

การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์พลาสติกฉีด
ด้วยการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ปริญญานิพนธ์
ของ
สุภกิจ ขาวเนตร

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
พฤษภาคม 2550

การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์พลาสติกฉีด
ด้วยการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ปริญญานิพนธ์
ของ
สุภกิจ ขาวเนตร

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

พฤษภาคม 2550

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์พลาสติกฉีด
ด้วยการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

บทคัดย่อ
ของ
สุภกิจ ขาวเนตร

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
พฤษภาคม 2550

A Study of Parameters Affecting Quality of Injection Molded Plastic Product
Using Experimental and Finite Element Methods

AN ABSTRACT
BY
SUBHAKIJ KHAOWNETR

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Master of Engineering degree in Mechanical Engineering
at Srinakharinwirot University
May 2007

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง

การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์พลาสติกฉีด
ด้วยการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ของ
สุภกิจ ขาวเนตร

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เพ็ญศิริ จีระเดชากุล)
วันที่ เดือน พ.ศ. 2550

คณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

.....ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชิต บัวแก้ว)

.....ประธาน
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ วรรณกุลชัย)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ไพศาล นาผล)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชิต บัวแก้ว)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ไพศาล นาผล)

.....กรรมการ
(พันเอก อาจารย์ สุภโชค สัมปัตตะวนิช)

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสามารถของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชิต บัวแก้ว ประธานกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ และ ดร.ไพศาล นาผล กรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ ให้แนวคิดในการลำดับ วิเคราะห์และแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นกับปริญญานิพนธ์ ตลอดจนช่วยตรวจแก้ปริญญานิพนธ์จนสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สถาพร ชาดาคม รองผู้อำนวยการฝ่ายวิชาการ สำนักคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่กรุณาอนุญาตให้ใช้โปรแกรมโมลโฟลพลาสติกอินไซต์ เวอร์ชัน 4.0 (Moldflow Plastics Insight V4.0) ซึ่งใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ อีกทั้งให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่กรุณาอนุญาตให้ใช้เครื่องฉีดพลาสติกอาร์เบ็ก ออลราวดอร์ 220 เอส (ARBURG ALLROUNDER 220 S) และแม่พิมพ์ส้อม ซึ่งใช้เป็นเครื่องมือในการทดลองสำหรับปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภฤกษ์ ศิริเวทิน ภาควิชาเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และ ดร.เคิร์ท บีเตอร์ รองผู้อำนวยการปฏิบัติการจำลองการผลิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ด สหรัฐอเมริกา ที่ให้ข้อเสนอแนะ ซึ่งเป็นประโยชน์มากต่อปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วรรณกุลชัย ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ พันเอก อาจารย์ สุภโชค สัมปัตตะวนิช รองผู้อำนวยการส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ประธานและกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ ที่ให้ข้อเสนอแนะ ในการลำดับ การวิเคราะห์และอภิปรายผลการวิจัยในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ และ ขอขอบคุณ เพื่อนร่วมชั้นเรียน โครงการความร่วมมือหลักสูตรปริญญาโท มศว. และ รร. จปร.สาขาวิศวกรรมเครื่องกล รุ่น 1 ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาและให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนส่งกำลังใจให้กันเสมอ

สุภกิจ ขาวเนตร

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
นิยามศัพท์.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
พลาสติกวิศวกรรม.....	4
หลักการขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดเทอร์โมพลาสติก.....	9
การไหลของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก.....	9
การจัดเรียงทิศทางโมเลกุลและการหดตัวของเทอร์โมพลาสติก.....	14
วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	27
คุณภาพของโมเดลและเมชในงานไฟไนต์เอลิเมนต์.....	30
การเมชโมเดล.....	31
บทปริทัศน์วรรณกรรม.....	34
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	38
วิธีดำเนินการวิจัยโดยการทดลอง.....	38
วิธีดำเนินการวิจัยโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	45
4 ผลการวิจัย.....	48
ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยที่เกิดขึ้นใน ผลิตภัณฑ์พลาสติกโพลีสไตรีนและโพลิพรอพิลีนจากการทดลอง กับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	49
ผลการเปรียบเทียบสภาวะที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์โพลีสไตรีนและ โพลิพรอพิลีนจากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	106
5 สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ.....	109
สรุปผล.....	109
อภิปรายผล.....	110

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
5	ข้อเสนอแนะ.....	113
	บรรณานุกรม.....	115
	ภาคผนวก.....	118
	ภาคผนวก ก การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์พลาสติก ฉีดด้วยการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	119
	ภาคผนวก ข การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมโมลโฟลพลาสติก อินไซต์ เวอร์ชัน 4.0.....	131
	ภาคผนวก ค ตารางและภาพประกอบการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตร เฉลี่ยด้วยการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	137
	ภาคผนวก ง บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่.....	192
	ภาคผนวก จ คำอธิบายสัญลักษณ์และหน่วย.....	198
	ภาคผนวก ฉ แบบผลิตภัณฑ์และแม่พิมพ์ส้อม.....	201
	ประวัติย่อผู้วิจัย.....	208

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 คำอัตราส่วนเส้นทางไหลของพลาสติกบางชนิด.....	14
2 การหดตัวในการฉีดพลาสติกที่มีการจัดเรียงทิศทางโมเลกุล.....	19
3 การหดตัวของเทอร์โมพลาสติกบางชนิด.....	25
4 การกำหนดค่าปริมาตรพลาสติกเหลวบริเวณปลายหัวฉีด.....	39
5 ตารางเวลาย้ำ.....	41
6 ตารางเวลาย้ำแบบเป็นขั้น.....	42
7 ตารางความดันย้ำแบบเป็นขั้น.....	42
8 การยืนยันความถูกต้องของเอลิเมนต์โดยโปรแกรมโมลโฟลพลาสติกอินไซท์ เวอร์ชัน 4.0	46
9 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิพรพิลีนที่มี อุณหภูมิหลอมเหลว 230°C เวลาฉีด 1 s และความดันฉีด 400 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	50
10 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิพรพิลีนที่มี อุณหภูมิหลอมเหลว 230°C เวลาฉีด 1 s และความดันฉีด 550 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	52
11 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิพรพิลีนที่มี อุณหภูมิหลอมเหลว 230°C เวลาฉีด 1 s และความดันฉีด 700 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	54
12 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิพรพิลีนที่มี อุณหภูมิหลอมเหลว 230°C เวลาฉีด 2.5 s และความดันฉีด 400 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	56
13 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิพรพิลีนที่มี อุณหภูมิหลอมเหลว 230°C เวลาฉีด 2.5 s และความดันฉีด 550 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	58
14 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิพรพิลีนที่มี อุณหภูมิหลอมเหลว 230°C เวลาฉีด 2.5 s และความดันฉีด 700 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	60
15 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิพรพิลีนที่มี อุณหภูมิหลอมเหลว 230°C เวลาฉีด 4 s และความดันฉีด 400 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	62

บัญชีตาราง (ต่อ)

[illegible]

บัญชีตาราง (ต่อ)

[illegible]

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
36 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลีสไตรีนและโพลิโพรพิลีนที่มี อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เวลาช้า เวลาช้า 9 s และ 15 s ตามลำดับ ความดันช้า 105 % ของความดันฉีด จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	104
37 สภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์.....	110
38 การอบเม็ดพลาสติกชนิดต่าง ๆ โดยเวลาและอุณหภูมิ.....	124
39 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลีสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลีสไตรีน 230°C เวลาฉีด 1 s และ ความดันฉีด 400 bar	138
40 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลีสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลีสไตรีน 230°C เวลาฉีด 1 s และ ความดันฉีด 550 bar	139
41 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลีสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลีสไตรีน 230°C เวลาฉีด 1 s และ ความดันฉีด 700 bar	140
42 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลีสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลีสไตรีน 230°C เวลาฉีด 2.5 s และ ความดันฉีด 400 bar	141
43 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลีสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลีสไตรีน 230°C เวลาฉีด 2.5 s และ ความดันฉีด 550 bar	142
44 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลีสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลีสไตรีน 230°C เวลาฉีด 2.5 s และ ความดันฉีด 700 bar	143
45 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลีสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลีสไตรีน 230°C เวลาฉีด 4 s และ ความดันฉีด 400 bar	144
46 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลีสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลีสไตรีน 230°C เวลาฉีด 4 s และ ความดันฉีด 550 bar	145

บัญชีตาราง (ต่อ)

[illegible]

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
57 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 290°C เวลาฉีด 1 s และ ความดันฉีด 400 bar	156
58 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 290°C เวลาฉีด 1 s และ ความดันฉีด 550 bar	157
59 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 290°C เวลาฉีด 1 s และ ความดันฉีด 700 bar	158
60 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 290°C เวลาฉีด 2.5 s และ ความดันฉีด 400 bar	159
61 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 290°C เวลาฉีด 2.5 s และ ความดันฉีด 550 bar	160
62 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 290°C เวลาฉีด 2.5 s และ ความดันฉีด 700 bar	161
63 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 290°C เวลาฉีด 4 s และ ความดันฉีด 400 bar	162
64 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 290°C เวลาฉีด 4 s และ ความดันฉีด 550 bar	163
65 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 290°C เวลาฉีด 4 s และ ความดันฉีด 700 bar	164
66 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลีโพรพิลีน 230°C เวลาฉีด 1 s และ ความดันฉีด 400 bar	165

บัญชีตาราง (ต่อ)

[illegible]

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
77 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลีพรพิลีน 260°C เวลาฉีด 1 s และ ความดันฉีด 700 bar	176
78 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลีพรพิลีน 260°C เวลาฉีด 2.5 s และ ความดันฉีด 400 bar	177
79 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลีพรพิลีน 260°C เวลาฉีด 2.5 s และ ความดันฉีด 550 bar	178
80 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลีพรพิลีน 260°C เวลาฉีด 2.5 s และ ความดันฉีด 700 bar	179
81 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลีพรพิลีน 260°C เวลาฉีด 4 s และ ความดันฉีด 400 bar	180
82 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลีพรพิลีน 260°C เวลาฉีด 4 s และ ความดันฉีด 550 bar	181
83 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลีพรพิลีน 260°C เวลาฉีด 4 s และ ความดันฉีด 700 bar	182
84 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลีพรพิลีน 290°C เวลาฉีด 1 s และ ความดันฉีด 400 bar	183
85 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลีพรพิลีน 290°C เวลาฉีด 1 s และ ความดันฉีด 550 bar	184
86 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลีพรพิลีน 290°C เวลาฉีด 1 s และ ความดันฉีด 700 bar	185

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
87	ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลีโพรพิลีน 290°C เวลาฉีด 2.5 s และ ความดันฉีด 400 bar	186
88	ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลีโพรพิลีน 290°C เวลาฉีด 2.5 s และ ความดันฉีด 550 bar	187
89	ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลีโพรพิลีน 290°C เวลาฉีด 2.5 s และ ความดันฉีด 700 bar	188
90	ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลีโพรพิลีน 290°C เวลาฉีด 4 s และ ความดันฉีด 400 bar	189
91	ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลีโพรพิลีน 290°C เวลาฉีด 4 s และ ความดันฉีด 550 bar	190
92	ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของ โพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลีโพรพิลีน 290°C เวลาฉีด 4 s และ ความดันฉีด 700 bar	191

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 โครงสร้างเทอร์โมพลาสติกอสัณฐาน.....	5
2 โครงสร้างเทอร์โมพลาสติกกึ่งผลึก.....	5
3 การแปรรูปด้วยเทคนิคขึ้นรูปด้วยความร้อน.....	6
4 โครงสร้างของสไตรีนโมโนเมอร์.....	7
5 ปฏิกิริยาการเกิดโพลิเมอร์แบบรวมตัวจากโพรพิลีนโมโนเมอร์.....	8
6 การเนื้ของของไหลจากการไหลในท่อ.....	10
7 การเสียรูปที่เกิดจากการเนื้.....	11
8 การไหลของของไหลชนิดต่าง ๆ.....	13
9 การเกิดชั้นพลาสติกแข็งในแม่พิมพ์เมื่อพลาสติกเหลวไหลเข้าสู่โพรงแบบ.....	13
10 ทิศทางโมเลกุลวางตัวไปตามบริเวณที่มีความเร็วในการไหลแตกต่างกัน....	15
11 การจัดเรียงทิศทางโมเลกุลค่อย ๆ เพิ่มขึ้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์.....	16
12 ค่าการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลที่ส่วนต่าง ๆ ของความหนา.....	17
13 การจัดเรียงทิศทางโมเลกุลตามความยาวของผลิตภัณฑ์.....	17
14 ผลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อการหดตัวสำหรับ HDPE.....	20
15 ผลของความหนาผนังผลิตภัณฑ์ที่มีต่อการหดตัวสำหรับ HDPE.....	20
16 ผลของอุณหภูมิกระบอกฉีดที่มีต่อการหดตัวสำหรับ HDPE.....	20
17 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตรและอุณหภูมิของโพลีสไตรีน.....	21
18 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตรและอุณหภูมิของโพลิโพรพิลีน.....	22
19 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตรและอุณหภูมิ ในกระบวนการฉีด.....	23
20 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตรและอุณหภูมิ ในกระบวนการฉีด (ประเภทอสัณฐาน)	24
21 การหดตัวและการหดตัวภายหลังของพลาสติกชนิดต่าง ๆ ในการทดลองฉีด.....	26
22 ผลของอุณหภูมิแม่พิมพ์และการบ่มที่มีต่อการหดตัวภายหลังของ POM (Acetal)	27
23 เมชแบบบี้ม (Beam mesh elements).....	31
24 เมชแบบมิดเพลน (Midplane mesh elements).....	32
25 ความหนาต่ำสุดที่นำมาใช้กับเมชแบบมิดเพลน (Midplane mesh elements)...	32
26 เมชแบบดิวอัลโดเมนหรือฟิวชั่น (Dual domain mesh or fusion mesh).....	33
27 การเปรียบเทียบการเมชไม่สมมาตร (ซ้าย) กับเมชสมมาตร (ขวา).....	33
28 เมชแบบทรงปริซึมสามเหลี่ยมสามมิติ (3D tetrahedral mesh).....	33
29 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมในการคำนวณแอสเป็ค เรโซ.....	34
30 เครื่องฉีดพลาสติก Arburg Allrounder 220 S.....	38

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
31 โปรไฟล์ความดันฉีด (Injection pressure profile).....	40
32 โปรไฟล์ความดันย่ำ (Holding pressure profile).....	40
33 การตั้งอุณหภูมิพลาสติกเหลวในโซนต่าง ๆ.....	43
34 การตั้งค่าพารามิเตอร์ในขั้นสภาวะการฉีด.....	44
35 การตั้งค่าพารามิเตอร์ในขั้นสภาวะการย่ำ.....	44
36 ลำดับสภาวะการทำงานของโปรแกรมโมลโฟลพลาสติกอินไซท์เวอร์ชัน 4.0.....	45
37 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเอลิเมนต์กับการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย.....	46
38 ลำดับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	47
39 การเปรียบเทียบสภาวะที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์พลาสติกโพลิสไตรีน จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	106
40 การเปรียบเทียบสภาวะที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์พลาสติกโพลิพรพิลีน จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	107
41 ผลของความดันฉีดที่มีต่อการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย.....	111
42 ผลของเวลาฉีดที่มีต่อการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย.....	111
43 ผลของอุณหภูมิหลอมเหลวที่มีต่อการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย.....	112
44 ผลของความดันย่ำที่มีต่อการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย.....	112
45 ผลของเวลาย่ำที่มีต่อการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย.....	113
46 ผลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย.....	113
47 เครื่องฉีดพลาสติกอาร์เบิก ออลราวเดอร์ 220 เอส (ARBURG ALLROUNDER 220 S).....	120
48 แผนภาพการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติกอาร์เบิก ออลราวเดอร์ 220 เอส.....	121
49 การทำงานของเครื่องฉีดพลาสติกอาร์เบิก ออลราวเดอร์ 220 เอส.....	122
50 ใบรับรอง (Certificate) ของโพลิสไตรีน.....	125
51 ใบรับรอง (Certificate) ของโพลิพรพิลีน.....	126
52 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยกับอุณหภูมิพลาสติกเหลวใน สภาวะเวลาฉีด 1.0 ถึง 3.5 s	133
53 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับอุณหภูมิพลาสติกเหลวทางทฤษฎี.....	134
54 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ในสภาวะ เวลาย่ำ 3.0 ถึง 10.5 s.....	134
55 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ทางทฤษฎี.....	134

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
56 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยกับเวลาช้าในสภาวะ ความดันช้า 487.5 ถึง 650 bar	135
57 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับเวลาช้าทางทฤษฎี.....	135
58 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยกับความดันช้าในสภาวะ อุณหภูมิแม่พิมพ์ 20 ถึง 70°C.....	136
59 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับความดันช้าทางทฤษฎี.....	136

สุภกิจ ขาวเนตร. (2550). การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์พลาสติกฉีดด้วย
การทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. ปรินซ์นิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล).
กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชิต บัวแก้ว, อาจารย์ ดร. ไพศาล นาผล.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาอิทธิพลและสภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ที่มีผล
ต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์พลาสติกฉีดด้วยการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยในส่วนของ การ
ทดลอง ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ใช้ในงานวิจัย คือ ส้อม ขนาด 25x147.5x2 mm เครื่องฉีดพลาสติก
ที่ใช้ในการวิจัย คือ อาร์เบอร์ก ออลราวเดอร์ 220เอส (ARBURG ALLROUNDER 220S) และใช้
โปรแกรมโมลโฟลพลาสติกอินไซต์ เวอร์ชัน 4.0 (Moldflow Plastics Insight V4.0) สำหรับการ
วิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยพารามิเตอร์ที่ศึกษาในสภาวะการฉีด คือ ความดันฉีด เวลา
ฉีดและอุณหภูมิหลอมเหลว เท่ากับ 400 bar ถึง 700 bar 1 s ถึง 4 s และ 230°C ถึง 290°C
ตามลำดับ ในสภาวะการย่ำ คือ ความดันย่ำ เวลาย่ำและอุณหภูมิแม่พิมพ์ เท่ากับ 75% ถึง 105%
ของความดันฉีด 3 s ถึง 9 s สำหรับโพลิสไตรีน 3 s ถึง 15 s และเท่ากับ 10°C ถึง 50°C สำหรับ
โพลิโพรพิลีน

ผลการวิจัยพบว่า ในสภาวะการฉีด เมื่อความดันฉีดและเวลาฉีดเพิ่มขึ้น ขณะที่อุณหภูมิ
หลอมเหลวคงที่ คุณภาพผลิตภัณฑ์โพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนมีแนวโน้มดีขึ้น เมื่ออุณหภูมิ
หลอมเหลวเพิ่มขึ้น คุณภาพผลิตภัณฑ์โพลิสไตรีนดีกว่าโพลิโพรพิลีน ในสภาวะการย่ำพบว่า เมื่อ
ความดันย่ำและเวลาย่ำเพิ่มขึ้น ขณะที่อุณหภูมิแม่พิมพ์คงที่ คุณภาพผลิตภัณฑ์โพลิสไตรีนและ
โพลิโพรพิลีนมีแนวโน้มดีขึ้นเช่นกัน แต่เมื่ออุณหภูมิแม่พิมพ์เพิ่มขึ้น คุณภาพผลิตภัณฑ์โพลี
สไตรีนและโพลิโพรพิลีนมีแนวโน้มลดลง สภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพ
ผลิตภัณฑ์ด้วยการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของงานวิจัยนี้ คือ ความดันฉีด เวลาฉีดและ
อุณหภูมิหลอมเหลวโพลี สไตรีน เท่ากับ 700 bar 4 s และ 290°C ตามลำดับ และเท่ากับ 700
bar 4 s และ 230°C สำหรับโพลิโพรพิลีน สำหรับสภาวะการย่ำพบว่า ความดันย่ำและอุณหภูมิ
แม่พิมพ์ ที่ทำให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ดีขึ้นสำหรับโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีน คือ 105% ของ
ความดันฉีดและ 10°C ตามลำดับ เวลาย่ำที่ทำให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ดีขึ้นสำหรับโพลิสไตรีนและ
โพลิโพรพิลีนเท่ากับ 9 s และ 15 s ตามลำดับ ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิ
โพรพิลีนเท่ากับ 62% และ 18% ตามลำดับ

Subhakij Khaownetr. (2007). *A Study of Parameters Affecting Quality of Injection Molded Plastic Product Using Experimental and Finite Element Methods*. Master Degree thesis, M.Eng. (Mechanical Engineering). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee : Asst.Prof. Vichit Buakaew, Dr. Paisarn Naphon

In this research is an objective for influential study and suitable conditions of parameters affecting quality of injection molded plastic product using experimental and finite element methods. For experimental work, the essentiality of product used is fork, geometry and outer dimension of 25x147.5x2 mm. The injection molding machine is ARBURG ALLROUNDER 220S. The injection molding simulation; The Moldflow Plastics Insight V.4.0 is employed as the solver for the analysis by finite element method. The considered parameters in the filling phase, the test runs are performed at injection pressure, injection time and melt temperature ranging between 400 and 700 bar, 1 and 4 seconds and between 230 and 290 degrees Celsius, respectively. For the packing phase the test runs are performed at holding pressure, holding time and mold temperature ranging between 75% and 105% of injection pressure, 3 and 9 second for polystyrene, 3 and 15 second for polypropylene and between 10 and 50 degree Celsius, respectively.

It can be found that for the filling phase, the quality of both products obtained from the experimental and finite element methods tend to increase as the injection pressure and injection time are increased, while the melt temperature is kept constant. However, the quality product of polystyrene is better than that of polypropylene as the melt temperature is increased. For the packing phase, the quality of both products obtained from the experimental and finite element methods increase with increasing of the holding pressure of holding time, while the mold temperature is maintained constant. The suitable conditions of parameters affecting quality product for the injection phase obtained experimental and finite element methods for polystyrene is injection pressure, injection time and melt temperature as 700 bar, 4 s and 290 degree Celsius, respectively, and 700 bar, 4 s, 230 degree Celsius for polypropylene. For the packing phase, the holding pressure and mold temperature of 105 % of injection pressure and 10 degrees Celsius give higher quality products, for the holding time of 9 s and 15 s for polystyrene and polypropylene, respectively. The average errors between the measured data and predicted results are 62 %, 18 %, for polystyrene and polypropylene, respectively.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในภาคอุตสาหกรรมการผลิต ได้นำพลาสติกมาทดแทนโลหะหรือวัสดุอื่นๆ ในผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากขึ้น เช่น ผลิตภัณฑ์ประเภทเครื่องใช้ในครัวเรือนไปจนถึงชิ้นส่วนโครงสร้างเครื่องบิน เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตต่ำและมีน้ำหนักเบาแต่ได้สมบัติทางกล ทำให้รูปแบบของผลิตภัณฑ์พลาสติกมีความหลากหลายมากขึ้น ดังนั้นการออกแบบผลิตภัณฑ์พลาสติก จึงมีความจำเป็นต้องให้ความสำคัญและได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง กระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไปจะเริ่มจากขั้นตอนการออกแบบรูปร่างผลิตภัณฑ์ ตามความต้องการของลูกค้า หรือผู้ใช้ผลิตภัณฑ์ เช่น มีรูปทรงที่สวยงาม เหมาะสมกับการใช้งาน มีความแข็งแรงเพียงพอต่อการรับภาระขณะใช้งาน หรือใช้เนื้อวัสดุน้อยเป็นต้น ซึ่งในส่วนนี้จะต้องพิจารณาจากพารามิเตอร์แม่พิมพ์ (Geometry parameters) ร่วมกับการออกแบบ สิ่งสำคัญที่ทำให้ผลิตภัณฑ์พลาสติกมีคุณภาพดีแบ่งออกเป็นสามส่วน ส่วนแรกคือการออกแบบแม่พิมพ์ (Injection mold design) ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ส่วนที่สองคือเครื่องฉีดพลาสติก (Injection molding machine) รวมไปถึงการออกแบบกระบวนการฉีด (Injection molding process design) และส่วนสุดท้ายคือ วัสดุโพลิเมอร์ (Raw materials) [วิโรจน์, 2540] แม่พิมพ์ที่มีความเที่ยงตรงสูงบางครั้งไม่ใช่ตัวชี้วัดว่าผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดมาแล้วนั้นจะไม่มีข้อบกพร่อง แต่อาจจะต้องพิจารณาพารามิเตอร์กระบวนการ (Process parameters) ด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำมาศึกษาเพื่อเป็นข้อมูลในการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ การกำหนดคุณภาพผลิตภัณฑ์ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นตัวชี้วัดรอยยุบอันเป็นข้อบกพร่องที่ควรพิจารณาแก้ไขให้สมบูรณ์

การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์โดยกระบวนการฉีดในสภาวะต่างๆ นั้น มีความจำเป็นต้องศึกษา เพื่อกำหนดพารามิเตอร์ให้เหมาะสม หากเกิดขึ้นภายหลังจากทำการทดลอง จะต้องนำกลับมาทำการปรับพารามิเตอร์ในแต่ละสภาวะ และทำการทดลองอีกครั้ง ซึ่งกว่าจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ อีกทั้งสามารถใช้งานจริงได้ อาจจะต้องเพิ่มรอบการทดลองอีกหลายรอบ ทำให้เกิดการสูญเสียทั้งเวลา และวัสดุที่ต้องใช้ไปอย่างมาก ในปัจจุบันได้มีการเพิ่มขีดความสามารถด้านการวิเคราะห์เพื่อช่วยลดจำนวนรอบของการทดลอง [ศุภนัยเทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ, 2545] ด้วยการใช้เทคโนโลยีการคำนวณขั้นสูงที่เรียกว่า วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) มาใช้ในการแก้สมการทดแทนความเป็นจริงของปัญหาที่มีความซับซ้อนในแต่ละด้าน เช่น ผลิตภัณฑ์พลาสติกขณะใช้

งานจะคำนึงถึงความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ว่าจะเกิดความเสียหายขณะรับแรงหรือไม่ หรือหากคำนึงถึงผลการฉีดพลาสติกในแม่พิมพ์ โดยทั่วไปจะพิจารณาเส้นทางไหล อุณหภูมิและการแข็งตัวของพลาสติกว่าจะมีผลทำให้พลาสติกเหลวไหลเต็มแม่พิมพ์หรือไม่ เป็นต้น การประยุกต์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ากับการออกแบบผลิตภัณฑ์ จะช่วยให้ไม่ต้องสร้างแม่พิมพ์ขึ้นมาเพื่อทำการทดลอง กล่าวคือหลังจากการออกแบบรูปร่างผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการแล้ว จะใช้วิธีนี้ช่วยวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นก่อน เปรียบเสมือนเป็นการจำลองกระบวนการฉีดผลิตภัณฑ์ตามรูปแบบที่ได้ออกแบบไว้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งทำให้การออกแบบแม่พิมพ์ใช้เวลาน้อยลงและทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์พลาสติกฉีดด้วยการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.2.2 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์พลาสติกฉีด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

พารามิเตอร์ที่ศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้เป็นพารามิเตอร์กระบวนการ มี 2 สภาวะคือ

1.3.1 พารามิเตอร์ในสภาวะการฉีด (Filling phase) คือ

1.3.1.1 ความดันฉีด (Injection pressure) เท่ากับ 400 bar 550 bar และ 700 bar

1.3.1.2 เวลาฉีด (Injection time) เท่ากับ 1 s 2.5 s และ 4 s

1.3.1.3 อุณหภูมิหลอมเหลว (Melt temperature) เท่ากับ 230°C 260°C และ 290°C

1.3.2 พารามิเตอร์ในสภาวะการย่ำ (Packing phase) คือ

1.3.2.1 ความดันย่ำ (Holding pressure) เท่ากับ 75% 90% และ 105% ของความดันฉีด

1.3.2.2 เวลาย่ำ (Holding time) สำหรับโพลิสไตรีน เท่ากับ 3 s 6 s และ 9 s สำหรับโพลิโพรพิลีน เท่ากับ 3 s 9 s และ 15 s

1.3.2.3 อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature) เท่ากับ 10°C 30°C และ 50°C

1.3.3 ผลิตภัณฑ์พลาสติกฉีดสำหรับงานวิจัยนี้ คือ ส้อม ขนาด 25x147.5x2 mm

1.3.4 แม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัย คือ แม่พิมพ์ส้อม ขนาด 250x250x200 mm

1.3.5 พลาสติกที่ใช้ในงานวิจัย มี 2 ชนิด คือ

1.3.5.1 โพลิสไตรีน (Polystyrene) ของมิตซูบิชิ เคมีคัล (MITSUBISHI CHEMICAL) ชนิดไดเร็กซ์ อีปส์ เอช350 (DIAREX HIPS H350)

1.3.5.2 โพลีโพรพิลีน (Polypropylene) ของบาเซล โพลีโอฟีนส์ (BASELL POLYOLEFINS) ชนิดโมเพลน เอชพี500เอ็น (MOPLEN HP500N)

1.4 นิยามศัพท์

- 1.4.1 คุณภาพผลิตภัณฑ์ หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่มีการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยและรอยยุบน้อย
- 1.4.2 สภาวะที่เหมาะสม หมายถึง สภาวะที่ทำให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ดีที่สุด
- 1.4.3 การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย หมายถึง ความแตกต่างระหว่างปริมาตรโพรงแบบกับปริมาตรผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก ภายหลังจากถูกปลดสู่บรรยากาศ
- 1.4.4 รอยยุบ หมายถึง ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์พลาสติกมีลักษณะเป็นรอยเว้ายุบลงบนผิวผลิตภัณฑ์
- 1.4.5 พารามิเตอร์กระบวนการ หมายถึง ตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ในสภาวะการฉีด คือ ความดันฉีด เวลาฉีดและอุณหภูมิหลอมเหลว ในสภาวะการย่ำ คือ ความดันย่ำ เวลาย่ำและอุณหภูมิแม่พิมพ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 แนวทางในการแก้ปัญหาการยุบ (Sink marks) ที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์พลาสติกฉีด
- 1.5.2 แนวทางในการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์พลาสติกฉีด
- 1.5.3 แนวทางในการวิเคราะห์รอยยุบ (Sink marks) ที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์พลาสติกฉีดด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทำให้ลดจำนวนของเสีย ต้นทุนและเวลา

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาพารามิเตอร์ในสภาวะการฉีดและการย่ำ สำหรับงานวิจัยนี้ จะพิจารณาอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่ทำให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ดีขึ้น ซึ่งสภาวะการฉีดและการย่ำ เป็นกระบวนการของเครื่องฉีดพลาสติก เริ่มจากนำเม็ดพลาสติกลำเลียงส่งเข้าไปในส่วนป้อน (Hopper) และควบคุมปริมาณก่อนจะค่อยๆ หลอมเหลวในส่วนที่มีอุณหภูมิต่าง ๆ กัน พลาสติกเหลวจะไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ด้วยแรงส่งของเกลียวหนอน (Injection screw) จนเต็มแม่พิมพ์ พลาสติกเหลวเริ่มแข็งตัว หลังจากนั้นจะถูกปลดออกจากแม่พิมพ์ นำไปพิจารณาคุณภาพผลิตภัณฑ์ต่อไป

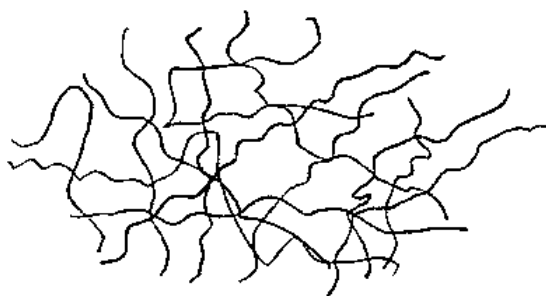
2.1 พลาสติกวิศวกรรม (Engineering plastics)

พลาสติกวิศวกรรม มีกระบวนการผลิตที่ซับซ้อน คือ กระบวนการโพลิแอตติชัน (Polyaddition) และโพลิคอนเดนเซชัน (Polycondensation) [สมศักดิ์, 2548] พลาสติกวิศวกรรมนี้สามารถผลิตให้มีสมบัติตามที่ต้องการได้ อาจจะมีสมบัติคล้ายกับยาง หรือคล้ายกับเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) ซึ่งสมบัติของเทอร์โมพลาสติกมีรายละเอียดดังนี้

เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) [สมศักดิ์, 2548]

เทอร์โมพลาสติก เป็นโพลิเมอร์แบบเส้นตรง หรือแบบมีกิ่งสาขา จะอ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อนและแข็งตัวใหม่เมื่อถูกทำให้เย็นตัวลง จะละลายได้ดีในตัวทำละลายบางชนิด กระบวนการฉีดเทอร์โมพลาสติกเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ดังนั้นโพลิเมอร์ประเภทนี้จึงนำกลับมาหลอมเหลวใหม่ได้ ซึ่งไม่ทำให้สมบัติทางเคมีเปลี่ยนแปลงไป โดยอาศัยการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลหรือสัณฐานวิทยา สามารถแบ่งเทอร์โมพลาสติกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ เทอร์โมพลาสติกอสัณฐาน (Amorphous thermoplastics) และเทอร์โมพลาสติกกึ่งผลึก (Semi-crystalline thermoplastics) [Deanin, R., 1972]

2.1.1 เทอร์โมพลาสติกอสัณฐาน (Amorphous thermoplastics) จัดเป็นโพลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลแบบสุ่ม (Random configuration) ดังภาพประกอบ 1 โพลิเมอร์ประเภทนี้เมื่อถูกความร้อน โมเลกุลที่ยึดเหนี่ยวกันอยู่ จะคลายออกและเคลื่อนที่ได้มากขึ้น ทำให้สายโซ่โมเลกุลหลุดออกจากกันจึงอ่อนตัวและเกิดการไหล เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลลดลง ในขณะที่ระยะทางเฉลี่ยระหว่างสายโซ่โมเลกุลเพิ่มขึ้น และเมื่อโพลิเมอร์เย็นตัวลงจะได้รับความแข็งแกร่งคืนมา เนื่องจากขณะเคลื่อนที่ระยะทางของโมเลกุลลดลง โพลิเมอร์ประเภทนี้ได้แก่ โพลิสไตรีน โพลีคาร์บอเนต โพลีเมทิลเมทาอะครีเลต เป็นต้น



ภาพประกอบ 1 โครงสร้างเทอร์โมพลาสติกอสัณฐาน [สมศักดิ์, 2548]

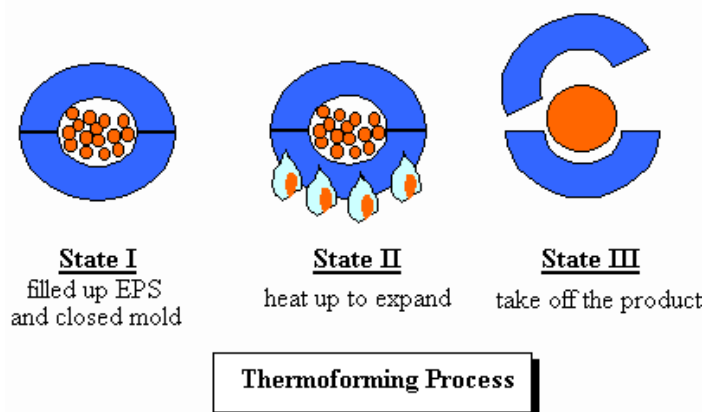
โพลิสไตรีน (Polystyrene) จัดเป็นพลาสติกที่มีปริมาณการใช้ติด 1 ใน 4 ลำดับแรกๆ ของพลาสติกที่มีปริมาณการใช้สูงสุด [Clements, L., 1988] การใช้โพลิสไตรีนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ คือ โพลิสไตรีนใช้งานทั่วไป (General Purpose Polystyrene, GPPS) โพลิสไตรีนโฟม (Expandable polystyrene, EPS) และโพลิสไตรีนทนแรงกระแทก (High Impact Polystyrene, HIPS)

1. General Purpose Polystyrene (GPPS)

โพลิสไตรีนกลุ่มนี้เมื่อนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ จะมีความใส มีความแข็งแต่เปราะ การใช้ผลิตภัณฑ์โพลิสไตรีนกลุ่มนี้มีหลายลักษณะ เช่น บรรจุภัณฑ์ แผ่นพลาสติกใส เป็นต้น และสามารถนำไปแปรรูปด้วยกระบวนการหล่อไปจนถึงกระบวนการฉีดขึ้นรูป นอกจากนี้โพลิสไตรีนยังนิยมใช้เป็นสารมาตรฐาน (แผ่นฟิล์มใสบาง) เพื่อทดสอบความแม่นยำของเครื่องมือวิเคราะห์ชนิดอินฟราเรด (Infrared)

2. Expandable Polystyrene (EPS)

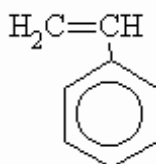
โพลิสไตรีนกลุ่มนี้ผลิตขึ้นเพื่อการขนส่งเป็นหลัก ได้แก่ วัสดุกันสะเทือนต่างๆ ในรูปแบบบรรจุภัณฑ์ เพื่อการปกป้องผลิตภัณฑ์ ปัจจุบันได้มีการพัฒนาสำหรับการใช้งานในลักษณะอื่นๆ ด้วยที่สำคัญคือ ภาชนะกันความร้อน หรือเก็บความร้อน เช่น แก้วใส่เครื่องดื่มชนิดทันทันร้อน ใช้เป็นวัสดุกันความร้อนของกระติกน้ำร้อน เป็นต้น และสามารถใช้เป็นวัสดุกันเสียง โดยวางแทรกอยู่ระหว่างฝาหรือผนังของตึก อาคารหรือห้องพัก ลักษณะของโพลิสไตรีนกลุ่มนี้เมื่อทำเป็นผลิตภัณฑ์จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความทึบตัวสูง มีน้ำหนักเบามาก แต่มีความแข็งแรงปานกลาง โพลิสไตรีนกลุ่มนี้มีลักษณะเป็นเม็ดโพลิสไตรีนเชื่อมติดกัน ดูลึกลับกับเป็นเนื้อเดียวกัน การแปรรูปนิยมใช้เทคนิคขึ้นรูปด้วยความร้อน (Thermoforming) โดยใช้แม่พิมพ์ที่ไม่มีความซับซ้อน ดังภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 การแปรรูปด้วยเทคนิคขึ้นรูปด้วยความร้อน [สมศักดิ์, 2548]

