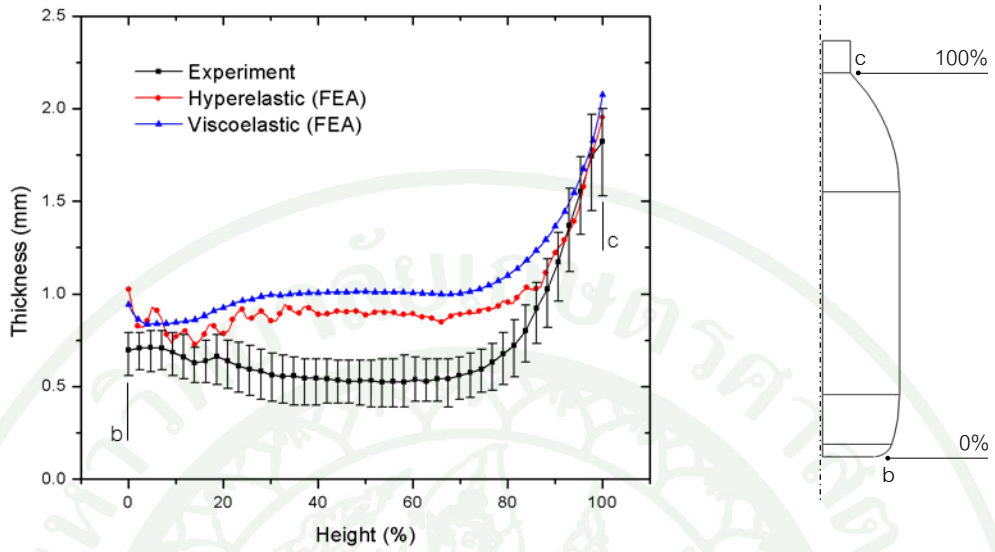
ภาพที่ 53 กราฟของภาพที่ 52 เป็นเปอร์เซ็นต์ความสูงขด จากตำแหน่ง b ถึง c



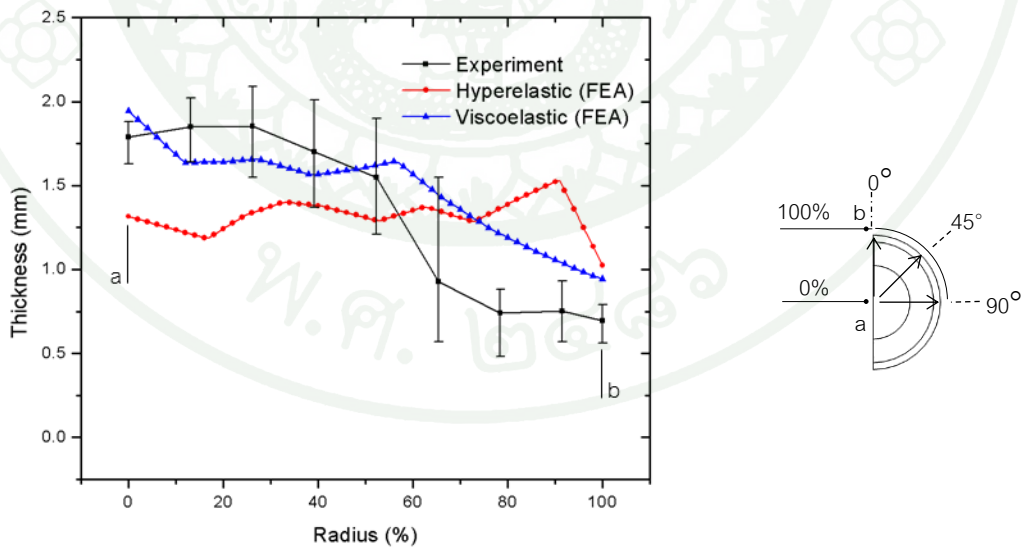
ภาพที่ 54 กราฟของภาพที่ 52 เป็นเปอร์เซ็นต์รัศมีฐานขนาด จากตำแหน่ง a ถึง b



ภาพที่ 55 ผลเปรียบเทียบความหนาของขดจริง (Experiment) และผล FEA ตามแนวเส้น 45° ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์



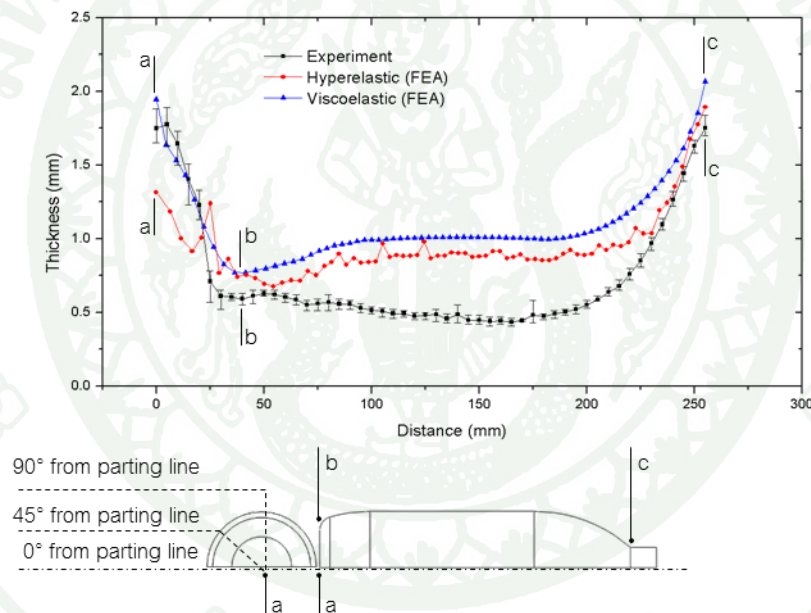
ภาพที่ 56 กราฟของภาพที่ 55 เป็นเปอร์เซ็นต์ความสูงขวัด จากตำแหน่ง b ถึง c



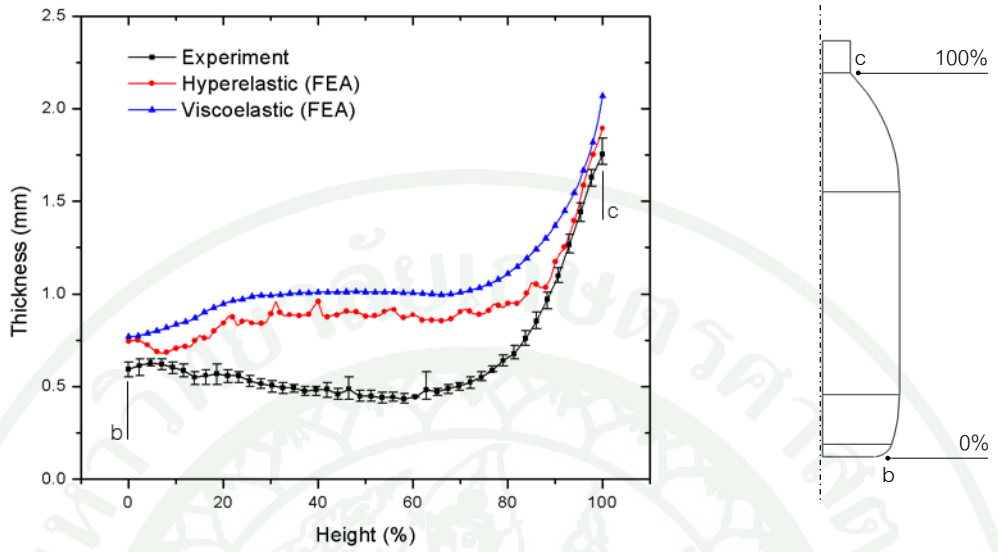
ภาพที่ 57 กราฟของภาพที่ 55 เป็นเปอร์เซ็นต์รัศมีฐานขวัด จากตำแหน่ง a ถึง b

### 3.4.3 ความหนาตามแนวเส้น 90° ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์

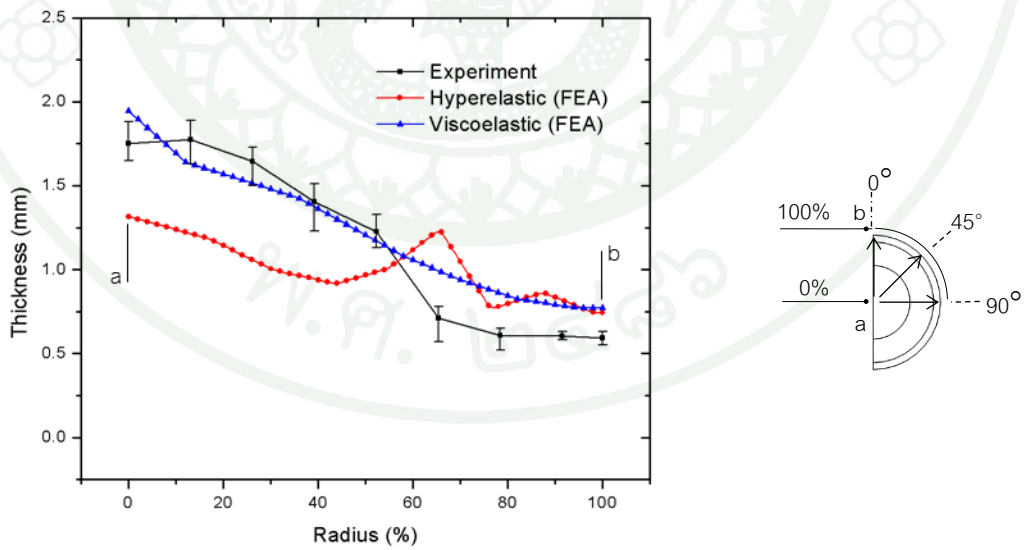
ผลเปรียบเทียบความหนาที่วัดจากขวดจริงตามแนวเส้น 90° ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์กับผล FEA ของกระบวนการเป่า เมื่อใช้วัสดุไฮเปอร์อีลาสติก และวัสดุวิสโคอีลาสติก ภายใต้ความดัน 1 MPa และมีความหนาเริ่มต้น 2.4 mm ได้แสดงในภาพที่ 58 โดยค่าเฉลี่ยจากผลการวัดความหนาของขวดได้แสดงพร้อมค่าพิสัยสูงสุดและต่ำสุด กราฟเปรียบเทียบของความหนากับเปอร์เซ็นต์ความสูงขวด และเปอร์เซ็นต์รัศมีฐานขวด ได้แสดงในภาพที่ 59 และ 60 ตามลำดับ



ภาพที่ 58 ผลเปรียบเทียบความหนาของขวดจริง (Experiment) และผล FEA ตามแนวเส้น 90° ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์



ภาพที่ 59 กราฟของภาพที่ 58 เป็นเปอร์เซ็นต์ความสูงวัด จากตำแหน่ง b ถึง c



ภาพที่ 60 กราฟของภาพที่ 58 เป็นเปอร์เซ็นต์รัศมีฐานวัด จากตำแหน่ง a ถึง b

### 3.5 ผลการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน

จากภาพที่ 52 ถึง 60 เมื่อวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนจากความหนาของขวดจริง (ภาพที่ 34 และ 35) เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ความหนาของแบบจำลองชนิดไฮเปอร์-อีลาสติก และวิสโคอีลาสติก คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์เฉลี่ย (percent average absolute error,  $\bar{e}_\%$ ) โดยคำนวณจาก

$$\bar{e}_\% = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|t_{EXP,i} - t_{FEA,i}|}{t_{EXP,i}} \cdot 100, \% \quad (63)$$

โดย  $n$  คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด ที่นำมาคำนวณความคลาดเคลื่อน  
 $t_{EXP,i}$  คือ ความหนาเฉลี่ยวัดจากขวดจริงที่ตำแหน่งต่างๆ  
 $t_{FEA,i}$  คือ ความหนาจากผลการวิเคราะห์ FEA ที่แต่ละโหนด

พบว่าแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกของขวดแบบสมมาตรครึ่งใบ ให้ผล FEA ของความหนาใกล้เคียงกับผลการวัดความหนาของขวดจริงมากกว่า โดยมีความคลาดเคลื่อน  $\bar{e}_\%$  เท่ากับ 29.15% ในขณะที่แบบจำลองวิสโคอีลาสติกมีความคลาดเคลื่อน  $\bar{e}_\%$  เท่ากับ 33.17% เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงในช่วง 10% ถึง 90% ของความสูงขวด วัสดุแบบวิสโคอีลาสติกมีการเปลี่ยนแปลงที่เรียบสม่ำเสมออย่างต่อเนื่องถูกต้องกว่าของแบบไฮเปอร์อีลาสติก ผลการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนความหนาจากขวดจริง เปรียบเทียบกับผล FEA ของแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก และวิสโคอีลาสติก ที่ตำแหน่งต่างๆ ได้สรุปในตารางที่ 10 และการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างแบบจำลองแบบไฮเปอร์อีลาสติก และแบบจำลองวิสโคอีลาสติก ได้สรุปในตารางที่ 11

ในระหว่างการทำการวิเคราะห์พบว่า การปรับตั้งเงื่อนไขการวิเคราะห์ FEA โดยใช้แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกมีความยุ่งยากกว่าแบบจำลองวิสโคอีลาสติก และผลการวิเคราะห์ความหนาของแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกมีโอกาสเกิดการลู่ออก (diverge) ได้บ่อยครั้งกว่า เมื่อเทียบกับการใช้แบบจำลองวิสโคอีลาสติก

**ตารางที่ 10** ผลการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนจากความหนาจริงของขวด เปรียบเทียบกับผล  
การวิเคราะห์ความหนาของแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก และวิสโคอีลาสติก ที่  
ตำแหน่งต่างๆ

ตำแหน่งจาก เส้นแบ่ง แม่พิมพ์	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (percent average absolute error, %)					
	ไฮเปอร์อีลาสติก			วิสโคอีลาสติก		
	ฐานขวด	ผนังขวด	เฉลี่ย	ฐานขวด	ผนังขวด	เฉลี่ย
0°	31.69	26.84	27.66	17.12	34.93	31.90
45°	29.95	27.56	27.98	18.17	34.27	31.53
90°	28.04	32.58	31.81	13.24	40.73	36.06
เฉลี่ย	29.91	28.99	29.15	16.18	36.64	33.17

**ตารางที่ 11** ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก และ  
วิสโคอีลาสติก

	ไฮเปอร์อีลาสติก	วิสโคอีลาสติก
การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และการวิเคราะห์	มีความยุ่งยากในการกำหนด เงื่อนไขขอบเขตให้เหมาะสม	ง่ายต่อการวิเคราะห์
การลู่ออก (divergence)	เกิดการลู่ออกได้ง่าย	โอกาสเกิดการลู่ออกน้อย
การแกว่งของค่าความหนา (oscillation)	มีการแกว่ง	ไม่มีการแกว่ง
การวิเคราะห์แบบอุณหภูมิไม่คงที่ (non-isothermal)	ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ (constant temperature)	สามารถวิเคราะห์ได้
การวิเคราะห์แบบขึ้นกับเวลา (dynamic)	ไม่สามารถวิเคราะห์ได้	สามารถวิเคราะห์ได้
การวิเคราะห์แบบไม่สมมาตรรอบแกน (non-axisymmetric)	ไม่สามารถวิเคราะห์ได้	สามารถวิเคราะห์ได้
จำนวนขั้นตอนในการวิเคราะห์ เวลาที่ใช้ในการกำหนดเงื่อนไข ในการวิเคราะห์	ต้องแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน 1. แม่พิมพ์ปิด 2. การเป่าพริสตัน ใช้เวลานาน (ประมาณ 30 นาที ถึง 2 ชั่วโมง)	วิเคราะห์ทั้ง 2 ขั้นตอนอย่าง ต่อเนื่องได้ภายในครั้งเดียว ใช้เวลาสั้น (ประมาณ 10 ถึง 30 นาที)

#### 4. ผล FEA จำลองการเปลี่ยนแปลงความหนาพาริสันของขวดทดสอบรูปทรงไม่สมมาตรรอบแกน

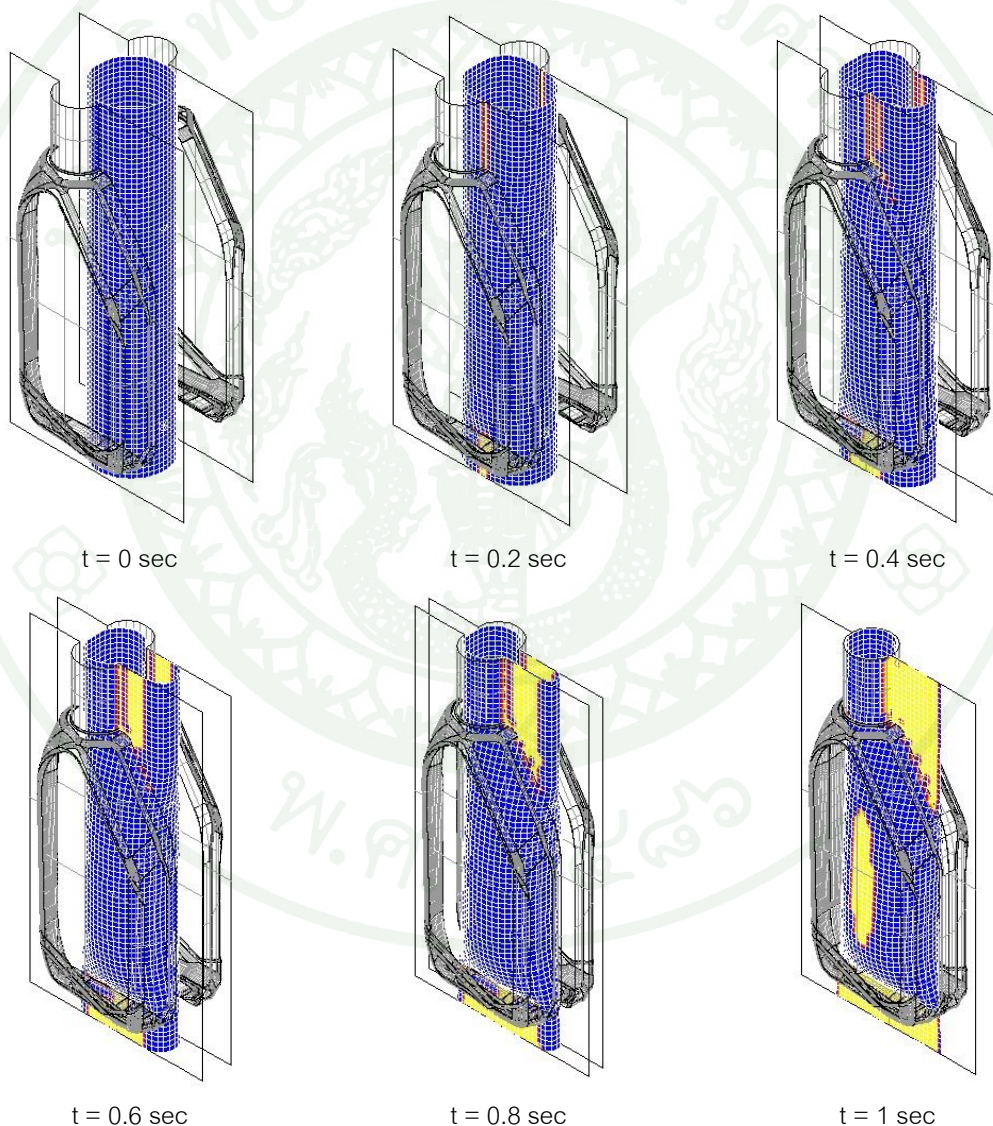
จากผลการวิเคราะห์โดยใช้ FEA จำลองการเป่าพาริสัน สรุปได้ว่าแบบจำลองวัสดุแบบวิสโคอีลาสติกมีผลโดยรวมเหมาะสมในการใช้จำลองการเปลี่ยนแปลงความหนาของพาริสัน จึงได้นำวิธีการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้จำลองขวดที่มีรูปทรงไม่สมมาตร โดยสร้างแบบ FEM แบบเต็มใบเพื่อวิเคราะห์ความหนาของพาริสันที่เปลี่ยนแปลงไปในเวลาต่างๆ ในขณะที่ทำการเป่า ที่ความดัน 1 MPa เส้นผ่าศูนย์กลางของพาริสันเท่ากับ 60 mm ความหนาของพาริสันเริ่มต้นเท่ากับ 2 mm และอุณหภูมิเริ่มต้นของพาริสันเท่ากับ 180°C โดยตารางที่ 12 แสดงรายละเอียดของการวิเคราะห์กระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูปของแบบจำลองขวดทดสอบรูปทรงไม่สมมาตร

ตารางที่ 12 ข้อมูลของแบบจำลอง FEM ของขวดทดสอบรูปทรงไม่สมมาตร

parison	non-axisymmetric
จำนวน node	3600
จำนวน element	3562
ชนิดของ element	shell
รูปทรงของ element	quad
ขนาดของ element (mm)	4 x 4
Area Ratio ของ element	$2.81 \times 10^{-4}$
เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)	60
แบบจำลองเชิงโครงสร้างของวัสดุ	วิสโคอีลาสติก
ความหนาเริ่มต้นของ element (mm)	2
อุณหภูมิเริ่มต้นของ element (°C)	180
ความดันเป่า (MPa)	1
processing time (sec)	542
หมายเหตุ	ยากต่อการสร้างแบบจำลอง และปรับตั้งเงื่อนไขในการวิเคราะห์ แบบจำลองต้องเป็นแบบจำลองเต็มใบเท่านั้น และใช้เวลานานในการวิเคราะห์ แต่สามารถวิเคราะห์ชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่สมมาตรได้

#### 4.1 ผล FEA จำลองการปิดแม่พิมพ์ของขวดรูปทรงไม่สมมาตรรอบแกน

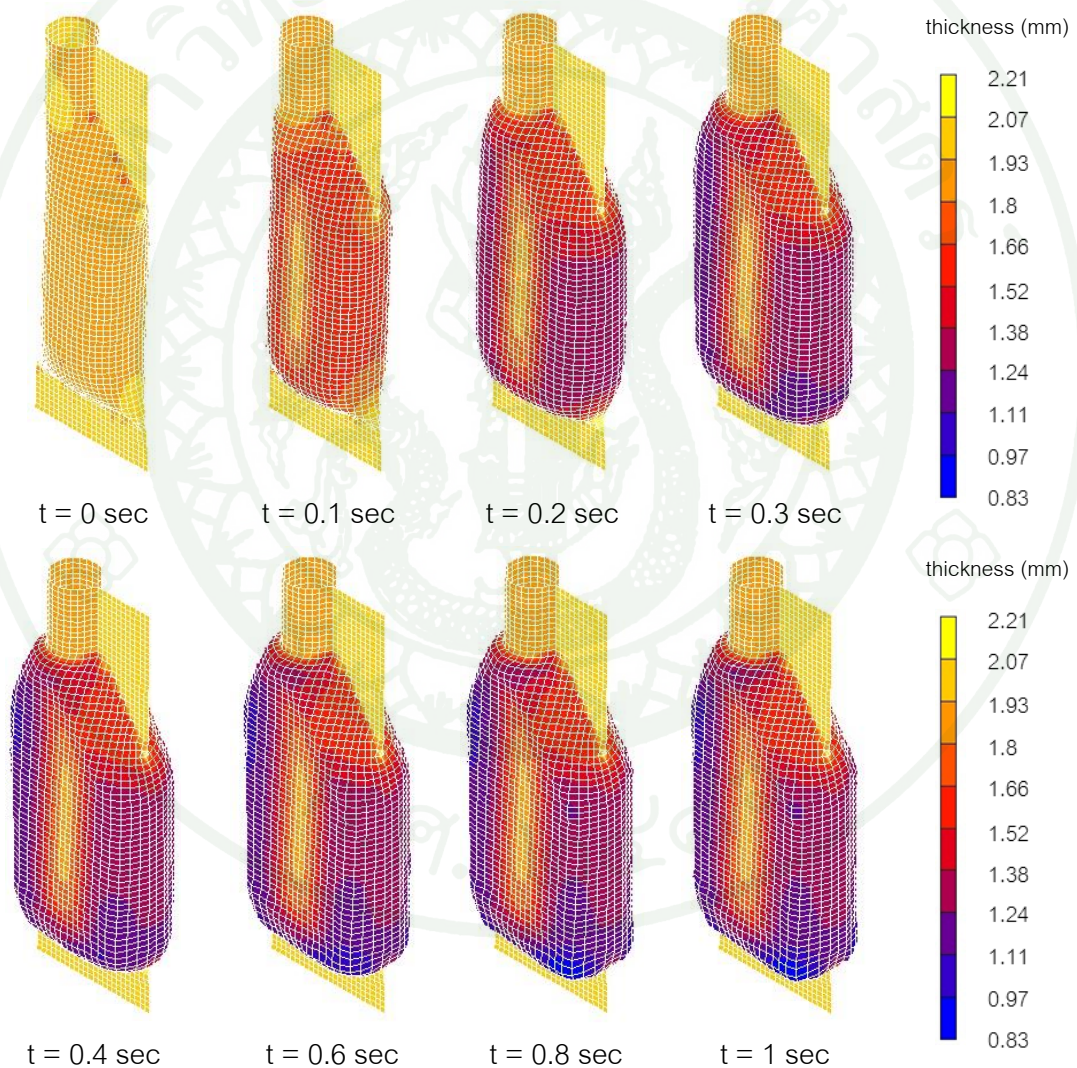
ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์ของขวดรูปทรงไม่สมมาตรรอบแกน โดยใช้วัสดุวิสโคอีลาสติกจำลองการเป่าขวดทั้งใบที่เวลา 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 วินาที ได้แสดงในภาพที่ 61 โดยส่วนสีน้ำเงินแสดงเอลิเมนต์ของพาริสันที่ไม่สัมผัสกับแม่พิมพ์ และส่วนสีเหลืองแสดงเอลิเมนต์ที่เกิดการสัมผัสกับผิวแม่พิมพ์