3. High Impact Polystyrene (HIPS)

การผสมยางกับโพลิสไตรีนในสัดส่วนร้อยละ 1 ถึง 10 โดยน้ำหนัก สามารถเพิ่มสมบัติการทนต่อแรงกระแทกของโพลิสไตรีนผสมได้เป็นอย่างดี โดยการทำหน้าที่เป็นสารอิมแพ็คโมดิไฟเออร์ (Impact modifier) ให้กับโพลิสไตรีนผสม นอกจากการผสมโดยตรงเพื่อเพิ่มสมบัติการทนต่อแรงกระแทกแล้ว การนำโมโนเมอร์บางชนิด เช่น บิวทาไดอีน อะคริโลไนไตรด์ มาทำให้เกิดปฏิกิริยาโคโพลิเมอไรเซชันกับสไตรีนโมโนเมอร์ จะได้โคโพลิเมอร์ (เช่น ABS) ที่มีความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น หรือสามารถเปลี่ยนสภาพจากพลาสติกกลายเป็นยางได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับสัดส่วนของหน่วยสไตรีนในโคโพลิเมอร์ สารตั้งต้นโพลิสไตรีนสังเคราะห์ได้จากสไตรีนโมโนเมอร์ ซึ่งเป็นของเหลวใส ไม่มีสีแต่มีกลิ่น โดยปกติสไตรีนสามารถกลายเป็นโพลิสไตรีนได้เอง (Self-polymerization) หากอยู่ภายใต้บรรยากาศปกติเป็นเวลานานๆ ดังนั้นเพื่อยืดอายุการดำรงสภาพของโมโนเมอร์ให้นานมากขึ้น นิยมเติมสารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา (Inhibitor) ส่วนผสมประมาณไม่เกินร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โครงสร้างของสไตรีนโมโนเมอร์แสดงดังภาพประกอบ 3



ภาพประกอบ 3 โครงสร้างของสไตรีนโมโนเมอร์ [สมศักดิ์, 2548]

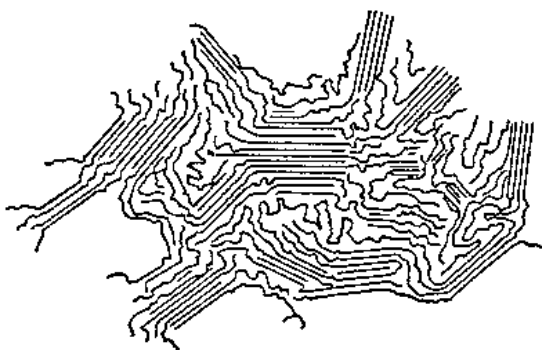
สมบัติทั่วไป

1. มีความแข็ง เปราะ แตกร้าวง่าย น้ำหนักเบา ราคาถูก
2. ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีความใส ผิวเรียบ ใสสีเติมแต่งได้ง่ายและคงความโปร่งใส

3. ทนทานต่อสารเคมีทั่วไป แต่ไม่ทนต่อสารไฮโดรคาร์บอนและตัวทำละลายอินทรีย์
4. เป็นฉนวนไฟฟ้า
5. ไม่ดูดความชื้น เกิดไฟฟ้าสถิตได้ง่าย ทำให้ดูดฝุ่นละอองได้ดี
6. การหดตัวสูงเมื่อเย็นตัว ทำให้ถอดจากแม่พิมพ์ได้ง่ายแต่อาจเสียรูปและขนาด
7. ไม่ทนต่อสภาพแวดล้อมภายนอก ผิวเสื่อมสภาพเร็ว ไม่ทนต่อการถูกขีดข่วน

ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากโพลิสไตรีน โพลิสไตรีนเรซิน มีลักษณะเป็นเม็ด ผง และของเหลว เหมาะสำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีต่างๆ ผลิตภัณฑ์ทั่วไป ได้แก่ ถ้วย จาน แก้วน้ำ ช้อนส้อม ที่ใช้แล้วทิ้ง กล่องบรรจุอาหารและผลไม้ ไม้บรรทัด อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ของเล่น ด้ามจับลูกอม ขนมเด็ก ขวดหรือกระป๋องใส่ยา เฟอร์นิเจอร์บางอย่าง ชิ้นส่วนในตู้เย็น โฟมกันแตกสำหรับบรรจุภัณฑ์และฉนวนความร้อน

2.1.2 เทอร์โมพลาสติกกึ่งผลึก (Semi-crystalline thermoplastics) โพลีเมอร์ ประเภทนี้ โครงสร้างของโมเลกุลมีความสม่ำเสมอและมีความยืดหยุ่น บริเวณที่เป็นผลึกมีการจัดเรียงทิศทาง โมเลกุลให้เป็นระเบียบมากขึ้น โดยเกิดขึ้นภายหลังจากการหลอมเหลวขณะถูกทำให้เย็นตัวลง เมื่อให้ความร้อนจนถึงจุดหลอมเหลว จะมีส่วนของอสัณฐานหรือการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลแบบสับสนเกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงมีทั้งส่วนที่เป็นอสัณฐานและส่วนที่เป็นผลึกปนกันอยู่ในโมเลกุล ดังภาพประกอบ 4 ระดับความเป็นผลึก (Degree of crystalline) ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมี กระบวนการฉีดและอัตราการเย็นตัวของโพลีเมอร์ โดยทั่วไปตัวแปรที่ช่วยลดอัตราการเย็นตัวจะเพิ่มระดับความเป็นผลึก โพลีเมอร์ประเภทนี้ได้แก่ โพลีโพรพิลีน โพลีเอทิลีน โพลีเอไมด์ เป็นต้น

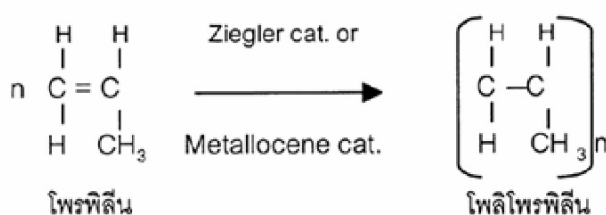


ภาพประกอบ 4 โครงสร้างเทอร์โมพลาสติกกึ่งผลึก [สมศักดิ์, 2548]

โพลีโพรพิลีน (Polypropylene)

การพัฒนากระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีนผสม ที่มีสมบัติทนต่อแรงกระแทกซึ่งได้รับการตอบรับเป็นอย่างดีนั้น ส่งผลให้ปริมาณการใช้โพลีโพรพิลีนในการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์โดยเฉพาะในการผลิตชิ้นส่วนประเภทที่ต้องการความทนทานต่อแรงกระแทก เช่น กันชนและชิ้นส่วนประกอบ

ต่างๆ มีเพิ่มมากขึ้น จุดเด่นของโคโพลิโพรพิลีนผสมชนิดความหนาแน่นสูงนี้ คือ เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสมดุล ในด้านความแข็งแรงและความสามารถในการทนทานต่อแรงกระแทกได้ดีมาก อีกทั้งยังมีความแข็งตึง (Stiffness) อยู่ในระดับที่ดี โดยไม่ทำให้ความสามารถในการขึ้นรูปเสียไป โคโพลิโพรพิลีนผสมนี้ สามารถนำมาขึ้นรูปโดยวิธีการฉีดผลิตภัณฑ์ผนังบางได้และที่สำคัญสามารถปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิต เพื่อให้ได้โคโพลิโพรพิลีนผสม ที่มีสมบัติตามต้องการได้อย่างไม่ยากนัก ด้วยเหตุนี้ต้นทุนในการผลิตโคโพลิโพรพิลีนผสมจึงไม่สูงมาก อีกทั้งยังสามารถที่จะใส่สารปรุงสีเข้าไป เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีความหลากหลายและมีราคาถูก โพลิโพรพิลีนเกิดจากปฏิกิริยาการเกิดโพลิเมอร์แบบรวมตัวจากโพรพิลีนโมโนเมอร์ ดังภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 ปฏิกิริยาการเกิดโพลิเมอร์แบบรวมตัวจากโพรพิลีนโมโนเมอร์ [สมศักดิ์, 2548]

โดยทั่วไป ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการสังเคราะห์โพลิโพรพิลีนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ แซกเลอร์แนทต้า (Ziegler-Natta) และเมททอลโลซีน (Metallocene) โดยโพลิโพรพิลีนที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเมททอลโลซีน (Metallocene) จะมีโครงสร้างที่สามารถควบคุมได้ ซึ่งความสามารถในการควบคุมโครงสร้างของโพลิโพรพิลีนที่สังเคราะห์ได้นี้ มีประโยชน์ที่เห็นได้ชัดคือ ความสามารถในการควบคุมสมบัติทางกายภาพของโพลิโพรพิลีน ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 0.905 มีจุดหลอมเหลวสูงกว่าโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โดยมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 140-160°C โพลิโพรพิลีนที่สังเคราะห์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแซกเลอร์แนทต้า (Ziegler-Natta) จะมีค่าจุดหลอมเหลวสูงกว่าเมททอลโลซีน (Metallocene) สมบัติของโพลิโพรพิลีนที่สำคัญ ได้แก่ มีความเหนียวและทนต่อแรงกระแทก มีความทนทานต่อสารเคมี มีความสามารถในการดัดงอ ขึ้นรูปได้ง่ายและไม่ดูดความชื้น

สมบัติทั่วไป

1. มีผิวแข็ง ทนทานต่อการขีดข่วน คงตัวไม่เสียรูปง่าย
2. สามารถทำเป็นบานพับในตัว มีความทนทานมาก
3. เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก
4. ทนทานต่อสารเคมี แต่บางชนิดอาจทำให้พองตัวหรืออ่อนนุ่มได้
5. มีความเหนียวที่อุณหภูมิตั้งแต่ 40°C ลงไปจนถึง -10°C

6. มีความต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซได้ดี
7. สามารถทนอุณหภูมิสูงที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ (สเตอริไลซ์ : 100°C) ได้
8. ผสมสีได้ง่ายทั้งลักษณะโปร่งแสงและทึบแสง

ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากโพลิโพรพิลีน พบมากได้แก่ กล้องเครื่องมือ กระเป๋า ปกแฟ้มเอกสาร กล้องและตลับเครื่องสำอาง กล้องบรรจุอาหาร อุปกรณ์รถยนต์ เครื่องใช้ในครัวเรือน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ทางการแพทย์ วัสดุบรรจุภัณฑ์ในอุตสาหกรรม ขวดใส่สารเคมี กระป๋องน้ำมันเครื่อง กระสอบข้าวและถุงบรรจุปุ๋ย

2.2 หลักการขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดเทอร์โมพลาสติก

สมบัติของเทอร์โมพลาสติกที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปโดยการฉีดเป็นผลิตภัณฑ์ เกิดจากการผสมผสานระหว่างสมบัติที่มีอยู่ในเม็ดพลาสติก [Griskey, R.G., 1995] สมบัติที่เป็นผลจากกระบวนการฉีดพลาสติกและแม่พิมพ์ ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามชนิดของพลาสติก ตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการฉีดคือ เวลา อุณหภูมิ ความดันและอัตราการไหล อุณหภูมิจริงและความดันในท่อกวนของพลาสติกเหลวจะไม่เท่ากับค่าที่ตั้งไว้กับเครื่องฉีด เพราะเกิดการสูญเสียและการหน่วงเวลาระหว่างจุดที่ใช้พลังงานความร้อนกับพลาสติกเหลว ค่าที่แตกต่างกันนี้ ยังขึ้นอยู่กับอัตราการฉีด ชนิดของพลาสติก เวลาที่พลาสติกอยู่ในกระบอกฉีด ระยะทางที่พลาสติกเหลวไหลและตำแหน่งของท่อหล่อเย็นในแม่พิมพ์ เป็นต้น พลาสติกที่มีการนำความร้อนต่ำ ทำให้การควบคุมอุณหภูมิให้ถูกต้องอาจทำได้ยาก เพราะอุณหภูมิของชุดให้ความร้อนอาจอยู่ในระดับที่ต่ำกว่า หรือสูงกว่าที่กำหนดไว้ จึงเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในทางปฏิบัติ แต่ในเครื่องฉีดพลาสติกแบบใหม่จะมีชุดควบคุมอุณหภูมิที่มีความแม่นยำ และการปรับปรุงแบบของเกลียวหนอนก็ทำให้อุณหภูมิพลาสติกเหลวสม่ำเสมอดีขึ้นด้วย

2.3 การไหลของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก [สมศักดิ์, 2548]

สมบัติการไหลของพลาสติกเหลวสามารถบ่งบอกถึงลักษณะของกระบวนการได้ ความเข้าใจถึงสมบัติการไหลช่วยในการออกแบบเกลียวหนอนให้เหมาะสม และช่วยในเรื่องสภาวะในการดำเนินการ (Operating conditions) การศึกษาสมบัติการไหลของพลาสติกเหลวจัดเป็นศาสตร์หนึ่งที่มีชื่อเฉพาะว่า รีโอโลยี (Rheology)

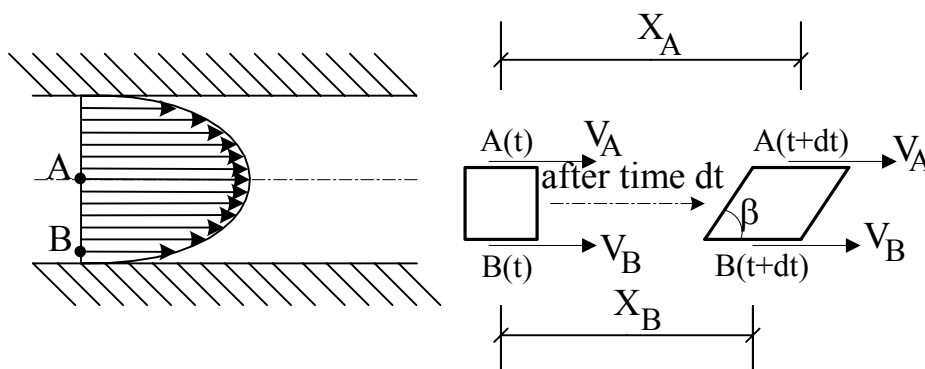
คำจำกัดความพื้นฐานที่ใช้ในการไหลของของไหล สามารถแบ่งได้ดังนี้

2.3.1 การไหลแบบลาก (drag flow) เกิดจากการเคลื่อนที่สัมผัสของขอบเขตบริเวณหนึ่งหรือมากกว่า เปรียบเทียบกับขอบเขตอื่น ที่มีของไหลบรรจุอยู่ ลักษณะเฉพาะของการไหลแบบลาก

เรียกว่าการไหลแบบคูเอต (Couette flow) เช่น พื้นผิวของเกลียวหนอน (Injection screw surface) เนื่องจากเกลียวหนอนหมุนอยู่ในกระบอกที่อยู่หนึ่ง ในขณะที่ขอบเขตหนึ่งเคลื่อนที่สัมผัสกับอีกขอบเขตหนึ่ง จึงทำให้เกิดการไหลแบบลาก

2.3.2 การไหลแบบใช้ความดัน (Pressure flow) เกิดจากความแตกต่างของความดันในของไหลเกิดขึ้น เช่น การไหลผ่านตาย (Die) ของเครื่องอัดรีดจะเกิดแรงขับ (Driving force) ซึ่งเกิดจากความดันตรงทางเข้าตาย (Die inlet) สูงกว่าความดันตรงทางออก (Outlet) ทำให้พลาสติกเหลวไหลผ่านตาย เรียกว่าความดันหลักของตาย (Die head pressure)

2.3.3 การเฉือน (Shear) เกิดจากความแตกต่างของความเร็วในทิศทางที่ตั้งฉากกับการไหล ดังภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 การเฉือนของของไหลจากการไหลในท่อ [สมศักดิ์, 2548]

2.3.4 การยืดออก (Elongation) เกิดจากความแตกต่างของความเร็วในทิศทางเดียว กับทิศทางการไหล

2.3.5 การไหลแบบความเร็วเท่ากัน (Plug flow) เกิดจากการไหลที่ทุกๆ ส่วนของการไหล (Fluids elements) เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วเท่าๆกัน โดยไม่มีการเฉือนเกิดขึ้น

2.3.6 อัตราการเฉือน (Shear Rate: $\dot{\gamma}$) เกิดจากความแตกต่างของความเร็วต่อระยะทางที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล การเฉือนของของไหลที่เกิดจากการไหลในท่อ จะหาอัตราการเฉือนได้ดังสมการที่ 1 และ 2

$$\dot{\gamma} \cong \frac{V_A - V_B}{AB} \quad (1)$$

โดยที่ $\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}$ มีหน่วยเป็นวินาที⁻¹)

หรือ

$$\dot{\gamma} \cong \lim_{AB \rightarrow 0} \frac{V_A - V_B}{AB} = \frac{dV(x)}{dy} \quad (2)$$

เมื่อ V_A = ความเร็วที่จุด A
 V_B = ความเร็วที่จุด B

จากสมการสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อการเฉือนเพิ่มสูงขึ้น ความหนืดจะลดลง เนื่องจากการเฉือนเปลี่ยนแนวทางการไหล ทำให้การเกี่ยวพันกันของโครงสร้างโมเลกุลเปลี่ยนแปลง

2.3.7 ความเครียดเฉือน (Shear strain: γ) เกิดจากการกระจัด (Displacement) ในทิศทางการไหลต่อหนึ่งหน่วยของระยะทางที่ตั้งฉากในช่วงเวลานั้น

จาก

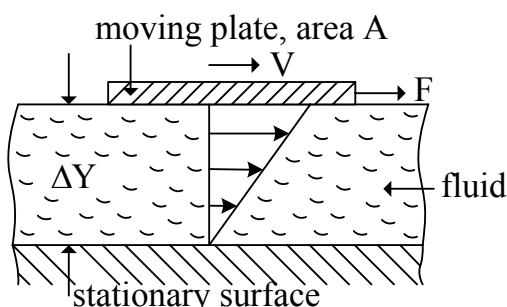
$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} \quad (3)$$

$$\gamma = \int \dot{\gamma} dt \quad (4)$$

$$\gamma_{AB} \cong \frac{X_A - X_B}{AB} = \frac{\Delta X}{\Delta Y} \Big|_{AB} = \tan \beta \quad (5)$$

จะเห็นว่าหน่วยของอัตราการเฉือน ($\dot{\gamma}$) มีหน่วยเป็นวินาที⁻¹ ในขณะที่ความเครียดเฉือน (Shear strain) ไม่มีหน่วย

2.3.8 ความเค้นเฉือน (Shear stress: τ) เป็นความเค้นเฉพาะ ที่จำเป็นโดยเกี่ยวกับการเสียรูป (Deformation) ดังภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 การเสียรูปที่เกิดจากการเฉือน [สมศักดิ์, 2548]

จะได้

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (6)$$

ขณะที่

$$\dot{\gamma} = \frac{V}{\Delta Y} \quad (7)$$

ความเค้นเฉือนมีหน่วยเป็น ปาสคาล (Pa)

2.3.9 ความหนืดที่เกิดจากการเฉือน (Shear viscosity: η) คือความต้านทานต่อการไหลที่เกิดจากการเฉือน ซึ่งในปริมาณวิเคราะห์ (Quantitative) หาความหนืดได้จากอัตราส่วนของความเค้นเฉือน (Shear stress) กับอัตราการเฉือน (Shear rate) ดังสมการที่ 8

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (8)$$

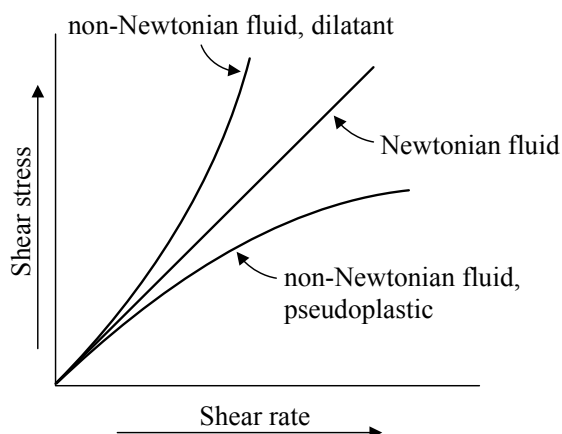
ความหนืดมีหน่วยเป็น ปาสคาล.วินาที (Pa.s)

2.3.10 ของไหลแบบนิวโทเนียน (Newtonian fluids) ของไหลชนิดนี้ ความหนืดไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการเฉือน โดยทั่วไปได้แก่ ของเหลวที่มีความหนืดต่ำและก๊าซ เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราการเฉือน จะได้กราฟเส้นตรง ดังภาพประกอบ 8

2.3.11 ของไหลแบบหนืดนิวโทเนียน (Non-Newtonian fluids) ของไหลชนิดนี้ ความหนืดขึ้นอยู่กับอัตราการเฉือน ดังภาพประกอบ 8 ของไหลประเภทนี้ ได้แก่

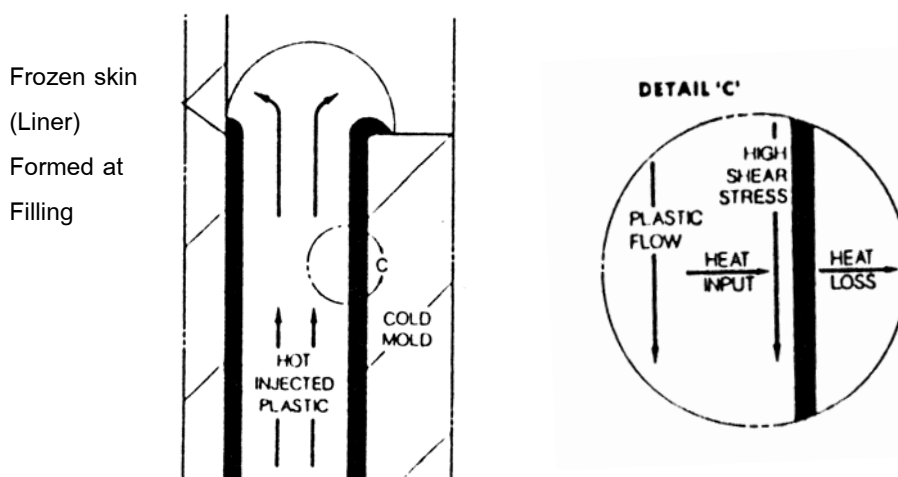
1. โพลีเมอร์ที่มีความหนืดสูง ได้แก่ พลาสติกเทียม (Pseudo plastics) หรือ เซียร์ทินนิง (Shear thinning) คือ โพลีเมอร์ที่มีความหนืดลดลง เมื่ออัตราการเฉือนเพิ่มขึ้น
2. ของไหลแบบไดลาแทนท์ (Dilatant) หรือ เซียร์ทิกเคนนิง (Shear thickening) คือ ของไหลที่มีความหนืดสูง เมื่ออัตราการเฉือนสูง ได้แก่ ทรายดูด (Quicksand) ทรายตามชายหาด (Moist beach sand) เป็นต้น
3. ของไหลแบบบิงกัมแฮม (Bingham plastics) เช่น น้ำซอสชนิดข้น (ketchup)
4. ทิไซโทรปีค (Thixotropic) ความหนืดของของไหลจำพวกนี้ จะลดลงไปตามเวลาของการกวน เมื่ออัตราการเฉือนคงที่ เช่น น้ำราดสลัด (Mayonnaise) และสี เป็นต้น
5. รีโอเพคติก (Rheopectic) ความหนืดของของไหลจำพวกนี้ จะเพิ่มขึ้นตามเวลาของการกวน เมื่ออัตราการเฉือนคงที่ เช่น แร่ยิปซัมที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ

จากภาพประกอบ 8 ของไหลประเภทที่ 1 2 และ 3 จัดเป็นของไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลา ในขณะที่ของไหลประเภท 4 และ 5 จะขึ้นอยู่กับเวลา



ภาพประกอบ 8 การไหลของของไหลชนิดต่างๆ [สมศักดิ์, 2548]

การไหลของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์นั้นเป็นเรื่องที่ซับซ้อน โดยปัจจัยทางด้านผนังโพรงแบบแม่พิมพ์ ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดที่พลาสติกเหลวแข็งตัว เมื่อพลาสติกเหลวเข้าสู่โพรงแบบ ผิวนอกของพลาสติกจะสัมผัสกับผนังโพรงแบบที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า จะกลายเป็นพลาสติกแข็งไปทันที ดังภาพประกอบ 9 ขณะที่แกนกลางของพลาสติกยังหลอมเหลวอยู่ พลาสติกเหลวที่ฉีดตามเข้าไป จะไหลอยู่ในแกนกลางนี้ โดยดันพลาสติกเหลวที่อยู่บริเวณนั้นให้ไหลต่อไป เกิดเป็นส่วนหน้าของการไหลขึ้นมาใหม่ การไหลของพลาสติกที่ถูกดันไปนี้เป็นการผสมกันระหว่าง การไหลไปข้างหน้า (Flow front) กับการไหลออกข้างนอก (Melt front) จะสัมผัสกับผนังของโพรงแบบ และกลายเป็นทางให้พลาสติกใหม่ที่ไหลเข้ามาตามช่องที่มีผนังเป็นพลาสติกแข็ง [Sachtling, 1987]



ภาพประกอบ 9 การเกิดชั้นพลาสติกแข็งในแม่พิมพ์เมื่อพลาสติกเหลวไหลเข้าสู่โพรงแบบ [วิวัฒน์ และ ชัยรัตน์, 2538]

พลาสติกเหลวจะไหลเต็มโพรงแบบหรือไม่นั้น ขึ้นอยู่กับความหนาของผลิตภัณฑ์ที่ฉีด ระยะทางที่พลาสติกเหลวไหลและตัวแปรในการฉีด คือ อุณหภูมิพลาสติกเหลวและแม่พิมพ์ วิธีการ

ที่ใช้กันมากในการออกแบบคือ อัตราส่วนเส้นทางไหล (Flow path ratio) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของระยะทางไหล กับ ความหนาของช่องทางไหล ดังตาราง 1 โดยมีข้อกำหนดว่า ถ้าอัตราส่วนเส้นทางไหลมากกว่าอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความหนาของหน้าตัดแล้ว การไหลของพลาสติกเหลวจะเต็มแม่พิมพ์ ความยาวของการไหลคือระยะทางวัดจากทางเข้า (Gate) ของพลาสติกเหลวไปถึงจุดที่ห่างที่สุดในโพรงแบบ ส่วนความหนาของช่องทางไหลอาจมีผลต่ออัตราส่วนนี้อยู่บ้าง แต่ผลิตภัณฑ์ฉีดพลาสติกมักจะมีความหนาที่ไม่แตกต่างกันมากนัก สิ่งที่น่าสนใจคือ อุณหภูมิพลาสติกเหลวในช่วงที่มีค่าสูง จะฉีดโดยที่มีอัตราส่วนเส้นทางไหลสูง ซึ่งอัตราส่วนนี้สามารถใช้เป็นแนวทางเกี่ยวกับการออกแบบกระบวนการฉีด

ตาราง 1 ค่าอัตราส่วนเส้นทางไหลของพลาสติกบางชนิด [วิวัฒน์ และ ชัยรัตน์, 2538]

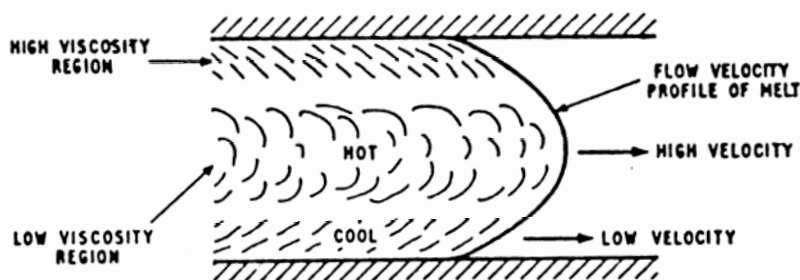
Thermoplastic	Flow path ratio
PPS	150
PP	150-350
PS	150
PS (toughened)	130
PSU	30-150
PVC (plasticized)	Up to 180
PVC (unplasticized)	60

2.4 การจัดเรียงทิศทางโมเลกุล (Orientation) และ การหดตัวของเทอร์โมพลาสติก

การควบคุมความหนืดของพลาสติกนั้น เพื่อให้แน่ใจว่าแม่พิมพ์จะถูกฉีดให้เต็มได้ โดยมีความดันตามต้องการ เพราะสิ่งนี้มีผลต่อการจัดเรียงทิศทางโมเลกุล และผลที่ตามมาคือสมบัติของผลิตภัณฑ์ในขั้นสุดท้าย [J.A.Brydson, 1989] ดังภาพประกอบ 10 พลาสติกเหลวที่ไหลเข้าโพรงแบบจะมีความเร็วที่แกนกลางสูงกว่าความเร็วที่ชั้นนอก เนื่องจาก

1. ความเสียดทานระหว่างพลาสติกเหลวกับผนังแม่พิมพ์
2. ที่ชั้นนอกจะมีความหนืดสูงกว่าเนื่องจากผนังแม่พิมพ์ทำให้อุณหภูมิลดลง

ความเร็วในการฉีดต่ำทำให้เกิดการเฉือน (Shear) และความหนืด (Viscosity) ของพลาสติกเหลวชั้นนอกมีค่าสูงขึ้นอีก โดยปกติสายโซ่โมเลกุลในพลาสติกเหลวจะมีสภาพเป็นเส้นสายขดกันอยู่ อย่างไรก็ตาม สายโซ่โมเลกุลบางส่วนอาจอยู่บริเวณที่มีความเร็วต่ำกว่าส่วนอื่น จึงมีความพยายามที่จะยืดสายดังกล่าวออกไปจากสภาพที่เป็นขดให้กลายเป็นเส้นตรงดังภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 สายโซ่โมเลกุลวางตัวไปตามบริเวณที่มีความเร็วในการไหลแตกต่างกันมีการยืดเป็นเส้นตรงและเกิดการจัดเรียงทิศทางโมเลกุล [วิวัฒน์ และ ชัยรัตน์, 2538]

การจัดเรียงทิศทางโมเลกุล คือ จำนวนของสายโซ่โมเลกุลที่มีการวางแนวและยืดให้ตรงมากขึ้นเพียงใดจะขึ้นอยู่กับ

1. อัตราการเฉือน (Shear rate) หากมีค่าต่ำทำให้มีเวลาสำหรับสายโซ่โมเลกุลในบริเวณที่มีความเร็วต่างกันในการจัดผลึกโดยปราศจากความเค้นส่วนเกินและทำให้ยืดออกได้น้อย

2. อุณหภูมิพลาสติกเหลวในระดับสูง ผลที่ตามมาคือความหนืดต่ำทำให้สายโซ่โมเลกุลจัดผลึกกัน โดยมีความเค้นต่ำ จึงลดการยืดตัวและการวางแนว

ปัจจัยเหล่านี้นิยมมีผลซึ่งกันและกัน อัตราการเฉือนต่ำแต่มีอุณหภูมิพลาสติกเหลวต่ำก็สามารถทำให้เกิดการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลได้มากเช่นกัน

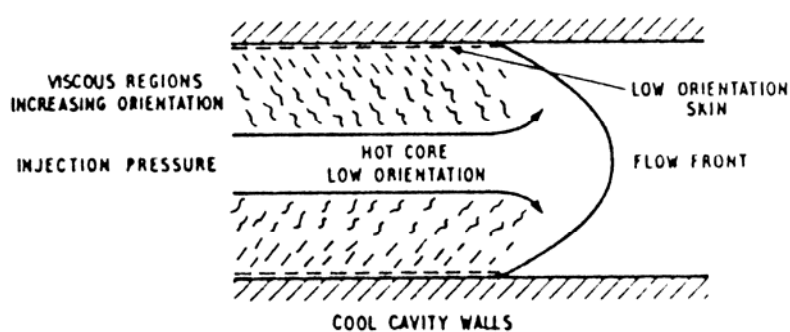
2.4.1 ผลของแม่พิมพ์และขนาดของทางเข้า (Gate) ที่มีต่อการจัดเรียงทิศทางโมเลกุล

สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงก็คือ รูปร่างของเส้นทางไหล (Sprue, Runner, Gate) ที่พลาสติกเหลวไหลผ่านซึ่งมีหน้าตัดขนาดใหญ่ ความเร็วของพลาสติกเหลวจะต่ำกว่าส่วนที่มีหน้าตัดขนาดเล็ก เพราะในรอบเวลาการฉีดหนึ่งๆ ปริมาตรพลาสติกที่เท่ากันจะใช้เวลาต่างกันในการไหลผ่านเส้นทางที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่เท่ากัน ดังนั้นเส้นทางไหลที่มีขนาดใหญ่จะมีอัตราการเฉือนต่ำ ความหนืดสูงและการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลจะเกิดขึ้นน้อยด้วย นี่ก็จุดสำคัญที่สุดในการหาขนาดของทางเข้า ขณะที่ทางเข้าขนาดเล็ก จะถูกชดเชยด้วยการลดความหนืดของพลาสติกเหลว ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มอัตราการเฉือนและอุณหภูมิที่เป็นผลมาจากพลาสติกเหลวไหลผ่านทางเข้าแคบทำให้มีความร้อนเกิดขึ้น แต่บางครั้งก็เป็นผลดี เช่น การเพิ่มอุณหภูมิพลาสติกเหลวจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ฉีด มีความมันเงา แต่ในกรณีอื่นจะทำให้พลาสติกเหลวที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ เช่น ไนลอน (Nylon) หรืออะคริลิก (Acrylic) จะมีไอน้ำระเหยออกมาเมื่อฉีดพลาสติกชนิดนี้ที่อุณหภูมิสูงๆหรือฉีดพลาสติกที่มีการเติมสารที่ระเหยได้ ไอน้ำหรือสารระเหยอาจควบแน่นที่ผนังแม่พิมพ์และเกิดรอยดำหนึ่ที่ผิว เช่น รอยคล้ายไมคา (Mica-marking) ขึ้นที่ผลิตภัณฑ์ ในกรณีคล้ายกันนี้คือพลาสติกที่ไม่เสถียรภาพทางความร้อน เช่น พีวีซี (PVC) อาจเกิดการแตกตัว ทำให้เกิดรอยที่ผิวได้เช่นกันหรือบางครั้งอาจทำคุณภาพของผลิตภัณฑ์ลดลง

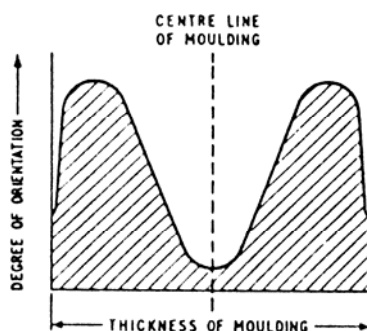
2.4.2 ลักษณะของการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลบริเวณความหนาของหน้าตัด

ในขณะที่พลาสติกเหลวไหลเข้าไปในโพรงแบบ ซึ่งมีความเร็วสูงในแกนกลางจะไหลออกทิศทางตั้งฉากทางไหล เมื่อสัมผัสกับผนังของแม่พิมพ์ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะแข็งตัวทันทีเนื่องจากพลาสติกส่วนนี้มีอุณหภูมิสูงและมีการเฉือนน้อยจึงมีการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลเพียงเล็กน้อย ทำให้ผิวของผลิตภัณฑ์เกิดการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลน้อย อย่างไรก็ตาม พลาสติกที่อยู่ถัดไปจากชั้นพลาสติกแข็งนี้จะยังคงหลอมเหลว เพราะมีชั้นพลาสติกแข็งภายนอกเป็นฉนวนกันไม่ให้พลาสติกเหลวสัมผัสกับผนังแม่พิมพ์ แต่พลาสติกเหลวยังคงสูญเสียความร้อนไปเรื่อยๆ จนมีความหนืดเพิ่มขึ้นภายใต้ความดันฉีด พลาสติกเหลวที่มีความหนืดสูงนี้จะไหลต่อไป ถึงแม้จะช้าลงกว่าที่แกนกลางก็ตาม การเฉือนภายใต้สภาพเช่นนี้ทำให้เกิดการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลมาก ดังภาพประกอบ 11

เมื่อพลาสติกเหลวไหลเต็มโพรงแบบ ไม่มีการเฉือน สามารถคลายตัวออกไปอยู่ในรูปขดปกติ การคลายตัวออกจะเป็นไปอย่างช้าๆ เนื่องจากความหนืดเพิ่มสูงขึ้น จะเกิดขึ้นเมื่อสิ้นสุดการเฉือน ผิวของพลาสติกที่ติดอยู่กับผนังแม่พิมพ์ จะเกิดการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลน้อย แต่พลาสติกที่อยู่ใกล้ผิวซึ่งเป็นส่วนที่มีการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลมาก จะเกิดการคลายตัวออกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากการสูญเสียความร้อนให้กับแม่พิมพ์เป็นไปอย่างรวดเร็ว ส่วนที่มีการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลมาก จะมีการคลายตัวออกมาก เพราะมีความร้อนสะสม การคลายตัวออกเช่นนี้ นำไปสู่ความแตกต่างของการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลตลอดความหนาของผลิตภัณฑ์ โดยมีค่าน้อยที่แกนกลาง และค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนถึงค่าสูงสุดที่บริเวณด้านข้างทั้งสองของเส้นกึ่งกลางในผลิตภัณฑ์ ความแตกต่างนี้แสดงดังภาพประกอบ 12 ลักษณะความแตกต่างนี้พลาสติกแต่ละชนิดจะไม่เหมือนกัน จะขึ้นอยู่กับสมบัติและสภาวะในการฉีด