ภาพที่ 61 ผลการจำลองการปิดของแม่พิมพ์โดยใช้แบบจำลองเต็มใบ ที่เวลา 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 วินาที

#### 4.2 ผล FEA จำลองการเป่าพาริสันของขวดรูปทรงไม่สมมาตรรอบแกน

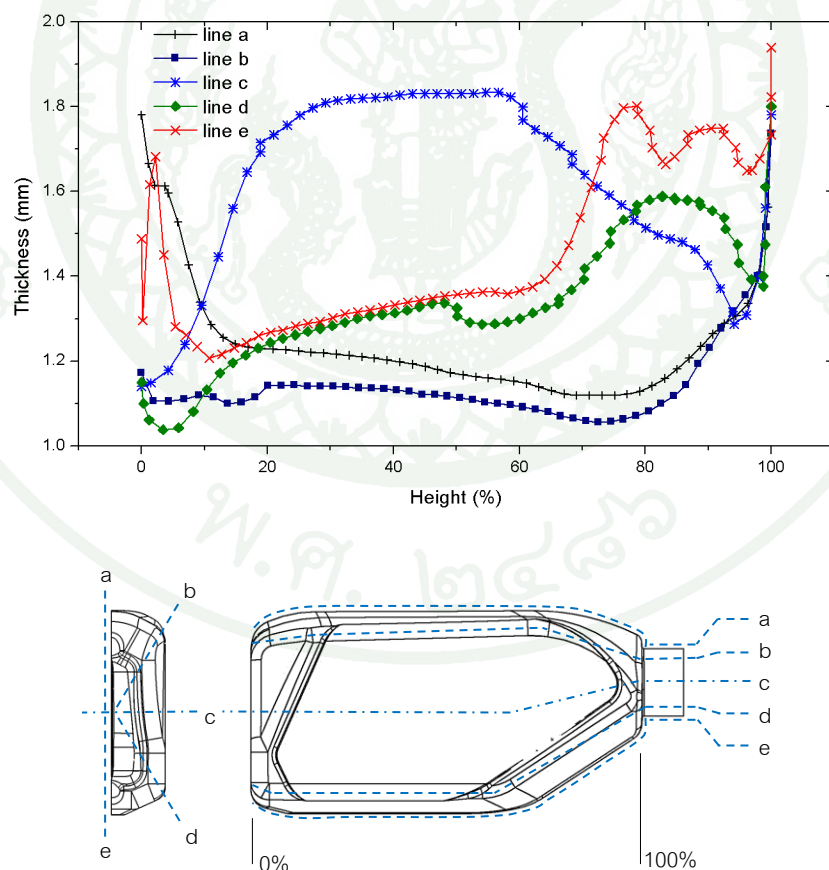
ผลการวิเคราะห์ความหนาเป็นระดับชั้นสีของผนังพาริสันที่เปลี่ยนแปลงที่เวลาต่างๆ ในขณะที่ทำการเป่า ที่ 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 วินาที ของขวดรูปทรงไม่สมมาตร โดยใช้วัสดุวิสโคอีลาสติก ได้แสดงในภาพที่ 62 จากผลจำลองการเป่าพาริสัน พบว่า 1 วินาทีหลังจากพาริสันถูกความดันเป่าไปสัมผัสแม่พิมพ์ ความหนาผนังข้างทั้งหมดหยุดการเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 62 ผลการวิเคราะห์ความหนาของพาริสัน โดยใช้วัสดุวิสโคอีลาสติกแบบจำลองเต็มใบ ที่เวลา 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 วินาที

#### 4.3 ผล FEA วิเคราะห์ความหนาของขวดรูปทรงไม่สมมาตรรอบแกน

ความหนาของขวด 1 ลิตร รูปทรงไม่สมมาตรรอบแกน ที่เป่าเสร็จแล้ว ณ ตำแหน่งต่างๆ จากขอบของฐานขวด จนถึงคอขวด สามารถแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเปอร์เซ็นต์ความสูงของขวดในแนวต่างๆ จากเส้นแบ่งของแม่พิมพ์ที่ได้ดังภาพที่ 63 จากผลการวิเคราะห์ความหนาขวดทำให้ทราบว่า ขวดมีความหนามากสุดที่บริเวณพาริสันถูกความดันเป่าไปสัมผัสกับแม่พิมพ์ก่อน ได้แก่ แนวเส้นกึ่งกลางของขวด (เส้น c) และส่วนโค้งเว้าของไหล่ขวด (เส้น d และ e) ในขณะที่ขวดจะมีความบางมากที่สุดในพื้นที่พาริสันสัมผัสกับแม่พิมพ์ทีหลัง ได้แก่ แนวเส้นแบ่งของแม่พิมพ์และเส้นขอบมุมขวดด้านที่อยู่ห่างจากเส้นกึ่งกลางของพาริสัน (เส้น a และ b) รวมถึงบริเวณขอบมุมต่างๆ ของขวดที่ยากต่อการเป่า



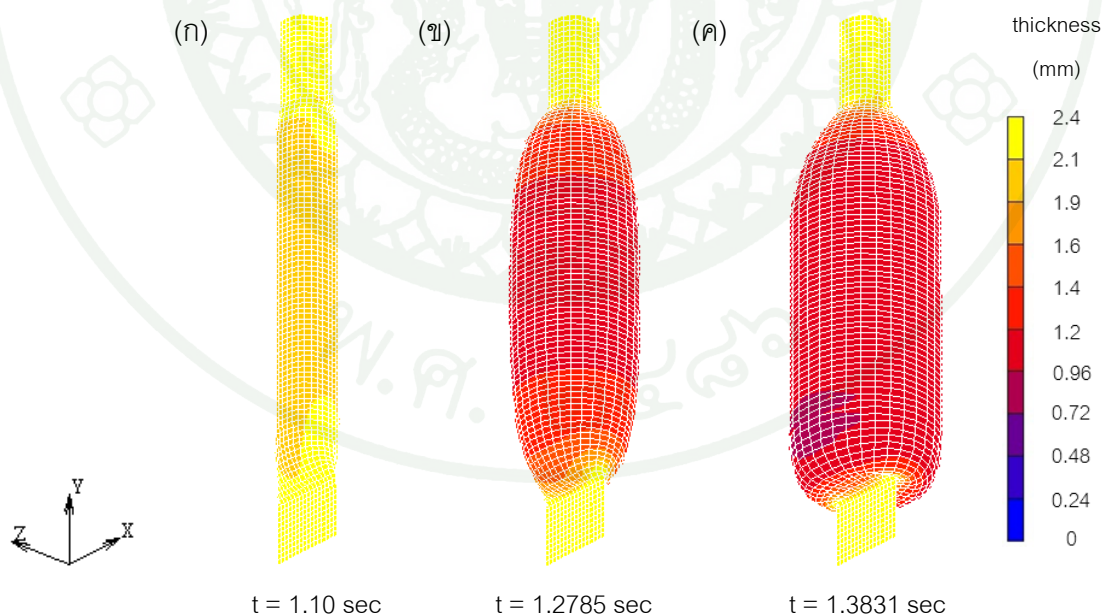
ภาพที่ 63 ผลการวิเคราะห์ FEA ของความหนาขวดรูปทรงไม่สมมาตรรอบแกน ที่ตำแหน่งต่างๆ จากเส้นแบ่งของแม่พิมพ์ กับเปอร์เซ็นต์ความสูงขวด

## 5. ผล FEA จำลองการเปลี่ยนแปลงความหนาของพาริสันเทียบกับเวลา

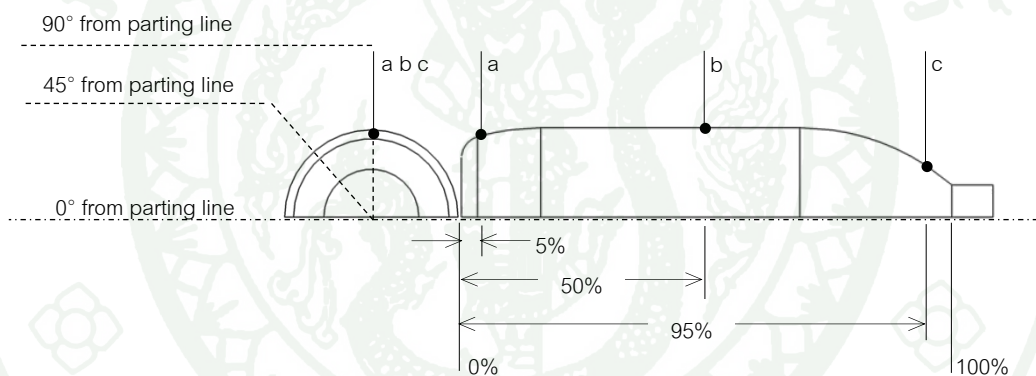
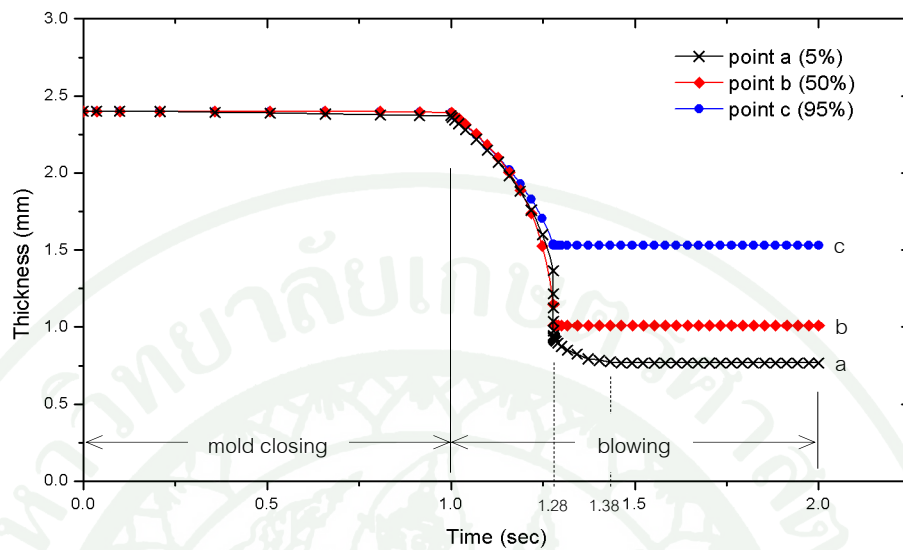
ความหนาของขวดรูปทรงสมมาตรรอบแกน (ขวด 0.9 ลิตร) ที่เวลาในขณะที่เป่าขวด เมื่อใช้วัสดุวิสโคอีลาสติก ภายใต้ความดัน 1 MPa อุณหภูมิเริ่มต้น 180°C และพาริสันมีความหนา 2.4 mm ตำแหน่งที่ศึกษามี 3 ตำแหน่งที่ 5, 50 และ 95 เปอร์เซ็นต์ของความสูงขวด ในแนว 90° จากเส้นแบ่งแม่พิมพ์ ภาพที่ 64 แสดงผล FEA ของระดับชั้นสีของความหนา ขวดที่เวลา 1.1, 1.2785 และ 1.3831 วินาที โดยกราฟของความหนาทั้ง 3 จุดเมื่อเทียบกับเวลา ได้แสดงในภาพที่ 65

ความหนาของขวดที่ 3 ตำแหน่ง ณ ความสูง 5 เปอร์เซ็นต์ของความสูงขวดที่มุม 0°, 45° และ 90° จากแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์ ได้แสดงดังภาพที่ 66 โดยจุด a คือ จุดที่ความสูง 5 เปอร์เซ็นต์ ในแนว 90° ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใช้เวลามากที่สุด และความหนาที่บางสุด

ตารางเปรียบเทียบความหนาพาริสันและเวลาเมื่อสัมผัสกับแม่พิมพ์ ณ จุดต่างๆ (a, b, c, d และ e) ได้แสดงดังตารางที่ 13