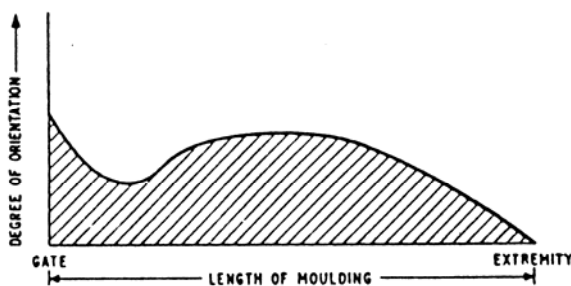
ภาพประกอบ 11 การจัดเรียงทิศทางโมเลกุลค่อยๆ เพิ่มขึ้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์ [วิวัฒน์ และ ชัยรัตน์, 2538]



ภาพประกอบ 12 ค่าการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลที่ส่วนต่างๆของความหนา [วิวัฒน์ และ ชัยรัตน์, 2538]

2.4.3 ลักษณะการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลตามทางไหลของพลาสติกเหลว

เมื่อพิจารณาการจัดเรียงทิศทางโมเลกุล ตามเส้นทางพลาสติกเหลวไหล พบว่าขึ้นอยู่กับ การเกิดชั้นพลาสติกเหลวซึ่งมีความหนืดและการเฉือนสูงบริเวณใกล้ผนังแม่พิมพ์ ความหนาของชั้น ดังกล่าวจะน้อยที่สุดตรงหน้าทางไหล เพราะเกิดขึ้นและเย็นตัวลงในระยะเวลาสั้นที่สุด ขณะที่ชั้น พลาสติกเหลวบริเวณใกล้ทางเข้าจะมีความหนามากที่สุด เพราะเกิดขึ้นก่อน อย่างไรก็ตามพลาสติก เหลวที่ไหลเข้ามาใหม่อย่างสม่ำเสมอ จะมีความร้อนและการเฉือนสูง เนื่องจากทางเข้าแคบ ทำให้ อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่บริเวณทางเข้าสูงขึ้น การเย็นตัวและการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลจึงเกิดขึ้นน้อยลง ความแตกต่างในการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลเกิดขึ้นตามความยาวของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเกิดขึ้นน้อยที่สุด ที่หน้าทางไหล และเพิ่มขึ้นมากที่สุดห่างจากทางเข้าระยะหนึ่ง ดังภาพประกอบ 13 การใช้อัตราการ ฉีดสูง ไม่เพียงทำให้พลาสติกเหลวไหลได้ดี เนื่องจากการลดความหนืด แต่ยังทำให้ไหลเข้าเต็ม แม่พิมพ์ก่อนที่จะเย็นตัวลง การจัดเรียงทิศทางโมเลกุลอาจเกิดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความหนืดที่มี อยู่หลังจากพลาสติกเหลวไหลเข้าเต็มแม่พิมพ์ แล้วยังคงให้ความดันย้ำ (Holding pressure) เพื่อส่ง พลาสติกเหลวเข้าไปชดเชยก่อนที่จะเย็นตัวลงและผลิตภัณฑ์เกิดการหดตัว (Shrinkage) อย่างไรก็ตาม เมื่อการย้ำพลาสติกเหลวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การจัดเรียงทิศทางโมเลกุลบริเวณทางเข้าเพิ่มขึ้น ด้วย



ภาพประกอบ 13 การจัดเรียงทิศทางโมเลกุลตามความยาวของผลิตภัณฑ์ [วิวัฒน์ และ ชัยรัตน์, 2538]

2.4.4 ผลของสภาพการฉีดที่มีต่อการเกิดการจัดเรียงทิศทางโมเลกุล

ผลของสภาพการฉีดพลาสติกและแม่พิมพ์ ที่มีต่อการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลนั้น แสดงดังภาพประกอบ 13 การเพิ่มอุณหภูมิพลาสติกเหลว จะลดความหนืด ความเค้นเฉือนและการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลลง อีกทั้งทำให้พลาสติกเหลว มีการคลายตัวออกมากขึ้น การลดความหนืดทำให้ความดันที่ถ่ายทอดจากเกลียวหนอนไปยังโพรงแบบเพิ่มขึ้น ในระหว่างพลาสติกเหลวไหลเข้าสู่โพรงแบบ อัตราการเฉือนและการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นในสภาวะต่างกัน การเปลี่ยนอุณหภูมิพลาสติกเหลว สามารถส่งผลให้ การจัดเรียงทิศทางโมเลกุลเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้อย่างไรก็ตาม การคลายตัวของสายโซ่โมเลกุลจะส่งผลให้เกิดการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลน้อยลงเวลาย่ำ (Holding time) ทำให้เกิดการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลมากขึ้น เนื่องจากพลาสติกเหลวส่วนหนึ่งถูกซัดเซยเข้าไปในพลาสติกเหลวที่กำลังเย็นตัวลง และเป็นเช่นนั้นจนกว่าความดันย่ำจะลดลงหรือพลาสติกเหลวที่ทางเข้าแข็งตัว การเพิ่มความเค้นเฉือนและอัตราการเฉือน ส่งผลให้การจัดเรียงทิศทางโมเลกุลเพิ่มขึ้นด้วย

การเพิ่มความหนาผลิตภัณฑ์ จะช่วยลดการจัดเรียงทิศทางโมเลกุล เพราะการเย็นตัวที่ช้าลงของหน้าตัดส่วนที่หนา จะทำให้ความหนืดลดลง เนื่องจากเกิดการสูญเสียความร้อนในการไหล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพิ่มเวลาในการคลายตัวออกให้นานขึ้น โดยชะลอการเย็นตัว การเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ ก็เป็นการลดการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลในผลิตภัณฑ์พลาสติกอีกด้วย

2.4.5 ผลของการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลที่มีต่อการหดตัว

ผลกระทบของการจัดเรียงทิศทางโมเลกุล คือ การทำให้พลาสติกมีการหดตัวมากขึ้น การเย็นตัวของพลาสติกเหลวด้วยการหล่อเย็น เป็นสาเหตุใหญ่ประการหนึ่งที่ทำให้เกิดการหดตัว ส่วนหนึ่งจะเกิดจากการคลายตัวของสายโซ่โมเลกุลที่มีการจัดเรียง ซึ่งเกิดขึ้นหลังจากพลาสติกเหลวไหลเข้าเต็มโพรงแบบแล้ว กรณีของการหดตัวจากการเย็นตัว อุณหภูมิพลาสติกเหลวในโพรงแบบสูงขึ้น การหดตัวก็จะมากขึ้น โดยเกิดขึ้นในช่วงการหล่อเย็น อย่างไรก็ตาม เมื่ออุณหภูมิพลาสติกเหลวสูงขึ้น ความหนืดจะน้อยลง ทำให้ความดันฉีดมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อความดันฉีดเท่ากัน พลาสติกเหลวที่อยู่ในโพรงแบบจะมีความดันสูง หากอุณหภูมิพลาสติกเหลวมีค่าสูงขึ้น จะทำให้การหดตัวมีค่ามากขึ้น ในทางกลับกัน เมื่ออุณหภูมิแม่พิมพ์คงที่ อุณหภูมิพลาสติกเหลวที่มีค่าสูง จะต้องใช้เวลาในการหล่อเย็นมาก ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพลาสติกเหลวที่มีโครงสร้างเป็นผลึก (Crystalline polymer) มีเวลาในการจัดผลึกกลายเป็นกลุ่มของผลึก ด้วยเหตุนี้ที่อุณหภูมิพลาสติกเหลวสูง ผลิตภัณฑ์จะมีความหนาแน่นสูงและปริมาตรเล็ก ในทำนองเดียวกัน เมื่ออุณหภูมิแม่พิมพ์เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการหล่อเย็นมากขึ้นเช่นกัน การฉีดพลาสติกที่มีโครงสร้างเป็นผลึก จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นสูง และผลที่ตามมาคือมีการหดตัวมาก

2.4.6 ผลจากการหดตัวไม่เท่ากันเนื่องจากการจัดเรียงทิศทางโมเลกุล

จะเห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่มีการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลมากขึ้น สายโซ่โมเลกุลจะวางแนวไปตามทิศทางการไหล แต่หลังจากพลาสติกเหลวหยุดไหล สายโซ่โมเลกุลจะพยายามคืนสู่สภาพปกติ

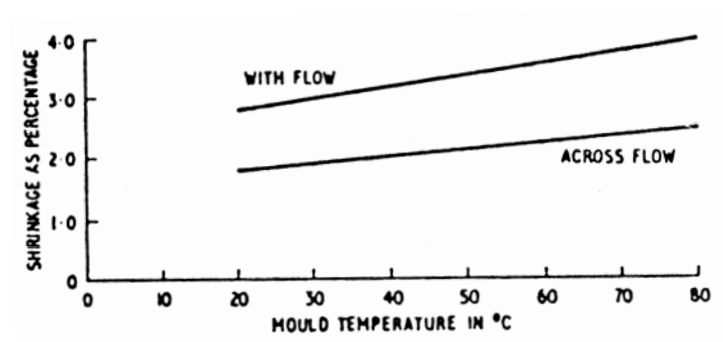
คือมีลักษณะเป็นขด ลักษณะเช่นนี้ ทำให้ความยาวของผลิตภัณฑ์ในทิศทางการไหลลดลง จำนวนสายโซ่โมเลกุล ที่วางแนวในทิศทางทำมุมกับเส้นทางไหล จะน้อยกว่าที่วางแนวในทิศทางการไหลอยู่มาก ด้วยเหตุนี้เมื่อเกิดการคลายตัวออก การหดตัวในทิศทางตั้งฉากกับการไหลจะมีค่าน้อย ดังตัวอย่างในตาราง 2 ถึงแม้ว่าค่าจริงสำหรับผลิตภัณฑ์จะขึ้นอยู่กับตัวแปรของพลาสติก และสภาพการฉีด เนื่องจากการการหดตัวโดยการเย็นตัว ซึ่งเกิดขึ้นในการฉีดพลาสติกโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous polymer) มีค่าน้อยกว่า พลาสติกโครงสร้างเป็นผลึกมาก พลาสติกที่มีโครงสร้างอสัณฐาน จึงมีการหดตัวน้อยกว่า ถึงแม้จะมีการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลที่ไม่เท่ากันในสองทิศทางอยู่ด้วยกันก็ตาม

ตาราง 2 การหดตัวในการฉีดพลาสติกที่มีการจัดเรียงทิศทางโมเลกุล [วิวัฒน์ และ ชัยรัตน์, 2538]

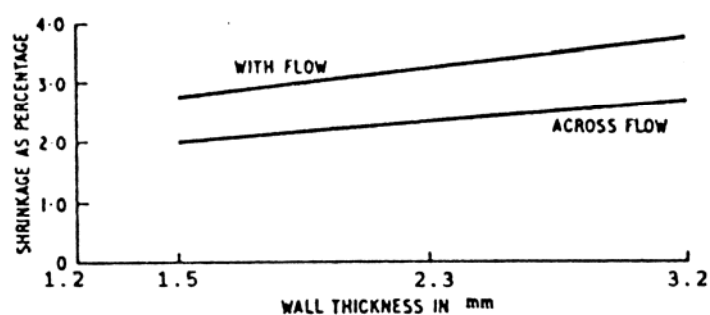
ชนิดของพลาสติก	การหดตัว (เปอร์เซ็นต์)	
	ในทิศทางการไหล	ตั้งฉากกับการไหล
Acetal Copolymer	2.0~2.2	1.8~2.1
Polypropylene	2.6~2.8	2.2~2.5
Polyethylene HD	2.8~3.2	1.8~2.0

2.4.7 ผลของสภาพการฉีดพลาสติกที่มีต่อการหดตัวเนื่องจากการจัดเรียงทิศทางโมเลกุล

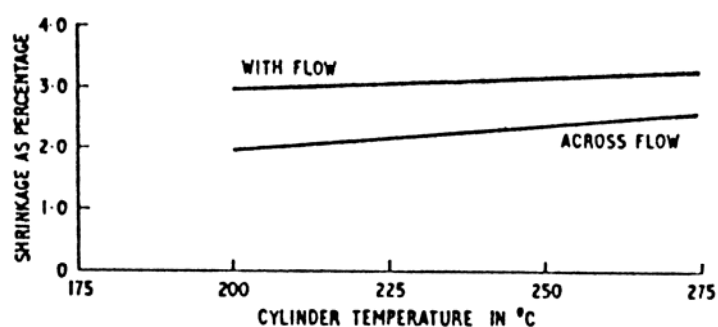
ขณะที่การเย็นเกิดขึ้นในพลาสติกเหลว ระหว่างที่ไหลเข้าสู่โพรงแบบทำให้เกิดการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลและความหนาของพลาสติกเหลวลดลงทันทีเมื่อการเย็นหยุดลง ความหนืดจะเพิ่มขึ้นและการคลายตัวของสายโซ่โมเลกุลไปอยู่ในรูปขดจะเกิดช้าลง อย่างไรก็ตาม สภาพการฉีดพลาสติกที่ใช้เวลานานกว่าในช่วงก่อนที่พลาสติกจะแข็งตัว ทำให้เพิ่มการคลายตัวของสายโซ่โมเลกุล เนื่องจากการคลายนี้จะเกิดก่อนในทิศทางที่มีการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลมากที่สุด ความแตกต่างของการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลในตอนแรกระหว่างทิศทางทั้งสองจึงลดลง ด้วยเหตุนี้สภาพการฉีดพลาสติกที่ทำให้เวลาในการคลายตัวออกนานขึ้น อาจได้ผลิตภัณฑ์ที่มีการหดตัวมากกว่า และมีความแตกต่างมากขึ้น ระหว่างการหดตัวในทิศทางการไหลกับทิศทางที่ตั้งฉากกับการไหล สภาพดังกล่าวก็คือ แม่พิมพ์ที่มีอุณหภูมิสูงและผลิตภัณฑ์ที่มีความหนา ผลที่เกิดขึ้นสามารถดูได้จากการฉีดโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene) ในภาพประกอบ 14 และ 15 การใช้อุณหภูมิพลาสติกเหลวสูง อาจทำให้การหดตัวเท่าเดิม มากขึ้นหรือน้อยลงได้ เพราะการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลลดลงและการเพิ่มความดันสูงขึ้น จะช่วยถ่วงดุลการเพิ่มการหดตัว เนื่องจากการเย็นตัวและการเพิ่มความหนาแน่นให้มีค่ามากขึ้นหรือน้อยลง ดังภาพประกอบ 16 การจัดเรียงทิศทางโมเลกุลลดลงเมื่ออุณหภูมิพลาสติกเหลวเพิ่มสูงขึ้น



ภาพประกอบ 14 ผลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อการหดตัวสำหรับ HDPE [วิวัฒน์ และ ชัยรัตน์, 2538]



ภาพประกอบ 15 ผลของความหนาผนังผลิตภัณฑ์ที่มีต่อการหดตัวสำหรับ HDPE [วิวัฒน์ และ ชัยรัตน์, 2538]



ภาพประกอบ 16 ผลของอุณหภูมิกระบอกฉีดที่มีต่อการหดตัวสำหรับ HDPE [วิวัฒน์ และ ชัยรัตน์, 2538]

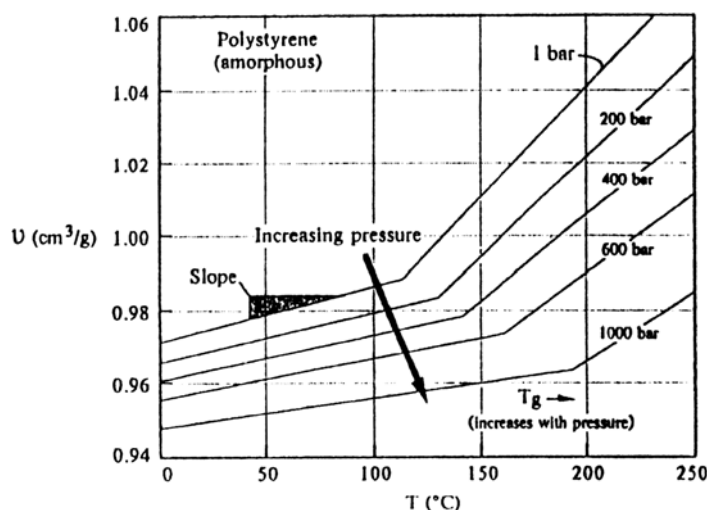
2.4.8 ผลของทางเข้า (Gate) ที่มีต่อการหดตัว

สิ่งที่ควรพิจารณาอีกอย่างหนึ่งก็คือ การใช้ทางเข้าแคบ เพราะทำให้การหดตัวเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลอาจเกิดมากหรือการเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อพลาสติก

เหลวไหลผ่านทางเข้าแคบๆ ต้องใช้เวลาในการคลายตัวออกมากขึ้น นอกจากนี้ทางเข้าที่มีขนาดเล็กทำให้พลาสติกเหลวบริเวณทางเข้าแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ความสามารถในการย่ำพลาสติกเพื่อชดเชยการหดตัวลดน้อยลง

2.4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตรจำเพาะและอุณหภูมิพลาสติกเหลว

เนื่องจากโพลิเมอร์ มีสมบัติการขยายตัวทางความร้อนในทิศทาง บวกและมีสถานะของการหลอมเหลวเป็นแบบอัดตัวสูง (Highly compressible molten stage) ทำให้ปริมาตรที่บ่งบอกการครอบคลุมนวลของวัสดุมีผลต่ออุณหภูมิและความดัน เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตรจำเพาะและอุณหภูมิพลาสติกเหลว มาเขียนเป็นแผนภูมิพบว่าโพลิเมอร์ประเภท อสังฐานกับโพลิเมอร์ประเภทกึ่งผลึกจะมีลักษณะแตกต่างกัน ดังภาพประกอบ 17 และ 18 แผนภูมิพีวีที (PvT diagram) แสดงให้เห็นถึงโพลิเมอร์ที่มีการอัดตัวมากขึ้น เมื่อมีการใช้อุณหภูมิพลาสติกเหลวและความดันมากขึ้นในกระบวนการฉีด ตัวแปรในกระบวนการฉีดที่มีผลได้แก่ ความดันย่ำ จะมีผลอย่างมากต่อขนาดของผลิตภัณฑ์ [Rosato, D.V. and Rosato, D.V.,1990]

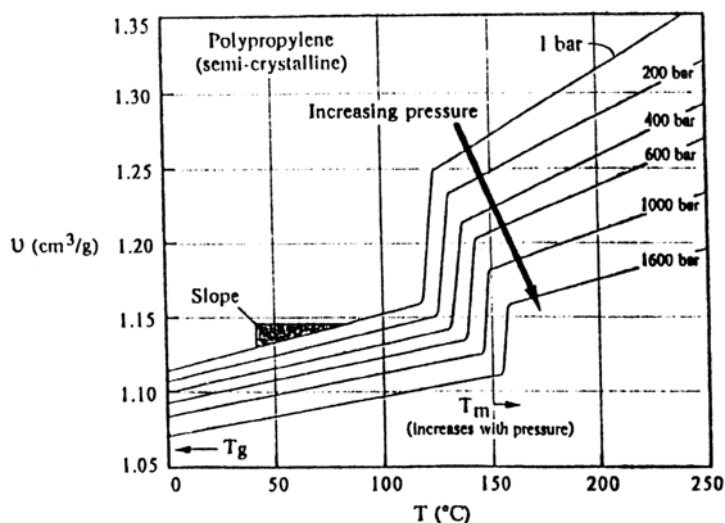


ภาพประกอบ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตรจำเพาะและอุณหภูมิโพลิสไตรีน [สมศักดิ์, 2548]

จากภาพประกอบ 17 พบว่าโพลิเมอร์ประเภทอสัณฐานและประเภทกึ่งผลึก (ภาพประกอบ 18) จะมีความคล้ายกัน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น กล่าวคือ ปริมาตรจำเพาะจะเพิ่มขึ้น (ความดันคงที่) เนื่องจากการขยายตัวทางความร้อนและปริมาตรจำเพาะจะลดลงตามความดัน (อุณหภูมิคงที่) เนื่องจากผลของความสามารถในการอัดตัว (Compressibility effects) แต่สิ่งที่แตกต่างกันคือวัสดุประเภทกึ่งผลึกจะมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดตรงอุณหภูมิที่เกิดการหลอมเหลว เมื่อโพลิเมอร์ประเภทกึ่งผลึกในโพรงแบบเย็นตัวลง ในขณะที่ส่วนของอสัณฐานที่หลอมเหลวแล้ว จะเป็นและ

แข็งตัวเมื่อถึงอุณหภูมิของการเป็นผลึกแล้ว ด้วยเหตุนี้ปริมาตรจำเพาะจึงลดลงในช่วงที่มีการเปลี่ยนวัฏภาค (Phase) โดยโมเลกุลของโพลิเมอร์จะรวมตัวกันเป็นผลึกมากขึ้นในบริเวณที่เกิดผลึก

จากภาพประกอบ 18 การเปลี่ยนวัฏภาคของโพลิเมอร์ประเภทกึ่งผลึกจาก โพลิเมอร์ประเภทอสัณฐานไปเป็นโพลิเมอร์ประเภทกึ่งผลึก ซึ่งมีผลต่อการหดตัวมากกว่าโพลิเมอร์ประเภทอสัณฐาน เพราะการหดตัวขึ้นอยู่กับความดันที่ใช้ชัดเจนเนื่องจากความร้อน



ภาพประกอบ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตรจำเพาะและอุณหภูมิโพลิโพรพิลีน [สมศักดิ์, 2548]

2.4.10 ผลของกระบวนการฉีดที่มีต่อการหดตัว (Shrinkage)

การหดตัว เกิดจากการอัดตัวและการขยายตัวของพลาสติกเหลวเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งพลาสติกเหลวที่มีโครงสร้างเป็นผลึก (Crystalline) จะมีการหดตัวมาก เนื่องจากการเปลี่ยนสถานะโครงสร้างในส่วนที่เป็นผลึก ในทางทฤษฎีสามารถหาขนาดของการหดตัวได้จากแผนภูมิ ความดัน ปริมาตรจำเพาะและอุณหภูมิพลาสติกเหลว ซึ่งได้มาจากการวัดอย่างเหมาะสม ผลิตภัณฑ์ที่สามารถหดตัวได้อย่างอิสระ ดังสมการการหดตัวของปริมาตร S_v

$$S_v = \frac{V_c - V}{V_c} = 1 - \frac{V}{V_c} \quad (9)$$

V_c คือปริมาตรของโพรงแบบที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ (cm^3)

V คือปริมาตรของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ (cm^3)

ผลิตภัณฑ์เริ่มหดตัวและมีขนาดเล็กกว่าโพรงแบบ เมื่อความดันในโพรงแบบลดลงหลังจากทางเข้าแข็งตัว (Gate freezes) ในขณะนี้ ความดันยังไม่สามารถเติมพลาสติกเหลวเข้าไปในโพรงแบบได้อีกและน้ำหนัก G ไม่เปลี่ยนแปลง

$$G = \frac{V_c}{V_{p=1}} \quad (10)$$

น้ำหนักนี้จะเท่ากับน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นสุดท้ายที่อุณหภูมิบรรยากาศ

$$G = \frac{V_c}{V_{Ta}} \quad (11)$$

จากสมการที่ 10 และ 11 จะคำนวณอัตราส่วนปริมาตรได้

$$\frac{V}{V_c} = \frac{V_{Ta}}{V_{p=1}} \quad (12)$$

ดังนั้น ขนาดของการหดตัวคือ

$$S_v = 1 - \frac{V_{Ta}}{V_{p=1}} \quad (13)$$

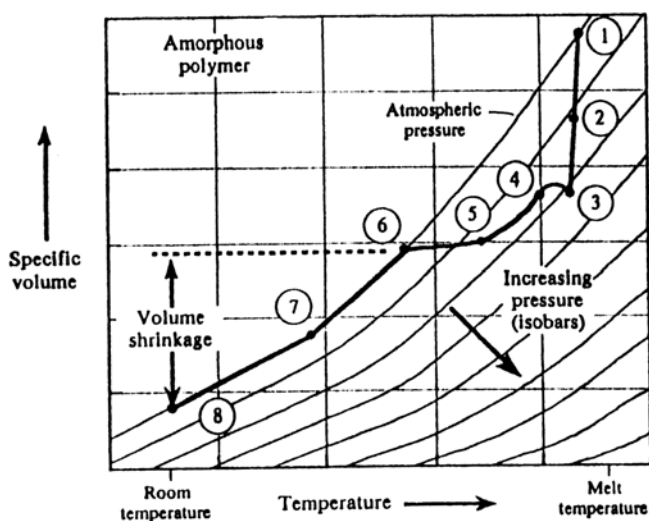
$V_{p=1}$ คือปริมาตรจำเพาะของพลาสติกที่ความดันบรรยากาศ (cm^3/g)

V_{Ta} คือปริมาตรจำเพาะที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ (cm^3/g)

ถ้าวัดความดัน และ อุณหภูมิพลาสติกเหลวในขณะฉีด ดังภาพประกอบ 19 นำผลที่ได้มาบันทึกลงในแผนภูมิพีวีที (PvT diagram) ของวัสดุ จะสามารถหาปริมาตรจำเพาะทั้งสองได้ทันที

$V_{p=1}$ จะตรงกับปริมาตรจุดที่ 6

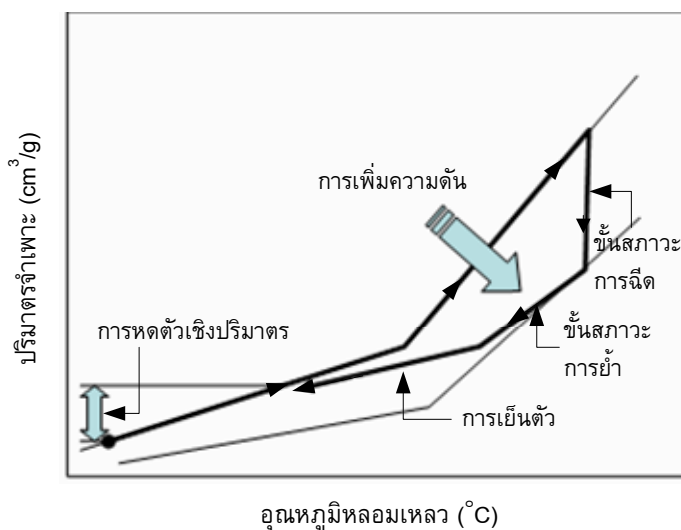
V_{Ta} จะตรงกับปริมาตรจุดที่ 8



ภาพประกอบ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตรจำเพาะและอุณหภูมิหลอมเหลว ในกระบวนการฉีด [สมศักดิ์, 2548]

จากภาพประกอบ 19 และ 20 สามารถอธิบายลักษณะการทำงานเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

- (1) ความดันเพิ่มขึ้น ในขณะที่พลาสติกเหลวที่อยู่ส่วนหน้าของปลายเกลียวไหลผ่านทางริง (Runner) ไหลเข้าใกล้ทางเข้า (Gate) จนถึงโพรงแบบ
- (1)-(2) พลาสติกเหลวไหลเข้าเต็มโพรงแบบ
- (2) พลาสติกเหลวเต็มโพรงแบบ (ความดันเท่ากับศูนย์)
- (2)-(3) เข้าสู่ขั้นการย่ำ (Packing phase)
- (3) สลับจากความดันฉีด (Injection pressure) ไปเป็นความดันย่ำ (Holding pressure)
- (3)-(4) การสลับระหว่างความดันย่ำกับความดันที่สูญเสียไป เนื่องจากวัสดุเกิดการไหลกลับเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความดันขึ้น
- (4) ความดันลดลงถึงระดับความดันย่ำ
- (4)-(5) ความดันลดลง เนื่องจากการหล่อเย็นโดยพลาสติกเหลวยังคงไหลต่อไป เพื่อชดเชยการหดตัวที่เกิดขึ้นเป็นผลทำให้ปริมาตรจำเพาะลดลง
- (5) ทางเข้าแข็งตัว (Freeze-off) ป้องกันไม่ให้วัสดุไหล จัดเป็นขั้นสุดท้ายของขั้นการย่ำ
- (5)-(6) ความดันลดลง ในขณะที่ผลิตภัณฑ์เย็นตัวลงและหดตัว (Shrinkage) โดยไม่มีการชดเชยใดๆ
- (6) ความดันลดลงถึงความดันบรรยากาศ
- (6)-(7) ผลิตภัณฑ์เย็นตัวลงด้วยความดันคงที่
- (7) แม่พิมพ์เปิดออก ผลิตภัณฑ์ถูกปลดออก
- (8) ความสมดุลทางความร้อนจัดเป็นปริมาตรสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ (ไม่คำนึงถึงสัณฐานวิทยาหรือความชื้นที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตร)



ภาพประกอบ 20 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน ปริมาตรจำเพาะและอุณหภูมิหลอมเหลว ในกระบวนการฉีด (ประเภทอัสถฐาน) [R. Abbott, 2003]

2.4.11 ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัว

การหดตัวขึ้นอยู่กับตัวแปรในการฉีดพลาสติก เช่น

1. ความดัน
2. อุณหภูมิ
3. อัตราการฉีดพลาสติก

และขึ้นอยู่กับปัจจัยทางด้านผลิตภัณฑ์ เช่น

1. ความหนาของผนัง
2. ระยะห่างจากทางเข้า

รวมทั้งขึ้นอยู่กับปัจจัยทางด้านชนิดของพลาสติก เช่น

1. ชนิดและปริมาณสารที่เติม (Filler)
2. ระดับของความเป็นผลึก (Degree of crystalline) เป็นต้น

ดังนั้นการคำนวณค่าที่แน่นอนของการหดตัวจึงไม่อาจทำได้ วิธีที่ดีที่สุดคือการเรียนรู้จากการทดลอง ดังค่าการหดตัวที่ให้ไว้ในตาราง 3

ตาราง 3 การหดตัวของเทอร์โมพลาสติกบางชนิด [วิวัฒน์ และ ชัยรัตน์, 2538]

Material	% Shrinkage	Material	% Shrinkage
PA 6 (Nylon)	1.0-1.5	PC	0.8
PA 6-GF	0.5	POM	2.0
PA 66	1.0-2.0	PVC rigid	0.5-0.7
PA 66-GF	0.5	PVC soft	1.0-3.0
LDPE	1.5-3.0	ABS	0.4-0.6
HDPE	2.0-3.0	PP	1.2-2.0
PS	0.5-0.7	CA	0.5
SAN	0.4-0.6	CAB	0.5

หลักปฏิบัติโดยทั่วไปคือ ควรตรวจสอบการหดตัวของผลิตภัณฑ์ที่ฉีดครั้งแรก ในการทดสอบแม่พิมพ์ที่ยังไม่ได้ชุบแข็ง หากจำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงสิ่งใดก็ยังสามารถทำได้ในตอนนี้ ดังนั้นผู้ออกแบบแม่พิมพ์ควรใส่ใจกับเรื่องนี้คือ

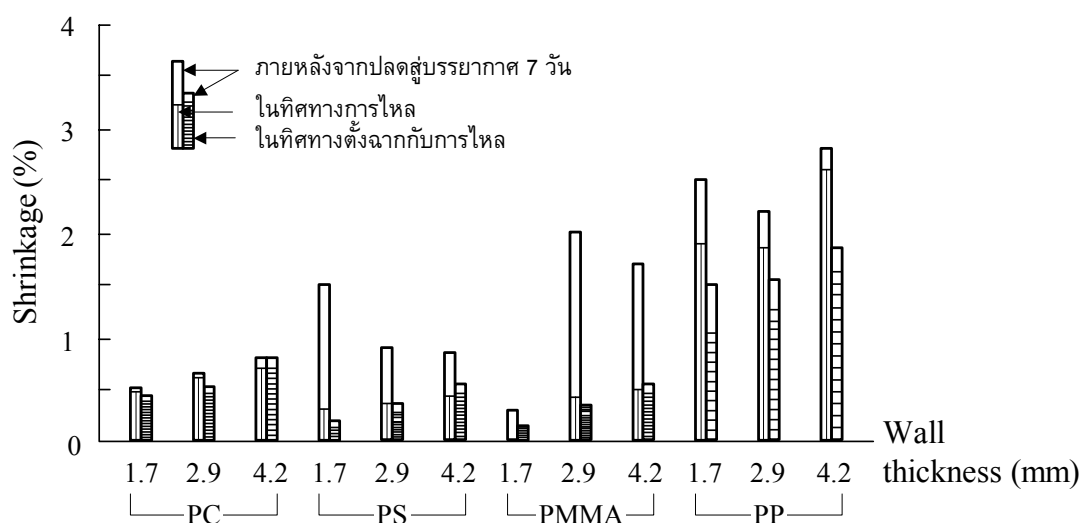
1. เพื่อขนาดคอร์ให้ใหญ่
2. เพื่อขนาดโพรงแบบให้เล็ก

ลักษณะเช่นนี้ทำให้แก้ไขได้โดยการตัดปาดเนื้อโลหะออก สุดท้ายจะต้องเผื่อการหดตัวภายหลังของพลาสติกโครงสร้างเป็นผลึกด้วย ซึ่งอาจมีค่าประมาณ 10% ของการหดตัวเมื่อ

ผลิตภัณฑ์ถูกปลดสับรรยากาศ การหดตัวภายหลังจะน้อยลงเมื่ออุณหภูมิพลาสติกเหลวสูงขึ้น โดยเฉพาะอุณหภูมิแม่พิมพ์ เพราะการจัดโครงสร้างให้เป็นผลึก (Crystallization) เกือบจะเสร็จสมบูรณ์ในระหว่างกระบวนการฉีด

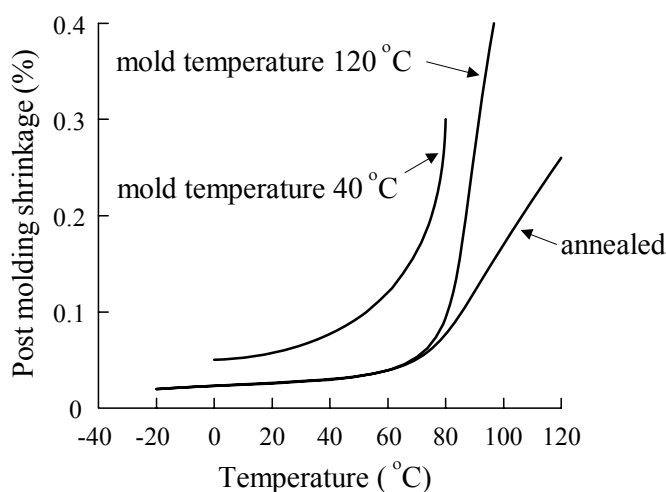
2.4.12 การหดตัวภายหลัง (Post molding shrinkage)

หลังจากผลิตภัณฑ์ถูกปลดสับรรยากาศแล้ว ขนาดของผลิตภัณฑ์ยังสามารถเปลี่ยนไปได้ ซึ่งขึ้นกับพลาสติกหลายชนิด ด้วยสาเหตุจากการปรับโครงสร้างให้มีเสถียรภาพ และจากที่อธิบายไปแล้วข้างต้น [Rosato, D.V. and Rosato, D.V., 1995] การเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัด จะเกิดขึ้นกับพลาสติกโครงสร้างอสัณฐาน โดยเฉพาะพลาสติกไฮโกรสโคปิก (Hygroscopic) ที่สามารถปรับความชื้นถึงระดับปกติ แต่สำหรับพลาสติกโครงสร้างกึ่งผลึก การจัดโครงสร้างให้เป็นผลึกยังเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการหดตัวภายหลัง การหดตัวส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นใน 24 ชั่วโมงแรกหลังจากกระบวนการเสร็จสิ้น และต่อจากนั้นจะเกิดขึ้นที่ละน้อยอย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง การจัดผลึกโครงสร้างที่เกิดขึ้นภายหลังจะมีอัตราเพิ่มอย่างสม่ำเสมอ พลาสติกไฮโกรสโคปิก เช่น ไนลอน การดูดความชื้นจะทำให้เกิดการจัดผลึกโครงสร้างได้ง่ายขึ้น แม้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง แต่การหดตัวภายหลังที่เกิดขึ้นจะลดลงบางส่วนจากการขยายตัว เนื่องจากมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น การดูดความชื้นเป็นปัจจัยที่สำคัญของพลาสติกชนิดนี้ ในการควบคุมขนาดหลังจากกระบวนการเสร็จสิ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการเปลี่ยนขนาดอาจเพิ่มขึ้นทั้งในพลาสติกโครงสร้างกึ่งผลึกและอสัณฐาน จากสาเหตุการคลายความเค้น (Orientation stress) ที่อุณหภูมิใกล้กับจุดอ่อนตัว (Softening point) ดังภาพประกอบ 21 แสดงการหดตัว (Shrinkage) และการหดตัวภายหลัง (Post molding shrinkage) ของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติกชนิดและความหนาต่างกัน อย่างไรก็ตาม ควรทำความเข้าใจว่าการหดตัวภายหลังจะเกิดที่อุณหภูมิสูงและไม่ส่งผลถึงการใช้งานที่อุณหภูมิอื่น แต่เป็นการแสดงถึงข้อจำกัดที่ต้องพิจารณาเมื่อผลิตภัณฑ์ถูกใช้ที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานาน



ภาพประกอบ 21 การหดตัวและการหดตัวภายหลังของพลาสติกชนิดต่างๆในการทดลองฉีด [วิวัฒน์ และ ชัยรัตน์, 2538]

โดยทั่วไปการหดตัวและการหดตัวภายหลัง จะเกิดขึ้นในทิศทางการไหลมากกว่าในทิศทางตั้งฉากกับการไหล เพราะมีการคลายตัวออกในทิศทางการไหลมากกว่า ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนามาก จะมีการหดตัว การคลายตัวออก การจัดผลึกโครงสร้างมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่มีผนังบาง เนื่องจากเย็นตัวช้ากว่า แต่การหดตัวภายหลังจะน้อยกว่า เพราะการจัดเรียงทิศทางโมเลกุลที่เป็นสาเหตุของการหดตัวภายหลังได้คลายตัวออกในหน้าตัดส่วนหนาระหว่างกระบวนการฉีดและความหนาแน่นจริงกับความหนาแน่นสูงสุดจะต่างกันไม่มาก สภาพการฉีดที่นำไปสู่การจัดเรียงทิศทางโมเลกุลเกิดขึ้นน้อยที่สุดและความหนาแน่นสุดท้ายมากที่สุด จะช่วยลดการหดตัวภายหลัง ดังภาพประกอบ 22 ซึ่งเป็นผลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อการหดตัวภายหลังสำหรับพลาสติกอะซีทัล (Acetal) การใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์สูงกว่าจะมีการหดตัวภายหลังน้อยกว่าและทำให้ผลิตภัณฑ์สามารถทนต่อการเสียรูปได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าผลิตภัณฑ์ ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์เย็น โดยไม่เกิดการหดตัว



ภาพประกอบ 22 ผลของอุณหภูมิแม่พิมพ์และการบ่มที่มีต่อการหดตัวภายหลังของ POM (Acetal) [วิวัฒน์ และ ชัยรัตน์, 2538]

2.5 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method)

ปัจจุบันวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) เข้ามามีบทบาทและเกิดประโยชน์อย่างมากในงานวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรม เป็นวิธีหนึ่งที่ยอมรับใช้เพื่อช่วยในการออกแบบผลิตภัณฑ์ เนื่องจากสามารถแก้ปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการออกแบบโดยอาศัยการทดลอง ซึ่งบางปัญหานั้นต้องใช้ค่าใช้จ่ายจำนวนมากสำหรับการทดลองในอดีต เช่น การทำนายพฤติกรรมของไหลรอบเครื่องบินโดยสารขนาดใหญ่ เพื่อให้ทราบถึงแรงยกและเสถียรภาพในขณะที่ทำการบิน เป็นต้น [เสฏฐวรธ, 2545] การใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาด้านพลศาสตร์ของไหลนั้น ขึ้นอยู่กับ 3 องค์ประกอบ ได้แก่

2.5.1 ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equations)

การวิเคราะห์ปัญหาการไหลนั้น ประกอบด้วยระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่แสดงถึงการอนุรักษ์มวล โมเมนตัมและพลังงาน สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเหล่านี้ ประกอบด้วยพจน์ต่างๆ ที่อยู่ในรูปแบบเชิงอนุพันธ์ (Derivative terms) ดังเช่น ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหลแบบมีความหนืดภายใต้สภาวะคงตัวในสามมิติ โดยคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ประกอบด้วยระบบสมการเชิงอนุพันธ์ทั้ง 5 สมการนี้ ซึ่งมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่า 5 ตัว ดังนี้ ความเร็ว u ในแนวแกน x , ความเร็ว v ในแนวแกน y , ความเร็ว w ในแนวแกน z โดยที่อุณหภูมิ T และความดัน p เป็นฟังก์ชันของทั้ง x, y และ z ในสมการทั้ง 5 ข้างต้นนี้ ρ แทนค่าความหนาแน่น σ, τ แทนความเค้นในแนวตั้งฉากและความเค้นเฉือน ตามลำดับ g แทนค่าความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก β แทนสัมประสิทธิ์แรงลอยตัว เนื่องจากอุณหภูมิ (T) ที่สูงกว่าอุณหภูมิเฉลี่ย T_0 , c แทนความร้อนจำเพาะ, Q แทนปริมาณความร้อนที่ผลิตเองได้ และ k แทนค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ในการแก้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ดังแสดงข้างต้น มีความซับซ้อนเนื่องจากเป็นระบบสมการที่สัมพันธ์กันและอยู่ในรูปแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น อันเป็นผลทำให้การประยุกต์ผลลัพท์เชิงตัวเลขมีความซับซ้อนมากขึ้นไปด้วย

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial(\sigma_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{xy})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{xz})}{\partial z} + \rho g_x [1 - \beta(T - T_0)] \quad (15)$$

$$\frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(\sigma_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{yz})}{\partial z} + \rho g_y [1 - \beta(T - T_0)] \quad (16)$$

$$\frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial(\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(\sigma_z)}{\partial z} + \rho g_z [1 - \beta(T - T_0)] \quad (17)$$

$$\rho c \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho Q + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (18)$$

2.5.2 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions)

ในกระบวนการแก้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยนั้น เงื่อนไขขอบเขตเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอันจะก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่แตกต่างกันไป เงื่อนไขขอบเขตที่เปลี่ยนแปลงไปจะก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่มีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน

2.5.3 ลักษณะรูปร่าง (Part geometry)

รูปแบบของปัญหาด้านพลศาสตร์ของไหล โดยทั่วไปในงานวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ล้วนมีรูปร่างที่ซับซ้อน หากลักษณะรูปร่างซึ่งครอบคลุมพื้นที่ของการไหลมีการเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้พฤติกรรมของการไหลที่เกิดขึ้นนั้นเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน ถึงแม้ว่าระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยและเงื่อนไขขอบเขตยังเป็นเช่นเดิม

ปัจจุบัน ได้้นำการแก้ปัญหาด้านพลศาสตร์ของไหลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มาประดิษฐ์เป็น โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปจำหน่ายจำนวนมาก โปรแกรมเหล่านี้ทำการหาผลลัพธ์ด้วยการแก้ องค์ประกอบหลักทั้งสามดังกล่าวข้างต้น โดยขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ประกอบด้วยสามขั้นตอนใหญ่ ๆ คือ (ก) ขั้นตอนการสร้างลักษณะรูปร่างของปัญหาและเงื่อนไข ขอบเขต ซึ่งเป็นขั้นตอนของกระบวนการขั้นต้น (Pre-processor) (ข) ขั้นตอนการวิเคราะห์ แก้ปัญหา (Analysis) ซึ่งเป็นหัวใจของการคำนวณภายในโปรแกรม และ (ค) ขั้นตอนของ กระบวนการขั้นสุดท้าย (Post-processor) เพื่อการแสดงผลที่ได้จากการคำนวณ

(ก) กระบวนการขั้นต้น (Pre-processor) กระบวนการขั้นต้นเริ่มจากการสร้างโดเมนของการ ไหลที่ต้องการทำการวิเคราะห์ เป็นขั้นตอนนับตั้งแต่การสร้างเส้นขอบ การสร้างพื้นผิว รวมไปถึง การสร้างปริมาตรหากเป็นการไหลในสามมิติ จากนั้นจึงแบ่งโดเมนของการไหลที่สร้างขึ้นนี้ออกเป็น เอลิเมนต์เล็ก ๆ หรือออกเป็นเมช (Mesh) ย่อย ๆ โดยเส้นตารางเหล่านี้ตัดกันที่จุดต่อแล้วจึง กำหนดสมบัติของของไหลและเงื่อนไขขอบเขตสำหรับปัญหานั้นตามลำดับ

(ข) ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Analysis) ขั้นตอนการวิเคราะห์จัดว่าเป็นหัวใจของโปรแกรม คอมพิวเตอร์สำเร็จรูปเหล่านี้ เป็นการนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาประยุกต์เข้ากับระบบสมการเชิง อนุพันธ์เพื่อหาผลลัพธ์ของการไหลที่จุดต่อ ได้แก่ ความเร็ว ความดันและอุณหภูมิ เป็นต้น

(ค) กระบวนการขั้นสุดท้าย (Post-processor) ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนของการ วิเคราะห์การไหลนั้น โดยปกติจะมีจำนวนมากซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนของจุดต่อ โดยอยู่ในรูปแบบของ ค่าตัวเลข หากต้องการเข้าใจในพฤติกรรมของสภาวะการไหลจะต้องนำค่าเหล่านี้มานำเสนอพร้อม กัน ซึ่งสามารถทำได้ในหลายรูปแบบ ได้แก่ การพล็อตเวกเตอร์ ณ ทุก ๆ จุดต่อตลอดทั้งโดเมนของ การไหลเพื่อแสดงขนาดและลักษณะทิศทางของการไหล การพล็อตด้วยเส้นชั้น (Contour lines)

ในการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะใช้วิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลขรวมอยู่ด้วย ซึ่งเป็น สมการที่ประยุกต์มาจากสมการของสเปนเซอร์และกิลมอร์ (Spencer and Gilmore) ในแบบสอง โดเมน (Double domain) เรียกว่า เทตพีวีทีโมเดล (Tait PvT model) [10] ดังนี้

$$v(T, p) = v_0(T) \left\{ 1 - C \ln \left(1 + \frac{p}{B(T)} \right) \right\} + v_t(T, p) \quad (19)$$

และ

$$\left. \begin{aligned} v_0(T) &= b_{1m} + b_{2m} \bar{T} \\ B(T) &= b_{3m} e^{-b_{4m} \bar{T}} \\ v_t(T, p) &= 0 \end{aligned} \right\} \text{for } T > T_t, \quad (20)$$

$$\left. \begin{aligned} v_0(T) &= b_{1s} + b_{2s}\bar{T} \\ B(T) &= b_{3s}e^{-b_{4s}\bar{T}} \\ v_t(T, p) &= b_7e^{(b_8\bar{T}-b_9p)} \end{aligned} \right\} \text{for } T < T_t, \quad (21)$$

โดยที่

p = ความดัน (bar)

T = อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{K}$)

v = ปริมาตรจำเพาะ (cm^3/g)

v_0 = ปริมาตรจำเพาะในสภาวะสุดท้าย (cm^3/g)

v_t = ปริมาตรจำเพาะ ณ เวลาใดๆ (cm^3/g)

$T_t = b_5 + b_6p$ คือ อุณหภูมิกระบวนการฉีด ($^{\circ}\text{K}$)

$\bar{T} = T - b_5$ คือ ผลต่างของสภาวะในรูปอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{K}$)

b_1 to b_9 คือ สัมประสิทธิ์ของสภาวะในรูปอุณหภูมิ

$C = 0.0894$ (ค่าคงที่)

ใน (19) ถึง (21) เป็นสมการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตรจำเพาะและอุณหภูมิพลาสติกเหลว ดังภาพประกอบ 17 และ 18 ของโพลิเมอร์ทั้งสองชนิดและสภาวะของกระบวนการ โดยสามารถคำนวณค่าการหดตัวเชิงปริมาตรได้

2.6 คุณภาพของโมเดล (Model) และเมช (Mesh) ในงานไฟไนต์เอลิเมนต์

เอ็น เอฟ ดับเบิลยู เอ/ เอ็น เฮช ที เอส เอ [NFWA/NHTSA, 2003] ได้ให้คำแนะนำในการสร้างเมช (Mesh) ของไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังต่อไปนี้

1. พิจารณาแบบ (Layout) และรายละเอียดของแต่ละส่วนให้สมบูรณ์ของเส้นและข้อมูลของแคด (Computer Aided Design: CAD)
2. จัดเตรียมรูปทรง (Geometry) สำหรับใช้ทำเมชและขัดเกลาให้เหมาะสมกับผิวงาน
3. พิจารณาดำเนินการของการตอกกันระหว่างชิ้นส่วนที่ประชิดกันอยู่และตำแหน่งวางรูปทรงของเมชที่เป็นแบบเดียวกันตลอดแนวที่ขอบชิดร่วมกันอยู่
4. การตรวจสอบคุณภาพเมช เช่น สัดส่วนของรูปร่าง (Aspect ratio) มุมบิด (Warp angle) โดยหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนรูปแบบรวดเร็วจากเมชขนาดเล็กไปสู่เมชขนาดใหญ่ (Fast Transitions)
5. ทำการประกอบส่วนต่างๆ ของเมชเข้าด้วยกัน เพื่อใช้อธิบายปัญหาของโมเดลอย่างสมบูรณ์

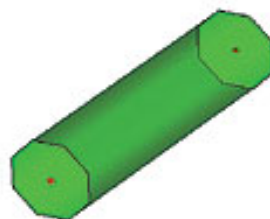
6. ตรวจสอบให้แน่ใจว่าโมเดลที่ใช้ไม่มีจุดต่ออิสระ ไม่มีมุมขอบอิสระ ไม่มีการซ้อนกันของเมชที่ไม่ต้องการซึ่งอาจเกิดขึ้นระหว่างส่วนต่างๆ
7. กำหนดลักษณะขอบเขตของจุดซึ่งมีเงื่อนไขขอบ (Boundary condition) ที่นำมาใช้
8. สำหรับบริเวณที่สำคัญของโครงสร้างแนะนำให้ใช้เมชขนาด 10 ถึง 15 mm
9. แนะนำให้ใช้เมชขนาด 20 ถึง 25 mm ในบริเวณที่ไม่สำคัญมากนัก
10. รูปเส้นเมช (Mesh lines) ต้องขนานและตั้งฉากกับแนวขอบเขตของรูปทรง
11. ขนาดของเมชต้องมีลักษณะคล้ายคลึงกันทั่วผิวด้าน
12. การเชื่อมต่อกันระหว่างขนาดของเอลิเมนต์ต่อเอลิเมนต์ควรเรียบสว

2.7 การเมชโมเดล (Model mesh) [Michelle M., 2004]

การเมชโมเดลเป็นการสร้างให้เอลิเมนต์ (Elements) หลากๆเอลิเมนต์เชื่อมต่อกันโดยในแต่ละเอลิเมนต์ที่เชื่อมต่อกันจะมีโนด (Nodes) อยู่ทุก ๆมุม ซึ่งในโปรแกรมโมลโฟลพลาสติกอินไซต์ เวอร์ชัน 4.0 (Moldflow Plastics Insight V4.0) ใช้สมบัติของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมในการวิเคราะห์ โดยจะคำนวณทุกๆโนดที่พบบนโมเดล ชนิดของเมชที่รองรับโปรแกรมมี 4 ชนิดดังนี้

2.7.1 เมชแบบบีม (Beam mesh elements)

เอลิเมนต์ในรูปของบีม (Beam) คือตัวอย่างของเอลิเมนต์หนึ่งมิติที่เชื่อมต่อกันด้วยโนด 2 โนด และมีรูปร่างต่างๆกัน ใช้ในโปรแกรมเพื่อแสดงเส้นทางไหลของทางฉีด (Sprue) ทางวิ่ง (Runner) และท่อหล่อเย็น (Cooling lines) ซึ่งเส้นทางไหลจะถูกสมมติขึ้นเป็นแนวแกนสมมาตร ดังภาพประกอบ 23 ความยาวของเอลิเมนต์ในรูปของบีมควรมีขนาดสองถึงสามเท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางบีม อีกทั้งทางเข้า (Gate) ควรมีอย่างน้อยสามเอลิเมนต์

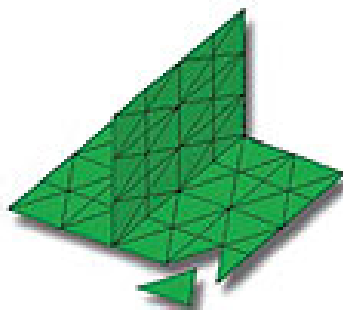


ภาพประกอบ 23 เมชแบบบีม (Beam mesh elements) [Michelle M., 2004]

2.7.2 เมชแบบมิดเพลน (Midplane mesh elements)

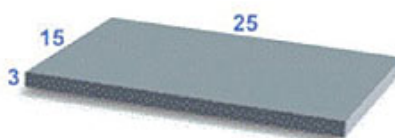
เมชแบบมิดเพลน แสดงด้วยชิ้นส่วนสามมิติกับสองมิติบนผิวระนาบศูนย์กลางความหนา สมบัติความหนาจึงถูกกำหนดขึ้น โดยเรียกว่า 2.5D ดังภาพประกอบ 24 การใช้เมชแบบมิดเพลนจะใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีผนังบาง เพื่อลดเวลาในการคำนวณ ในเมชแบบนี้ควรอยู่บนสมมุติฐานที่ว่า

เส้นทางไหลจะต้องมีความยาวมากกว่าความหนาหนึ่ง ค่าเฉลี่ยของความยาวและความกว้างของแต่ละผลิตภัณฑ์ควรจะมีมากกว่าสี่เท่าของความหนา ดังภาพประกอบ 25



ภาพประกอบ 24 เมชแบบมิดเพลน (Midplane mesh elements) [Michelle M., 2004]

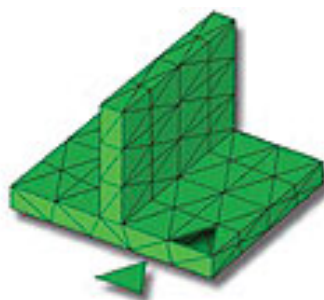
Average of Length (25) and Width (15) = 20
Thickness (3) < 1/4 Average (5)



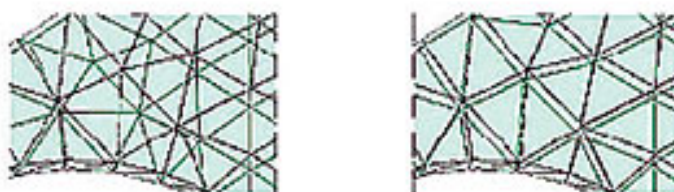
ภาพประกอบ 25 ความหนาต่ำสุดที่นำมาใช้กับเมชแบบมิดเพลน [Michelle M., 2004]

2.7.3 เมชแบบดวลโดเมนหรือฟิวชั่น (Dual domain mesh or Fusion mesh)

เรียกอีกชื่อหนึ่งว่าฟิวชั่นเมช (Fusion mesh) เป็นเมชพื้นฐานในการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ ซึ่งเป็นการผสมผสานระหว่างเมชแบบมิดเพลนเมช (Midplane mesh) แบบระนาบเดียวกับแบบระนาบคู่ (Double skin) ดังภาพประกอบ 26 สามารถรับแฟ้มข้อมูลในรูปแบบของ เอสทีแอล (STL) หรือ ไอจีอีเอส (IGES) และเมื่อเมชเข้าด้วยกันแล้วจะมีลักษณะเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมมีโพรงด้านใน (Shell elements) ซึ่งการจัดเมชให้สมบูรณ์จะต้องเป็นผลึกทั้งด้านบนและด้านล่าง ดังภาพประกอบ 26 และภายในเอลิเมนต์สามเหลี่ยมจะมีโนด 3 หรือ 6 โนด บรรจุอยู่เมื่อมีการวิเคราะห์เกิดขึ้นเมชแบบนี้จะไหล 2 ทาง คือจากด้านบนและด้านล่างของโมเดล เมื่อทำการเมชโมเดลเสร็จแล้ว ควรตรวจสอบความสมบูรณ์ของเมช (Match mesh) ในแต่ละเอลิเมนต์ให้มีค่าสูงกว่า 80 เปอร์เซนต์



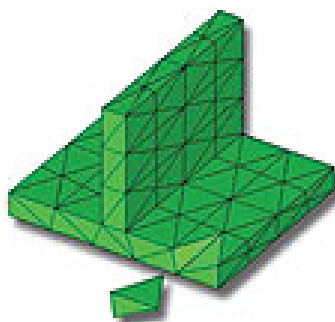
ภาพประกอบ 26 เมชแบบสองโดเมนหรือฟิวชั่น (Double domain mesh or Fusion mesh)
[Michelle M., 2004]



ภาพประกอบ 27 การเปรียบเทียบการเมชไม่สมบูร์น (ซ้าย) กับเมชสมบูร์น (ขวา) [Michelle M., 2004]

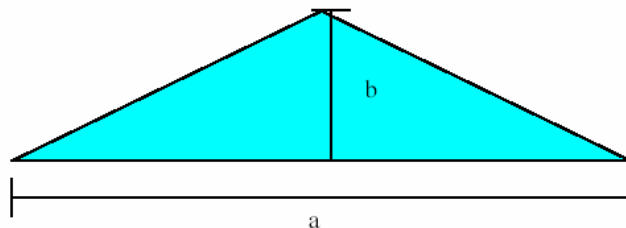
2.7.4 เมชแบบทรงปริซึมสามเหลี่ยมสามมิติ (3D tetrahedral mesh)

เมชแบบสามมิติ ประกอบด้วยเอลิเมนต์ทรงปริซึมสามเหลี่ยมสามมิติมีโนด 4 โนด เป็นเมชเชิงปริมาตร ดังภาพประกอบ 28 ซึ่งเหมาะสำหรับงานประเภทที่มีความหนาแน่นสูงและงานที่มีขนาดใหญ่ เช่น ข้อต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าหรือโครงสร้างที่มีความหนา เพราะว่าการวิเคราะห์เมชแบบสามมิตินี้จะใช้สมการของนาร์เวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes) ซึ่งแน่นอนกว่าวิธีการประมาณค่าของเอล-ชอร์ (Hele-Shaw) เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับงานที่มีผนังบาง



ภาพประกอบ 28 เมชแบบทรงปริซึมสามเหลี่ยมสามมิติ (3D Tetrahedral mesh) [Michelle M., 2004]

ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนเอลิเมนต์และโนด ที่ทำการเจนเนอเรต เมช (Generated mesh) บนผลิตภัณฑ์ หากมีจำนวนเอลิเมนต์และโนดจำนวนมาก ก็จะใช้เวลาในการวิเคราะห์มาก ทั้งนี้ยังมีข้อกำหนดของโปรแกรมคือในเอลิเมนต์สามเหลี่ยมจะต้องมีค่าแอสเปคต์ เรโซ (Aspect ratio = a/b) ไม่เกิน 6 ดังภาพประกอบ 29



ภาพประกอบ 29 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมในการคำนวณแอสเปคต์ เรโซ [Michelle M., 2004]

2.8 บทปริทัศน์วรรณกรรม (Literature Reviews)

สมัชชา โชคชัยวิวัฒน์ (2545 : บทคัดย่อ) ศึกษาการประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์โมลเด็กซ์ (Moldex) ในการจำลองการไหลและการกระจายตัวของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ โดยศึกษาตัวแปรและปัญหาที่ทำให้เกิดรอยประสาน (Weld line) และรอยยุบ (Sink marks) ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการไหลของพลาสติกเหลวที่เงื่อนไขต่าง ๆ กัน ได้แก่ อุณหภูมิพลาสติกเหลว อุณหภูมิแม่พิมพ์ ความดันฉีด ความดันย้ำ อุณหภูมิสารหล่อเย็น เวลาของการหล่อเย็นและเวลาย้ำ ซึ่งค่าเหล่านี้เป็นค่าที่ได้จากการทดลอง แล้วเกิดปัญหารอยประสานและรอยยุบ โดยจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิพลาสติกเหลวและอุณหภูมิแม่พิมพ์มีผลกับความเร็ว นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิสูงจะทำให้ความหนืดต่ำและความเร็วเพิ่มขึ้น โดยที่ด้านหลังของโลหะฝัง (Insert) ความเร็วจะค่อยๆ สูงขึ้น แต่บริเวณใกล้กับโลหะฝัง ความเร็วจะลดลงเนื่องจากการนำความร้อนทำให้อุณหภูมิลดลงและเกิดรอยประสาน โดยเฉพาะบริเวณใกล้กับโลหะฝัง แต่จะค่อยๆ หายไปเมื่อห่างจากโลหะฝัง เวลาเชื่อมประสานช้าทำให้เกิดการแข็งตัวก่อนการเชื่อมประสานจะเกิดขึ้น ความดันฉีดมีผลกับความเร็วของพลาสติกเหลว แต่จะไม่มีผลกับการหดตัว ความดันย้ำ อุณหภูมิสารหล่อเย็น เวลาของการหล่อเย็นและเวลาย้ำมีผลกับการหดตัวของผลิตภัณฑ์ ซึ่งส่งผลกับการเกิดรอยยุบ เมื่อศึกษาผลที่ได้จากการทดลอง สามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิสารหล่อเย็น เวลาของการหล่อเย็นและเวลาย้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดรอยยุบ ส่วนอุณหภูมิพลาสติกเหลวและอุณหภูมิแม่พิมพ์เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดรอยประสานในแม่พิมพ์

คามาดะ ซาโตรุ ฟูกุชิม่า มัทซึจิ นิชิมูระ ชินโซ และ โมริโตกิ ฮิโตชิ (Kamata Satoru, Fukushima Mutsuji, Nishimura Shinzo, Moritoki Hitoshi. 1989 : pp.213-219) ศึกษาการใช้

สมการของสเปนเซอร์และกิลมอร์ (Spencer and Gilmore) คำนวณการหดตัวเชิงปริมาตรของโพลิเมอร์ชนิดโครงสร้างเป็นผลึกในกระบวนการฉีด บนสมมุติฐานที่ว่าด้วยปริมาตรจำเพาะของโพลิเมอร์ สามารถแสดงโดยสมการของสเปนเซอร์และกิลมอร์ (Spencer and Gilmore) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับทดลอง ค่าปริมาตรจำเพาะในสภาวะของแข็ง (Solid phase) ซึ่งเป็นตัวแปรในสมการ ใช้ในการทำนายการขยายตัวและการอัดตัวด้วยความร้อน ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาตรจำเพาะของแม่พิมพ์และจะต้องนำมาพิจารณาด้วย ตัวแปรของปริมาตรจำเพาะในสภาวะของเหลว (Melt phase) คำนวณโดยใช้ผลจากกระบวนการฉีด ซึ่งกำหนดให้โพลิเมอร์มีความแตกต่างของอุณหภูมิและความดันในแต่ละสภาวะ ปริมาตรจำเพาะเฉลี่ยสามารถบรรยายได้ในทอมการอินทิเกรตในรูปของปริมาตรจำเพาะ ไปตามทิศทางความหนาของผลิตภัณฑ์ การคำนวณปริมาตรจำเพาะเฉลี่ยจากสมการของสเปนเซอร์และกิลมอร์ (Spencer and Gilmore) จะใช้เมื่อเวลาที่พลาสติกเริ่มแข็งตัวและมีความดันลดลง ซึ่งอุณหภูมิของโพลิเมอร์จะกระจายตัวบนแม่พิมพ์ไปตามทิศทางความหนา ส่วนในทางอื่นๆ ปริมาตรจำเพาะจะหาได้จากการทดลอง ซึ่งผลของปริมาตรจำเพาะเฉลี่ยและการหดตัวเชิงปริมาตรระหว่างการทำนายและการทดลองมีแนวโน้มในทางเดียวกัน

จิต-ซุน ชอย และ ยง-แท็ก อิม (Du-Soon Choi, Yong-Taek Im. 1999 : pp.655-665) ศึกษาการทำนายการหดตัว (Shrinkage) และการบิดงอ (Warpage) เพื่อวิเคราะห์ความเค้นตกค้าง (Residual stress) ของผลิตภัณฑ์ ด้วยวิธีการจำลองกระบวนการฉีด ความแม่นยำในการทำนายการหดตัวและการบิดงอในผลิตภัณฑ์ เป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบแม่พิมพ์ที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง ในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลขในการทำนายการหดตัวและการบิดงอของผลิตภัณฑ์ชนิด ออสัญฐาน (Amorphous) ซึ่งจะพิจารณาความเค้นตกค้างของผลิตภัณฑ์ในช่วงการย่ำ (Packing phase) และในช่วงการหล่อเย็น (Cooling phase) ของกระบวนการฉีด โดยพิจารณาอุณหภูมิและความดันเป็นตัวแปรในการวิเคราะห์ความเค้นตกค้าง ศาสตร์แห่งการไหลเชิงความร้อน (Rheology) และพฤติกรรมการไหลของวัสดุ (Viscoelasticity) จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบของการคลายความเค้น (Stress relaxation) และพฤติกรรมทางกล (Mechanical behavior) เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป ผลการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลองในการทำนายผลของความเค้นแรงดึงตกค้าง (Tensile residual stresses) บริเวณผิวของผลิตภัณฑ์สามารถทำนายผลกระทบของสภาวะในกระบวนการต่างๆ ที่มีต่อการหดตัวได้เป็นอย่างดี

แฮร์ริส นิวลีน ฮัค และ ดิคเคน (R.A.Harris, H.A. Newlyn, R.J.M Hague, P.M Dickens. 2003 : pp.879-887) ศึกษาการหดตัวของผลิตภัณฑ์จากเครื่องมือทำต้นแบบ (Stereo Lithography: SL) การใช้เครื่องมือทำต้นแบบ (SL) เป็นการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกโดยกระบวนการฉีดในอัตราการผลิตสูงแต่ใช้เวลาน้อย ซึ่งได้เปรียบกระบวนการฉีดที่เป็นเครื่องฉีดพลาสติก เมื่อพิจารณาในสัดส่วนของเวลาและต้นทุนที่เท่ากัน อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้พบว่าการใช้เครื่องมือทำต้นแบบจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีการหดตัวน้อยกว่าเครื่องฉีดพลาสติก และยังสามารถระบุความแตกต่างของค่าการหดตัวที่ได้จากแม่พิมพ์ของเครื่องมือทำต้นแบบกับค่าที่ได้จากแม่พิมพ์อะลูมิเนียม โดยแม่พิมพ์แต่

ละชนิดใช้โพลิเมอร์และรูปร่างของแม่พิมพ์ที่แตกต่างกันอีกสองแบบ ส่วนสมบัติการถ่ายเทความร้อนของแม่พิมพ์จะนำมาเป็นตัวแปรในการทดลอง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแม่พิมพ์แต่ละชนิดจะมีอัตราการขยายตัว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ต้องเกิดขึ้นเพื่อชดเชยการหดตัวของผลิตภัณฑ์ ซึ่งการชดเชยนี้สามารถอธิบายได้ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์และวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ทั้งสองเทคนิควิธีนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะทางความร้อน ชนิดของแม่พิมพ์ และชนิดของโพลิเมอร์ ทำให้ทราบค่าการหดตัวได้อย่างสมบูรณ์

ศรีดา และ นาร์ (L. Sridhar and K.A. Narh. 2000 : pp.325-332) ศึกษาการทำนายผลของอุณหภูมิที่แปรผันตามสมบัติทางความร้อนในกระบวนการฉีด ซึ่งผลลัพธ์ของการใช้อุณหภูมิแปรผันตามการนำความร้อน และความร้อนจำเพาะของโพลิเมอร์ในการจำลองกระบวนการฉีดของงานวิจัยนี้จะนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน โดยใช้โพลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกสองชนิดคือเทอร์โมพลาสติกชนิดอสัณฐาน (Amorphous thermoplastic) และเทอร์โมพลาสติกชนิดผลึก (Crystalline thermoplastic) ผลจากการจำลองกระบวนการฉีดสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่แปรผันตามสมบัติทางความร้อนขึ้นอยู่กับเวลาหล่อเย็น (Cooling time) สัดส่วนระหว่างพลาสติกเหลวกับพลาสติกที่จะเย็นตัวลง (Frozen layer fraction) และความหนาของผลิตภัณฑ์ ซึ่งผลที่ได้นี้สามารถนำไปทำนายการหดตัวเชิงปริมาตรและการบิดงอของผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย

โพสตาวา และ คอสคูร์ (P.Postawa, J. Koszkuł. 2005 : pp. 109-115) ศึกษาการหดตัวและเปลี่ยนแปลงด้านน้ำหนักในผลิตภัณฑ์ ซึ่งพิจารณาตามขั้นของกระบวนการฉีดที่เกิดผลกระทบจากตัวแปรอิสระ (ตัวแปรที่ป้อนเข้า) บนตัวแปรตาม โดยประเมินผลจากการทดลอง ผลิตภัณฑ์เป็นโพลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นผลึก ได้แก่ โพลีออกซิเมทิลีน (POM) และจากโพลิเมอร์ที่มีโครงสร้างอสัณฐาน เช่น โพลีสไตรีน (PS) ผลการทดลองจะพิจารณาการหดตัวในทิศทางการไหล ($\bar{\epsilon}_w$) การหดตัวในทิศทางตั้งฉากกับการไหล ($\bar{\epsilon}_p$) และน้ำหนัก (m) ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาวะการฉีดในหลายปัจจัยที่ส่งผลกับเครื่องฉีดพลาสติก การออกแบบแม่พิมพ์ และชนิดของโพลิเมอร์ที่ถูกขึ้นรูปทางกายภาพทั้งหมดนี้เกี่ยวข้องกับสมบัติทางกล ทางความร้อน และสมบัติอื่นๆ ผลจากการทดลองซึ่งมีมุมมองโดยการประมาณผลกระทบของตัวแปรของกระบวนการในการหดตัว (ในทิศทางการไหลและทิศทางตั้งฉากกับการไหล) ของผลิตภัณฑ์ การศึกษาการออกแบบการทดลองแบ่งออกเป็น 27 ชุด (Manufacturing parameters) กับ ปริมาตรทางเข้า 5 แบบ (Geometry parameters) แต่ละชุดจะแบ่งพิจารณา อุณหภูมิแม่พิมพ์ อุณหภูมิฉีด เวลาหล่อเย็น ความดันอัดและความเร็วฉีด จากการวิเคราะห์พบว่าผลการทดลองที่ได้ สอดคล้องกับสมการถดถอย (Equation of regression) ซึ่งอธิบายปริมาตรที่เปลี่ยนไปสัมพันธ์กับช่วงของการผลิตในกรณีต่างๆ ดังได้อธิบายไว้ในรูปของความสัมพันธ์ทางเมตริกซ์ (Matrix of correlation) ค่าที่ได้จากการทดลองแสดงถึงการควบคุมค่าการหดตัว เมื่อพิจารณาทั้งกระบวนการพบว่าควรให้ความสำคัญกับความดันในการปิดแม่พิมพ์ควบคู่ไปกับพารามิเตอร์อื่นๆในกระบวนการผลิตด้วย

จากงานวิจัยข้างต้นที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้ เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการหดตัวและการบิดงอของผลิตภัณฑ์ โดยมีทั้งการทดลอง วิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลข และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งศึกษาพารามิเตอร์และพฤติกรรมการไหลของโพลิเมอร์ในแต่ละสภาวะและยังศึกษาถึงกระบวนการฉีดและความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ แต่ยังไม่พบการศึกษาที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการหดตัวเชิงปริมาตรมากนัก ซึ่งมีผลโดยตรงกับคุณภาพผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะการศึกษาการหดตัวจากผลิตภัณฑ์จริงด้วยการทดลอง งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาในประเด็นดังกล่าว โดยทำการคำนวณหาค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของผลิตภัณฑ์บนสมมุติฐานความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน ปริมาตรจำเพาะ และอุณหภูมิพลาสติกไหล (PvT)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีการศึกษาพารามิเตอร์ของกระบวนการฉีดผลิตภัณฑ์พลาสติกด้วยการทดลอง โดยการชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ส้อมด้วยเครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.0001 g (กรัม) และการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรมโมลโฟลพลาสติกอินไซต์ เวอร์ชัน 4.0 (Moldflow Plastics Insight V4.0) เพื่อหาการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์ส้อม ภายใต้สมมุติฐานแม่พิมพ์ที่ใช้ทำการทดลองมีความเที่ยงตรง ซึ่งทั้งสองวิธีมีรายละเอียดดังนี้

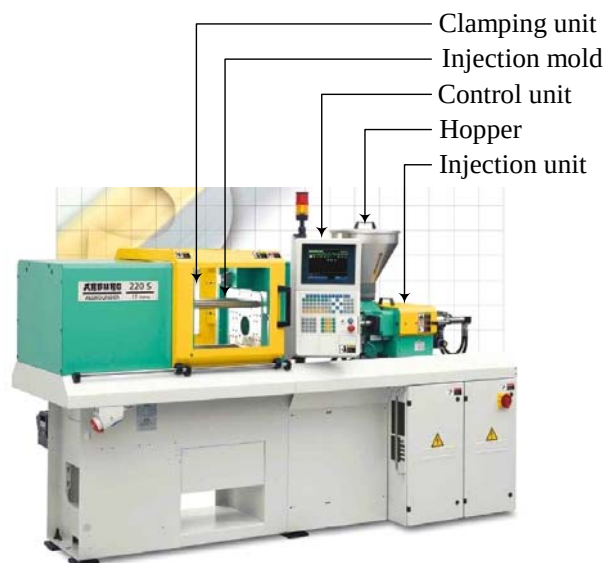
3.1 วิธีดำเนินการวิจัยโดยการทดลอง

3.1.1 อุปกรณ์การทดลอง

3.1.1.1 เครื่องฉีดพลาสติกอาร์เบ็ก ออลราวเดอร์ 220 เอส (ARBURG ALLROUNDER 220 S) ดังภาพประกอบ 30 [ARBURG GmbH + Co:1998]

3.1.1.2 แม่พิมพ์ผลิตภัณฑ์ส้อมทำจากวัสดุ S45C ขนาด 250x250x200 mm

3.1.1.3 โพลิสไตรีน (PS) ของมิตซูบิชิ เคมีคัล (MITSUBISHI CHEMICAL) ชนิด ไดเร็กซ์ ฮิปส์ เอช350 (DIAREX HIPS H350) และโพลิโพรพิลีน (PP) ของบาเซล โพลีโอเลฟินส์ (BASELL POLYOLEFINS) ชนิดโมเพเลน เอชพี500เอ็น (MOPLEN HP500N)



ภาพประกอบ 30 เครื่องฉีดพลาสติกอาร์เบ็ก ออลราวเดอร์ 220 เอส [ARBURG GmbH + Co: 1998]

3.1.2 ขั้นตอนการเตรียมงานวิจัยโดยการทดลอง

ในการเตรียมการทดลองเบื้องต้น นำผลิตภัณฑ์ส้อมจากการทดลองฉีด ซึ่งมีขนาด 25x147.5x2 mm ของโพลีสไตรีนและโพลิพรอพิลีนมาชั่งน้ำหนัก (ผลิตภัณฑ์+ทางวิ่ง+ทางเข้า+ทางฉีด) ได้ค่าดังนี้ [ARBURG GmbH + Co: 2003]

ผลิตภัณฑ์ส้อมจากวัสดุโพลิพรอพิลีนมีน้ำหนักเท่ากับ 7.4619 g

ผลิตภัณฑ์ส้อมจากวัสดุโพลีสไตรีนมีน้ำหนักเท่ากับ 9.1474 g

คำนวณปริมาตรพลาสติกเหลว (Dosage volume) ที่ใช้ในการฉีดแต่ละครั้งให้กับเครื่องฉีดพลาสติก ดังนี้

$$\text{ปริมาตรพลาสติกเหลว (V}_D\text{)} = \frac{W_s}{\rho_s} \quad (22)$$

เมื่อ

V_D คือ ปริมาตรพลาสติกเหลวที่ใช้ในการฉีดแต่ละครั้ง (cm^3)