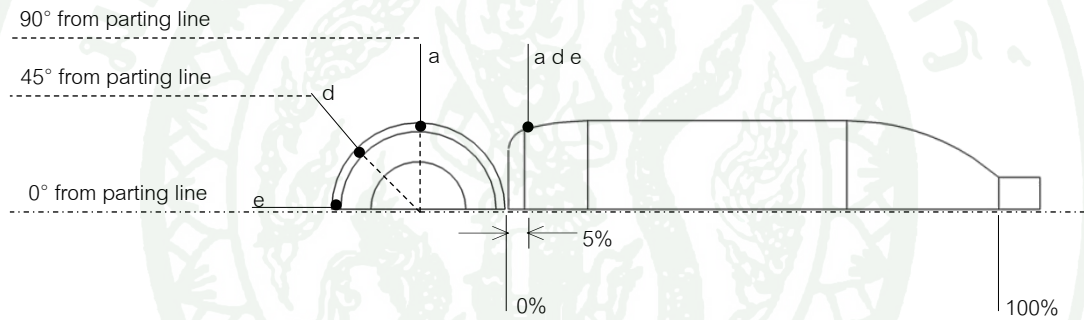
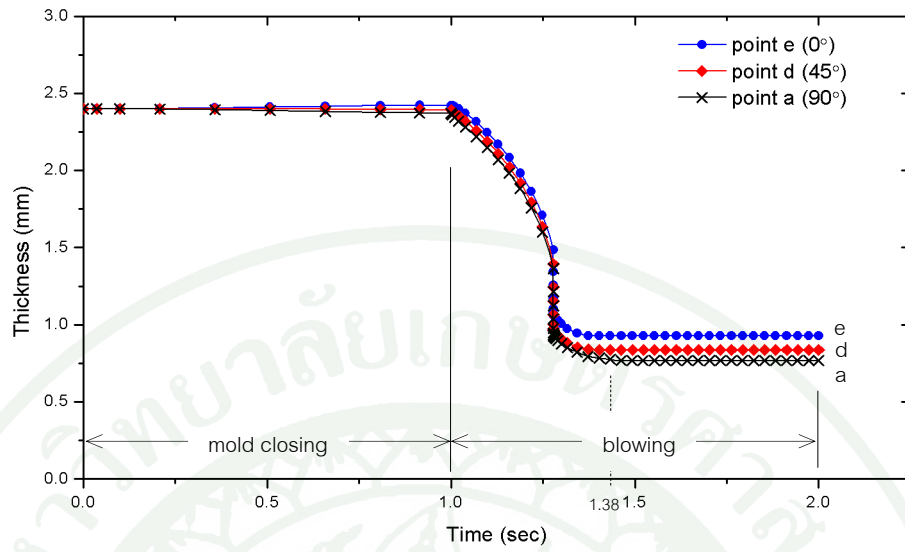


ภาพที่ 64 ผล FEA แสดงระดับชั้นสีของความหนาขวดที่เวลา (ก) 1.1 วินาที (ข) 1.2785 วินาที และ (ค) 1.3831 วินาที



**ภาพที่ 65** การเปลี่ยนแปลงความหนาพาริสันของขวด 0.9 ลิตร เมื่อเทียบกับเวลา ณ ตำแหน่ง 5, 50 และ 95 เปอร์เซ็นต์ของความสูงขวด ในแนว 90° จากเส้นแบ่งแม่พิมพ์

ผลการจำลองความหนาของพาริสันที่เวลาต่างๆ พบว่าตำแหน่งที่พาริสันสัมผัสแม่พิมพ์ ก่อน มีความหนาขวดมากกว่าตำแหน่งที่พาริสันสัมผัสแม่พิมพ์ทีหลัง ค่าความหนาสุดท้ายของ พาริสันสังเกตได้จากกราฟของเวลา เมื่อกราฟความหนาหยุดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นผล เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจากพาริสันไปยังแม่พิมพ์ ทำให้พาริสันเกิดการแข็งตัว (solidification) เป็นชิ้นงานขวดตามรูปทรงของแม่พิมพ์ ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าว สามารถจำลอง ด้วยเงื่อนไขการสัมผัสแบบติดแน่น (glued after contact) หรือการกำหนดเงื่อนไขการถ่ายเท ความร้อนระหว่าง พาริสันกับแม่พิมพ์ได้



ภาพที่ 66 การเปลี่ยนแปลงความหนาพาริสันของขวด 0.9 ลิตร เมื่อเทียบกับเวลาที่ความสูง 5 เปอร์เซ็นต์ของความสูงขวด ณ ตำแหน่ง 0°, 45° และ 90° จากแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์

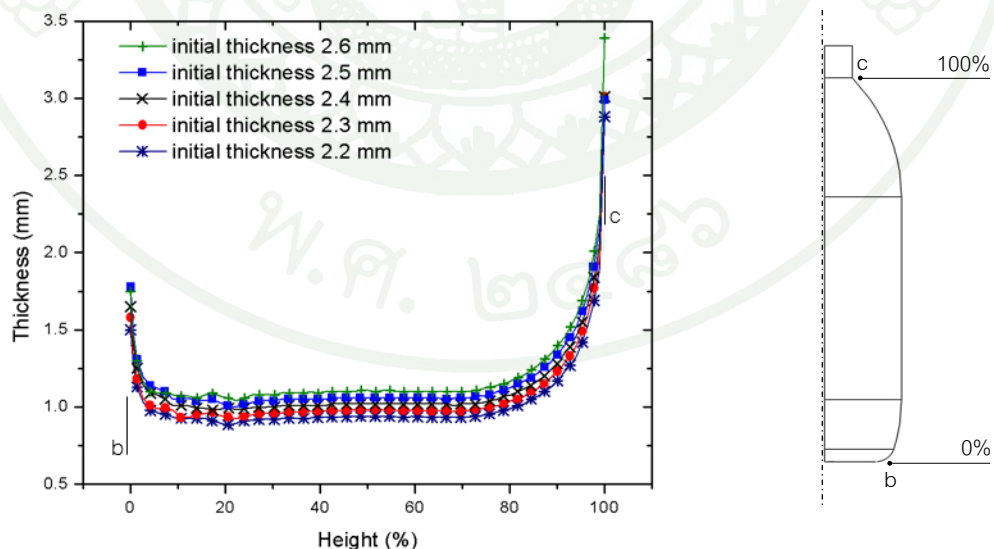
ตารางที่ 13 ผลการเปรียบเทียบความหนาขวดกับเวลาที่พาริสันเกิดการสัมผัสกับแม่พิมพ์ ณ จุดต่างๆ

point	ตำแหน่ง		เวลาที่เกิดการสัมผัสแม่พิมพ์ (sec)	ความหนาพาริสัน (mm)
	ความสูง (%)	มุมจากแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์ (องศา)		
a	5	90	1.3831	0.76701
b	50	90	1.2785	1.01116
c	95	90	1.2785	1.53028
d	5	45	1.3531	0.83536
e	5	0	1.3431	0.9286

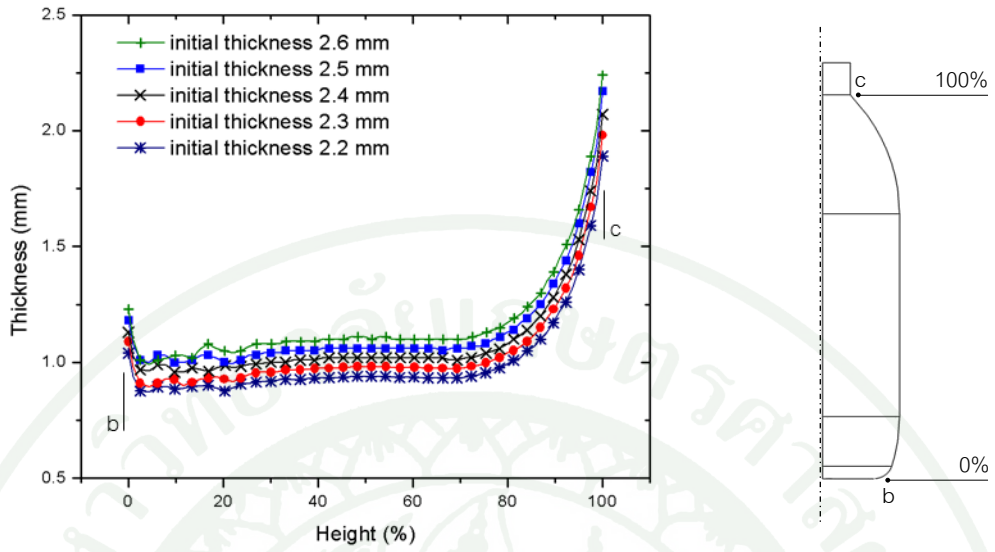
## 6. ผล FEA การเปลี่ยนความหนาของพาริสันต่อความหนาขวด

ขวดที่ใช้วิเคราะห์เป็นขวดขนาด 0.9 ลิตร (รูปทรงสมมาตรรอบแกน) โดยกำหนดความหนาของพาริสันที่ 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 และ 2.6 mm วิเคราะห์ FEA โดยใช้วัสดุโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง ภายใต้ความดัน 1 MPa อุณหภูมิเริ่มต้น 180°C ภาพที่ 67, 68 และ 69 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนากับเปอร์เซ็นต์ความสูงขวด ตามแนวเส้น 0°, 45° และ 90° จากแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์ตามลำดับ กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์อัตราส่วนระหว่างความหนาขวดต่อความหนาพาริสัน (Thickness ratio, TR) เทียบกับเปอร์เซ็นต์ความสูงขวด ตามแนวเส้น 0°, 45° และ 90° จากแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์ ได้แสดงในภาพที่ 70, 71 และ 72 ตามลำดับ และตารางที่ 14 ถึง 16 แสดงผลต่างของเปอร์เซ็นต์อัตราส่วนความหนา (TR) เทียบกับเปอร์เซ็นต์ความสูง ทุกๆ 10% จาก 0% ถึง 100% ของ 4 ความหนาพาริสัน เปรียบเทียบกับพาริสันที่มีความหนา 2.4 mm

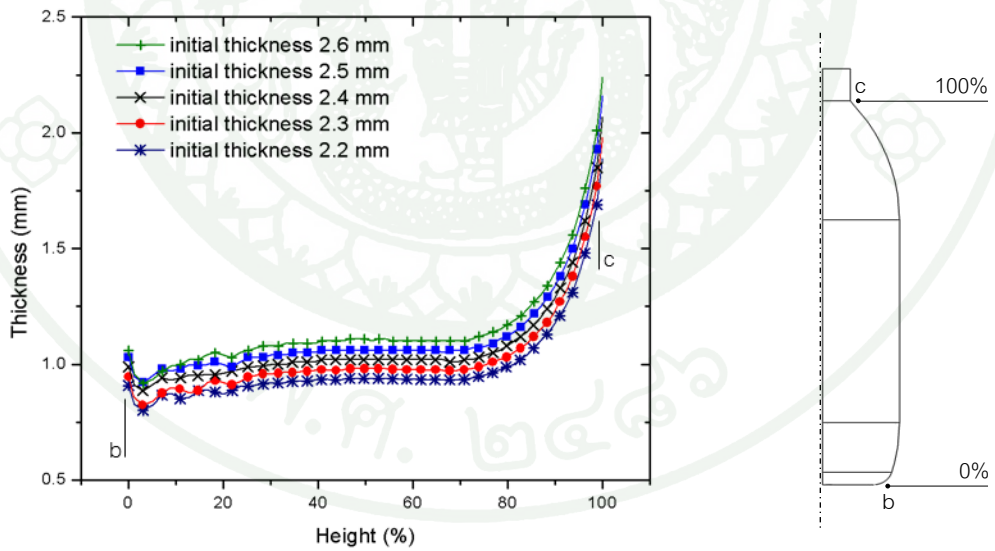
ผลจากการวิเคราะห์ภาพที่ 67 ถึง 69 พบว่า ความหนาผนังขวด เมื่อมีความหนาพาริสันที่ต่างกัน มีลักษณะใกล้เคียงกันมาก และผล FEA ที่ได้สอดคล้องกับความเป็นจริง คือเมื่อเพิ่มความหนาพาริสัน ก็จะทำให้ผนังขวดหนาเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