W_s คือ น้ำหนักรวม (ผลิตภัณฑ์+ทางวิ่ง+ทางเข้า+ทางฉีด) (g)

ρ_s คือ ความหนาแน่นของโพลิเมอร์ในสถานะของแข็ง (g/cm^3)

โพลีสไตรีนมีค่าความหนาแน่นในสถานะของแข็งเท่ากับ 1.04 g/cm^3 (ภาพประกอบ 50)

โพลิพรอพิลีนมีค่าความหนาแน่นในสถานะของแข็งเท่ากับ 0.90 g/cm^3 (ภาพประกอบ 51)

ดังนั้น จากสมการ 22 จะได้

ปริมาตรพลาสติกเหลวของโพลิพรอพิลีนมีค่าเท่ากับ 8.2910 cm^3

ปริมาตรพลาสติกเหลวของโพลีสไตรีนมีค่าเท่ากับ 8.7956 cm^3

ใช้ค่าปริมาตรพลาสติกเหลวที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ 9.0000 cm^3

รวมกับปริมาตรพลาสติกเหลวบริเวณปลายหัวฉีด (Material cushion) 3.0000 cm^3 (ตาราง 4) จะได้ปริมาตรพลาสติกเหลวที่ใช้ในการฉีดแต่ละครั้งกับเครื่องฉีดพลาสติกมีค่าเท่ากับ 12.000 cm^3

ตาราง 4 การกำหนดค่าปริมาตรพลาสติกเหลวบริเวณปลายหัวฉีด (Material cushion) [ARBURG GmbH + Co: 2003]

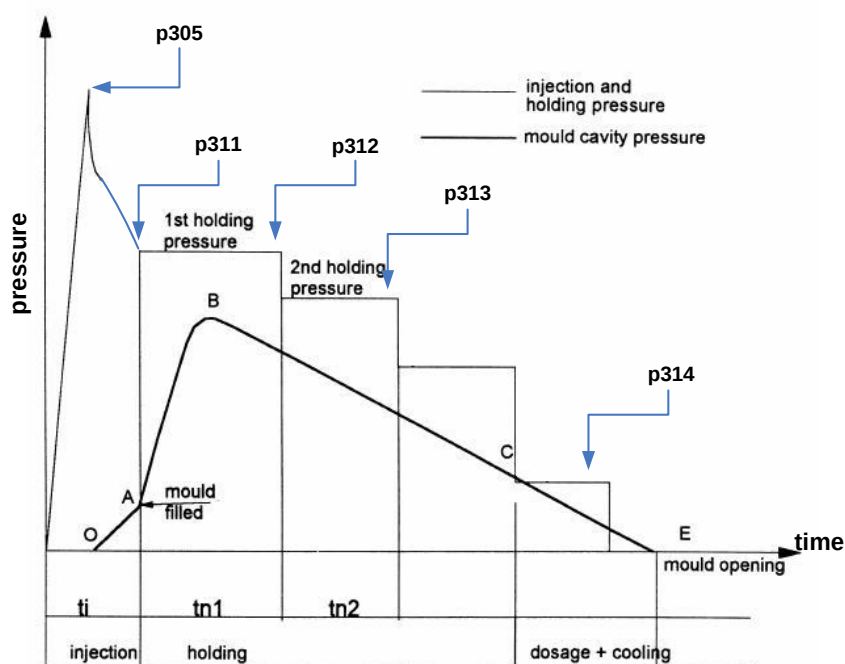
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางสกรู (Screw diameter, mm)	15-20	25	30	35	40	45	50
พลาสติกเหลวบริเวณปลายหัวฉีด (Material cushion, cm^3)	1.0- 3.0	3.0- 4.0	4.0- 5.0	5.0- 6.0	6.0- 7.5	7.5- 9.0	9.0- 12.0

3.1.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษารามิเตอร์ใน 2 สภาวะได้แก่

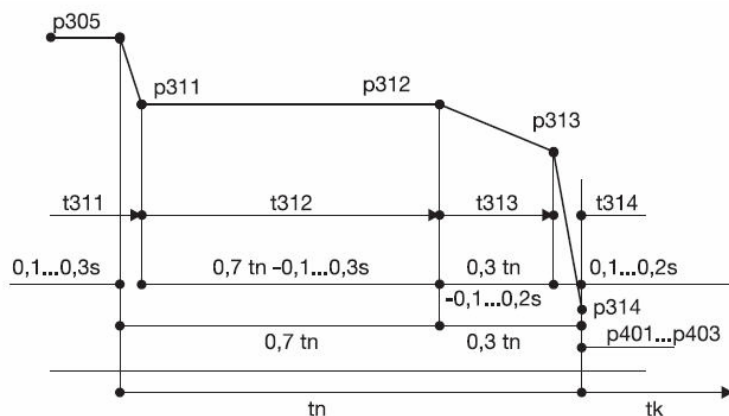
3.1.2.1 สภาวะการฉีด (Filling phase)

พารามิเตอร์ที่ศึกษาในสภาวะการฉีดคือ ความดันฉีด เวลาฉีดและอุณหภูมิหลอมเหลว จากภาพประกอบ 31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับเวลา จะเห็นได้ว่าความดันสูงสุดที่เกิดขึ้น (p305) คือค่าความดันฉีดที่ใช้ไป และจะถูกสลับเข้าสู่สภาวะการย่ำโดยความดันย่ำแบบเป็นขั้นในขั้นแรก (p311) และเวลาย่ำในขั้นแรก (tn1)



ภาพประกอบ 31 โปรไฟล์ความดันฉีด [ARBURG GmbH + Co: 1998]

3.1.2.2 สภาวะการย่ำ (Packing phase)



ภาพประกอบ 32 โปรไฟล์ความดันย่ำ [ARBURG GmbH + Co: 1998]

จากภาพประกอบ 32 สามารถอธิบายได้ดังนี้

P305	คือ ความดันฉีด (bar)
P311 ถึง P312	คือ ความดันย่ำเริ่มต้นในช่วงเวลา t312 (bar)
P313	คือ ความดันย่ำแบบเป็นขั้นในช่วงเวลา t313 (bar)
P314	คือ ความดันย่ำสุดท้ายในช่วงเวลา t314 (bar)
t311	คือ เวลาเริ่มต้นของการสลับจากความดันฉีดเป็นความดันย่ำเท่ากับ 0 s
t312	คือ เวลาย่ำในช่วงความดันย่ำเริ่มต้นเท่ากับ 2.1 s (0.7tn)
t313	คือ เวลาย่ำในช่วงความดันย่ำแบบเป็นขั้นเท่ากับ 0.7 s (0.3tn – t314)
t314	คือ เวลาย่ำในช่วงความดันย่ำสุดท้ายเท่ากับ 0.2 s
tn	คือ เวลาย่ำ (s)
tk	คือ เวลาหล่อเย็น (s) (ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการศึกษา)

ตาราง 5 ตารางเวลาย่ำ [ARBURG GmbH + Co: 2003]

Mold temperature under 70°C				
d	tn	tn1	tn2	tk
0.5	0.3	0.2	0.1	0.7
0.75	0.6	0.4	0.2	1.3
1.0	0.9	0.6	0.3	2.1
1.1	1.1	0.7	0.4	2.5
1.2	1.3	0.9	0.4	2.8
1.3	1.4	1.0	0.4	3.3
1.4	1.7	1.1	0.6	3.7
1.5	1.8	1.2	0.6	4.2
1.6	2.1	1.4	0.7	4.7
1.7	2.3	1.6	0.7	5.2
1.8	2.5	1.7	0.8	5.8
1.9	2.8	2.0	0.8	6.4
2.0	3.0	2.1	0.9	7.0
2.1	3.3	2.3	1.0	7.7
2.2	3.6	2.5	1.1	8.3
2.3	3.9	2.7	1.2	9.0
2.4	4.2	3.0	1.2	9.8
2.5	4.5	3.1	1.4	10.5
2.6	4.9	3.4	1.5	11.3
2.7	5.2	3.6	1.6	12.1
2.8	5.5	4.0	1.6	13.0
2.9	6.0	4.2	1.8	13.8
3.0	6.3	4.4	1.9	14.7
3.1	6.8	4.7	2.1	15.6
3.2	7.2	5.0	2.2	16.5
3.3	7.6	5.3	2.3	17.5
3.4	8.0	5.6	2.4	18.6
3.5	8.4	5.8	2.5	19.5

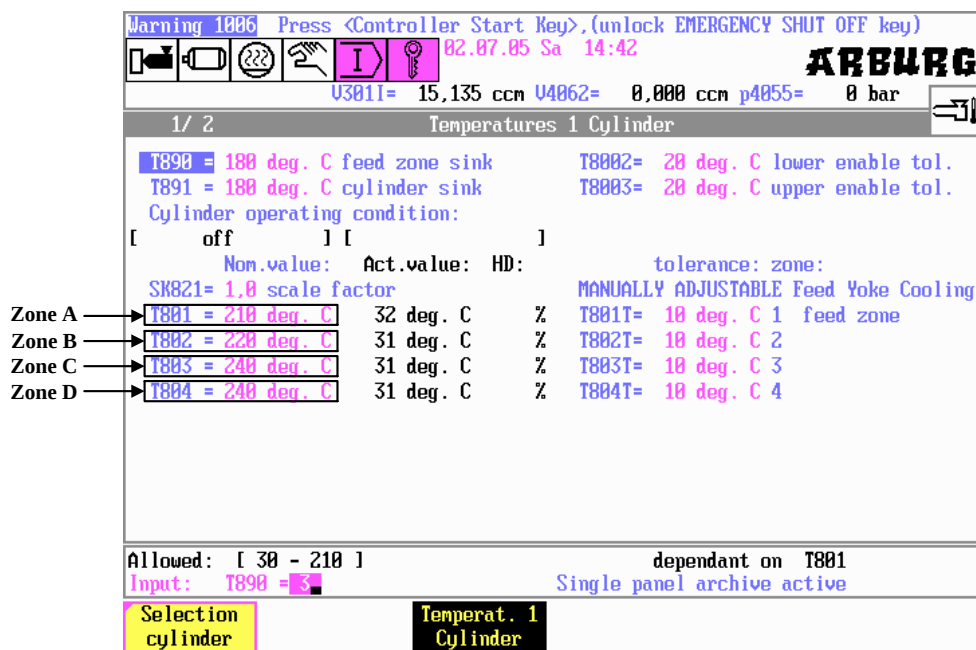
จากตาราง 5 พิจารณาความหนาผลึกที่เท่ากับ 2.0 mm จะได้เวลาย้ำ (tn) เท่ากับ 3.0 s
นำมาพิจารณาใช้กำหนดค่าพารามิเตอร์ในสภาวะการย้ำได้ดังตาราง 6

ตาราง 6 ตารางเวลาย้ำแบบเป็นชั้น

รหัส	เวลาย้ำ (s)	เวลาย้ำแบบเป็นชั้น (s)
t311	3	0
t312		2.1
t313		0.7
t314		0.2
t311	6	0
t312		4.2
t313		1.4
t314		0.4
t311	9	0
t312		6.3
t313		2.1
t314		0.6
t311	15	0
t312		10.4
t313		3.6
t314		1.0

ตาราง 7 ตารางความดันย้ำแบบเป็นชั้น

รหัส	ความดันย้ำแบบเป็นชั้น (bar)		
	75%	90%	105%
p311	300	360	420
P312	300	360	420
P313	255	306	357
P314	25	25	25
p311	412.5	495	577.5
P312	412.5	495	577.5
P313	350.6	420.8	490.9
P314	25	25	25
p311	525	630	735
P312	525	630	735
P313	446.3	535.5	624.8
P314	25	25	25



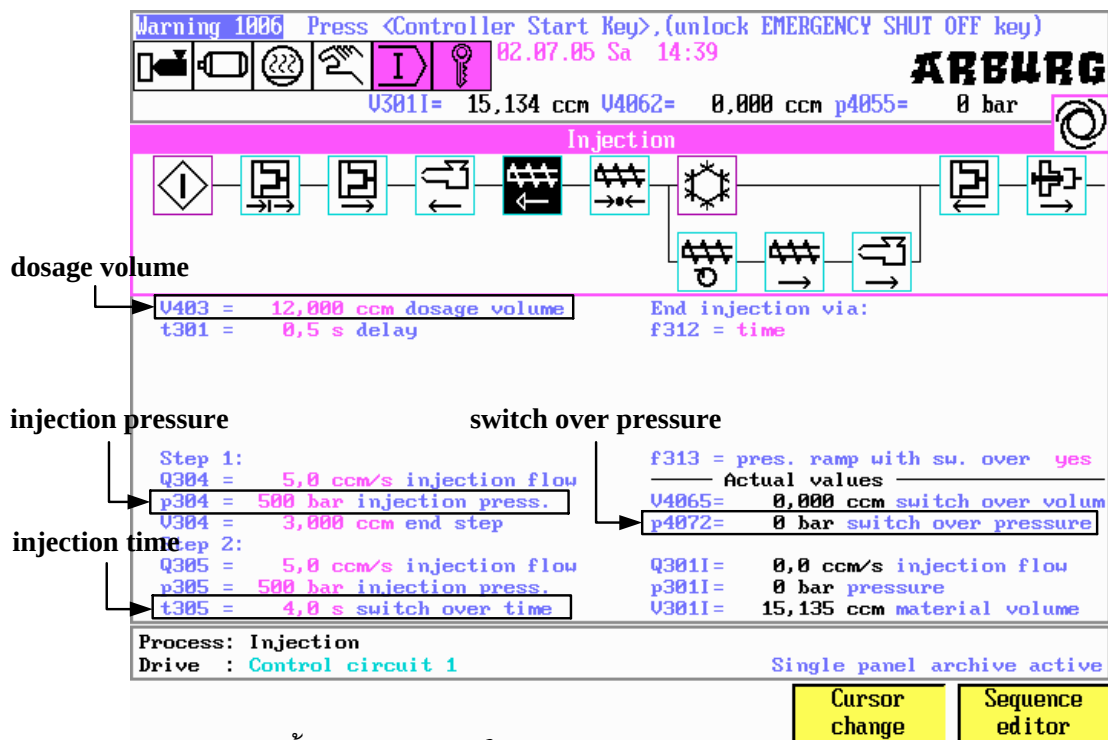
ภาพประกอบ 33 การตั้งอุณหภูมิพลาสติกเหลวในโซนต่างๆ [ARBURG GmbH + Co: 1998]

3.1.3.1 วิธีการทดลองในสภาวะการฉีดและสภาวะการย่ำ (Filling and Packing phase)

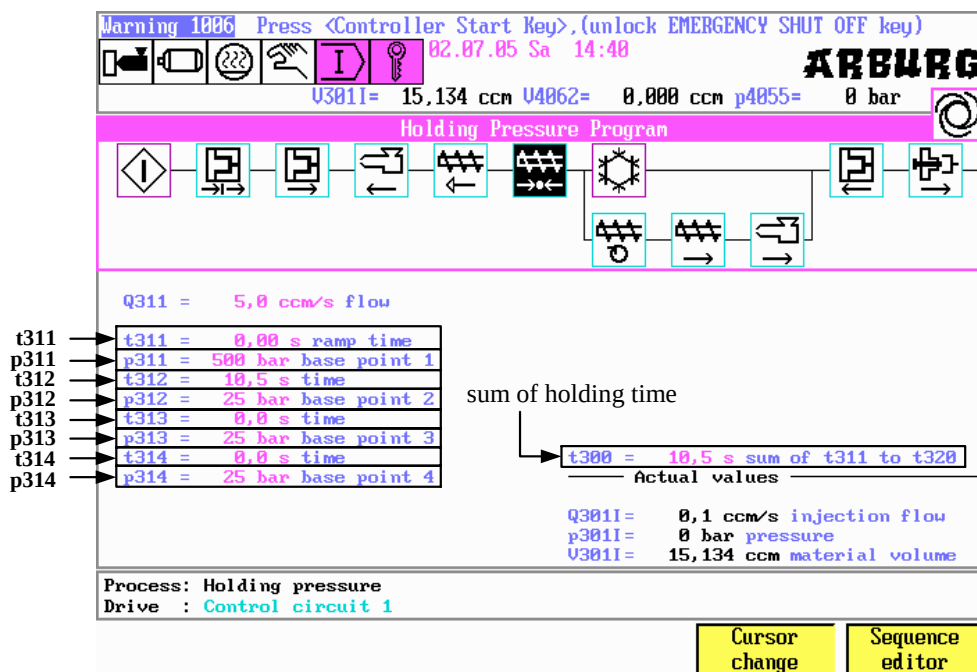
1. อบเม็ดพลาสติกชนิดโพลีโพรพิลีนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 2 hr เพื่อไล่ความชื้น ดังตาราง 38
2. นำโพลีโพรพิลีนใส่ในถังกรวย (Hopper) ดังภาพประกอบ 30
3. ตั้งอุณหภูมิพลาสติกเหลวในโซนดี (Zone D) เท่ากับ 230°C 260°C และ 290°C ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 33
4. ตั้งอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นให้แม่พิมพ์มีอุณหภูมิ 10°C 30°C และ 50°C ตามลำดับ
5. ตั้งพารามิเตอร์ในสภาวะการฉีด (Filling phase) โดยปรับความดันฉีดเท่ากับ 400 bar 550 bar และ 700 bar และใช้เวลาฉีดเท่ากับ 1 s 2.5 s และ 4 s ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 34
6. ตั้งพารามิเตอร์ในสภาวะการย่ำ (Packing phase) โดยใช้ค่าความดันย่ำเท่ากับ 75% 90% และ 105% ของความดันฉีด และใช้เวลาย่ำเท่ากับ 3 s 9 s และ 15 s ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 35
7. เริ่มทำการฉีดโดยตั้งรอบการทำงานเท่ากับ 10
8. เมื่อผลิตภัณฑ์ถูกปลดปล่อยอุณหภูมิและความดันบรรยากาศนำมาชั่งน้ำหนักโดยเครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.0001 g

9. บันทึกผลการทดลอง

10. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึง 6 โดยอบเม็ดโพลิสไตรีนที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 2 hr ดังตาราง 38 และใช้เวลาฆ่าเท่ากับ 3 s 6 s และ 9 s ตามลำดับ



ภาพประกอบ 34 การตั้งค่าพารามิเตอร์ในสภาวะการฉีด [ARBURG GmbH + Co: 1998]



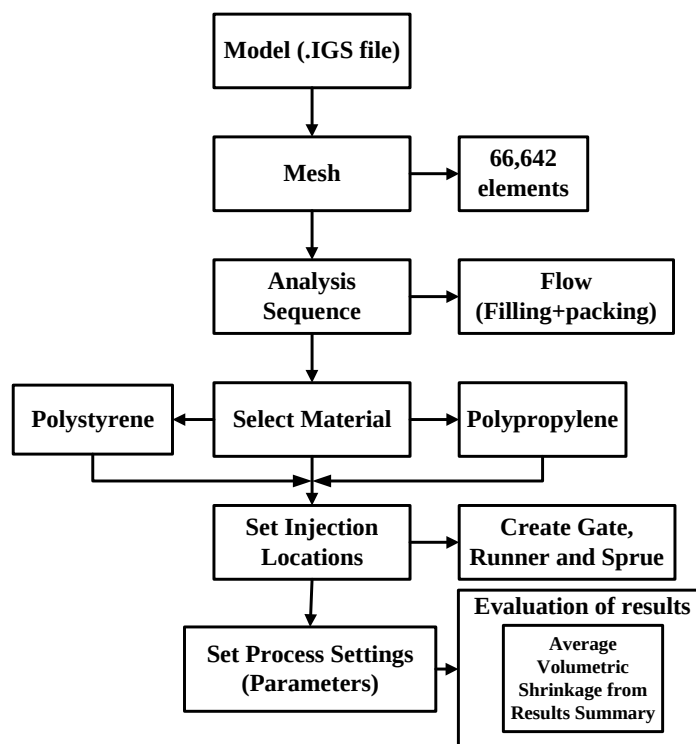
ภาพประกอบ 35 การตั้งค่าพารามิเตอร์ในสภาวะการย้ำ [ARBURG GmbH + Co: 1998]

3.2 วิธีดำเนินการวิจัยโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.2.1 การยืนยันความถูกต้อง (Validation)

ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ของงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมโมลโฟลพลาสติกอินไซต์ เวอร์ชัน 4.0 (Moldflow Plastics Insight V4.0) เข้ามาช่วยเพื่อคำนวณหาการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์ และใช้เป็นแนวทางในการยืนยันความถูกต้องของคำตอบ โดยมีลำดับสภาวะการทำงานดังภาพประกอบ 36 ซึ่งพารามิเตอร์ในโปรแกรมจะต้องเป็นค่าเดียวกันกับพารามิเตอร์ของเครื่องฉีดพลาสติกอาร์เบ็ก ออลราวเดอร์ 220 เอส (ARBURG ALLROUNDER 220 S) แล้วนำการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง สมบัติของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณร่วมกับโปรแกรมมีดังนี้

1. มีหน่วยการประมวลผลระดับอินเทล เพนเทียม 4 (Intel pentium 4) 2.4 GHz
2. มีหน่วยความจำ (RAM) 256 MB
3. มีความจุฮาร์ดดิสก์ (Hard disk) 40 GB
4. ใช้ระบบปฏิบัติการ Windows XP Home Edition



ภาพประกอบ 36 ลำดับสภาวะการทำงานของโปรแกรมโมลโฟลพลาสติกอินไซต์เวอร์ชัน 4.0 (Moldflow Plastics Insight V4.0)

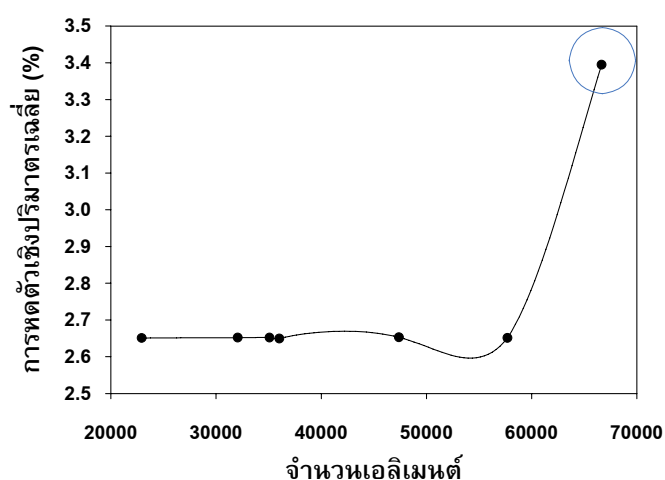
ในการพิจารณาเลือกใช้จำนวนเอลิเมนต์สำหรับการยืนยันความถูกต้อง กระทำโดยกำหนดค่าความยาวรอบเอลิเมนต์สามเหลี่ยม (Global edge length) จำนวน 7 ค่า ทำการเจนเนอร์

เรท เมชและทำการตรวจสอบเมช หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์โดยโปรแกรมโมลโฟลพลาสติกอินไซท์ เวอร์ชัน 4.0 และนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ดังตาราง 8

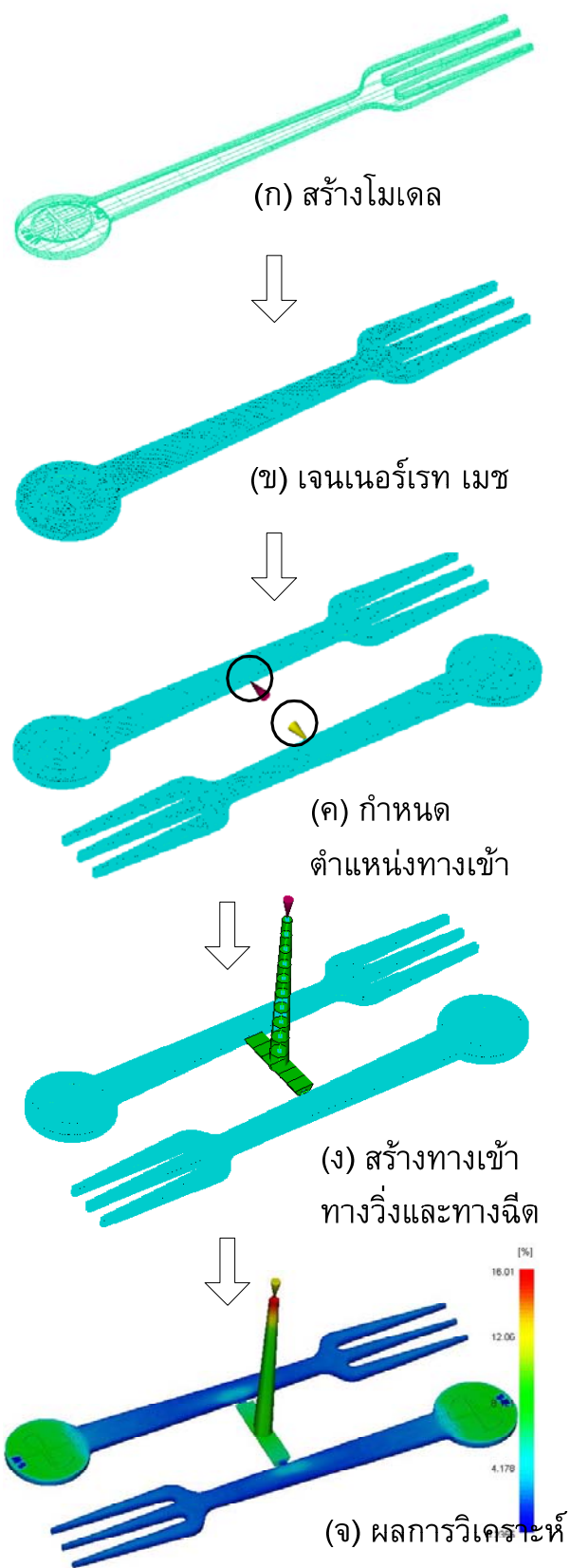
ตาราง 8 การยืนยันความถูกต้องของเอลิเมนต์โดยโปรแกรมโมลโฟลพลาสติกอินไซท์ เวอร์ชัน 4.0

ลำดับที่	ความยาวรอบเอลิเมนต์ สามเหลี่ยม (mm)	แอสเป็ค เรโซ	จำนวน เอลิเมนต์	เวลาที่พียู (s)	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%)
1	0.94	6.1	22934	5200.42	2.6511
2	0.77	6.1	32062	8523.09	2.6520
3	0.73	6.1	35086	9789.67	2.6520
4	0.72	5.4	36018	10289.00	2.6497
5	0.64	5.4	47386	15135.80	2.6529
6	0.57	4.9	57706	67716.30	2.6512
7	0.52	4.9	66642	34355.90	3.3948

นำค่าการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกับค่าการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลอง เมื่อการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลอง คือ 5.5735% กำหนดให้พารามิเตอร์ในสภาวะการฉีดคงที่ คือ ความดันฉีด 500 bar เวลาฉีด 1.5 s และอุณหภูมิหลอมเหลว 255°C พารามิเตอร์ในสภาวะการย้าแบบเป็นขั้น คือ ความดันย้าในขั้นแรก 400 bar ความดันย้าในขั้นที่สอง 340 bar เวลาย้า 15 s อุณหภูมิแม่พิมพ์ 20°C โดยใช้โพลิโพรพิลีน พบว่าเมื่อจำนวนเอลิเมนต์เพิ่มขึ้น การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยที่ได้จากการวิเคราะห์มีแนวโน้มเข้าใกล้การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองมากขึ้น แสดงดังภาพประกอบ 37 ดังนั้นเลือกใช้การตรวจสอบเอลิเมนต์ลำดับที่ 7 คือ การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยเท่ากับ 3.3948%



ภาพประกอบ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเอลิเมนต์กับการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย



ภาพประกอบ 38 ลำดับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.2.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1. สร้างโมเดลผลิตภัณฑ์สัณฐานรูปทรงสามมิติด้วยโปรแกรมโซลิดเวิร์ค 2004 (Solidworks 2004) พบว่ามีปริมาตร 6.5433 cm^3 บันทึกแฟ้มเป็นไอจีอีเอส (IGES)
2. นำแฟ้มโมเดลที่บันทึกแฟ้มเป็นไอจีอีเอส (IGES) มานำเข้าในโปรแกรมโมลโฟลพลาสติกอินไซต์ เวอร์ชัน 4 (Moldflow Plastics Insight V4.0) ดังภาพประกอบ 38(ก)
3. สร้างเมช (Mesh) ชนิดสามเหลี่ยมแบบฟิวชั่น (Fusion mesh) พร้อมตั้งค่าความยาวของเอลิเมนต์ 0.52 mm
4. ทำการเจนเนอเรท เมช (Generated mesh) พบว่าผลิตภัณฑ์ทั้งชิ้นประกอบด้วย 66,642 เอลิเมนต์ ดังภาพประกอบ 38(ข)
5. ตั้งค่าลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ที่ Flow (Filling+Packing)
6. เลือกเมตพลาสติกให้ตรงกับการทดลอง
7. สร้างขนาดและตำแหน่งทางเข้า (Gate) เป็นชนิดทางเข้าด้านข้าง (Side gate) ในตำแหน่งศูนย์กลางและเลือกจำนวนของโพรงแบบเท่ากับ 2 ดังภาพประกอบ 38(ค)
8. ทางเข้ามีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ $2 \times 1 \text{ mm}$ มีความยาวของเกตแลนด์ (Gate land) 2 mm ทางวิ่ง (Runner) เป็นแบบครึ่งวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm หน้า 3 mm และทางฉีด (Sprue) มีเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น 6.5 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางสุดท้าย 3 mm มีความยาว 56 mm ดังภาพประกอบ 38(ง)
9. ตั้งค่าพารามิเตอร์ในการจำลองกระบวนการฉีดให้ตรงกับการทดลอง
10. ดำเนินการวิเคราะห์
11. บันทึกผลการวิเคราะห์ ดังภาพประกอบ 38(จ) การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย (Average volumetric shrinkage) จาก Result summary
12. นำผลการวิเคราะห์มาบันทึกลงบนกราฟ
13. วิเคราะห์ผลการวิจัย

บทที่ 4

ผลการวิจัย

ผลการวิจัยเรื่อง การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์พลาสติกฉีดด้วยการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการวิจัยมีดังหัวข้อต่อไปนี้

4.1 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์พลาสติกโพลิสไตรีนและโพลิพรอพิลีนจากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

4.2 ผลการเปรียบเทียบสภาวะที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์โพลิสไตรีนและโพลิพรอพิลีนจากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

4.1 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์พลาสติกโพลิสไตรีนและโพลิพรอพิลีนจากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์พลาสติกฉีดจากการทดลองสำหรับหัวข้อนี้จะกล่าวถึง ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์พลาสติกโพลิสไตรีนและโพลิพรอพิลีน ดังต่อไปนี้

ตาราง 9 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิหลอมเหลว 230 °C เวลาฉีด 1 s และความดันฉีด 400 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อุณหภูมิแม่พิมพ์ (°C)	เวลาย้ำ (s)	ความดันย้ำ (% ของความดันฉีด)	โพลิสไตรีน (Polystyrene)		โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)	
			การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
10	3	75	5.7259	2.4084	5.9102	7.1155
		90	4.9452	2.1358	5.8590	6.9659
		105	4.0098	1.8809	5.8195	6.8550
	6	75	5.6396	2.3790	3.9442	3.9014
		90	4.8000	2.0908	3.5258	3.5593
		105	3.7789	1.8265	3.0463	3.2342
	9	75	5.6474	2.3790	3.9383	3.8961
		90	4.7970	2.0911	3.5191	3.5543
		105	3.7780	1.8263	3.0365	3.2282
30	3	75	6.0879	2.5617	6.1994	8.0965
		90	5.4166	2.2933	6.1649	7.9654
		105	4.6174	2.0390	6.1381	7.8667
	6	75	5.8605	2.4640	4.2761	4.2235
		90	5.0897	2.1820	3.9110	3.8719
		105	4.1515	1.9152	3.5013	3.5411
	9	75	5.8607	2.4641	4.2672	4.2142
		90	5.0894	2.1819	3.8953	3.8581
		105	4.1483	1.9144	3.4731	3.5204
50	3	75	6.5182	2.7694	6.4417	9.1541
		90	5.9649	2.5079	6.4212	9.0541
		105	5.3227	2.2602	6.4057	8.9797
	6	75	6.0591	2.5489	4.5704	4.5570
		90	5.3331	2.2638	4.2586	4.2052
		105	4.4603	1.9955	3.9063	3.8677
	9	75	6.0603	2.5494	4.5455	4.5268
		90	5.3325	2.2636	4.2218	4.1672
		105	4.4514	1.9931	3.8432	3.8129
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)			56		11	

จากตาราง 9 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิสไตรีนพบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10 °C เมื่อเวลาย้ำครั้งที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.6474 % ถึง 3.7780 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30 °C และ 50 °C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.8607 % ถึง 4.1483 % และ 6.0603 % ถึง 4.4514 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10 °C เมื่อความดันย้ำครั้งที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่

ระหว่าง 4.9452 % ถึง 4.7970 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.4166 % ถึง 5.0894 % และ 5.9649 % ถึง 5.3325 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิสไตรีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาอย่างต่ำที่ 9 s ความดันย่ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.3790 % ถึง 1.8263 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.4641 % ถึง 1.9144 % และ 2.5494 % ถึง 1.9931 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย่ำอย่างต่ำที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาอย่างต่ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.1358 % ถึง 2.0911 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.2933 % ถึง 2.1819 % และ 2.5079 % ถึง 2.2636 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาอย่างต่ำที่ 15 s ความดันย่ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.9383 % ถึง 3.0365 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.2672 % ถึง 3.4731 % และ 4.5455 % ถึง 3.8432 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย่ำอย่างต่ำที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาอย่างต่ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.8590 % ถึง 3.5191 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.1649 % ถึง 3.8953 % และ 6.4212 % ถึง 4.2218 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาอย่างต่ำที่ 15 s ความดันย่ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.8961 % ถึง 3.2282 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.2142 % ถึง 3.5204 % และ 4.5268 % ถึง 3.8129 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย่ำอย่างต่ำที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาอย่างต่ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.9659 % ถึง 3.5543 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.9654 % ถึง 3.8581 % และ 9.0541 % ถึง 4.1672 % ตามลำดับ

ดังนั้น ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ เมื่อเวลาอย่างต่ำที่ ความดันย่ำเพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความดันย่ำคงที่ เวลาอย่างต่ำเพิ่มขึ้น การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์สูง และพบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 56 % และ 11 % ตามลำดับ

ตาราง 10 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิหลอมเหลว 230°C เวลาฉีด 1 s และความดันฉีด 550 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลาย้ำ (s)	ความดันย้ำ (% ของ ความดัน ฉีด)	โพลิสไตรีน (Polystyrene)		โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)		
			การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	
10	3	75	7.0814	1.9122	7.5210	6.8685	
		90	5.4201	1.5733	7.4789	6.7536	
		105	3.0245	1.2505	7.4507	6.6787	
	6	75	6.8582	1.8589	4.8090	3.2755	
		90	5.0444	1.5120	4.0298	2.8475	
		105	2.3258	1.1815	3.0580	2.4485	
	9	75	6.8577	1.8588	4.7992	3.2693	
		90	5.0399	1.5113	4.0065	2.8364	
		105	2.3057	1.1796	3.0159	2.4337	
	30	3	75	7.6650	2.0702	7.8376	7.8775
			90	6.2966	1.7356	7.8122	7.7858
			105	4.4213	1.4209	7.7951	7.7250
6		75	7.2201	1.9481	5.2548	3.5836	
		90	5.5669	1.5979	4.5929	3.1444	
		105	3.1284	1.2630	3.8125	2.7474	
9		75	7.2174	1.9474	5.2286	3.5639	
		90	5.5531	1.5955	4.5379	3.1127	
		105	3.0942	1.2593	3.7702	2.7287	
50		3	75	8.3477	2.2905	8.1039	8.9876
			90	7.3006	1.9691	8.0882	8.9138
			105	6.0085	1.6785	8.0783	8.8675
	6	75	7.5195	2.0286	5.6507	3.9103	
		90	5.9845	1.6739	5.1243	3.4876	
		105	3.7690	1.3366	4.5210	3.1031	
	9	75	7.5116	2.0264	5.5910	3.8573	
		90	5.9640	1.6700	5.0202	3.4146	
		105	3.7228	1.3310	4.3758	3.0229	
	ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)				68	22	

จากตาราง 10 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิสไตรีนพบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำครั้งที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.8577 % ถึง 2.3057 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.2174 % ถึง 3.0942 % และ 7.5116 % ถึง 3.7228 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำครั้งที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่

ระหว่าง 5.4201 % ถึง 5.0399 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.2966 % ถึง 5.5531 % และ 7.3006 % ถึง 5.9640 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิสไตรีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาอ่างที่ ที่ 9 s ความดันยำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.8588 % ถึง 1.1796 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.9474 % ถึง 1.2593 % และ 2.0264 % ถึง 1.3310 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันยำที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลายำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.5733 % ถึง 1.5113 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.7356 % ถึง 1.5955 % และ 1.9691 % ถึง 1.6700 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาอ่างที่ ที่ 15 s ความดันยำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.7992 % ถึง 3.0159 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.2286 % ถึง 3.7702 % และ 5.5910 % ถึง 4.3758 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันยำที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลายำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.4789 % ถึง 4.0065 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.8122 % ถึง 4.5379 % และ 8.0882 % ถึง 5.0202 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาอ่างที่ ที่ 15 s ความดันยำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.2693 % ถึง 2.4337 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.5639 % ถึง 2.7287 % และ 3.8573 % ถึง 3.0229 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันยำที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลายำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.7536 % ถึง 2.8364 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.7858 % ถึง 3.1127 % และ 8.9138 % ถึง 3.4146 % ตามลำดับ