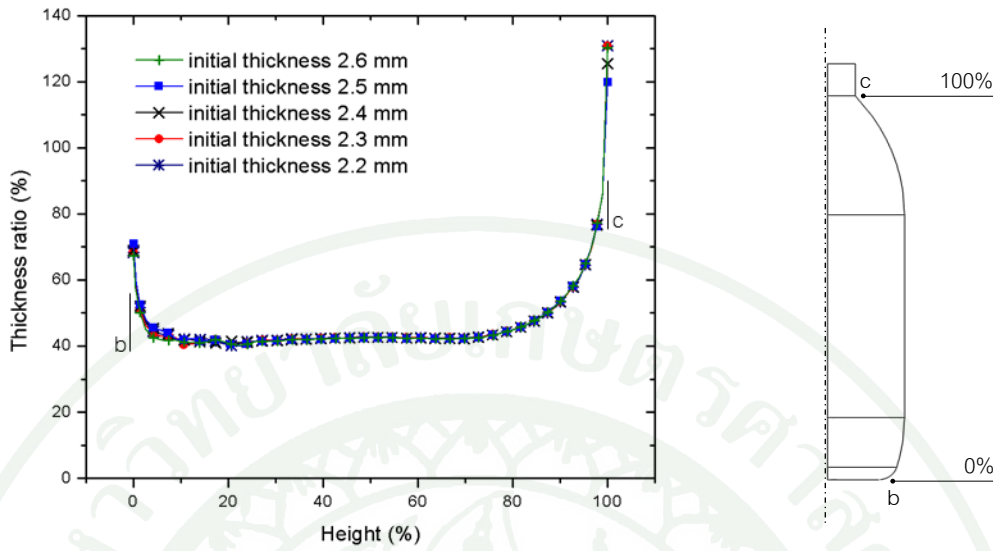
ภาพที่ 67 ผลเปรียบเทียบความหนาขวดที่ความหนาพาริสันจาก 2.2 ถึง 2.6 mm ตามแนวเส้น 0° ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์ กับเปอร์เซ็นต์ความสูงขวด



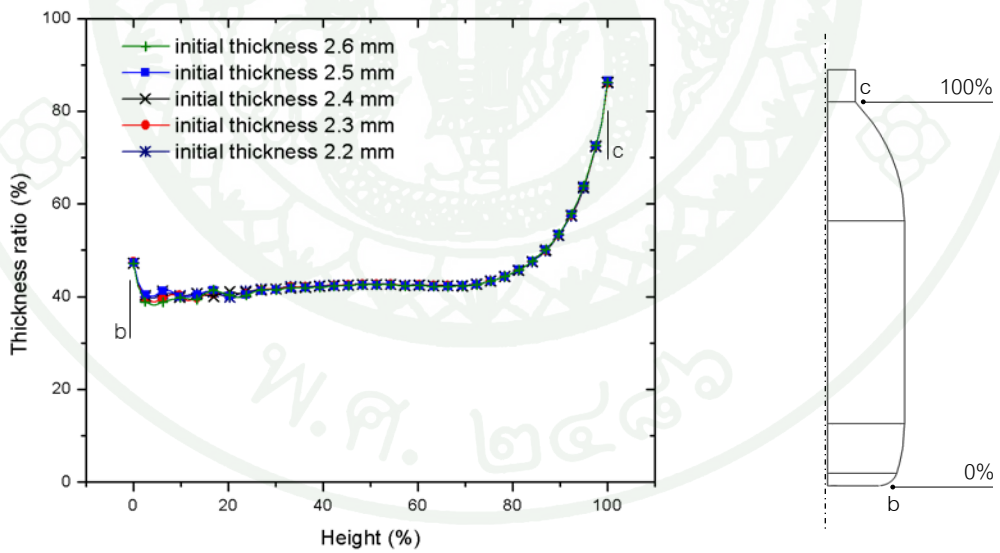
ภาพที่ 68 ผลเปรียบเทียบความหนาขวดที่ความหนาพาริสันจาก 2.2 ถึง 2.6 mm ตามแนวเส้น 45° ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์ กับเปอร์เซ็นต์ความสูงขวด



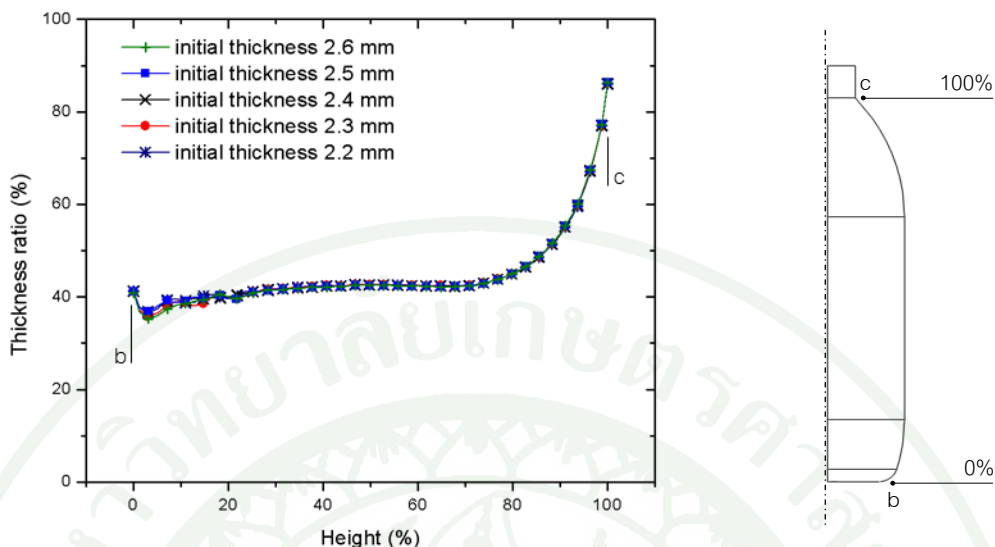
ภาพที่ 69 ผลเปรียบเทียบความหนาขวดที่ความหนาพาริสันจาก 2.2 ถึง 2.6 mm ตามแนวเส้น 90° ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์ กับเปอร์เซ็นต์ความสูงขวด



ภาพที่ 70 ผลเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์อัตราส่วนระหว่างความหนาขวดต่อความหนาพาริสัน จาก 2.2 ถึง 2.6 mm ตามแนวเส้น 0° ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์ กับเปอร์เซ็นต์ความสูงขวด



ภาพที่ 71 ผลเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์อัตราส่วนระหว่างความหนาขวดต่อความหนาพาริสัน จาก 2.2 ถึง 2.6 mm ตามแนวเส้น 45° ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์ กับเปอร์เซ็นต์ความสูงขวด



ภาพที่ 72 ผลเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์อัตราส่วนระหว่างความหนาขวดต่อความหนาพาริสัน จาก 2.2 ถึง 2.6 mm ตามแนวเส้น  $45^\circ$  ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์ กับเปอร์เซ็นต์ความสูงขวด

เมื่อวิเคราะห์อัตราส่วนความหนาผนังขวดต่อความหนาพาริสัน (TR) จากตารางที่ 14 ถึง 16 จะพบว่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง ( $\Delta\%$ ) ของ TR ของความหนาพาริสันที่ 2.2, 2.3, 2.5 และ 2.6 mm เทียบกับความหนาที่ 2.4 mm มีค่าเฉลี่ยสมบูรณ์ของความแตกต่าง ( $\Delta_{AVG}$ ) ตลอดความสูงของขวด มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.00984% ซึ่งน้อยมาก จึงสามารถสรุปได้ว่า TR มีค่าคงที่ตามแนวความสูงขวด เมื่อความหนาพาริสันที่ศึกษาเท่ากับ  $2.4 \pm 0.2$  mm (ซึ่งเห็นได้จากกราฟในภาพที่ 70 ถึง 71 แต่ละภาพเห็นกราฟซ้อนทับกัน) ดังนั้นในการวิเคราะห์ความหนาของขวด เราสามารถใช้ FEA วิเคราะห์ที่ความหนาพาริสันค่าหนึ่ง แล้วคำนวณ TR ตามแนวความสูง เพื่อใช้คำนวณความหนา เมื่อต้องการเพิ่มหรือลดความหนาพาริสันจากค่า TR ของขวดนั้น โดยไม่ต้องทำ FEA ซ้ำ

ตารางที่ 14 ผลเปรียบเทียบอัตราส่วนความหนาที่ความสูงต่างๆ ของพาริสันที่มีความหนา 2.2 ถึง 2.6 mm ตามแนวเส้น 0° ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์

อัตราส่วนความหนา เมื่อความหนาพาริสันเท่ากับ $x$ mm ( $TR_x$ , %)									
และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง ( $\Delta\% = \frac{TR_{2.4} - TR_x}{TR_{2.4}}$ )									
ความหนาพาริสัน (mm)	2.4	2.2		2.3		2.5		2.6	
น้ำหนักพาริสัน (g)	56.87	52.53		54.71		59.02		61.14	
blowing time (sec)	1.598	1.542		1.560		1.618		1.628	
เปอร์เซ็นต์ความสูง	$TR_{2.4}$	$TR_{2.2}$	$\Delta\%$	$TR_{2.3}$	$\Delta\%$	$TR_{2.5}$	$\Delta\%$	$TR_{2.6}$	$\Delta\%$
100	125.52	130.85	-0.04248	130.79	-0.04198	119.75	+0.04597	130.24	-0.03758
90	53.49	53.36	+0.00251	53.47	+0.00051	53.59	-0.00185	53.68	-0.00351
80	45.03	45.01	+0.00059	45.04	+0.00025	45.05	-0.00035	45.07	-0.00090
70	42.29	42.43	-0.00327	42.32	-0.00071	42.32	-0.00054	42.27	+0.00056
60	42.45	42.55	-0.00242	42.50	-0.00122	42.40	+0.00129	42.39	+0.00153
50	42.58	42.67	-0.00204	42.64	-0.00125	42.53	+0.00120	42.50	+0.00193
40	42.16	42.35	-0.00452	42.21	-0.00125	42.10	+0.00149	42.06	+0.00237
30	41.74	41.79	-0.00138	41.71	+0.00072	41.67	+0.00167	41.53	+0.00496
20	41.41	40.19	+0.02946	40.60	+0.01969	40.51	+0.02183	40.68	+0.01775
10	41.88	42.13	-0.00616	40.50	+0.03286	41.94	-0.00159	41.22	+0.01562
0	68.93	68.33	+0.00862	68.51	+0.00596	71.03	-0.03050	67.27	+0.02395
ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของความแตกต่าง ( $\Delta_{AVG} = \sum  \Delta\%  / n$ ), %			-0.00940			0.00967			0.01006

ตารางที่ 15 ผลเปรียบเทียบอัตราส่วนความหนาที่ความสูงต่างๆ ของพาริสันที่มีความหนา 2.2 ถึง 2.6 mm ตามแนวเส้น 45° ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์

อัตราส่วนความหนา เมื่อความหนาพาริสันเท่ากับ $x$ mm ( $TR_x$ , %)									
และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง ( $\Delta\% = \frac{TR_{2.4} - TR_x}{TR_{2.4}}$ , %)									
ความหนาพาริสัน (mm)	2.4	2.2		2.3		2.5		2.6	
น้ำหนักพาริสัน (g)	56.87	52.53		54.71		59.02		61.14	
blowing time (sec)	1.598	1.542		1.560		1.618		1.628	
เปอร์เซ็นต์ความสูง	$TR_{2.4}$	$TR_{2.2}$	$\Delta\%$	$TR_{2.3}$	$\Delta\%$	$TR_{2.5}$	$\Delta\%$	$TR_{2.6}$	$\Delta\%$
100	86.34	86.14	+0.00240	85.96	+0.00440	86.60	-0.00300	86.21	+0.00157
90	53.34	53.18	+0.00295	53.30	+0.00067	53.41	-0.00132	53.53	-0.00356
80	45.00	44.98	+0.00040	45.01	-0.00025	45.02	-0.00034	45.04	-0.00084
70	42.46	42.52	-0.00139	42.49	-0.00076	42.39	+0.00158	42.35	+0.00243
60	42.45	42.55	-0.00242	42.50	-0.00123	42.40	+0.00129	42.39	+0.00153
50	42.58	42.67	-0.00204	42.64	-0.00125	42.53	+0.00120	42.50	+0.00193
40	42.39	42.48	-0.00226	42.44	-0.00128	42.33	+0.00132	42.14	+0.00591
30	41.65	41.71	-0.00149	41.62	+0.00076	41.58	+0.00162	41.45	+0.00470
20	41.12	39.86	+0.03062	40.29	+0.02034	40.20	+0.02248	40.34	+0.01900
10	39.92	40.21	-0.00730	40.27	-0.00872	39.96	-0.00109	39.76	+0.00396
0	47.17	47.24	-0.00161	47.47	-0.00629	47.31	-0.00290	47.19	-0.00045
ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของความแตกต่าง ( $\Delta_{AVG} = \sum \Delta\% /n$ ), %		0.00499		0.00418		0.00347		0.00417	