ดังนั้น ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ เมื่อเวลาอ่างที่ ความดันยำเพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความดันยำที่ เวลายำเพิ่มขึ้น การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์สูง และพบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 68 % และ 22 % ตามลำดับ

ตาราง 11 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิหลอมเหลว 230°C เวลาฉีด 1 s และความดันฉีด 700 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลาย้ำ (s)	ความดันย้ำ (% ของ ความดัน ฉีด)	โพลิสไตรีน (Polystyrene)		โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)	
			การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์
10	3	75	7.5974	1.4541	7.4681	6.7205
		90	3.9650	1.0700	7.4348	6.6331
		105	2.0142	0.8562	7.4211	6.5980
	6	75	7.1304	1.3900	3.6822	2.6900
		90	2.9305	0.9948	2.7212	2.3346
		105	2.1418	0.7359	2.2908	2.2013
	9	75	7.1228	1.3890	3.6503	2.6765
		90	2.9008	0.9928	2.6691	2.3180
		105	2.1315	0.7355	2.2090	2.1810
30	3	75	8.6196	1.6179	7.8059	7.7579
		90	6.1087	1.2675	7.7834	7.6789
		105	4.8154	1.1403	7.7739	7.6460
	6	75	7.7376	1.4747	4.3383	3.0020
		90	4.0504	1.0764	3.5743	2.6448
		105	2.7899	0.8232	3.3147	2.5420
	9	75	7.7187	1.4719	4.2760	2.9693
		90	3.9892	1.0716	3.4704	2.6027
		105	2.6855	0.8184	3.1934	2.4967
50	3	75	9.7938	1.8581	8.0858	8.8952
		90	8.2831	1.5601	8.0718	8.8307
		105	7.6027	1.4550	8.0639	8.7944
	6	75	8.2223	1.5501	4.8859	3.3238
		90	4.8784	1.1459	4.3477	3.0070
		105	1.2521	0.8933	4.1602	2.9104
	9	75	8.1892	1.5447	4.7681	3.2489
		90	4.8368	1.1422	4.1804	2.9205
		105	1.2152	0.8913	3.9790	2.8227
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)			72	18		

จากตาราง 11 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิสไตรีนพบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำครั้งที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.1228 % ถึง 2.1315 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.7187 % ถึง 2.6855 % และ 8.1892 % ถึง 1.2152 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำครั้งที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่

ระหว่าง 3.9650 % ถึง 2.9008 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.1087 % ถึง 3.9892 % และ 8.2831 % ถึง 4.8368 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิสไตรีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.3890 % ถึง 0.7355 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.4719 % ถึง 0.8184 % และ 1.5447 % ถึง 0.8913 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.0700 % ถึง 0.9928 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.2675 % ถึง 1.0716 % และ 1.5601 % ถึง 1.1422 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.6503 % ถึง 2.2090 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.2760 % ถึง 3.1934 % และ 4.7681 % ถึง 3.9790 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.4348 % ถึง 2.6691 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.7834 % ถึง 3.4704 % และ 8.0718 % ถึง 4.1804 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.6765 % ถึง 2.1810 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.9693 % ถึง 2.4967 % และ 3.2489 % ถึง 2.8227 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.6331 % ถึง 2.3180 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.6789 % ถึง 2.6027 % และ 8.8307 % ถึง 2.9205 % ตามลำดับ

ดังนั้น ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ เมื่อเวลาย้ำคงที่ ความดันย้ำเพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความดันย้ำคงที่ เวลาย้ำเพิ่มขึ้น การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์สูง และพบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 72 % และ 18 % ตามลำดับ

ตาราง 12 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิหลอมเหลว 230 °C เวลาฉีด 2.5 s และความดันฉีด 400 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลาย้ำ (s)	ความดันย้ำ (% ของ ความดัน ฉีด)	โพลิสไตรีน (Polystyrene)		โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)	
			การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์
10	3	75	5.2551	2.2340	5.3193	5.7062
		90	4.2907	1.9525	5.2311	5.5420
		105	3.1604	1.6934	5.1568	5.4107
	6	75	5.2279	2.2277	3.6342	3.6432
		90	4.2590	1.9424	3.1507	3.3008
		105	3.0737	1.6793	2.5848	2.9737
	9	75	5.2279	2.2277	3.6325	3.6419
		90	4.2590	1.9424	3.1504	3.3006
		105	3.0747	1.6795	2.5863	2.9745
30	3	75	5.5407	2.3386	5.7888	6.7751
		90	4.7143	2.0668	5.7360	6.6354
		105	3.6943	1.8075	5.6946	6.5298
	6	75	5.4777	2.3154	4.0067	3.9597
		90	4.6000	2.0341	3.6112	3.6253
		105	3.5216	1.7699	3.1684	3.3122
	9	75	5.4777	2.3154	4.0035	3.9567
		90	4.6004	2.0342	3.6055	3.6209
		105	3.5174	1.7690	3.1544	3.3032
50	3	75	5.9133	2.4860	6.1555	7.9361
		90	5.1987	2.2179	6.1268	7.8313
		105	4.3349	1.9621	6.1051	7.7537
	6	75	5.7091	2.4030	4.3565	4.3113
		90	4.8915	2.1196	4.0152	3.9675
		105	3.8876	1.8515	3.6274	3.6379
	9	75	5.7086	2.4028	4.3395	4.2928
		90	4.8888	2.1188	3.9929	3.9470
		105	3.8777	1.8492	3.5865	3.6063
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)			54	8		

จากตาราง 12 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิสไตรีนพบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10 °C เมื่อเวลาย้ำครั้งที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.2279 % ถึง 3.0747 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30 °C และ 50 °C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.4777 % ถึง 3.5174 % และ 5.7086 % ถึง 3.8777 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10 °C เมื่อความดันย้ำครั้งที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่

ระหว่าง 4.2907 % ถึง 4.2590 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.7143 % ถึง 4.6004 % และ 5.1987 % ถึง 4.8888 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิสไตรีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.2277 % ถึง 1.6795 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.3154 % ถึง 1.7690 % และ 2.4028 % ถึง 1.8492 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.9525 % ถึง 1.9424 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.0668 % ถึง 2.0342 % และ 2.2179 % ถึง 2.1188 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.6325 % ถึง 2.5863 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.0035 % ถึง 3.1544 % และ 4.3395 % ถึง 3.5865 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.2311 % ถึง 3.1504 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.7360 % ถึง 3.6055 % และ 6.1268 % ถึง 3.9929 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.6419 % ถึง 2.9745 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.9567 % ถึง 3.3032 % และ 4.2928 % ถึง 3.6063 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.5420 % ถึง 3.3006 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.6354 % ถึง 3.6209 % และ 7.8313 % ถึง 3.9470 % ตามลำดับ

ดังนั้น ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ เมื่อเวลาย้ำคงที่ ความดันย้ำเพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความดันย้ำคงที่ เวลาย้ำเพิ่มขึ้น การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์สูง และพบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 54 % และ 8 % ตามลำดับ

ตาราง 13 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิหลอมเหลว 230 °C เวลาฉีด 2.5 s และความดันฉีด 550 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลาย้ำ (s)	ความดันย้ำ (% ของ ความดัน ฉีด)	โพลิสไตรีน (Polystyrene)		โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)	
			การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์
10	3	75	6.2447	1.7253	6.8651	5.4258
		90	4.1366	1.3830	6.7802	5.2825
		105	2.3198	1.0563	6.7219	5.1883
	6	75	6.1765	1.7116	4.3632	3.0153
		90	3.9902	1.3642	3.4586	2.5980
		105	2.0553	1.0366	2.3378	2.2177
	9	75	6.1775	1.7118	4.3649	3.0162
		90	3.9886	1.3640	3.4569	2.5973
		105	2.0406	1.0355	2.3136	2.2107
30	3	75	6.7730	1.8394	7.3990	6.5417
		90	4.9418	1.4964	7.3522	6.4258
		105	2.2044	1.1702	7.3229	6.3554
	6	75	6.6068	1.8019	4.8957	3.3302
		90	4.6408	1.4519	4.1860	2.9233
		105	1.6835	1.1236	3.3010	2.5368
	9	75	6.6036	1.8012	4.8830	3.3219
		90	4.6276	1.4500	4.1550	2.9078
		105	1.6392	1.1198	3.2230	2.5076
50	3	75	7.3902	1.9934	7.8071	7.7619
		90	5.8984	1.6579	7.7836	7.6797
		105	3.8550	1.3473	7.7692	7.6297
	6	75	6.9650	1.8847	5.3628	3.6660
		90	5.1688	1.5318	4.7607	3.2443
		105	2.5518	1.2035	4.0503	2.8566
	9	75	6.9568	1.8827	5.3431	3.6505
		90	5.1417	1.5275	4.6848	3.1979
		105	2.5009	1.1985	3.9434	2.8061
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)			63		22	

จากตาราง 13 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิสไตรีนพบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10 °C เมื่อเวลาย้ำครั้งที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.1775 % ถึง 2.0406 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30 °C และ 50 °C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.6036 % ถึง 1.6392 % และ 6.9568 % ถึง 2.5009 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10 °C เมื่อความดันย้ำครั้งที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่

ระหว่าง 4.1366 % ถึง 3.9886 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.9418 % ถึง 4.6276 % และ 5.8984 % ถึง 5.1417 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิสไตรีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.7118 % ถึง 1.0355 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.8012 % ถึง 1.1198 % และ 1.8827 % ถึง 1.1985 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.3830 % ถึง 1.3640 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.4964 % ถึง 1.4500 % และ 1.6579 % ถึง 1.5275 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.3649 % ถึง 2.3136 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.8830 % ถึง 3.2230 % และ 5.3431 % ถึง 3.9434 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.7802 % ถึง 3.4569 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.3522 % ถึง 4.1550 % และ 7.7836 % ถึง 4.6848 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.0162 % ถึง 2.2107 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.3219 % ถึง 2.5076 % และ 3.6505 % ถึง 2.8061 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.2825 % ถึง 2.5973 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.4258 % ถึง 2.9078 % และ 7.6797 % ถึง 3.1979 % ตามลำดับ

ดังนั้น ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ เมื่อเวลาย้ำคงที่ ความดันย้ำเพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความดันย้ำคงที่ เวลาย้ำเพิ่มขึ้น การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์สูง และพบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 63 % และ 22 % ตามลำดับ

ตาราง 14 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิหลอมเหลว 230 °C เวลาฉีด 2.5 s และความดันฉีด 700 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลาย้ำ (s)	ความดันย้ำ (% ของ ความดัน ฉีด)	โพลิสไตรีน (Polystyrene)		โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)	
			การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์
10	3	75	6.0637	1.2626	6.7525	5.2398
		90	3.9669	0.8813	6.6908	5.1419
		105	2.2491	0.6445	6.6663	5.1040
	6	75	5.8773	1.2427	3.1198	2.4705
		90	2.1139	0.8615	1.7661	2.0640
		105	1.4879	0.6198	1.4264	1.9067
	9	75	5.8716	1.2421	3.1134	2.4682
		90	2.0860	0.8601	1.7224	2.0531
		105	1.8905	0.6188	1.3500	1.8903
30	3	75	7.0198	1.3756	7.3353	6.3886
		90	2.9971	0.9993	7.3034	6.3130
		105	2.0507	0.7905	7.2901	6.2818
	6	75	6.6510	1.3297	3.8532	2.7656
		90	2.2209	0.9492	2.8829	2.3882
		105	1.4130	0.7100	2.4876	2.2624
	9	75	6.6302	1.3272	3.8096	2.7461
		90	2.1636	0.9457	2.7680	2.3502
		105	1.3703	0.7085	2.3583	2.2241
50	3	75	8.1639	1.5406	7.7753	7.6562
		90	5.5457	1.2088	7.7565	7.5918
		105	4.4922	1.1124	7.7469	7.5593
	6	75	7.2759	1.4094	4.4877	3.0843
		90	3.3798	1.0260	3.7558	2.7224
		105	2.0448	0.7902	3.5241	2.6249
	9	75	7.2411	1.4047	4.3979	3.0348
		90	3.3167	1.0215	3.6274	2.6675
		105	1.9596	0.7866	3.3741	2.5654
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)			69		20	

จากตาราง 14 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิสไตรีนพบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10 °C เมื่อเวลาย้ำครั้งที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.8716 % ถึง 1.8905 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30 °C และ 50 °C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.6302 % ถึง 1.3703 % และ 7.2411 % ถึง 1.9596 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10 °C เมื่อความดันย้ำครั้งที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่

ระหว่าง 3.9669 % ถึง 2.0860 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.9971 % ถึง 2.1636 % และ 5.5457 % ถึง 3.3167 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิสไตรีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาอ่างที่ ที่ 9 s ความดันยำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.2421 % ถึง 0.6188 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.3272 % ถึง 0.7085 % และ 1.4047 % ถึง 0.7866 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันยำอ่างที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลายำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.8813 % ถึง 0.8601 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.9993 % ถึง 0.9457 % และ 1.2088 % ถึง 1.0215 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาอ่างที่ ที่ 15 s ความดันยำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.1134 % ถึง 1.3500 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.8096 % ถึง 2.3583 % และ 4.3979 % ถึง 3.3741 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันยำอ่างที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลายำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.6908 % ถึง 1.7224 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.3034 % ถึง 2.7680 % และ 7.7565 % ถึง 3.6274 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาอ่างที่ ที่ 15 s ความดันยำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.4682 % ถึง 1.8903 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.7461 % ถึง 2.2241 % และ 3.0348 % ถึง 2.5654 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันยำอ่างที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลายำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.1419 % ถึง 2.0531 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.3130 % ถึง 2.3502 % และ 7.5918 % ถึง 2.6675 % ตามลำดับ

ดังนั้น ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ เมื่อเวลาอ่างที่ ความดันยำเพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความดันยำอ่างที่ เวลายำเพิ่มขึ้น การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์สูง และพบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 69 % และ 20 % ตามลำดับ

ตาราง 15 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิหลอมเหลว 230°C เวลาฉีด 4 s และความดันฉีด 400 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลาย้ำ (s)	ความดันย้ำ (% ของ ความดัน ฉีด)	โพลิสไตรีน (Polystyrene)		โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)		
			การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	
10	3	75	4.5777	2.0282	4.7312	4.7626	
		90	3.6021	1.7875	4.5755	4.5633	
		105	2.3283	1.5477	4.4372	4.3998	
	6	75	4.5831	2.0297	3.2954	3.3953	
		90	3.6011	1.7873	2.7224	3.0463	
		105	2.3185	1.5461	2.0791	2.7311	
	9	75	4.5831	2.0297	3.2953	3.3952	
		90	3.6016	1.7874	2.7224	3.0463	
		105	2.3191	1.5462	2.0798	2.7314	
	30	3	75	5.0317	2.1638	5.3477	5.7581
			90	4.1018	1.9032	5.2694	5.6093
			105	2.9294	1.6523	5.2000	5.4835
6		75	5.0018	2.1543	3.7437	3.7296	
		90	4.0504	1.8906	3.2911	3.3924	
		105	2.8402	1.6359	2.7327	3.0519	
9		75	5.0018	2.1543	3.7423	3.7285	
		90	4.0496	1.8904	3.2894	3.3912	
		105	2.8358	1.6351	2.7226	3.0464	
50		3	75	5.4317	2.2992	5.8508	6.9425
			90	4.5955	2.0332	5.8089	6.8257
			105	3.5530	1.7769	5.7758	6.7361
	6	75	5.3312	2.2636	4.1315	4.0769	
		90	4.4371	1.9896	3.7704	3.7516	
		105	3.3091	1.7260	3.3260	3.4162	
	9	75	5.3306	2.2634	4.1223	4.0679	
		90	4.4334	1.9886	3.7486	3.7336	
		105	3.2968	1.7235	3.2837	3.3874	
	ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)			50	8		

จากตาราง 15 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิสไตรีนพบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำครั้งที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.5831 % ถึง 2.3191 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.0018 % ถึง 2.8358 % และ 5.3306 % ถึง 3.2968 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำครั้งที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่

ระหว่าง 3.6021 % ถึง 3.6016 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.1018 % ถึง 4.0496 % และ 4.5955 % ถึง 4.4334 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิสไตรีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.0297 % ถึง 1.5462 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.1543 % ถึง 1.6351 % และ 2.2634 % ถึง 1.7235 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.7875 % ถึง 1.7874 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.9032 % ถึง 1.8904 % และ 2.0332 % ถึง 1.9886 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.2953 % ถึง 2.0798 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.7423 % ถึง 2.7226 % และ 4.1223 % ถึง 3.2837 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.5755 % ถึง 2.7224 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.2694 % ถึง 3.2894 % และ 5.8089 % ถึง 3.7486 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.3952 % ถึง 2.7314 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.7285 % ถึง 3.0464 % และ 4.0679 % ถึง 3.3874 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.5633 % ถึง 3.0463 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.6093 % ถึง 3.3912 % และ 6.8257 % ถึง 3.7336 % ตามลำดับ

ดังนั้น ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ เมื่อเวลาย้ำคงที่ ความดันย้ำเพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความดันย้ำคงที่ เวลาย้ำเพิ่มขึ้น การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์สูง และพบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 50 % และ 8 % ตามลำดับ

ตาราง 16 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิหลอมเหลว 230°C เวลาฉีด 4 s และความดันฉีด 550 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลาย้ำ (s)	ความดันย้ำ (% ของ ความดัน ฉีด)	โพลิสไตรีน (Polystyrene)		โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)	
			การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์
10	3	75	5.4480	1.5775	6.1502	4.4186
		90	3.0523	1.2548	5.9796	4.2308
		105	3.0523	1.2548	5.8563	4.1047
	6	75	5.4320	1.5748	3.8683	2.7724
		90	2.9914	1.2483	2.7655	2.3494
		105	1.9625	0.9336	1.3573	1.9663
	9	75	5.4326	1.5749	3.8694	2.7729
		90	2.9857	1.2477	2.7637	2.3488
		105	1.9302	0.9317	1.3326	1.9607
30	3	75	6.0319	1.6830	6.9055	5.4995
		90	3.8564	1.3473	6.8218	5.3543
		105	1.8891	1.0245	6.7686	5.2660
	6	75	5.9502	1.6674	4.5037	3.0933
		90	3.6945	1.3276	3.6241	2.6661
		105	1.6363	1.0067	2.5239	2.2734
	9	75	5.9465	1.6667	4.4955	3.0887
		90	3.6770	1.3255	3.5972	2.6549
		105	1.5761	1.0026	2.4388	2.2478
50	3	75	6.6374	1.8084	7.4761	6.7461
		90	4.7593	1.4689	7.4379	6.6452
		105	1.9203	1.1442	7.4157	6.5879
	6	75	6.4063	1.7584	5.0693	3.4486
		90	4.3554	1.4119	4.3535	3.0109
		105	1.2345	1.0862	3.4944	2.6129
	9	75	6.3959	1.7562	5.0300	3.4213
		90	4.3243	1.4077	4.2634	2.9636
		105	1.1908	1.0827	3.3510	2.5565
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)			58	25		

จากตาราง 16 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิสไตรีนพบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำครั้งที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.4326 % ถึง 1.9302 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.9465 % ถึง 1.5761 % และ 6.3959 % ถึง 1.1908 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำครั้งที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่

ระหว่าง 5.4480 % ถึง 2.9857 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.8564 % ถึง 3.6770 % และ 4.7593 % ถึง 4.3243 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิสไตรีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.5749 % ถึง 0.9317 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.6667 % ถึง 1.0026 % และ 1.7562 % ถึง 1.0827 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.2548 % ถึง 1.2477 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.3473 % ถึง 1.3255 % และ 1.4689 % ถึง 1.4077 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.8694 % ถึง 1.3326 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.4955 % ถึง 2.4388 % และ 5.0300 % ถึง 3.3510 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.9796 % ถึง 2.7637 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.8218 % ถึง 3.5972 % และ 7.4379 % ถึง 4.2634 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.7729 % ถึง 1.9607 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.0887 % ถึง 2.2478 % และ 3.4213 % ถึง 2.5565 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.2308 % ถึง 2.3488 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.3543 % ถึง 2.6549 % และ 6.6452 % ถึง 2.9636 % ตามลำดับ

ดังนั้น ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ เมื่อเวลาย้ำคงที่ ความดันย้ำเพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความดันย้ำคงที่ เวลาย้ำเพิ่มขึ้น การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์สูง และพบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 58 % และ 25 % ตามลำดับ

ตาราง 17 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิหลอมเหลว 230°C เวลาฉีด 4 s และความดันฉีด 700 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลาย้ำ (s)	ความดันย้ำ (% ของ ความดัน ฉีด)	โพลิสไตรีน (Polystyrene)		โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)	
			การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์
10	3	75	4.8130	1.1402	5.9241	4.1715
		90	3.9539	0.7488	5.8185	4.0660
		105	3.7731	0.5134	5.7618	4.0116
	6	75	4.7207	1.1321	2.2972	2.2060
		90	3.7525	0.7412	1.7930	1.7761
		105	3.3999	0.5068	1.3889	1.5953
	9	75	4.7081	1.1310	2.2906	2.2041
		90	3.6776	0.7384	1.7455	1.7673
		105	3.2397	0.5040	1.4602	1.5809
30	3	75	5.7383	1.2284	6.7963	5.3091
		90	3.2911	0.8470	6.7454	5.2258
		105	2.9972	0.6287	6.7248	5.1930
	6	75	5.5464	1.2090	3.2403	2.5140
		90	2.9164	0.8291	1.8516	2.0853
		105	2.0597	0.6008	1.6623	1.9204
	9	75	5.5151	1.2059	3.1997	2.4990
		90	2.8429	0.8257	1.7416	2.0575
		105	1.9774	0.5988	1.3770	1.8956
50	3	75	6.8094	1.3492	7.4286	6.6173
		90	2.8291	0.9881	7.4030	6.5518
		105	2.0905	0.8604	7.3931	6.5270
	6	75	6.3184	1.2910	4.0355	2.8495
		90	2.4418	0.9188	3.0502	2.4452
		105	1.4587	0.6967	2.6679	2.3176
	9	75	6.2812	1.2868	3.9211	2.7958
		90	2.2404	0.9157	2.9005	2.3936
		105	0.8958	0.6927	2.4937	2.2638
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)			72	17		

จากตาราง 17 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิสไตรีนพบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำครั้งที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.7081 % ถึง 3.2397 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.5151 % ถึง 1.9774 % และ 6.2812 % ถึง 0.8958 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำครั้งที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่

ระหว่าง 3.9539 % ถึง 3.6776 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.2911 % ถึง 2.8429 % และ 2.8291 % ถึง 2.2404 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิสไตรีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.1310 % ถึง 0.5040 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.2059 % ถึง 0.5988 % และ 1.2868 % ถึง 0.6927 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.7488 % ถึง 0.7384 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.8470 % ถึง 0.8257 % และ 0.9881 % ถึง 0.9157 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.2906 % ถึง 1.4602 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.1997 % ถึง 1.3770 % และ 3.9211 % ถึง 2.4937 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.8185 % ถึง 1.7455 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.7454 % ถึง 1.7416 % และ 7.4030 % ถึง 2.9005 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.2041 % ถึง 1.5809 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.4990 % ถึง 1.8956 % และ 2.7958 % ถึง 2.2638 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.0660 % ถึง 1.7673 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.2258 % ถึง 2.0575 % และ 6.5518 % ถึง 2.3936 % ตามลำดับ

ดังนั้น ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ เมื่อเวลาย้ำคงที่ ความดันย้ำเพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความดันย้ำคงที่ เวลาย้ำเพิ่มขึ้น การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์สูง และพบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 72 % และ 17 % ตามลำดับ

ตาราง 18 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิหลอมเหลว 260°C เวลาฉีด 1 s และความดันฉีด 400 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลาย้ำ (s)	ความดันย้ำ (% ของ ความดัน ฉีด)	โพลิสไตรีน (Polystyrene)		โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)	
			การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์
10	3	75	5.7919	2.4360	6.2860	8.4518
		90	5.1207	2.1921	6.2608	8.3469
		105	4.3342	1.9619	6.2426	8.2730
	6	75	5.2906	2.2491	3.9077	3.8703
		90	4.4019	1.9798	3.5136	3.5513
		105	3.3060	1.7251	3.0598	3.2435
	9	75	5.2903	2.2490	3.8907	3.8554
		90	4.4008	1.9795	3.4884	3.5327
		105	3.3035	1.7246	3.0104	3.2132
30	3	75	6.3628	2.6906	6.4916	9.4154
		90	5.8386	2.4550	6.4749	9.3286
		105	5.2465	2.2340	6.4634	9.2704
	6	75	5.5624	2.3467	4.3041	4.2547
		90	4.7479	2.0766	3.9618	3.9186
		105	3.7497	1.8199	3.5847	3.6049
	9	75	5.5664	2.3482	4.2393	4.1867
		90	4.7499	2.0772	3.8943	3.8585
		105	3.7413	1.8180	3.4741	3.5222
50	3	75	6.9371	3.0068	6.6736	10.4719
		90	6.5373	2.7794	6.6620	10.3978
		105	6.1056	2.5696	6.6535	10.3435
	6	75	5.8342	2.4532	4.7043	4.7289
		90	5.0804	2.1790	4.4512	4.4176
		105	4.1651	1.9186	4.1742	4.1206
	9	75	5.8092	2.4430	4.5501	4.5342
		90	5.0406	2.1662	4.2255	4.1726
		105	4.1036	1.9033	3.8613	3.8298
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)			56		16	

จากตาราง 18 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิสไตรีนพบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำครั้งที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.2903 % ถึง 3.3035 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.5664 % ถึง 3.7413 % และ 5.8092 % ถึง 4.1036 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำครั้งที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่

ระหว่าง 5.1207 % ถึง 4.4008 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.8386 % ถึง 4.7499 % และ 6.5373 % ถึง 5.0406 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิสไตรีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.2490 % ถึง 1.7246 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.3482 % ถึง 1.8180 % และ 2.4430 % ถึง 1.9033 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.1921 % ถึง 1.9795 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.4550 % ถึง 2.0772 % และ 2.7794 % ถึง 2.1662 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.8907 % ถึง 3.0104 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.2393 % ถึง 3.4741 % และ 4.5501 % ถึง 3.8613 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.2608 % ถึง 3.4884 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.4749 % ถึง 3.8943 % และ 6.6620 % ถึง 4.2255 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.8554 % ถึง 3.2132 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.1867 % ถึง 3.5222 % และ 4.5342 % ถึง 3.8298 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 8.3469 % ถึง 3.5327 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 9.3286 % ถึง 3.8585 % และ 10.3978 % ถึง 4.1726 % ตามลำดับ

ดังนั้น ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ เมื่อเวลาย้ำคงที่ ความดันย้ำเพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความดันย้ำคงที่ เวลาย้ำเพิ่มขึ้น การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์สูง และพบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 56 % และ 16 % ตามลำดับ

ตาราง 19 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิหลอมเหลว 260°C เวลาฉีด 1 s และความดันฉีด 550 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลาย้ำ (s)	ความดันย้ำ (% ของ ความดัน ฉีด)	โพลิสไตรีน (Polystyrene)		โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)	
			การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์
10	3	75	7.3776	1.9900	7.9442	8.2909
		90	6.0714	1.6909	7.9257	8.2071
		105	4.4207	1.4210	7.9142	8.1617
	6	75	6.3926	1.7558	4.8234	3.2836
		90	4.4171	1.4205	4.0464	2.8547
		105	1.3713	1.0974	3.1842	2.4933
	9	75	6.3903	1.7553	4.7773	3.2546
		90	4.3967	1.4177	3.9775	2.8220
		105	1.3137	1.0927	3.0717	2.4528
30	3	75	8.2624	2.2609	8.1644	9.2770
		90	7.3257	1.9761	8.1525	9.2171
		105	6.2747	1.7314	8.1443	9.1764
	6	75	6.8252	1.8515	5.3229	3.6347
		90	5.0270	1.5095	4.7237	3.2215
		105	2.3171	1.1808	4.0669	2.8646
	9	75	6.8184	1.8499	5.2317	3.5651
		90	5.0167	1.5079	4.5548	3.1215
		105	2.2886	1.1781	3.7915	2.7374
50	3	75	9.0994	2.5951	8.3540	10.3495
		90	8.4668	2.3343	8.3449	10.2923
		105	7.9052	2.1431	8.3380	10.2495
	6	75	7.2261	1.9500	5.9104	4.1575
		90	5.6217	1.6077	5.4845	3.7649
		105	3.2257	1.2738	5.0947	3.4654
	9	75	7.1705	1.9357	5.6099	3.8726
		90	5.5158	1.5893	5.0438	3.4298
		105	3.0771	1.2576	4.4572	3.0665
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)			65		24	

จากตาราง 19 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิสไตรีนพบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำครั้งที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.3903 % ถึง 1.3137 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.8184 % ถึง 2.2886 % และ 7.1705 % ถึง 3.0771 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำครั้งที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่

ระหว่าง 6.0714 % ถึง 4.3967 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.3257 % ถึง 5.0167 % และ 8.4668 % ถึง 5.5158 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิสไตรีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.7553 % ถึง 1.0927 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.8499 % ถึง 1.1781 % และ 1.9357 % ถึง 1.2576 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.6909 % ถึง 1.4177 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.9761 % ถึง 1.5079 % และ 2.3343 % ถึง 1.5893 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.7773 % ถึง 3.0717 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.2317 % ถึง 3.7915 % และ 5.6099 % ถึง 4.4572 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.9257 % ถึง 3.9775 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 8.1525 % ถึง 4.5548 % และ 8.3449 % ถึง 5.0438 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.2546 % ถึง 2.4528 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.5651 % ถึง 2.7374 % และ 3.8726 % ถึง 3.0665 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 8.2071 % ถึง 2.8220 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 9.2171 % ถึง 3.1215 % และ 10.2923 % ถึง 3.4298 % ตามลำดับ

ดังนั้น ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ เมื่อเวลาย้ำคงที่ ความดันย้ำเพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความดันย้ำคงที่ เวลาย้ำเพิ่มขึ้น การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์สูง และพบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 65 % และ 24 % ตามลำดับ

ตาราง 20 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิหลอมเหลว 260°C เวลาฉีด 1 s และความดันฉีด 700 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลาย้ำ (s)	ความดันย้ำ (% ของ ความดัน ฉีด)	โพลิสไตรีน (Polystyrene)		โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)	
			การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์
10	3	75	8.4416	1.5868	7.9190	8.1863
		90	6.5309	1.3154	7.9031	8.1243
		105	5.5205	1.2063	7.8950	8.0927
	6	75	6.4193	1.3024	3.7346	2.7132
		90	4.7899	0.9270	2.8416	2.3744
		105	4.3005	0.7082	2.4663	2.2560
	9	75	6.3846	1.2984	3.6562	2.6796
		90	3.2351	0.9221	2.6893	2.3249
		105	2.7091	0.7041	2.2754	2.2002
30	3	75	9.8801	1.8786	8.1478	9.2014
		90	8.8135	1.6532	8.1362	9.1440
		105	8.2321	1.5517	8.1296	9.1114
	6	75	7.1236	1.3891	4.4955	3.0887
		90	3.1514	1.0099	3.8780	2.7768
		105	2.1051	0.7928	3.6424	2.6738
	9	75	7.1076	1.3870	4.2917	2.9783
		90	3.1008	1.0064	3.6116	2.6609
		105	1.9993	0.7883	3.3396	2.5521
50	3	75	11.1698	2.2495	8.3412	10.2787
		90	10.6470	2.0828	8.3319	10.2209
		105	10.3801	2.0069	8.3261	10.1855
	6	75	7.8134	1.4860	5.3146	3.6294
		90	4.3615	1.1015	4.9984	3.3997
		105	1.1371	0.8871	4.9050	3.3373
	9	75	7.6874	1.4673	4.8196	3.2822
		90	4.1498	1.0843	4.3161	2.9911
		105	2.1506	0.8633	4.1165	2.8895
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)			74		21	

จากตาราง 20 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิสไตรีนพบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำครั้งที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.3846 % ถึง 2.7091 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.1076 % ถึง 1.9993 % และ 7.6874 % ถึง 2.1506 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำครั้งที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่

ระหว่าง 6.5309 % ถึง 3.2351 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 8.8135 % ถึง 3.1008 % และ 10.6470 % ถึง 4.1498 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิสไตรีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาอ่างที่ ที่ 9 s ความดันยำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.2984 % ถึง 0.7041 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.3870 % ถึง 0.7883 % และ 1.4673 % ถึง 0.8633 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันยำที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลายำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.3154 % ถึง 0.9221 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.6532 % ถึง 1.0064 % และ 2.0828 % ถึง 1.0843 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาอ่างที่ ที่ 15 s ความดันยำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.6562 % ถึง 2.2754 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.2917 % ถึง 3.3396 % และ 4.8196 % ถึง 4.1165 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันยำที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลายำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.9031 % ถึง 2.6893 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 8.1362 % ถึง 3.6116 % และ 8.3319 % ถึง 4.3161 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาอ่างที่ ที่ 15 s ความดันยำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.6796 % ถึง 2.2002 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.9783 % ถึง 2.5521 % และ 3.2822 % ถึง 2.8895 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันยำที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลายำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 8.1243 % ถึง 2.3249 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 9.1440 % ถึง 2.6609 % และ 10.2209 % ถึง 2.9911 % ตามลำดับ

ดังนั้น ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ เมื่อเวลาอ่างที่ ความดันยำเพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความดันยำที่ เวลายำเพิ่มขึ้น การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์สูง และพบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 74 % และ 21 % ตามลำดับ

ตาราง 21 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิหลอมเหลว 260 °C เวลาฉีด 2.5 s และความดันฉีด 400 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลาย้ำ (s)	ความดันย้ำ (% ของ ความดัน ฉีด)	โพลิสไตรีน (Polystyrene)		โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)	
			การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์
10	3	75	4.9308	2.1321	5.8735	7.0076
		90	3.9895	1.8759	5.8334	6.8937
		105	2.8127	1.6309	5.8018	6.8062
	6	75	4.7687	2.0831	3.6047	3.6191
		90	3.7293	1.8156	3.1405	3.2933
		105	2.4092	1.5610	2.6057	2.9838
	9	75	4.7693	2.0833	3.5953	3.6119
		90	3.7293	1.8156	3.1232	3.2823
		105	2.4068	1.5606	2.5781	2.9694
30	3	75	5.4977	2.3232	6.1981	8.0914
		90	4.7411	2.0750	6.1745	8.0016
		105	3.8349	1.8396	6.1576	7.9385
	6	75	5.1105	2.1892	4.0203	3.9708
		90	4.1710	1.9204	3.6308	3.6394
		105	2.9908	1.6638	3.1705	3.3126
	9	75	5.1102	2.1891	3.9959	3.9483
		90	4.1678	1.9196	3.5807	3.6007
		105	2.9797	1.6617	3.1111	3.2746
50	3	75	6.1434	2.5873	6.4671	9.2810
		90	5.5722	2.3509	6.4528	9.2094
		105	4.9275	2.1311	6.4431	9.1610
	6	75	5.4040	2.2893	4.4479	4.4120
		90	4.5436	2.0187	4.1315	4.0769
		105	3.4655	1.7583	3.7860	3.7646
	9	75	5.4029	2.2889	4.3489	4.3014
		90	4.5342	2.0161	4.0032	3.9550
		105	3.4470	1.7544	3.6005	3.6159
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)			52	12		

จากตาราง 21 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิสไตรีนพบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10 °C เมื่อเวลาย้ำครั้งที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.7693 % ถึง 2.4068 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30 °C และ 50 °C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.1102 % ถึง 2.9797 % และ 5.4029 % ถึง 3.4470 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10 °C เมื่อความดันย้ำครั้งที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่

ระหว่าง 3.9895 % ถึง 3.7293 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.7411 % ถึง 4.1678 % และ 5.5722 % ถึง 4.5342 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิสไตรีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.0833 % ถึง 1.5606 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.1891 % ถึง 1.6617 % และ 2.2889 % ถึง 1.7544 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.8759 % ถึง 1.8156 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.0750 % ถึง 1.9196 % และ 2.3509 % ถึง 2.0161 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.5953 % ถึง 2.5781 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.9959 % ถึง 3.1111 % และ 4.3489 % ถึง 3.6005 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.8334 % ถึง 3.1232 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.1745 % ถึง 3.5807 % และ 6.4528 % ถึง 4.0032 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.6119 % ถึง 2.9694 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.9483 % ถึง 3.2746 % และ 4.3014 % ถึง 3.6159 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.8937 % ถึง 3.2823 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 8.0016 % ถึง 3.6007 % และ 9.2094 % ถึง 3.9550 % ตามลำดับ

ดังนั้น ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ เมื่อเวลาย้ำคงที่ ความดันย้ำเพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความดันย้ำคงที่ เวลาย้ำเพิ่มขึ้น การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์สูง และพบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 52 % และ 12 % ตามลำดับ