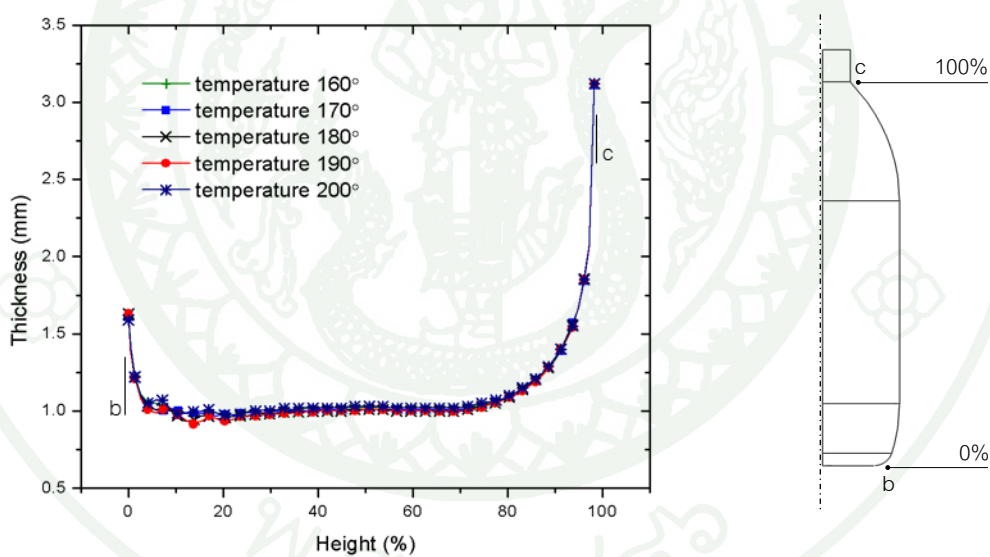
ตารางที่ 16 ผลเปรียบเทียบอัตราส่วนความหนาที่ความสูงต่างๆ ของพาริสันที่มีความหนา 2.2 ถึง 2.6 mm ตามแนวเส้น 90° ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์

อัตราส่วนความหนา เมื่อความหนาพาริสันเท่ากับ $x$ mm ( $TR_x$ , %)									
และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง ( $\Delta\% = \frac{TR_{2.4} - TR_x}{TR_{2.4}}$ , %)									
ความหนาพาริสัน (mm)	2.4	2.2		2.3		2.5		2.6	
น้ำหนักพาริสัน (g)	56.87	52.53		54.71		59.02		61.14	
blowing time (sec)	1.598	1.542		1.560		1.618		1.628	
เปอร์เซ็นต์ความสูง	$TR_{2.4}$	$TR_{2.2}$	$\Delta\%$	$TR_{2.3}$	$\Delta\%$	$TR_{2.5}$	$\Delta\%$	$TR_{2.6}$	$\Delta\%$
100	86.18	86.01	+0.00198	86.22	-0.00055	86.37	-0.00222	86.35	-0.00196
90	53.22	53.06	+0.00302	53.18	+0.00077	53.29	-0.00128	53.41	-0.00346
80	44.98	44.95	+0.00057	44.99	-0.00030	44.99	-0.00024	45.02	-0.00088
70	42.45	42.51	-0.00137	42.49	-0.00077	42.39	+0.00147	42.35	+0.00245
60	42.45	42.55	-0.00242	42.50	-0.00123	42.40	+0.00129	42.38	+0.00153
50	42.58	42.67	-0.00204	42.64	-0.00125	42.53	+0.00120	42.50	+0.00193
40	42.38	42.47	-0.00226	42.43	-0.00128	42.32	+0.00132	42.13	+0.00587
30	41.58	41.91	-0.00785	41.55	+0.00082	41.51	+0.00178	41.38	+0.00478
20	40.08	39.58	+0.01248	40.01	+0.00189	39.92	+0.00409	40.08	+0.00003
10	39.21	38.74	-0.01212	38.87	+0.00863	39.21	-0.00017	38.57	+0.01636
0	41.25	41.28	-0.00075	41.14	+0.00269	41.27	+0.00059	40.88	+0.00901
ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของความแตกต่าง ( $\Delta_{AVG} = \sum \Delta\% /n$ ), %		0.00426		0.00183		0.00142		0.00439	

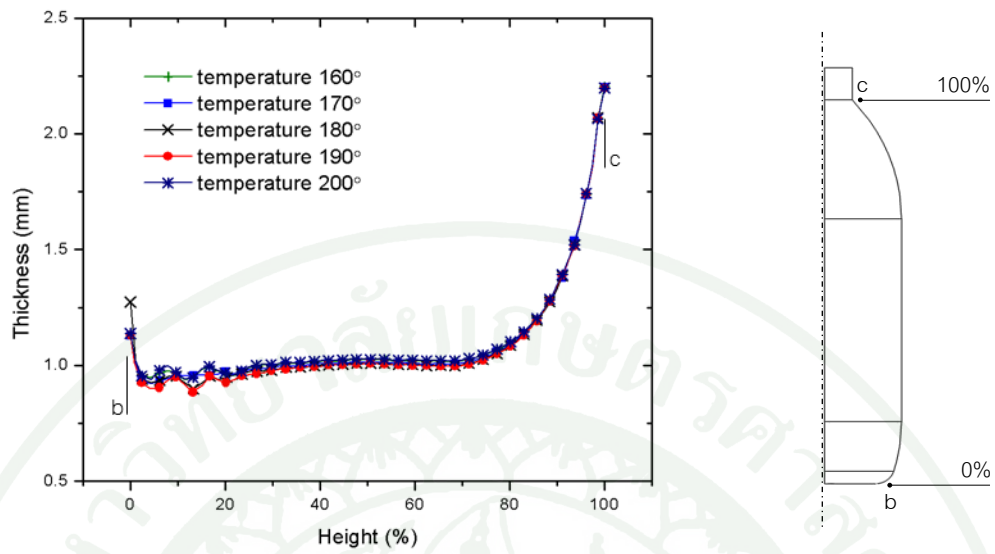
## 7. ผล FEA การเปลี่ยนอุณหภูมิเริ่มต้นของพาริสันต่อความหนาขวด

ขวดที่ใช้วิเคราะห์เป็นขวดขนาด 0.9 ลิตร (รูปทรงสมมาตรรอบแกน) โดยกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นของพาริสันที่ 160, 170, 180, 190 และ 200°C วิเคราะห์ FEA โดยใช้วัสดุวิสโคอีลาสติก ภายใต้ความดัน 1 MPa ภาพที่ 73, 74 และ 75 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนา กับเปอร์เซ็นต์ความสูงขวด ตามแนวเส้น 0°, 45° และ 90° จากแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์ตามลำดับ

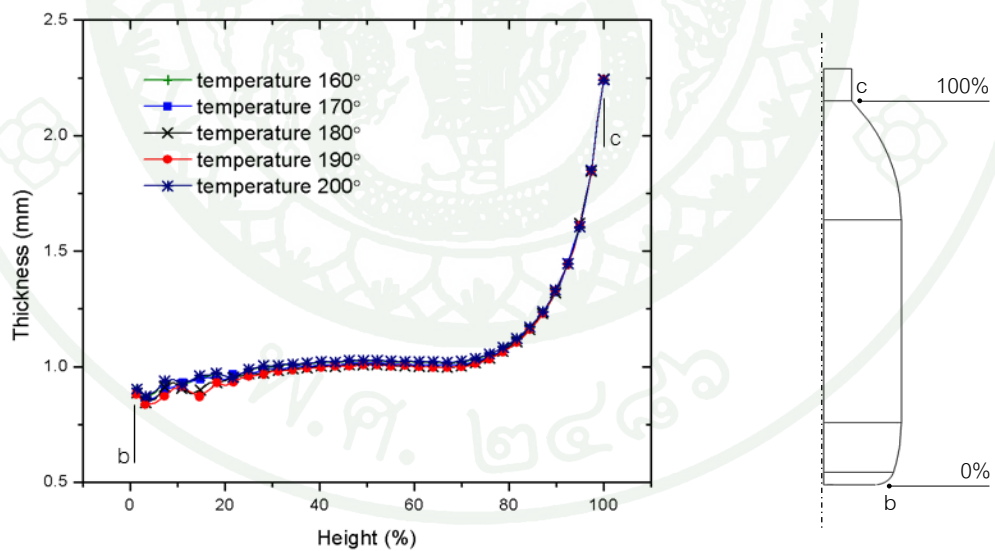
จากผลการวิเคราะห์พบว่า สัดส่วนการกระจายความหนาของผนังขวดไม่แตกต่างกันมาก กับเมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของพาริสัน อยู่ในช่วง 160 ถึง 200°C โดยมี  $\Delta_{AVG}$  ของ  $TR$  เท่ากับ 0.5812%



ภาพที่ 73 ผลเปรียบเทียบความหนาขวดที่อุณหภูมิเริ่มต้นของพาริสันที่ 160, 170, 180, 190 และ 200°C ตามแนวเส้น 0° ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์ กับเปอร์เซ็นต์ความสูงขวด



ภาพที่ 74 ผลเปรียบเทียบความหนาขดที่อุณหภูมิเริ่มต้นของพาริสันที่ 160, 170, 180, 190 และ 200°C ตามแนวเส้น 45° ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์ กับเปอร์เซ็นต์ความสูงขด

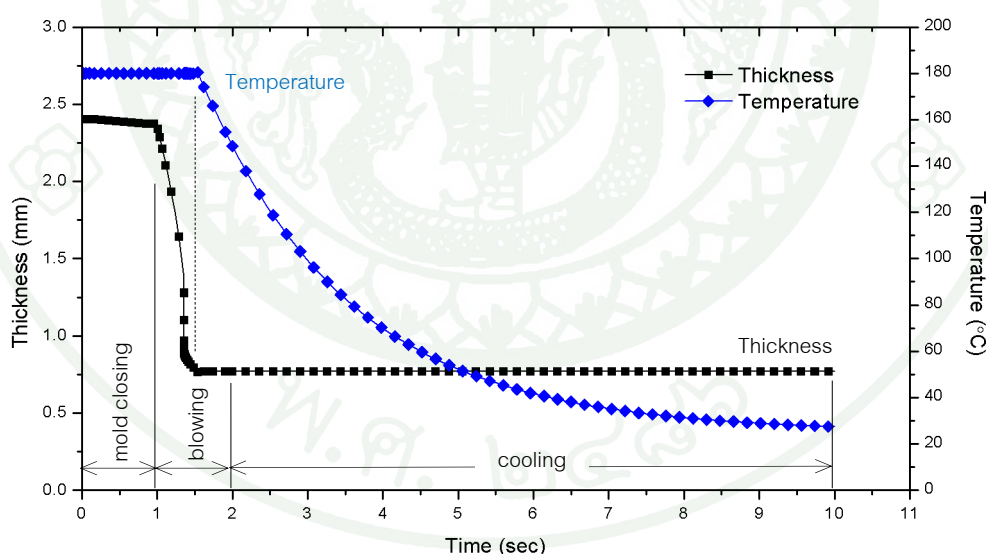


ภาพที่ 75 ผลเปรียบเทียบความหนาขดที่อุณหภูมิเริ่มต้นของพาริสันที่ 160, 170, 180, 190 และ 200°C ตามแนวเส้น 90° ของเส้นแบ่งแม่พิมพ์ กับเปอร์เซ็นต์ความสูงขด

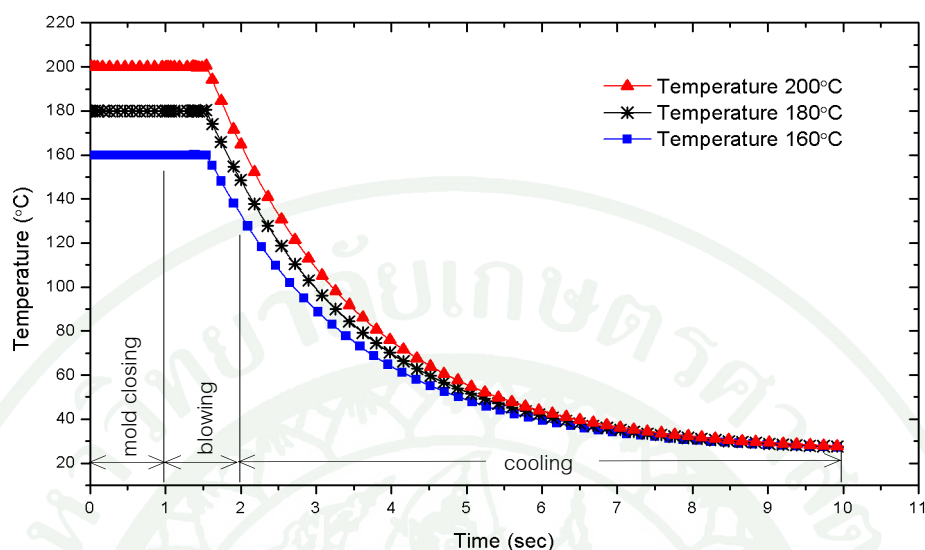
## 8. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของพาริสันเทียบกับเวลา

กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของพาริสัน เมื่อเทียบกับเวลา ที่อุณหภูมิเริ่มต้น  $180^{\circ}\text{C}$  และที่ความสูง 5% ของความสูงขวด ณ ตำแหน่ง  $90^{\circ}$  จากเส้นแบ่งแม่พิมพ์ โดยเปรียบเทียบกับกราฟความหนาผนังขวดของขวดขนาด 0.9 ลิตร รูปทรงสมมาตรรอบแกน ได้แสดงในภาพที่ 76 และกราฟของอุณหภูมิพาริสัน เทียบกับกับเวลา เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นที่ 160, 180 และ  $200^{\circ}\text{C}$  ได้แสดงในภาพที่ 77

ผลที่ได้จากภาพที่ 76 ทำให้เราทราบเวลาที่อุณหภูมิพาริสันเริ่มแข็งตัว (อุณหภูมิหลอมเหลวหรือ melting temperature ของ HDPE อยู่ที่ประมาณ  $130^{\circ}\text{C}$ ) และเข้าสู่ค่าคงที่ (steady state) และภาพที่ 77 แสดงความแตกต่างของเวลา เมื่ออุณหภูมิลดลง และเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยอุณหภูมิพาริสันเริ่มต้นที่สูง ใช้เวลานานกว่าเมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นที่ต่ำกว่า



ภาพที่ 76 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และความหนาของพาริสัน เมื่อเทียบกับเวลา เมื่ออุณหภูมิพาริสันเริ่มต้นเท่ากับ  $180^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 77 กราฟแสดงอุณหภูมิพาริสันเทียบกับเวลา เมื่ออุณหภูมิพาริสันเริ่มต้นเท่ากับ 160, 180 และ 200°C

## 9. ปัญหาที่พบในการวิจัย

ปัญหาต่างๆ ที่พบในการวิจัย ได้แก่

1. การทดสอบดัดยัดของพลาสติกที่อุณหภูมิสูงทำได้ยาก เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงพลาสติกหลอมเหลว จะมีพฤติกรรมกึ่งแข็งกึ่งเหลว และไหลย้อนในระหว่างการดัดยัด จึงทำให้ผลการทดสอบมีความคลาดเคลื่อนอย่างมาก หรืออาจทำการทดสอบไม่ได้เลยที่อุณหภูมิสูงระดับหนึ่ง ทั้งนี้อาจแก้ปัญหาโดยการใช้ฟังก์ชันเลื่อนเวลาและอุณหภูมิ เช่น สมการอาร์เรเนียส หรือ สมการ WLF ในการแทนค่าพฤติกรรมของวัสดุ ในช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดสอบได้ยาก ซึ่งอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากผลการทดสอบจริง ที่อุณหภูมินั้นๆ นอกจากนี้ เครื่องมือทดสอบยังหาได้ยากในประเทศไทย

2. การประเมินความแม่นยำของความหนาของพาริสันก่อนทำการเป่า ไม่สามารถวัดเปรียบเทียบกับผล FEA ได้ เนื่องด้วยพาริสันที่รีดออกมาจากหัวดาย มีสภาพที่นิ่มและร้อน และไวต่ออุณหภูมิ ดังนั้นเครื่องมือวัดแบบสัมผัสจึงไม่สามารถใช้วัดได้

3. ในการอธิบายพฤติกรรมของพาริสันที่อุณหภูมิสูง ซึ่งมีการเสียรูป ในลักษณะการพังของเอลิเมนต์อย่างมาก จำเป็นต้องใช้แบบจำลองเชิงโครงสร้าง (constitutive model) ของวัสดุที่มีความซับซ้อน ซึ่งซอฟต์แวร์ FEM ที่มีอยู่ในปัจจุบัน อาจไม่รองรับแบบจำลองเชิงโครงสร้างของวัสดุเหล่านี้ นอกจากนี้การทดสอบเพื่อหาค่าคงที่ของสมการวัสดุต่างๆ ยังทำได้ยาก

4. ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ การกำหนดขนาดของเอลิเมนต์หรือ element length ให้เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ด้วยเอลิเมนต์ชนิด shell ทำได้ยาก เนื่องจากในระหว่างการวิเคราะห์การเป่า เอลิเมนต์ของพาริสันมีการเสียรูป และเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาอย่างมาก ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้อัตราส่วนพื้นที่ของเอลิเมนต์ต่อพื้นที่รวมของพาริสัน (ARE) เท่ากับ  $3.12 \times 10^{-4}$  สำหรับขดรูปทรงสมมาตรรอบแกน และ  $2.81 \times 10^{-4}$  สำหรับขดรูปทรงไม่สมมาตรรอบแกน

5. การกำหนดเงื่อนไขสัมผัสให้เหมาะสม มีความยุ่งยากอย่างมาก เนื่องจาก อัลกอริทึมในการคำนวณระยะสัมผัส จะคิดระยะสัมผัสจากความหนาของเอลิเมนต์ที่เล็กที่สุดในแบบจำลองเงื่อนไขการสัมผัสนั้นๆ ซึ่งอาจทำให้เกิดการลู่ออกในการวิเคราะห์ FEA เนื่องจากในระหว่างการวิเคราะห์การเป่า เอลิเมนต์ของพาริสันมีการเสียรูป และเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาอย่างมาก จึงทำให้ขนาดและความหนาในแต่ละเอลิเมนต์ของพาริสันมีความแตกต่างกันอย่างมาก

6. การกำหนดเงื่อนไขเชิงตัวเลขในการวิเคราะห์ให้เหมาะสมทำได้ยาก เนื่องจากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนาของพาริสัน มีความไว (sensitivity) ต่อการปรับตั้งเงื่อนไขเชิงตัวเลข เช่น time step ซึ่งหากปรับตั้งไม่เหมาะสมเพียงเล็กน้อย จะทำให้เกิดการลู่ออกในการวิเคราะห์ได้ง่ายมาก ในงานวิจัยนี้ ใช้การกำหนด time step แบบปรับค่าอัตโนมัติระหว่างการวิเคราะห์ (adaptive time step) โดยมีค่า time step เท่ากับ 0.01 ถึง 0.00001 sec สำหรับการจำลองแบบวิสโคอีลาสติก

7. การกำหนดหน่วยของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น แรง ความหนาแน่น ความเค้น ความเครียด การนำความร้อน ที่เหมาะสมให้กับแบบจำลอง จำเป็นต้องศึกษาให้รอบคอบ และกำหนดให้สัมพันธ์กัน เช่น ถ้าหน่วยของแรงเป็น N จะต้องใช้หน่วยของความยาวเป็น m

## สรุป

งานวิจัยของวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษารูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) สำหรับวิเคราะห์ความหนาของพาริสัน ของกระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบเอ็กทรูชั่น ของขวดพลาสติกที่ผลิตจาก HDPE ผลวิเคราะห์ที่ได้ทำให้ทราบความหนาที่ตำแหน่งต่างๆ ของผนังขวดได้ แบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถใช้ศึกษาความหนาและอุณหภูมิของพาริสันเทียบกับเวลาได้

ผลจากงานวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. แบบจำลองคณิตศาสตร์ของวัสดุ เพื่อใช้สำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูป ได้ศึกษาเปรียบเทียบ 2 แบบจำลอง คือแบบจำลองวัสดุชนิดไฮเปอร์-อีลาสติก และวิสโคอีลาสติก
2. ได้ทำการศึกษาแบบจำลองเมื่อใช้จำลองกระบวนการปิดของแม่พิมพ์ และคำนวณความหนาของพาริสัน ที่เวลาต่างๆ ในระหว่างกระบวนการเป่า ภายใต้เงื่อนไขของกระบวนการผลิต เช่น อุณหภูมิ ความหนาพาริสัน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเริ่มต้นของพาริสัน ความดันเป่า และเวลาที่ใช้ในการเป่า เป็นต้น
3. จากผลการวัดความหนาของขวดทดสอบเปรียบเทียบกับผล FEA วิเคราะห์ความหนาโดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของขวดรูปทรงสมมาตรรอบแกน พบว่าแบบจำลองไฮเปอร์-อีลาสติกและวิสโคอีลาสติกสามารถนำมาใช้วิเคราะห์ความหนาของขวดได้ โดยแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกของขวดแบบสมมาตร ให้ผลการวิเคราะห์ความหนาใกล้เคียงกับผลการวัดความหนาของขวดจริงมากกว่าโดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 29.15% ในขณะที่แบบจำลองวิสโค-อีลาสติกมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 33.17% สาเหตุของความคลาดเคลื่อนที่สำคัญคือ สมบัติของ HDPE ที่ไม่สามารถวัดได้โดยตรง
4. การกำหนดเงื่อนไข FEA เมื่อใช้แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกมีความยุ่งยากกว่าแบบจำลองวิสโคอีลาสติก และผลการวิเคราะห์ความหนาของไฮเปอร์อีลาสติกมีโอกาสเกิดการลู่ออก (diverge) ได้บ่อยครั้งกว่าแบบจำลองวิสโคอีลาสติก

5. ผลการวิเคราะห์ความหนาของแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก พบความไม่สม่ำเสมอหรือแกว่งขึ้นลงของค่าความหนา ซึ่งไม่เสมือนความเป็นจริง

6. ในการวิเคราะห์เมื่อใช้แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก จำเป็นต้องแบ่งขั้นตอนการวิเคราะห์เป็นสองขั้นตอน คือ ขั้นตอนการประกบปิดของแม่พิมพ์ และขั้นตอนการเป่า รวมถึงทำการปรับปรุงโครงร่างตาข่ายของพาริสัน และตัดเอลิเมนต์ส่วนที่ถูกแม่พิมพ์ประกบหนีบ (pinch-off) ทิ้งไป นอกจากนี้แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกยังมีข้อจำกัด ที่ไม่สามารถวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการ เช่น การนำความร้อนในพาริสัน การนำความร้อนแบบสัมผัสระหว่างพาริสันกับแม่พิมพ์ การพาความร้อนของแม่พิมพ์ที่เกิดขึ้น เนื่องจากสมการของแบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติกไม่มีพจน์ของอุณหภูมิ จึงจำกัดที่อุณหภูมิเริ่มต้นของพาริสันเท่านั้น หรือมีอุณหภูมิมืดที่ตลอดช่วงการเป่า โดยตารางที่ 11 ได้สรุปเปรียบเทียบทั้งสองแบบจำลอง

7. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ของพาริสัน ใช้เอลิเมนต์รูปทรง quad แบบ shell ขนาด  $3 \times 3$  mm หรืออัตราส่วนพื้นที่เอลิเมนต์ต่อพื้นที่ผิวรวม (Area Ratio of Element, ARE) ของพาริสัน เท่ากับ  $3.12 \times 10^{-4}$  และความหนาเท่ากับ 2.4 mm สำหรับขนาด 0.9 ลิตร รูปทรงสมมาตรรอบแกน และ  $4 \times 4$  mm หรือ ARE เท่ากับ  $2.81 \times 10^{-4}$  และความหนาเท่ากับ 2 mm สำหรับขนาด 1 ลิตร รูปทรงไม่สมมาตรรอบแกน

8. แบบจำลองวิสโคอีลาสติก ได้นำมาวิเคราะห์ความหนาขาด และพบว่าอัตราส่วนระหว่างความหนาขาดต่อความหนาพาริสัน (TR) มีค่าคงที่ตามแนวความสูงขาด สำหรับขาดรูปทรงสมมาตรรอบแกน

9. แบบจำลองวิสโคอีลาสติก ได้นำมาใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความหนา และอุณหภูมิของพาริสันเทียบกับเวลาได้ ซึ่งสามารถนำไปใช้คาดคะเนเวลาที่ต้องใช้ในกระบวนการเป่าขึ้นรูปได้

10. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบเอ็กทริงชัน สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาความหนาของภาชนะ น้ำหนัก และรูปทรงของภาชนะ จากรูปแบบและขนาดของพาริสัน จึงทำให้ลดเวลา พลังงาน และวัสดุดิบ จากการลองผิดลองถูกที่ปฏิบัติบนเครื่อง

เป่า และทำให้ลดต้นทุนของการผลิตลงได้อย่างมาก โดยการลองผิดลองถูกโดยผู้ควบคุมเครื่องเป่าที่มีความชำนาญ จะใช้เวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมงในการปรับขนาดความหนาของพาริสันให้ได้ขนาดที่ต้องการ หรืออาจใช้เวลาถึงหนึ่งสัปดาห์ในกรณีที่ภาชนะมีรูปทรงซับซ้อน จึงทำให้สิ้นเปลืองพลาสติกและพลังงาน คิดเป็นมูลค่ากว่า 10,000 บาทต่อหนึ่งผลิตภัณฑ์ (ข้อมูลจากบริษัทปัญจวัฒนาพลาสติก จำกัด)

11. งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบเอ็กทรูชันโดยใช้แบบจำลองวิสโคอีลาสติก สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในคำนวณความหนาของขวดภายใต้เงื่อนไขการผลิต โดยสามารถกำหนดความหนาเริ่มต้นของพาริสันได้ สามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งรูปทรงแบบสมมาตรรอบแกน และรูปทรงซับซ้อนแบบไม่สมมาตร และสามารถนำมาใช้ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ จากเงื่อนไขการผลิตที่มีผลต่อความหนา และเวลาในการเป่าขวดได้

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กฤษกร เขาทอง. 2551. การวิเคราะห์ระดับความรู้สึกเจ็บจากการกดบนผิวหนังโดยการ  
จำลองทางคอมพิวเตอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ชาคริต สุวรรณจำรัส. 2546. การจำลองมาตรฐานการทดสอบขวดพลาสติกโดยใช้  
คอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เดช พุทธเจริญทอง. 2541. การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ.  
กรุงเทพฯ.

ประพันธ์ ธรรมนนทิกุล. 2552. การออกแบบเพื่อความแข็งแรงสำหรับบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่  
ผลิตโดยการขึ้นรูปร้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สัจจาทิพย์ ทศนียพันธ์ุ. 2546. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการออกแบบภาชนะบรรจุ  
ของเหลวโดยกรรมวิธีวิศวกรรม.

Attar, A.N. Bhuiyan and V. Thomson. 2008. Manufacturing in blow molding: Time  
reduction and part quality improvement. *Journal of material processing  
technology* 204: 284-289.

ASTM D 638-03. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics

ASTM D 674-56 (69). Standard Recommend Practices for Testing Long-time Creep and  
Stress-Relaxation of Plastics Under Tension or Compression Loads at Various  
Temperatures

ASTM D 2991-84. Standard Practice for Testing Stress-Relaxation of Plastics

- Cohen, A. and J.T. Seitz. 1991. Material and numerical aspects of mathematical modeling of blow molding. *Int. Polym. Proc.* 6 (1): 51-55.
- Debbaut, B., O. Homerin and N. Jivraj. 1999. A comparison between experiments and predictions for the blow molding of an industrial part. *Polymer Engineering & Science.* 39 (9): 1812-1822.
- DeLorenzi, H.G. and H.F. Nied. 1987. Blow molding and thermoforming of plastics: Finite element modeling. *Computers & Structures.* 26 (1-2): 197-206.
- Ferry, J.D. 1980. *Viscoelastic Properties of Polymers.* 3<sup>rd</sup> edition, John Wiley & Sons, New York.
- Fukuzawa, Y., S. Tanoue, Y. Iemoto, R. Kawachi and H. Tomiyama. 2010. Three-dimensional simulation on multilayer parison shape at pinch-off stage in extrusion blow molding. *Polymer Engineering & Science.* 50 (7): 1476-1484.
- Gauvin, C., F. Thibault and D. Laroche. 2003. Optimization of blow molded part performance through process simulation. *Polymer Engineering & Science.* 43 (7): 1407-1414.
- Holzappel, G.A. 2000. *Nonlinear Solid Mechanics.* John Wiley & Sons. *Chichester, England.*
- Huang, G.Q. and H.X. Huang. 2007. Optimizing parison thickness for extrusion blow molding by hybrid method. *Journal of Materials Processing Technology.* 182 (1-3): 512-518.

- Khayat, R.E. and A. Derdouri. 1995. Stretch and inflation of hyperelastic membranes as applied to blow molding. **Polymer Engineering & Science.** 35 (23): 1852-1863.
- Kouba, K., O. Bartos and J. Vlachopoulos. 1992. Computer simulation of thermoforming in complex shapes. **Polymer Engineering & Science.** 32 (10): 699-704.
- Laroche, D., K.K. Kabanemi, L. Pecora and R.W. Diraddo. 1999. Integrated numerical modeling of the blow molding process. **Polymer Engineering & Science.** 39(7): 1223-1233.
- Lee, N.C. 1990. **Plastic blow molding handbook.** Van Nostrand Reinhold, New York.
- \_\_\_\_\_. 1998. **Blow molding design guide.** Carl Hanser Verlag, Munich.
- \_\_\_\_\_. 2006. **Practical Guide to Blow Moulding.** Smither Rapra, Shawbury, Shropshire, UK.
- Liu, S.J. 1999. Computer simulation of the inflation process in blow molding. **Journal of Reinforced Plastics and Composites.** 18(8): 759-774.
- Logan, D.L., 2007, **A First Course in the Finite Element Method**, 4<sup>th</sup> edition, Thomson, Canada.
- Marckmann, G., E. Verron and B. Peseux. 2001. Finite element analysis of blow molding and thermoforming using a dynamic explicit procedure. **Polymer Engineering & Science.** 41 (3): 426-439.

Mase, G.T., R.E. Smelser and G.E. Mase. 2010. **Continuum Mechanics for Engineer.** 3<sup>rd</sup> edition. Boca Raton, Florida.

Menary, G.H., C.W. Tan, C.G. Armstrong, Y. Salomeia, M. Picard, N. Billon and E.M.A. Harkin-Jones. 2010. Validating injection stretch-blow molding simulation through free blow trials. **Polymer Engineering & Science.** 50(5): 1047-1057.

Moaveni, S., 1999, **Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS.** Prentice Hall, New Jersey.

Pham, X.-T., F. Thibault and L-T. Lim. 2004. Modeling and simulation of stretch blow molding of polyethylene terephthalate. **Polymer Engineering and Science.** 44 (8): 1460-1472.

Poslinski, A.J. and J.A. Tsamopoulos. 1990. Nonisothermal parison inflation in blow molding. **AIChE Journal.** 36 (12): 1837-1850.

Schmidt, F.M., J.F. Agassant and M. Bellet. 1996. Viscoelastic simulation of PET stretch/blow molding process. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics.** 64 (1): 19-42.

Shames, I.H. and F.A. Cozzareli. 1992. **Elastic and Inelastic Stress Analysis.** Prentice-Hall. New Jersey.

Shaw, M.T. and W.J. Macknight, 2005. **Introduction to Polymer Viscoelasticity.** 3<sup>rd</sup> edition, John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey.

- Tanifuji, S.-I., T. Kikuchi, J.-I. Takimoto and K. Koyama. 2000. Overall numerical simulation of extrusion blow molding process. **Polymer Engineering & Science**. 40 (8): 1878-1893.
- Yang, Z. J., E.M.A. Harkin-Jones, G.H. Menary and C.G. Armstrong. 2004. Finite element modelling of stretch – blow moulding of PET bottles using Buckley model: plant tests and effects of process conditions and material parameters. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers -- Part E -- Journal of Process Mechanical Engineering**. 218 (4): 237-250.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_ and \_\_\_\_\_. 2004. A non-isothermal finite element model for injection stretch-blow molding of PET bottles with parametric studies. **Polymer Engineering and Science**. 44 (7): 1379-1390.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, C.G. Armstrong and G.H. Menary. 2004. Coupled temperature-displacement modelling of injection stretch-blow moulding of PET bottles using Buckley model. **Journal of Materials Processing Technology**. 153-154: 20-27.
- Yu, J.-C., X.-X. Chen, T.-R. Hung and F. Thibault. 2004. Optimization of extrusion blow molding processes using soft computing and Taguchi's method. **Journal of Intelligent Manufacturing**. 15 (5): 625-634.
- Yu, J.-C. and J.-Y. Juang. 2010. Design optimization of extrusion-blow-molded parts using prediction-reliability-guided search of evolving network modeling. **Journal of Applied Polymer Science**. 117(1): 222-234.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก  
สารบัญหัวข้องานวิจัย

## สารบัญ

	หน้า
การตรวจเอกสาร	5
1. กระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูป	5
2. การควบคุมความหนาของพาริสัน	7
3. การจำลองกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูป	9
4. การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์	20
5. วัสดุวิสโคอีลาสติกเชิงเส้น	25
6. แบบจำลองวิสโคอีลาสติกชนิดเชิงเส้น	27
6.1 แบบจำลองวิสโคอีลาสติกของแมกซ์เวล	27
6.2 แบบจำลองวิสโคอีลาสติกของเคลวิน	29
7. การทดสอบการผ่อนคลายความเค้นของวัสดุ	30
8. แบบจำลองทั่วไปของแมกซ์เวล	31
9. แบบจำลองไฮเปอร์อีลาสติก	36
10. แบบจำลองมูนี-ริฟลิน	38
อุปกรณ์และวิธีการ	40
อุปกรณ์	40
วิธีการ	44
1. การวัดการกระจายตัวของความหนาของขวดทดสอบ	44
2. การสร้างแบบจำลองพื้นผิวของกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูป	45
3. การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการอัดรีดเป่าขึ้นรูป	47
3.1 การกำหนดสมบัติเชิงกลของวัสดุ	49
3.2 การกำหนดภาวะและเงื่อนไขขอบเขต	57
3.3 การกำหนดเงื่อนไขสัมผัส	57
4. การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของขวดรูปทรงไม่สมมาตร	58
4.1 การกำหนดสมบัติเชิงกลของวัสดุ	63
4.2 การกำหนดภาวะและเงื่อนไขขอบเขต	63

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ผลการทดลองและวิจารณ์	64
1. ผลการวัดความหนาของขวดทดสอบ	64
2. ผล FEA จำลองการปิดแม่พิมพ์	70
2.1 ผล FEA จำลองการปิดแม่พิมพ์โดยใช้วัสดุไฮเปอร์อีลาสติก	70
2.2 ผล FEA จำลองการปิดแม่พิมพ์โดยใช้วัสดุวิสโคอีลาสติกแบบจำลองเต็มใบ	70
2.3 ผล FEA จำลองการปิดแม่พิมพ์โดยใช้วัสดุวิสโคอีลาสติกแบบจำลองสมมาตรครึ่งใบ	70
3. ผล FEA จำลองการเป่าพาริสัน	75
3.1 ผล FEA จำลองการเป่าพาริสันโดยใช้วัสดุไฮเปอร์อีลาสติก	75
3.2 ผล FEA จำลองการเป่าพาริสันโดยใช้วัสดุวิสโคอีลาสติก	78
3.3 ผลเปรียบเทียบแบบจำลองการเป่าพาริสัน	83
3.4 ผลเปรียบเทียบความหนาของขวดจริงและผล FEA	84
3.5 ผลการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน	90
4. ผล FEA จำลองการเปลี่ยนแปลงความหนาพาริสันของขวดทดสอบรูปทรงไม่สมมาตรรอบแกน	92
4.1 ผล FEA จำลองการปิดแม่พิมพ์ของขวดรูปทรงไม่สมมาตรรอบแกน	93
4.2 ผล FEA จำลองการเป่าพาริสันของขวดรูปทรงไม่สมมาตรรอบแกน	94
4.3 ผล FEA วิเคราะห์ความหนาขวดรูปทรงไม่สมมาตรรอบแกน	95
5. ผล FEA จำลองการเปลี่ยนแปลงความหนาของพาริสันเทียบกับเวลา	96
6. ผล FEA การเปลี่ยนความหนาของพาริสันต่อความหนาขวด	99
7. ผล FEA การเปลี่ยนอุณหภูมิเริ่มต้นของพาริสันต่อความหนาขวด	102
8. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของพาริสันเทียบกับเวลา	108
9. ปัญหาที่พบในการวิจัย	109

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	รวิวัฒน์ รักสัจ
เกิดวันที่	6 ตุลาคม 2528
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	ประถมศึกษาจากโรงเรียนอุดมศึกษา มัธยมศึกษาจากโรงเรียนบดินทรเดชา สิงห์ สิงหเสนี วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรนานาชาติ รุ่นที่ 1) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
สถานที่ทำงาน	นักวิจัยประจำหน่วยหน่วยปฏิบัติการวิจัยการออกแบบทางกลและ ผลิตภัณฑ์ (MPDRL) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับทุนวิจัยมหาบัณฑิต จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ร่วมกับ บริษัทปัญญาวัฒนาพลาสติก จำกัด ภายใต้ชุดโครงการ สนับสนุนผู้ประกอบการวิจัยในภาคอุตสาหกรรม ชื่อโครงการ การจำลอง การเปลี่ยนแปลงความหนาของพาริสันภายใต้การเป่าขึ้นรูปแบบ เอ็กทรูชัน