ตาราง 22 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิหลอมเหลว 260 °C เวลาฉีด 2.5 s และความดันฉีด 550 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลาย้ำ (s)	ความดันย้ำ (% ของ ความดัน ฉีด)	โพลิสไตรีน (Polystyrene)		โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)	
			การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์
10	3	75	5.9163	1.6610	7.5017	6.8153
		90	3.7641	1.3360	7.4695	6.7283
		105	1.9905	1.0318	7.4510	6.6794
	6	75	5.5352	1.5924	4.3792	3.0247
		90	3.0645	1.2561	3.4819	2.6079
		105	2.1477	0.9447	2.4616	2.2546
	9	75	5.5328	1.5920	4.3525	3.0104
		90	3.0486	1.2544	3.4306	2.5875
		105	2.0963	0.9416	2.3290	2.2156
30	3	75	6.8979	1.8683	7.8560	7.9453
		90	5.3628	1.5632	7.8387	7.8815
		105	3.4089	1.2942	7.8267	7.8378
	6	75	6.0932	1.6949	4.9307	3.3542
		90	3.9311	1.3566	4.2538	2.9586
		105	2.0904	1.0391	3.4609	2.5995
	9	75	6.0830	1.6929	4.8731	3.3165
		90	3.9007	1.3528	4.1599	2.9110
		105	2.0375	1.0352	3.3073	2.5398
50	3	75	7.9532	2.1578	8.1407	9.1664
		90	6.9315	1.8763	8.1309	9.1180
		105	5.8090	1.6411	8.1235	9.0821
	6	75	6.5548	1.7902	5.5295	3.8042
		90	4.6226	1.4491	4.9917	3.3951
		105	1.7232	1.1269	4.4925	3.0870
	9	75	6.5382	1.7866	5.3532	3.6596
		90	4.5847	1.4437	4.7061	3.2117
		105	1.6755	1.1228	4.0511	2.8577
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)			63	20		

จากตาราง 22 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิสไตรีนพบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10 °C เมื่อเวลาย้ำครั้งที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.5328 % ถึง 2.0963 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30 °C และ 50 °C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.0830 % ถึง 2.0375 % และ 6.5382 % ถึง 1.6755 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10 °C เมื่อความดันย้ำครั้งที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่

ระหว่าง 3.7641 % ถึง 3.0486 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.3628 % ถึง 3.9007 % และ 6.9315 % ถึง 4.5847 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิสไตรีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.5920 % ถึง 0.9416 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.6929 % ถึง 1.0352 % และ 1.7866 % ถึง 1.1228 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.3360 % ถึง 1.2544 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.5632 % ถึง 1.3528 % และ 1.8763 % ถึง 1.4437 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.3525 % ถึง 2.3290 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.8731 % ถึง 3.3073 % และ 5.3532 % ถึง 4.0511 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.4695 % ถึง 3.4306 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.8387 % ถึง 4.1599 % และ 8.1309 % ถึง 4.7061 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.0104 % ถึง 2.2156 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.3165 % ถึง 2.5398 % และ 3.6596 % ถึง 2.8577 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.7283 % ถึง 2.5875 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.8815 % ถึง 2.9110 % และ 9.1180 % ถึง 3.2117 % ตามลำดับ

ดังนั้น ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ เมื่อเวลาย้ำคงที่ ความดันย้ำเพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความดันย้ำคงที่ เวลาย้ำเพิ่มขึ้น การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์สูง และพบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 63 % และ 20 % ตามลำดับ

ตาราง 23 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิหลอมเหลว 260°C เวลาฉีด 2.5 s และความดันฉีด 700 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อุณหภูมิแม่พิมพ์ (°C)	เวลาย้ำ (s)	ความดันย้ำ (% ของความดันฉีด)	โพลิสไตรีน (Polystyrene)		โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)	
			การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
10	3	75	5.6698	1.2214	7.4612	6.7022
		90	3.6365	0.8872	7.4378	6.6410
		105	2.2184	0.7977	7.4271	6.6134
	6	75	4.8028	1.1393	3.1515	2.4814
		90	3.3543	0.7835	1.9144	2.1015
		105	1.8966	0.5729	1.3588	1.9663
	9	75	4.7733	1.1367	3.0906	2.4595
		90	3.3029	0.7814	1.8281	2.0793
		105	1.5395	0.5715	1.4092	1.9395
30	3	75	7.6187	1.4575	7.8351	7.8628
		90	5.3792	1.1926	7.8188	7.8038
		105	4.5193	1.1148	7.8107	7.7749
	6	75	5.8311	1.2380	3.9408	2.8049
		90	3.8995	0.8778	3.1065	2.4652
		105	3.0898	0.6692	2.7698	2.3503
	9	75	5.7907	1.2338	3.8224	2.7511
		90	3.8319	0.8743	2.9109	2.3971
		105	2.8268	0.6657	2.5277	2.2741
50	3	75	9.4459	1.7801	8.1304	9.1082
		90	8.3928	1.5787	8.1194	9.0547
		105	7.8703	1.4948	8.1127	9.0224
	6	75	6.6513	1.3299	4.7933	3.2646
		90	3.9230	0.9638	4.3324	2.9989
		105	2.6916	0.7568	4.2266	2.9439
	9	75	6.6080	1.3247	4.4599	3.0680
		90	3.5689	0.9600	3.7944	2.7387
		105	2.5270	0.7504	3.5477	2.6339
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)			76		19	

จากตาราง 23 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิสไตรีนพบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำครั้งที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.7733 % ถึง 1.5395 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.7907 % ถึง 2.8268 % และ 6.6080 % ถึง 2.5270 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำครั้งที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่

ระหว่าง 3.6365 % ถึง 3.3029 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.3792 % ถึง 3.8319 % และ 8.3928 % ถึง 3.5689 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิสไตรีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.1367 % ถึง 0.5715 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.2338 % ถึง 0.6657 % และ 1.3247 % ถึง 0.7544 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.8872 % ถึง 0.7814 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.1926 % ถึง 0.8743 % และ 1.5787 % ถึง 0.9600 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.0906 % ถึง 1.4092 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.8224 % ถึง 2.5277 % และ 4.4599 % ถึง 3.5477 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.4378 % ถึง 1.8281 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.8188 % ถึง 2.9109 % และ 8.1194 % ถึง 3.7944 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.4595 % ถึง 1.9395 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.7511 % ถึง 2.2741 % และ 3.0680 % ถึง 2.6339 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.6410 % ถึง 2.0793 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.8038 % ถึง 2.3971 % และ 9.0547 % ถึง 2.7387 % ตามลำดับ

ดังนั้น ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ เมื่อเวลาย้ำคงที่ ความดันย้ำเพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความดันย้ำคงที่ เวลาย้ำเพิ่มขึ้น การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์สูง และพบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 76 % และ 19 % ตามลำดับ

ตาราง 24 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิหลอมเหลว 260 °C เวลาฉีด 4 s และความดันฉีด 400 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลาย้ำ (s)	ความดันย้ำ (% ของ ความดัน ฉีด)	โพลิสไตรีน (Polystyrene)		โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)	
			การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์
10	3	75	4.2344	1.9361	5.4064	5.8782
		90	3.0810	1.6807	5.3457	5.7573
		105	2.1830	1.4366	5.2973	5.6644
	6	75	4.1447	1.9135	3.2338	3.3550
		90	2.9377	1.6536	2.6965	3.0330
		105	2.0742	1.4016	2.0801	2.7322
	9	75	4.1451	1.9136	3.2241	3.3486
		90	2.9382	1.6537	2.6850	3.0268
		105	1.9258	1.4014	2.0630	2.7247
30	3	75	4.8020	2.0926	5.8695	7.0005
		90	3.8262	1.8373	5.8356	6.9041
		105	2.6043	1.5938	5.8071	6.8249
	6	75	4.5954	2.0328	3.7419	3.7294
		90	3.5165	1.7688	3.3033	3.4017
		105	2.1234	1.5148	2.7930	3.0862
	9	75	4.5961	2.0330	3.7264	3.7167
		90	3.5127	1.7680	3.2769	3.3838
		105	2.1119	1.5130	2.7515	3.0631
50	3	75	5.4747	2.3143	6.2480	8.2950
		90	4.7277	2.0707	6.2295	8.2207
		105	3.8462	1.8419	6.2163	8.1685
	6	75	4.9888	2.1498	4.2219	4.1689
		90	4.0141	1.8815	3.8634	3.8316
		105	2.7807	1.6249	3.4724	3.5210
	9	75	4.9869	2.1492	4.1525	4.0990
		90	4.0054	1.8794	3.7649	3.7483
		105	2.7534	1.6200	3.3252	3.4167
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)			47	11		

จากตาราง 24 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิสไตรีนพบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10 °C เมื่อเวลาย้ำครั้งที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.1451 % ถึง 1.9258 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30 °C และ 50 °C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.5961 % ถึง 2.1119 % และ 4.9869 % ถึง 2.7534 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10 °C เมื่อความดันย้ำครั้งที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่

ระหว่าง 3.0810 % ถึง 2.9382 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.8262 % ถึง 3.5127 % และ 4.7277 % ถึง 4.0054 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิสไตรีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาอ่างที่ ที่ 9 s ความดันยำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.9136 % ถึง 1.4014 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.0330 % ถึง 1.5130 % และ 2.1492 % ถึง 1.6200 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันยำอ่างที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลายำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.6807 % ถึง 1.6537 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.8373 % ถึง 1.7680 % และ 2.0707 % ถึง 1.8794 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาอ่างที่ ที่ 15 s ความดันยำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.2241 % ถึง 2.0630 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.7264 % ถึง 2.7515 % และ 4.1525 % ถึง 3.3252 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันยำอ่างที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลายำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.3457 % ถึง 2.6850 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.8356 % ถึง 3.2769 % และ 6.2295 % ถึง 3.7649 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาอ่างที่ ที่ 15 s ความดันยำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.3486 % ถึง 2.7247 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.7167 % ถึง 3.0631 % และ 4.0990 % ถึง 3.4167 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันยำอ่างที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลายำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.7573 % ถึง 3.0268 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.9041 % ถึง 3.3838 % และ 8.2207 % ถึง 3.7483 % ตามลำดับ

ดังนั้น ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ เมื่อเวลาอ่างที่ ความดันยำเพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความดันยำอ่างที่ เวลายำเพิ่มขึ้น การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์สูง และพบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 47 % และ 11 % ตามลำดับ

ตาราง 25 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิหลอมเหลว 260°C เวลาฉีด 4 s และความดันฉีด 550 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลาย้ำ (s)	ความดันย้ำ (% ของ ความดัน ฉีด)	โพลิสไตรีน (Polystyrene)		โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)	
			การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์
10	3	75	4.7464	1.4672	7.0024	5.6747
		90	3.3734	1.1428	6.9439	5.5659
		105	1.6468	0.8386	6.9053	5.4964
	6	75	4.5045	1.4326	3.8694	2.7722
		90	2.9076	1.1029	2.8320	2.3707
		105	1.4851	0.7981	1.5466	2.0100
	9	75	4.5038	1.4325	3.8545	2.7655
		90	2.8885	1.1013	2.7964	2.3590
		105	1.4234	0.7951	1.4784	1.9939
30	3	75	5.7123	1.6238	7.5120	6.8395
		90	3.4756	1.3020	7.4815	6.7564
		105	1.6409	1.0072	7.4678	6.7197
	6	75	5.2593	1.5464	4.5651	3.1274
		90	2.6474	1.2130	3.7479	2.7183
		105	1.5160	0.9079	2.7790	2.3533
	9	75	5.2495	1.5448	4.5261	3.1051
		90	2.6074	1.2090	3.6770	2.6878
		105	1.4322	0.9033	2.6268	2.3047
50	3	75	6.9025	1.8697	7.9175	8.1747
		90	5.4337	1.5753	7.9037	8.1206
		105	3.6999	1.3284	7.8939	8.0829
	6	75	5.8882	1.6560	5.2265	3.5612
		90	3.6328	1.3204	4.5808	3.1365
		105	1.6820	1.0100	3.8709	2.7729
	9	75	5.8646	1.6516	5.0857	3.4591
		90	3.5863	1.3149	4.3681	3.0179
		105	1.6365	1.0068	3.5670	2.6418
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)			59	21		

จากตาราง 25 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิสไตรีนพบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำครั้งที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.5038 % ถึง 1.4234 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.2495 % ถึง 1.4322 % และ 5.8646 % ถึง 1.6365 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำครั้งที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่

ระหว่าง 3.3734 % ถึง 2.8885 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.4756 % ถึง 2.6074 % และ 5.4337 % ถึง 3.5863 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิสไตรีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาอ่างที่ ที่ 9 s ความดันยำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.4325 % ถึง 0.7951 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.5448 % ถึง 0.9033 % และ 1.6516 % ถึง 1.0068 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันยำที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลายำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.1428 % ถึง 1.1013 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.3020 % ถึง 1.2090 % และ 1.5753 % ถึง 1.3149 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาอ่างที่ ที่ 15 s ความดันยำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.8545 % ถึง 1.4784 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.5261 % ถึง 2.6268 % และ 5.0857 % ถึง 3.5670 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันยำที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลายำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.9439 % ถึง 2.7964 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.4815 % ถึง 3.6770 % และ 7.9037 % ถึง 4.3681 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาอ่างที่ ที่ 15 s ความดันยำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.7655 % ถึง 1.9939 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.1051 % ถึง 2.3047 % และ 3.4591 % ถึง 2.6418 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันยำที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลายำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.5659 % ถึง 2.3590 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.7564 % ถึง 2.6878 % และ 8.1206 % ถึง 3.0179 % ตามลำดับ

ดังนั้น ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ เมื่อเวลาอ่างที่ ความดันยำเพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความดันยำที่ เวลายำเพิ่มขึ้น การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์สูง และพบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 59 % และ 21 % ตามลำดับ

ตาราง 26 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิหลอมเหลว 260°C เวลาฉีด 4 s และความดันฉีด 700 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลาย้ำ (s)	ความดันย้ำ (% ของ ความดัน ฉีด)	โพลิสไตรีน (Polystyrene)		โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)	
			การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์
10	3	75	3.4173	1.0287	6.9229	5.5306
		90	2.3696	0.6928	6.8817	5.4573
		105	1.9420	0.4969	6.8667	5.4312
	6	75	2.8349	0.9884	2.3476	2.2210
		90	2.1271	0.6494	1.9273	1.8350
		105	1.6260	0.4417	1.6438	1.6620
	9	75	2.8017	0.9862	2.3023	2.2079
		90	1.9978	0.6457	1.8153	1.8129
		105	1.4820	0.4398	1.4519	1.6313
30	3	75	5.3422	1.1889	7.4718	6.7345
		90	4.1021	0.8885	7.4540	6.6874
		105	2.8898	0.8278	7.4441	6.6613
	6	75	4.3104	1.0973	3.3838	2.5692
		90	2.7032	0.7572	2.2401	2.1902
		105	1.3718	0.5521	1.7585	2.0621
	9	75	4.2516	1.0925	3.2745	2.5274
		90	2.6062	0.7534	2.0564	2.1395
		105	1.1969	0.5485	1.5459	2.0102
50	3	75	7.7356	1.4744	7.8989	8.1079
		90	5.9885	1.2545	7.8852	8.0551
		105	5.3328	1.1880	7.8775	8.0258
	6	75	5.4901	1.2033	4.3045	2.9850
		90	3.4482	0.8547	3.5883	2.6512
		105	2.5063	0.6530	3.3790	2.5673
	9	75	5.4402	1.1984	4.0696	2.8666
		90	3.3997	0.8523	3.1805	2.4925
		105	2.4519	0.6507	2.8107	2.3642
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)			72		14	

จากตาราง 26 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิสไตรีนพบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำครั้งที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.8017 % ถึง 1.4820 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.2516 % ถึง 1.1969 % และ 5.4402 % ถึง 2.4519 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำครั้งที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่

ระหว่าง 2.3696 % ถึง 1.9978 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.1021 % ถึง 2.6062 % และ 5.9885 % ถึง 3.3997 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิสไตรีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.9862 % ถึง 0.4398 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.0925 % ถึง 0.5485 % และ 1.1984 % ถึง 0.6507 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.6928 % ถึง 0.6457 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.8885 % ถึง 0.7534 % และ 1.2545 % ถึง 0.8523 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.3023 % ถึง 1.4519 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.2745 % ถึง 1.5459 % และ 4.0696 % ถึง 2.8107 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.8817 % ถึง 1.8153 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.4540 % ถึง 2.0564 % และ 7.8852 % ถึง 3.1805 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.2079 % ถึง 1.6313 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.5274 % ถึง 2.0102 % และ 2.8666 % ถึง 2.3642 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.4573 % ถึง 1.8129 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.6874 % ถึง 2.1395 % และ 8.0551 % ถึง 2.4925 % ตามลำดับ

ดังนั้น ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ เมื่อเวลาย้ำคงที่ ความดันย้ำเพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความดันย้ำคงที่ เวลาย้ำเพิ่มขึ้น การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์สูง และพบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 72 % และ 14 % ตามลำดับ

ตาราง 27 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิหลอมเหลว 290°C เวลาฉีด 1 s และความดันฉีด 400 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลาย้ำ (s)	ความดันย้ำ (% ของ ความดัน ฉีด)	โพลิสไตรีน (Polystyrene)		โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)	
			การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์
10	3	75	6.2771	2.6497	6.5351	9.6395
		90	5.7886	2.4352	6.5220	9.5684
		105	5.2493	2.2354	6.5129	9.5196
	6	75	5.0602	2.1729	3.9953	3.9478
		90	4.1350	1.9114	3.6330	3.6411
		105	2.9893	1.6635	3.2181	3.3436
	9	75	5.0617	2.1734	3.8625	3.8295
		90	4.1354	1.9115	3.4635	3.5134
		105	2.9802	1.6618	3.0006	3.2063
30	3	75	6.9065	2.9889	6.6960	10.6082
		90	6.5443	2.7838	6.6864	10.5451
		105	6.1692	2.5991	6.6792	10.4983
	6	75	5.4083	2.2908	4.4478	4.4119
		90	4.5809	2.0291	4.1834	4.1283
		105	3.5549	1.7773	3.8739	3.8394
	9	75	5.3748	2.2789	4.2262	4.1717
		90	4.5259	2.0138	3.8949	3.8577
		105	3.4741	1.7601	3.4802	3.5256
50	3	75	7.4925	3.3933	6.8314	11.5886
		90	7.2473	3.2115	6.8236	11.5276
		105	7.0179	3.0582	6.8181	11.4842
	6	75	5.7258	2.4101	4.9582	5.0864
		90	4.9821	2.1481	4.7705	4.8156
		105	4.0819	1.8983	4.5545	4.5377
	9	75	5.6372	2.3756	4.5478	4.5296
		90	4.8457	2.1061	4.2496	4.1958
		105	3.8734	1.8485	3.8957	3.8584
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)			55		20	

จากตาราง 27 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิสไตรีนพบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำครั้งที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.0617 % ถึง 2.9802 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.3748 % ถึง 3.4741 % และ 5.6372 % ถึง 3.8734 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำครั้งที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่

ระหว่าง 5.7886 % ถึง 4.1354 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.5443 % ถึง 4.5259 % และ 7.2473 % ถึง 4.8457 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิสไตรีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.1734 % ถึง 1.6618 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.2789 % ถึง 1.7601 % และ 2.3756 % ถึง 1.8485 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.4352 % ถึง 1.9115 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.7838 % ถึง 2.0138 % และ 3.2115 % ถึง 2.1061 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.8625 % ถึง 3.0006 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.2262 % ถึง 3.4802 % และ 4.5478 % ถึง 3.8957 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.5220 % ถึง 3.4635 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.6864 % ถึง 3.8949 % และ 6.8236 % ถึง 4.2496 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.8295 % ถึง 3.2063 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.1717 % ถึง 3.5256 % และ 4.5296 % ถึง 3.8584 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 9.5684 % ถึง 3.5134 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 10.5451 % ถึง 3.8577 % และ 11.5276 % ถึง 4.1958 % ตามลำดับ

ดังนั้น ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ เมื่อเวลาย้ำคงที่ ความดันย้ำเพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความดันย้ำคงที่ เวลาย้ำเพิ่มขึ้น การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์สูง และพบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 55 % และ 20 % ตามลำดับ

ตาราง 28 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิหลอมเหลว 290°C เวลาฉีด 1 s และความดันฉีด 550 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลาย้ำ (s)	ความดันย้ำ (% ของ ความดัน ฉีด)	โพลิสไตรีน (Polystyrene)		โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)	
			การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์
10	3	75	8.2600	2.2596	8.2105	9.5250
		90	7.4320	2.0044	8.2011	9.4753
		105	6.6203	1.8046	8.1949	9.4424
	6	75	6.0891	1.6941	4.9739	3.3831
		90	3.9939	1.3645	4.2881	2.9764
		105	3.6613	1.0466	3.5900	2.6519
	9	75	6.0820	1.6927	4.7648	3.2478
		90	3.9717	1.3617	4.0187	2.8422
		105	2.1433	1.0430	3.1184	2.4700
30	3	75	9.1569	2.6211	8.3766	10.5038
		90	8.6379	2.3990	8.3691	10.4555
		105	8.2285	2.2487	8.3631	10.4166
	6	75	6.6351	1.8079	5.6117	3.8755
		90	4.7939	1.4740	5.1504	3.5064
		105	2.0195	1.1531	4.6991	3.2075
	9	75	6.5598	1.7913	5.2344	3.5683
		90	4.6713	1.4561	4.5852	3.1399
		105	1.7842	1.1322	3.8784	2.7770
50	3	75	9.9857	3.0758	8.5152	11.4890
		90	9.6991	2.9017	8.5092	11.4419
		105	9.5150	2.7999	8.5039	11.4018
	6	75	7.1462	1.9292	6.2900	4.5730
		90	5.5612	1.5969	5.9397	4.1891
		105	3.2134	1.2723	5.6233	3.8858
	9	75	6.9481	1.8803	5.6403	3.9010
		90	5.2329	1.5419	5.0879	3.4617
		105	2.6876	1.2169	4.5446	3.1165
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)			67		28	

จากตาราง 28 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิสไตรีนพบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำครั้งที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.0820 % ถึง 2.1433 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.5598 % ถึง 1.7842 % และ 6.9481 % ถึง 2.6876 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำครั้งที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่

ระหว่าง 7.4320 % ถึง 3.9717 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 8.6379 % ถึง 4.6713 % และ 9.6991 % ถึง 5.2329 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิสไตรีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.6927 % ถึง 1.0430 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.7913 % ถึง 1.1322 % และ 1.8803 % ถึง 1.2169 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.0044 % ถึง 1.3617 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.3990 % ถึง 1.4561 % และ 2.9017 % ถึง 1.5419 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.7648 % ถึง 3.1184 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.2344 % ถึง 3.8784 % และ 5.6403 % ถึง 4.5446 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 8.2011 % ถึง 4.0187 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 8.3691 % ถึง 4.5852 % และ 8.5092 % ถึง 5.0879 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.2478 % ถึง 2.4700 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.5683 % ถึง 2.7770 % และ 3.9010 % ถึง 3.1165 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 9.4753 % ถึง 2.8422 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 10.4555 % ถึง 3.1399 % และ 11.4419 % ถึง 3.4617 % ตามลำดับ

ดังนั้น ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ เมื่อเวลาย้ำคงที่ ความดันย้ำเพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความดันย้ำคงที่ เวลาย้ำเพิ่มขึ้น การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์สูง และพบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 67 % และ 28 % ตามลำดับ

ตาราง 29 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิหลอมเหลว 290°C เวลาฉีด 1 s และความดันฉีด 700 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลาย้ำ (s)	ความดันย้ำ (% ของ ความดัน ฉีด)	โพลิสไตรีน (Polystyrene)		โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)	
			การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์
10	3	75	7.1028	1.9186	8.2015	9.4692
		90	6.2967	1.7359	8.1911	9.4143
		105	5.7864	1.6372	8.1851	9.3832
	6	75	5.9082	1.2461	4.0177	2.8410
		90	4.1584	0.8916	3.3712	2.5637
		105	2.4504	0.6955	3.1079	2.4657
	9	75	3.9685	1.2430	3.6667	2.6834
		90	3.0501	0.8873	2.8083	2.3629
		105	1.7599	0.6874	2.4255	2.2434
30	3	75	7.7174	2.3289	8.3691	10.4455
		90	7.3255	2.1927	8.3603	10.3889
		105	7.1531	2.1377	8.3552	10.3565
	6	75	7.5812	1.3538	4.9615	3.3737
		90	5.7525	0.9969	4.5831	3.1378
		105	3.7849	0.8019	4.4840	3.0814
	9	75	4.7857	1.3353	4.2942	2.9788
		90	3.6703	0.9758	3.6742	2.6866
		105	2.7665	0.7774	3.4118	2.5795
50	3	75	8.1386	2.8512	8.5095	11.4324
		90	7.8142	2.7562	8.5022	11.3770
		105	7.4586	2.7248	8.4974	11.3403
	6	75	7.7437	1.4757	5.8096	4.0574
		90	6.0273	1.1181	5.5037	3.7810
		105	4.1993	0.9445	5.4355	3.7245
	9	75	5.8907	1.4210	4.8506	3.3010
		90	4.0891	1.0567	4.3955	3.0327
		105	3.1897	0.8567	4.2093	2.9351
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)			73		26	

จากตาราง 29 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิสไตรีนพบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำครั้งที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.9685 % ถึง 1.7599 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.7857 % ถึง 2.7665 % และ 5.8907 % ถึง 3.1897 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำครั้งที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่

ระหว่าง 6.2967 % ถึง 3.0501 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.3255 % ถึง 3.6703 % และ 7.8142 % ถึง 4.0891 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิสไตรีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.2430 % ถึง 0.6874 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.3353 % ถึง 0.7774 % และ 1.4210 % ถึง 0.8567 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.7359 % ถึง 0.8873 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.1927 % ถึง 0.9758 % และ 2.7562 % ถึง 1.0567 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.6667 % ถึง 2.4255 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.2942 % ถึง 3.4118 % และ 4.8506 % ถึง 4.2093 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 8.1911 % ถึง 2.8083 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 8.3603 % ถึง 3.6742 % และ 8.5022 % ถึง 4.3955 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.6834 % ถึง 2.2434 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.9788 % ถึง 2.5795 % และ 3.3010 % ถึง 2.9351 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 9.4143 % ถึง 2.3629 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 10.3889 % ถึง 2.6866 % และ 11.3770 % ถึง 3.0327 % ตามลำดับ

ดังนั้น ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ เมื่อเวลาย้ำคงที่ ความดันย้ำเพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความดันย้ำคงที่ เวลาย้ำเพิ่มขึ้น การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์สูง และพบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 73 % และ 26 % ตามลำดับ

ตาราง 30 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิหลอมเหลว 290 °C เวลาฉีด 2.5 s และความดันฉีด 400 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อุณหภูมิแม่พิมพ์ (°C)	เวลาย้ำ (s)	ความดันย้ำ (% ของความดันฉีด)	โพลิสไตรีน (Polystyrene)		โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)	
			การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
10	3	75	5.1269	2.1941	6.2237	8.1974
		90	4.3506	1.9662	6.2046	8.1227
		105	3.4378	1.7522	6.1910	8.0700
	6	75	4.4725	1.9988	3.6284	3.6387
		90	3.3697	1.7381	3.1741	3.3159
		105	1.9580	1.4894	2.6692	3.0183
	9	75	4.4721	1.9987	3.5845	3.6048
		90	3.3673	1.7376	3.1060	3.2724
		105	1.9494	1.4881	2.5644	2.9631
30	3	75	5.9025	2.4815	6.4620	9.2633
		90	5.3354	2.2646	6.4500	9.2027
		105	4.6995	2.0625	6.4410	9.1581
	6	75	4.8678	2.1124	4.1560	4.1025
		90	3.8790	1.8495	3.7893	3.7686
		105	2.6314	1.5985	3.4025	3.4707
	9	75	4.8685	2.1126	4.0032	3.9564
		90	3.8704	1.8475	3.6069	3.6220
		105	2.6112	1.5950	3.1427	3.2957
50	3	75	6.6577	2.8442	6.6644	10.4125
		90	6.2596	2.6407	6.6562	10.3607
		105	5.8462	2.4581	6.6494	10.3179
	6	75	5.2562	2.2373	4.6874	4.7068
		90	4.3767	1.9731	4.4461	4.4117
		105	3.2847	1.7208	4.1887	4.1352
	9	75	5.2083	2.2211	4.3735	4.3300
		90	4.3004	1.9531	4.0224	3.9742
		105	3.1609	1.6962	3.6388	3.6468
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)			51	16		

จากตาราง 30 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิสไตรีนพบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10 °C เมื่อเวลาย้ำครั้งที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.4721 % ถึง 1.9494 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30 °C และ 50 °C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.8685 % ถึง 2.6112 % และ 5.2083 % ถึง 3.1609 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10 °C เมื่อความดันย้ำครั้งที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่

ระหว่าง 4.3506 % ถึง 3.3673 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.3354 % ถึง 3.8704 % และ 6.2596 % ถึง 4.3004 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิสไตรีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.9987 % ถึง 1.4881 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.1126 % ถึง 1.5950 % และ 2.2211 % ถึง 1.6962 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.9662 % ถึง 1.7376 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.2646 % ถึง 1.8475 % และ 2.6407 % ถึง 1.9531 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.5845 % ถึง 2.5644 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.0032 % ถึง 3.1427 % และ 4.3735 % ถึง 3.6388 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.2046 % ถึง 3.1060 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.4500 % ถึง 3.6069 % และ 6.6562 % ถึง 4.0224 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.6048 % ถึง 2.9631 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.9564 % ถึง 3.2957 % และ 4.3300 % ถึง 3.6468 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 8.1227 % ถึง 3.2724 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 9.2027 % ถึง 3.6220 % และ 10.3607 % ถึง 3.9742 % ตามลำดับ

ดังนั้น ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ เมื่อเวลาย้ำคงที่ ความดันย้ำเพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความดันย้ำคงที่ เวลาย้ำเพิ่มขึ้น การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์สูง และพบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 51 % และ 16 % ตามลำดับ

ตาราง 31 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิหลอมเหลว 290 °C เวลาฉีด 2.5 s และความดันฉีด 550 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลาย้ำ (s)	ความดันย้ำ (% ของ ความดัน ฉีด)	โพลิสไตรีน (Polystyrene)		โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)		
			การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	
10	3	75	6.4985	1.7783	7.8920	8.0756	
		90	4.9719	1.5010	7.8785	8.0238	
		105	3.1464	1.2651	7.8690	7.9880	
	6	75	5.0949	1.5201	4.4404	3.0572	
		90	2.4547	1.1940	3.5910	2.6517	
		105	1.1809	0.8895	2.6418	2.3094	
	9	75	5.0873	1.5189	4.3403	3.0031	
		90	2.4154	1.1902	3.4392	2.5903	
		105	1.1089	0.8857	2.3612	2.2245	
	30	3	75	7.7208	2.0870	8.1415	9.1626
			90	6.7294	1.8294	8.1332	9.1218
			105	5.7317	1.6273	8.1266	9.0893
6		75	5.7450	1.6297	5.1593	3.5117	
		90	3.4495	1.2990	4.5336	3.1094	
		105	1.3720	0.9889	3.9464	2.8075	
9		75	5.7251	1.6261	4.9073	3.3378	
		90	3.4093	1.2944	4.1646	2.9126	
		105	1.2985	0.9841	3.3437	2.5531	
50		3	75	8.8359	2.4797	8.3497	10.3223
			90	8.2630	2.2611	8.3439	10.2857
			105	7.8357	2.1216	8.3393	10.2572
	6	75	6.3740	1.7519	5.9237	4.1711	
		90	4.4091	1.4194	5.5299	3.8032	
		105	1.4345	1.1026	5.1526	3.5069	
	9	75	6.2560	1.7276	5.3930	3.6901	
		90	4.2197	1.3939	4.7656	3.2473	
		105	1.1379	1.0786	4.1612	2.9109	
	ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)			57	22		

จากตาราง 31 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิสไตรีนพบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10 °C เมื่อเวลาย้ำครั้งที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.0873 % ถึง 1.1089 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30 °C และ 50 °C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.7251 % ถึง 1.2985 % และ 6.2560 % ถึง 1.1379 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10 °C เมื่อความดันย้ำครั้งที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่

ระหว่าง 4.9719 % ถึง 2.4154 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.7294 % ถึง 3.4093 % และ 8.2630 % ถึง 4.2197 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิสไตรีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.5189 % ถึง 0.8857 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.6261 % ถึง 0.9841 % และ 1.7276 % ถึง 1.0786 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.5010 % ถึง 1.1902 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.8294 % ถึง 1.2944 % และ 2.2611 % ถึง 1.3939 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.3403 % ถึง 2.3612 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.9073 % ถึง 3.3437 % และ 5.3930 % ถึง 4.1612 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.8785 % ถึง 3.4392 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 8.1332 % ถึง 4.1646 % และ 8.3439 % ถึง 4.7656 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.0031 % ถึง 2.2245 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.3378 % ถึง 2.5531 % และ 3.6901 % ถึง 2.9109 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 8.0238 % ถึง 2.5903 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 9.1218 % ถึง 2.9126 % และ 10.2857 % ถึง 3.2473 % ตามลำดับ

ดังนั้น ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ เมื่อเวลาย้ำคงที่ ความดันย้ำเพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความดันย้ำคงที่ เวลาย้ำเพิ่มขึ้น การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์สูง และพบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 57 % และ 22 % ตามลำดับ

ตาราง 32 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิหลอมเหลว 290 °C เวลาฉีด 2.5 s และความดันฉีด 700 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลาย้ำ (s)	ความดันย้ำ (% ของ ความดัน ฉีด)	โพลิสไตรีน (Polystyrene)		โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)	
			การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์
10	3	75	7.2507	1.4060	7.8734	8.0103
		90	5.3443	1.1891	7.8592	7.9571
		105	4.3784	1.1029	7.8517	7.9294
	6	75	4.0833	1.0790	3.2753	2.5277
		90	3.7891	0.7425	2.2708	2.1989
		105	2.6664	0.5485	1.8152	2.0764
	9	75	4.0326	1.0750	3.0896	2.4597
		90	2.2153	0.7386	1.9163	2.1024
		105	1.4806	0.5453	1.3735	1.9700
30	3	75	7.8009	1.7427	8.1302	9.1144
		90	6.8810	1.5713	8.1194	9.0618
		105	4.8222	1.4826	8.1142	9.0368
	6	75	5.2669	1.1817	4.3112	2.9885
		90	3.1719	0.8412	3.7482	2.7191
		105	2.4974	0.6516	3.6087	2.6597
	9	75	5.2204	1.1773	3.8826	2.7789
		90	3.0661	0.8361	3.0609	2.4495
		105	2.2491	0.6445	2.7125	2.3323
50	3	75	8.0639	2.1937	8.3422	10.2848
		90	6.2094	2.0741	8.3344	10.2364
		105	4.5680	2.0250	8.3289	10.2026
	6	75	6.4003	1.3002	5.3650	3.6690
		90	5.2528	0.9549	5.0116	3.4087
		105	3.1102	0.7734	4.9108	3.3411
	9	75	6.1850	1.2759	4.5265	3.1062
		90	4.8031	0.9278	3.9597	2.8144
		105	2.8736	0.7358	3.7326	2.7123
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)			74		20	

จากตาราง 32 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิสไตรีนพบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10 °C เมื่อเวลาย้ำครั้งที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.0326 % ถึง 1.4806 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30 °C และ 50 °C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.2204 % ถึง 2.2491 % และ 6.1850 % ถึง 2.8736 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10 °C เมื่อความดันย้ำครั้งที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่

ระหว่าง 5.3443 % ถึง 2.2153 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.8810 % ถึง 3.0661 % และ 6.2094 % ถึง 4.8031 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิสไตรีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.0750 % ถึง 0.5453 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.1773 % ถึง 0.6445 % และ 1.2759 % ถึง 0.7358 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.1891 % ถึง 0.7386 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.5713 % ถึง 0.8361 % และ 2.0741 % ถึง 0.9278 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.0896 % ถึง 1.3735 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.8826 % ถึง 2.7125 % และ 4.5265 % ถึง 3.7326 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.8592 % ถึง 1.9163 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 8.1194 % ถึง 3.0609 % และ 8.3344 % ถึง 3.9597 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.4597 % ถึง 1.9700 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.7789 % ถึง 2.3323 % และ 3.1062 % ถึง 2.7123 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.9571 % ถึง 2.1024 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 9.0618 % ถึง 2.4495 % และ 10.2364 % ถึง 2.8144 % ตามลำดับ

ดังนั้น ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ เมื่อเวลาย้ำคงที่ ความดันย้ำเพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความดันย้ำคงที่ เวลาย้ำเพิ่มขึ้น การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์สูง และพบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 74 % และ 20 % ตามลำดับ

ตาราง 33 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิหลอมเหลว 290 °C เวลาฉีด 4 s และความดันฉีด 400 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อุณหภูมิแม่พิมพ์ (°C)	เวลาย้ำ (s)	ความดันย้ำ (% ของความดันฉีด)	โพลิสไตรีน (Polystyrene)		โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)	
			การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
10	3	75	4.1370	1.9119	5.8706	6.9994
		90	3.0399	1.6731	5.8448	6.9256
		105	2.6901	1.4461	5.8239	6.8672
	6	75	3.7705	1.8249	3.2550	3.3681
		90	2.4602	1.5695	2.7230	3.0466
		105	2.1919	1.3238	2.1153	2.7471
	9	75	3.7719	1.8252	3.2309	3.3521
		90	2.4584	1.5692	2.6822	3.0245
		105	1.8892	1.3227	2.0562	2.7211
30	3	75	5.0185	2.1596	6.2253	8.1977
		90	4.2295	1.9352	6.2091	8.1343
		105	3.3017	1.7245	6.1977	8.0899
	6	75	4.3056	1.9548	3.8532	3.8215
		90	3.1555	1.6954	3.4529	3.5057
		105	1.6753	1.4481	2.9887	3.1991
	9	75	4.3041	1.9544	3.7563	3.7400
		90	3.1483	1.6940	3.3148	3.4085
		105	1.6479	1.4442	2.7977	3.0880
50	3	75	5.9117	2.4859	6.4930	9.4147
		90	5.3651	2.2755	6.4833	9.3639
		105	4.7636	2.0816	6.4759	9.3260
	6	75	4.7754	2.0851	4.4050	4.3634
		90	3.7604	1.8226	4.1225	4.0681
		105	2.4763	1.5722	3.8238	3.7964
	9	75	4.7520	2.0782	4.1565	4.1015
		90	3.7190	1.8133	3.7949	3.7720
		105	2.4050	1.5603	3.3720	3.4481
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)			46		15	

จากตาราง 33 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิสไตรีนพบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10 °C เมื่อเวลาย้ำครั้งที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.7719 % ถึง 1.8892 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30 °C และ 50 °C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.3041 % ถึง 1.6479 % และ 4.7520 % ถึง 2.4050 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10 °C เมื่อความดันย้ำครั้งที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่

ระหว่าง 3.0399 % ถึง 2.4584 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.2295 % ถึง 3.1483 % และ 5.3651 % ถึง 3.7190 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิสไตรีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.8252 % ถึง 1.3227 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.9544 % ถึง 1.4442 % และ 2.0782 % ถึง 1.5603 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.6731 % ถึง 1.5692 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.9352 % ถึง 1.6940 % และ 2.2755 % ถึง 1.8133 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.2309 % ถึง 2.0562 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.7563 % ถึง 2.7977 % และ 4.1565 % ถึง 3.3720 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.8448 % ถึง 2.6822 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.2091 % ถึง 3.3148 % และ 6.4833 % ถึง 3.7949 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.3521 % ถึง 2.7211 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.7400 % ถึง 3.0880 % และ 4.1015 % ถึง 3.4481 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.9256 % ถึง 3.0245 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 8.1343 % ถึง 3.4085 % และ 9.3639 % ถึง 3.7720 % ตามลำดับ

ดังนั้น ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ เมื่อเวลาย้ำคงที่ ความดันย้ำเพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความดันย้ำคงที่ เวลาย้ำเพิ่มขึ้น การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์สูง และพบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 46 % และ 15 % ตามลำดับ

ตาราง 34 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิหลอมเหลว 290 °C เวลาฉีด 4 s และความดันฉีด 550 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลาย้ำ (s)	ความดันย้ำ (% ของ ความดัน ฉีด)	โพลิสไตรีน (Polystyrene)		โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)	
			การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์
10	3	75	4.7925	1.4738	7.5228	6.8736
		90	2.2814	1.1773	7.4980	6.8053
		105	2.0684	0.9226	7.4869	6.7752
	6	75	3.9095	1.3539	3.9012	2.7874
		90	2.1653	1.0338	2.9376	2.4067
		105	1.9479	0.7451	1.7393	2.0573
	9	75	3.9015	1.3529	3.8430	2.7610
		90	1.9728	1.0305	2.7961	2.3594
		105	1.6731	0.7403	1.5589	2.0133
30	3	75	6.3662	1.7500	7.8953	8.0942
		90	4.8330	1.4798	7.8836	8.0492
		105	3.1099	1.2610	7.8747	8.0154
	6	75	4.8229	1.4783	4.7508	3.2391
		90	2.0195	1.1531	4.0088	2.8375
		105	2.0522	0.8584	3.2204	2.5072
	9	75	4.7993	1.4748	4.5693	3.1307
		90	1.9662	1.1483	3.7082	2.7018
		105	1.9728	0.8544	2.7451	2.3428
50	3	75	7.7820	2.1049	8.1732	9.3301
		90	6.8628	1.8600	8.1662	9.2943
		105	6.0891	1.6941	8.1596	9.2609
	6	75	5.5950	1.6028	5.5571	3.8278
		90	3.2406	1.2753	5.0967	3.4679
		105	2.5739	0.9713	4.6399	3.1720
	9	75	5.5276	1.5911	5.1282	3.4904
		90	3.1376	1.2640	4.4221	3.0480
		105	2.4122	0.9611	3.6783	2.6890
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)			62	21		

จากตาราง 34 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิสไตรีนพบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10 °C เมื่อเวลาย้ำครั้งที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.9015 % ถึง 1.6731 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30 °C และ 50 °C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.7993 % ถึง 1.9728 % และ 5.5276 % ถึง 2.4122 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10 °C เมื่อความดันย้ำครั้งที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่

ระหว่าง 2.2814 % ถึง 1.9728 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.8330 % ถึง 1.9662 % และ 6.8628 % ถึง 3.1376 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิสไตรีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย่างที่ ที่ 9 s ความดันยำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.3529 % ถึง 0.7403 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.4748 % ถึง 0.8544 % และ 1.5911 % ถึง 0.9611 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันยำที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลายำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.1773 % ถึง 1.0305 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.4798 % ถึง 1.1483 % และ 1.8600 % ถึง 1.2640 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย่างที่ ที่ 15 s ความดันยำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.8430 % ถึง 1.5589 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.5693 % ถึง 2.7451 % และ 5.1282 % ถึง 3.6783 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันยำที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลายำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.4980 % ถึง 2.7961 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.8836 % ถึง 3.7082 % และ 8.1662 % ถึง 4.4221 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย่างที่ ที่ 15 s ความดันยำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.7610 % ถึง 2.0133 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.1307 % ถึง 2.3428 % และ 3.4904 % ถึง 2.6890 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันยำที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลายำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.8053 % ถึง 2.3594 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 8.0492 % ถึง 2.7018 % และ 9.2943 % ถึง 3.0480 % ตามลำดับ

ดังนั้น ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ เมื่อเวลาย่างที่ ความดันยำเพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความดันยำที่ เวลายำเพิ่มขึ้น การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์สูง และพบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 62 % และ 21 % ตามลำดับ

ตาราง 35 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิหลอมเหลว 290 °C เวลาฉีด 4 s และความดันฉีด 700 bar จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลาย้ำ (s)	ความดันย้ำ (% ของ ความดัน ฉีด)	โพลิสไตรีน (Polystyrene)		โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)		
			การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	
10	3	75	4.0173	1.0739	7.4944	6.7913	
		90	3.0119	0.8336	7.4776	6.7461	
		105	1.7584	0.7783	7.4696	6.7247	
	6	75	1.7715	0.9225	2.4891	2.2624	
		90	0.6872	0.6032	2.0885	1.9025	
		105	0.5402	0.4136	1.6741	1.7543	
	9	75	1.6969	0.9182	2.3960	2.2347	
		90	0.6372	0.5988	2.0341	1.8560	
		105	0.4712	0.4111	1.5247	1.6983	
	30	3	75	7.1108	1.3876	7.8826	8.0394
			90	5.4654	1.2010	7.8691	7.9886
			105	4.6643	1.1272	7.8628	7.9649
6		75	3.5672	1.0397	3.6862	2.6917	
		90	3.0634	0.7163	2.8901	2.3901	
		105	1.6776	0.5290	2.6153	2.3011	
9		75	3.5016	1.0349	3.3691	2.5629	
		90	2.9722	0.7131	2.2829	2.2019	
		105	1.5468	0.5265	1.8281	2.0793	
50		3	75	9.4538	1.7818	8.1666	9.2882
			90	8.8160	1.6539	8.1577	9.2436
			105	8.4636	1.5908	8.1517	9.2132
	6	75	5.0231	1.1591	4.9076	3.3380	
		90	4.4124	0.8282	4.4707	3.0740	
		105	2.3918	0.6486	4.3347	3.0001	
	9	75	4.9072	1.1486	4.1468	2.9037	
		90	4.1140	0.8166	3.3463	2.5541	
		105	2.4770	0.6305	3.0596	2.4485	
	ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)			64	14		

จากตาราง 35 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิสไตรีนพบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10 °C เมื่อเวลาย้ำครั้งที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.6969 % ถึง 0.4712 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30 °C และ 50 °C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.5016 % ถึง 1.5468 % และ 4.9072 % ถึง 2.4770 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10 °C เมื่อความดันย้ำครั้งที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่

ระหว่าง 3.0119 % ถึง 0.6372 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.4654 % ถึง 2.9722 % และ 8.8160 % ถึง 4.1140 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิสไตรีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 9 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.9182 % ถึง 0.4111 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.0349 % ถึง 0.5265 % และ 1.1486 % ถึง 0.6305 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 9 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.8336 % ถึง 0.5988 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.2010 % ถึง 0.7131 % และ 1.6539 % ถึง 0.8166 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.3960 % ถึง 1.5247 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.3691 % ถึง 1.8281 % และ 4.1468 % ถึง 3.0596 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.4776 % ถึง 2.0341 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.8691 % ถึง 2.2829 % และ 8.1577 % ถึง 3.3463 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อเวลาย้ำคงที่ ที่ 15 s ความดันย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 75 ถึง 105 % ของความดันฉีด การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.2347 % ถึง 1.6983 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.5629 % ถึง 2.0793 % และ 2.9037 % ถึง 2.4485 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เมื่อความดันย้ำคงที่ ที่ 90 % ของความดันฉีด เวลาย้ำเพิ่มขึ้นระหว่าง 3 ถึง 15 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.7461 % ถึง 1.8560 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C และ 50°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.9886 % ถึง 2.2019 % และ 9.2436 % ถึง 2.5541 % ตามลำดับ

ดังนั้น ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ เมื่อเวลาย้ำคงที่ ความดันย้ำเพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความดันย้ำคงที่ เวลาย้ำเพิ่มขึ้น การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์สูง และพบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 64 % และ 14 % ตามลำดับ

ตาราง 36 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C เวลาอัด 9 s และ 15 s ตามลำดับ ความดันอัด 105 % ของความดันฉีด จากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อุณหภูมิ หลอมเหลว (°C)	เวลาฉีด (s)	ความดัน (% ของ ความดัน ฉีด)	โพลิสไตรีน (Polystyrene)		โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)		
			การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากการทดลอง	การหดตัวเชิง ปริมาตรเฉลี่ย (%) จากวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์	
230	1	400	3.7780	1.8263	3.0365	3.2282	
		550	2.3057	1.1796	3.0159	2.4337	
		700	2.1315	0.7355	2.2090	2.1810	
	2.5	400	3.0747	1.6795	2.5863	2.9745	
		550	2.0406	1.0355	2.3136	2.2107	
		700	1.8905	0.6188	1.3500	1.8903	
	4	400	2.3191	1.5462	2.0798	2.7314	
		550	1.9302	0.9317	1.3326	1.9607	
		700	3.2397	0.5040	1.4602	1.5809	
	260	1	400	3.3035	1.7246	3.0104	3.2132
			550	1.3137	1.0927	3.0717	2.4528
			700	2.7091	0.7041	2.2754	2.2002
2.5		400	2.4068	1.5606	2.5781	2.9694	
		550	2.0963	0.9416	2.3290	2.2156	
		700	1.5395	0.5715	1.4092	1.9395	
4		400	1.9258	1.4014	2.0630	2.7247	
		550	1.4234	0.7951	1.4784	1.9939	
		700	1.4820	0.4398	1.4519	1.6313	
290	1	400	2.9802	1.6618	3.0006	3.2063	
		550	2.1433	1.0430	3.1184	2.4700	
		700	1.7599	0.6874	2.4255	2.2434	
	2.5	400	1.9494	1.4881	2.5644	2.9631	
		550	1.1089	0.8857	2.3612	2.2245	
		700	1.4806	0.5453	1.3735	1.9700	
	4	400	1.8892	1.3227	2.0562	2.7211	
		550	1.6731	0.7403	1.5589	2.0133	
		700	0.4712	0.4111	1.5247	1.6983	
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)			48		19		

จากตาราง 36 ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิสไตรีนพบว่า ที่อุณหภูมิหลอมเหลวโพลิสไตรีน 290°C เมื่อเวลาฉีดคงที่ ที่ 4 s ความดันฉีดเพิ่มขึ้นระหว่าง 400 ถึง 700 bar การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.8892 % ถึง 0.4712 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิหลอมเหลวโพลิสไตรีน 230°C และ 260°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.3191 % ถึง 3.2397 % และ 1.9258 % ถึง 1.4820 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิหลอมเหลวโพลิสไตรีน 290°C เมื่อความดันฉีดคงที่ ที่ 550 bar เวลาฉีดเพิ่มขึ้นระหว่าง 1 ถึง 4 s การหดตัว

เชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.1433 % ถึง 1.6731 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิหลอมเหลวโพลิสไตรีน 230°C และ 260°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.3057 % ถึง 1.9302 % และ 1.3137 % ถึง 1.4234 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิสไตรีน พบว่า ที่อุณหภูมิหลอมเหลวโพลิสไตรีน 290°C เมื่อเวลาฉีดคงที่ ที่ 4 s ความดันฉีดเพิ่มขึ้นระหว่าง 400 ถึง 700 bar การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.3227 % ถึง 0.4111 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิหลอมเหลวโพลิสไตรีน 230°C และ 260°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.5462 % ถึง 0.5040 % และ 1.4014 % ถึง 0.4398 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิหลอมเหลวโพลิสไตรีน 290°C เมื่อความดันฉีดคงที่ ที่ 550 bar เวลาฉีดเพิ่มขึ้นระหว่าง 1 ถึง 4 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.0430 % ถึง 0.7403 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิหลอมเหลวโพลิสไตรีน 230°C และ 260°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.1796 % ถึง 0.9317 % และ 1.0927 % ถึง 0.7951 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิหลอมเหลวโพลิโพรพิลีน 230°C เมื่อเวลาฉีดคงที่ ที่ 4 s ความดันฉีดเพิ่มขึ้นระหว่าง 400 ถึง 700 bar การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.0798 % ถึง 1.4602 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิหลอมเหลวโพลิโพรพิลีน 260°C และ 290°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.0630 % ถึง 1.4519 % และ 2.0562 % ถึง 1.5247 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิหลอมเหลวโพลิโพรพิลีน 230°C เมื่อความดันฉีดคงที่ ที่ 550 bar เวลาฉีดเพิ่มขึ้นระหว่าง 1 ถึง 4 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.0159 % ถึง 1.3326 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิหลอมเหลวโพลิโพรพิลีน 260°C และ 290°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.0717 % ถึง 1.4784 % และ 3.1184 % ถึง 1.5589 % ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลิโพรพิลีน พบว่า ที่อุณหภูมิหลอมเหลวโพลิโพรพิลีน 230°C เมื่อเวลาฉีดคงที่ ที่ 4 s ความดันฉีดเพิ่มขึ้นระหว่าง 400 ถึง 700 bar การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.7314 % ถึง 1.5809 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิหลอมเหลวโพลิโพรพิลีน 260°C และ 290°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.7247 % ถึง 1.6313 % และ 2.7211 % ถึง 1.6983 % ตามลำดับ ที่อุณหภูมิหลอมเหลวโพลิโพรพิลีน 230°C เมื่อความดันฉีดคงที่ ที่ 550 bar เวลาฉีดเพิ่มขึ้นระหว่าง 1 ถึง 4 s การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.4337 % ถึง 1.9607 % น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิหลอมเหลวโพลิโพรพิลีน 260°C และ 290°C การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.4528 % ถึง 1.9939 % และ 2.4700 % ถึง 2.0133 % ตามลำดับ

ดังนั้น ที่อุณหภูมิหลอมเหลวโพลิสไตรีนสูง เมื่อเวลาอัดที่ ความดันอัดเพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความดันอัดที่ เวลาอัดเพิ่มขึ้น การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ที่อุณหภูมิหลอมเหลวโพลิสไตรีนต่ำ ที่อุณหภูมิหลอมเหลวโพลิโพรพิลีนต่ำ เมื่อเวลาอัดที่ ความดันอัดเพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความดันอัดที่ เวลาอัดเพิ่มขึ้น การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ที่อุณหภูมิหลอมเหลวโพลิโพรพิลีนสูง

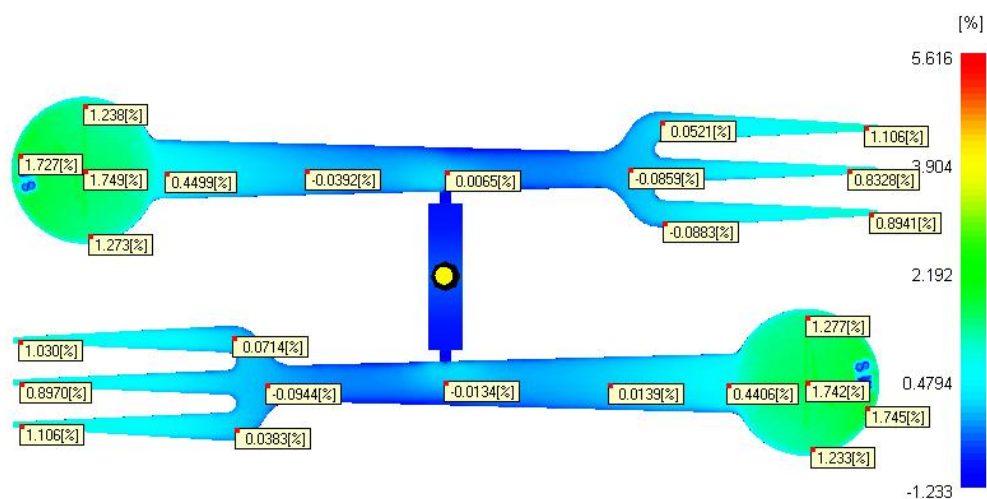
ลิโพรฟิลีนสูง และพบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของโพลีสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 48 % และ 19 % ตามลำดับ

4.2 ผลการเปรียบเทียบสภาวะที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์พลาสติกโพลีสไตรีนและโพลิโพรพิลีนจากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

4.2.1 การเปรียบเทียบสภาวะที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์พลาสติกโพลีสไตรีนจากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



ก. วิธีการทดลอง



ข. วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

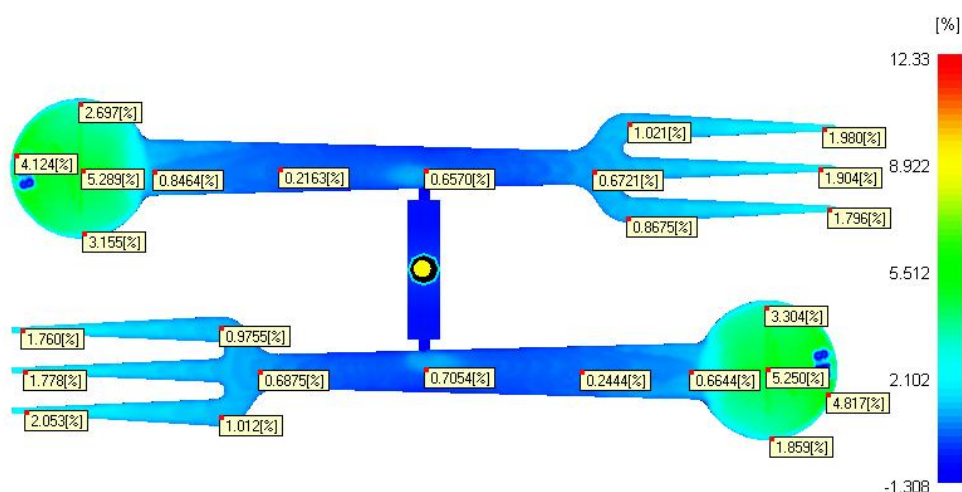
ภาพประกอบ 39 การเปรียบเทียบสภาวะที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์พลาสติกโพลีสไตรีนจากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากภาพประกอบ 39 พิจารณาเปรียบเทียบสภาวะที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์พลาสติกโพลีไทรีนจากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่ความดันฉีด 700 bar เวลาฉีด 4 s อุณหภูมิหลอมเหลวโพลีไทรีน 290°C ความดันย้ำ 105 % ของความดันฉีด เวลาย้ำ 9 s และ อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C พบว่า การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองเท่ากับ 0.4712 % และมีรอยยุบเกิดขึ้นบริเวณที่จับส้อม (มีลักษณะเป็นรอยเว้าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 20 mm ยุบลงไปเล็กน้อย บริเวณที่แรเงา) การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เท่ากับ 0.4111 % และพบว่า การหดตัวเชิงปริมาตรสูงสุดจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีค่าประมาณ 1.749 % ซึ่งเกิดขึ้นบริเวณจุดศูนย์กลางของที่จับส้อม

4.2.2 การเปรียบเทียบสภาวะที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์พลาสติกโพลิพรพิลีนจากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



ก. วิธีการทดลอง



ข. วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ภาพประกอบ 40 การเปรียบเทียบสภาวะที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์พลาสติกโพลิพรพิลีนจากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากภาพประกอบ 40 พิจารณาเปรียบเทียบสภาวะที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์พลาสติกโพลิโพรพิลีนจากการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่ความดันฉีด 700 bar เวลาฉีด 4 s อุณหภูมิหลอมเหลวโพลีสไตรีน 290°C ความดันย้ำ 105 % ของความดันฉีด เวลาย้ำ 9 s และ อุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C พบว่า การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการทดลองเท่ากับ 1.4602 % และมีรอยยุบเกิดขึ้นบริเวณที่จับส้อม (มีลักษณะเป็นรอยเว้าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 20 mm ยุบลงไปเล็กน้อย บริเวณที่แรเงา) การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เท่ากับ 1.5809 % และพบว่า การหดตัวเชิงปริมาตรสูงสุดจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีค่าประมาณ 5.289 % ซึ่งเกิดขึ้นบริเวณจุดศูนย์กลางของที่จับส้อม

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาอิทธิพลและสภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์พลาสติกฉีดด้วยการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยศึกษาพารามิเตอร์ในสภาวะการฉีดคือ ความดันฉีด เวลาฉีดและอุณหภูมิหลอมเหลว เท่ากับ 400 bar ถึง 700 bar 1 s ถึง 4 s และ 230°C ถึง 290°C ตามลำดับ ในสภาวะการย่ำคือ ความดันย่ำ เวลาย่ำและอุณหภูมิแม่พิมพ์ เท่ากับ 75% ถึง 105% ของความดันฉีด 3 s ถึง 9 s สำหรับโพลิสไตรีน 3 s ถึง 15 s สำหรับโพลิโพรพิลีน และ 10°C ถึง 50°C ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยคือ ส้อม ขนาด 25x147.5x2 mm ทำมาจากพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก คือ โพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีน เครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ในการวิจัย คือ อาร์เบิร์ก ออลราวเดอร์ 220เอส (ARBURG ALLROUNDER 220S) และใช้โปรแกรมโมลโฟลพลาสติกอินไซต์ เวอร์ชัน 4.0 (Moldflow Plastics Insight V4.0) สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

5.1 สรุปผล

5.1.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์พลาสติกฉีดด้วยการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการวิจัยพบว่า เมื่อพิจารณาการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์พลาสติกโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีน ในสภาวะการฉีด คือ ความดันฉีด เวลาฉีดและอุณหภูมิหลอมเหลวคงที่ ขณะที่สภาวะการย่ำ คือ ความดันย่ำและเวลาย่ำเพิ่มขึ้น ทำให้การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลง สอดคล้องกันทั้งการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แต่เมื่ออุณหภูมิแม่พิมพ์เพิ่มขึ้น ทำให้การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สอดคล้องกันทั้งการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เช่นกัน เมื่อพิจารณาการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์พลาสติกโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีน ในสภาวะการย่ำ คือ ความดันย่ำ เวลาย่ำและอุณหภูมิแม่พิมพ์คงที่ ขณะที่สภาวะการฉีด คือ ความดันฉีด เวลาฉีดและอุณหภูมิหลอมเหลวโพลิสไตรีนเพิ่มขึ้น ทำให้การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงสอดคล้องกันทั้งการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แต่เมื่ออุณหภูมิหลอมเหลวโพลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้น ทำให้การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสอดคล้องกันทั้งการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เช่นกัน

5.1.2 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์พลาสติกฉีด

ผลการวิจัยพบว่า การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์พลาสติกโพลีสไตรีน น้อยที่สุดในสภาวะการฉีด คือ ความดันฉีด เวลาฉีดและอุณหภูมิหลอมเหลวโพลีสไตรีน เท่ากับ 700 bar 4 s และ 290°C ตามลำดับ การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์พลาสติกโพลิโพรพิลีนน้อยที่สุดในสภาวะการฉีด คือ ความดันฉีด เวลาฉีดและอุณหภูมิหลอมเหลวโพลิโพรพิลีน เท่ากับ 700 bar 4 s และ 230°C ตามลำดับ และพบว่า การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยเกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์โพลีสไตรีนน้อยที่สุดในสภาวะการย่ำ คือ ความดันย่ำ เวลาย่ำและอุณหภูมิแม่พิมพ์ เท่ากับ 105% ของความดันฉีด 9 s และ 10°C ตามลำดับ การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยเกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์โพลิโพรพิลีนน้อยที่สุดในสภาวะการย่ำ คือ ความดันย่ำ เวลาย่ำและอุณหภูมิแม่พิมพ์ เท่ากับ 105% ของความดันฉีด 15 s และ 10°C ตามลำดับ อีกทั้งยังหลังจากการเปรียบเทียบ ระหว่างการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสำหรับโพลีสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 62% และ 18% ตามลำดับ

ตาราง 37 สภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์

โพลีสไตรีน (Polystyrene)				โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)			
		การหดตัวเชิงปริมาตร เฉลี่ย (%)				การหดตัวเชิงปริมาตร เฉลี่ย (%)	
		การ ทดลอง	วิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์			การ ทดลอง	วิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์
ความดันฉีด (bar)	700	0.4712	0.4111	ความดันฉีด (bar)	700	1.4602	1.5809
เวลาฉีด (s)	4			เวลาฉีด (s)	4		
อุณหภูมิพลาสติกเหลว (°C)	290			อุณหภูมิพลาสติกเหลว (°C)	230		
ความดันย่ำ (% ของความ ดันฉีด)	105			ความดันย่ำ (%ของความดัน ฉีด)	105		
เวลาย่ำ (s)	9			เวลาย่ำ (s)	15		
อุณหภูมิแม่พิมพ์ (°C)	10			อุณหภูมิแม่พิมพ์ (°C)	10		

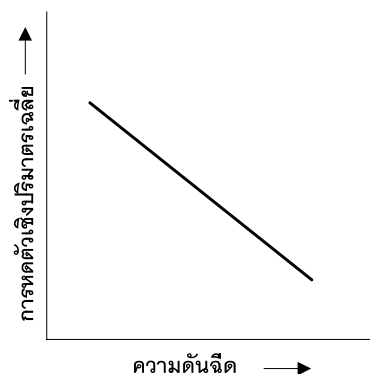
5.2 อภิปรายผล

การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย มีพารามิเตอร์ที่ศึกษา คือ

5.2.1 ความดันฉีด (Injection pressure)

ความดันฉีดเป็นพารามิเตอร์ ที่เติมเนื้อพลาสติกเหลวเข้าไปในโพรงแบบ เมื่อความดันฉีดเพิ่มขึ้น ทำให้ช่วงการเติมเนื้อพลาสติกเหลวสมบูรณ์ขึ้น การเคลื่อนที่เพื่อให้เกิดการคลายตัวจึงลดน้อยลง ทำให้การจัดเรียงทิศทางของโมเลกุลมีมากขึ้น ส่งผลให้การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมี

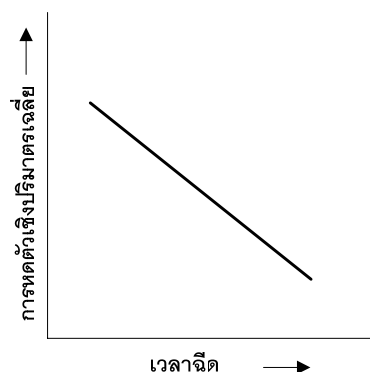
แนวโน้มลดลง ดังภาพประกอบ 41 หากความดันฉีดมีค่าน้อยเกินไป ทำให้เกิดการฉีดไม่เต็มโพรงแบบ (Short shot) หากมีค่ามากเกินไป ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดครีบ (Flash) และพบว่าความดันฉีดที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์พลาสติกโพลีสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 700 bar



ภาพประกอบ 41 ผลของความดันฉีดที่มีต่อการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย

5.2.2 เวลาฉีด (Injection time)

เวลาฉีดเป็นพารามิเตอร์ในช่วงเวลาการเติมเนื้อพลาสติกเหลวเข้าไปในแม่พิมพ์ด้วยความดันฉีด เมื่อมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ช่วงเวลาการเติมเนื้อพลาสติกเหลวสมบูรณ์ขึ้น ส่งผลให้การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลง ดังภาพประกอบ 42 และพบว่าเวลาฉีดที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์พลาสติกโพลีสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 4 s



ภาพประกอบ 42 ผลของเวลาฉีดที่มีต่อการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย

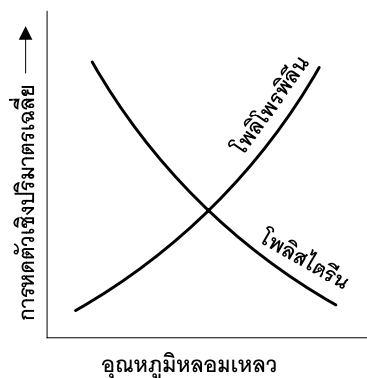
5.2.3 อุณหภูมิหลอมเหลว (Melt temperature)

โพลีสไตรีนเป็นเทอร์โมพลาสติกอสัณฐาน มีการจัดเรียงทิศทางของโมเลกุลในรูปขด เมื่ออุณหภูมิหลอมเหลวโพลีสไตรีนเพิ่มขึ้น ทำให้การจัดเรียงทิศทางของโมเลกุลในรูปขดมีมากขึ้น จึงส่งผลให้การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลง ดังภาพประกอบ 43 และพบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์พลาสติกโพลีสไตรีนเท่ากับ 290 °C

โพลิโพรพิลีนเป็นเทอร์โมพลาสติกกึ่งผลึก มีการจัดเรียงทิศทางของโมเลกุลให้เป็นระเบียบ เมื่ออุณหภูมิหลอมเหลวโพลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้น ทำให้การจัดเรียงทิศทางของโมเลกุลมีความเป็น

ระเบียบน้อยลง ส่งผลให้การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และพบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์พลาสติกโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 230°C

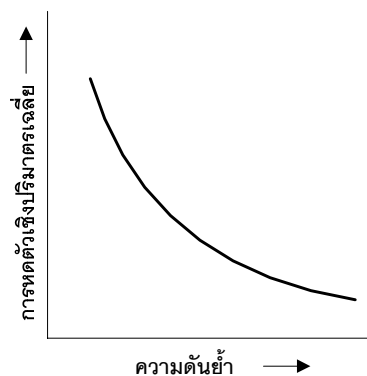
อีกทั้งหากอุณหภูมิหลอมเหลวโพลีสไตรีนและโพลิโพรพิลีน มีค่าน้อยเกินไป ทำให้ต้องใช้ความดันฉีดมากขึ้น เพราะมีค่าความหนืดสูง หากมีค่ามากเกินไป จะทำให้เกิดรอยไหม้



ภาพประกอบ 43 ผลของอุณหภูมิหลอมเหลวที่มีต่อการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย

5.2.4 ความดันย่ำ (Holding pressure)

ความดันย่ำเป็นพารามิเตอร์ที่เติมเนื้อพลาสติกเหลวส่วนหนึ่ง เข้าไปในเนื้อพลาสติกเหลวที่กำลังเย็นตัวลง เพื่อชดเชยการหดตัวที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลง ดังภาพประกอบ 44 และพบว่าความดันย่ำที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์พลาสติกโพลีสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 105 % ของความดันฉีด

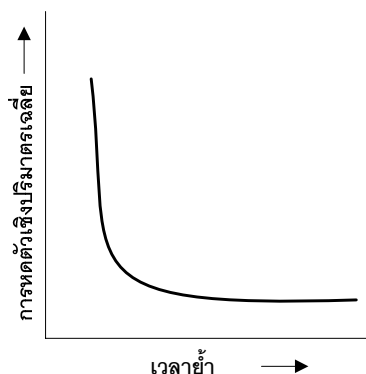


ภาพประกอบ 44 ผลของความดันย่ำที่มีต่อการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย

5.2.5 เวลาย่ำ (Holding time)

เวลาย่ำเป็นพารามิเตอร์ในช่วงเวลาการเติมเนื้อพลาสติกเหลวส่วนหนึ่ง เข้าไปในเนื้อพลาสติกเหลวที่กำลังเย็นตัวลงโดยความดันย่ำ เพื่อชดเชยการหดตัวที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ ดังภาพประกอบ 45 เมื่อเวลาย่ำเพิ่มขึ้น เนื้อพลาสติกเหลวเข้าสู่โพรงแบบมากขึ้น ทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลเพื่อเกิดการคลายตัวมีน้อยลง ความหนาแน่นจึงเพิ่มขึ้น ปริมาณของการจัดเรียงตัวจึงเพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง จะอยู่ในแนวราบเนื่องจากเข้าสู่สภาวะเย็นตัวลง หรือเกิดการหยุดการย่ำ

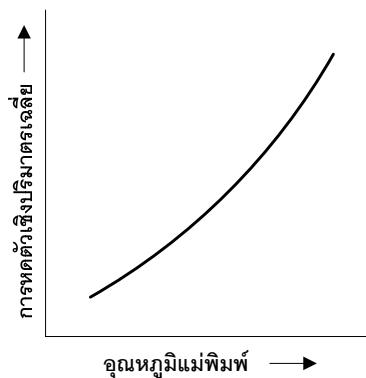
ส่งผลให้การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลง และพบว่าเวลาฆ่าที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์พลาสติกโพลีสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 9 s และ 15 s ตามลำดับ



ภาพประกอบ 45 ผลของเวลาฆ่าที่มีต่อการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย

5.2.6 อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature)

เมื่ออุณหภูมิแม่พิมพ์เพิ่มขึ้นทำให้การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเวลาการคลายตัวของโมเลกุลมีมากขึ้น ทำให้การจัดเรียงทิศทางของโมเลกุลเกิดขึ้นน้อยลง ส่งผลให้การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังภาพประกอบ 46 และพบว่าอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์พลาสติกโพลีสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 10°C



ภาพประกอบ 46 ผลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่มีต่อการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ข้อเสนอแนะทั่วไป

5.3.1.1 ในการพิจารณาสถานะการฉีดผลิตภัณฑ์พลาสติกโพลีสไตรีน จะเห็นได้ว่าการใช้ความดันฉีด เวลาฉีดและอุณหภูมิหลอมเหลวที่มีค่ามาก ทำให้การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยลดน้อยลง แต่ส่งผลให้รอบการทำงานและพลังงานที่ใช้ไปมีค่าเพิ่มขึ้น และพบว่าการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยขึ้นอยู่กับความดันฆ่ามากกว่าเวลาฆ่า ขณะที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำ เมื่อลดเวลาฉีด เวลาฆ่าและ

อุณหภูมิหลอมเหลวโพลิสไตรีน แต่เพิ่มความดันย៉่ำให้มากขึ้น ทำให้การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย ลดน้อยลง ส่งผลให้รอบการทำงานและพลังงานที่ใช้ไปลดน้อยลงด้วย ส่วนการพิจารณาภาวะการฉีดผลิตภัณฑ์พลาสติกโพลิโพรพิลีนพบว่า การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยขึ้นอยู่กับเวลาอย่างมากกว่าความดันย៉่ำ ดังนั้น จึงควรลดความดันย៉่ำ อุณหภูมิหลอมเหลวโพลิโพรพิลีนและอุณหภูมิแม่พิมพ์ลง แต่เพิ่มเวลาอย่างมากขึ้น ทำให้การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย ลดน้อยลงเช่นกัน

5.3.1.2 ในกรณีของอุณหภูมิแม่พิมพ์ โดยปกติก่อนการทดลองจะต้องอุ่นแม่พิมพ์ ให้แม่พิมพ์มีอุณหภูมิคงที่ แต่จะเห็นได้ว่าแม่พิมพ์ที่มีอุณหภูมิ 10°C มีค่าการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยน้อยที่สุด แสดงว่าแม่พิมพ์ที่มีอุณหภูมิต่ำ ทำให้การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยลดน้อยลง ส่งผลให้ไม่สิ้นเปลืองพลังงานในการอุ่นแม่พิมพ์

5.3.1.3 การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีค่าแตกต่างจากการทดลองมาก เนื่องจากโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีนไม่มีสมบัติการหดตัว (Shrinkage properties) จากบริษัทผู้ผลิต จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูง ดังนั้นจึงควรมีคอร์เรกชัน แฟกเตอร์ (Correction factor) มาคูณกับค่าการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยที่คำนวณได้ วิธีนี้อาจทำให้ความคลาดเคลื่อนลดน้อยลง

5.3.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัย

การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย ส่งผลให้เกิดรอยยุบในผลิตภัณฑ์ เนื่องจากการควบคุมพารามิเตอร์กระบวนการ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่ยังมีส่วนที่มีอิทธิพลต่อการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยอีก จึงขอเสนอแนะเพื่อการวิจัยครั้งต่อไปดังนี้

5.3.2.1 ทางเข้า (Gate) เป็นพารามิเตอร์แม่พิมพ์ที่มีความสำคัญและมีอิทธิพลต่อการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย ได้แก่ ขนาดทางเข้า (Dimension) ตำแหน่งทางเข้า (Location) และรูปร่างพื้นที่หน้าตัดทางเข้า (Shape) เป็นต้น

5.3.2.2 การออกแบบการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ควรดำเนินการวิเคราะห์พารามิเตอร์ ก่อนดำเนินการออกแบบแม่พิมพ์

5.3.2.3 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ควรมีการเปรียบเทียบโปรแกรม ที่นอกเหนือจากโปรแกรมโมลโฟลพลาสติกอินไซท์ เวอร์ชัน 4.0 เช่น โปรแกรมซี-โมล (C-mold) และโปรแกรมแคดโมล (Cadmold) เป็นต้น

5.3.2.4 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD) ในงานวิจัยนี้ คือ โปรแกรมโซลิดเวิร์ค (Solid work) เวอร์ชัน 2004 แต่มีโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ อีกโปรแกรมหนึ่ง ที่สามารถใช้งานร่วมกับโปรแกรมโมลโฟลพลาสติกอินไซท์ โปรแกรมซี-โมล และโปรแกรมแคดโมลได้ดี คือ โปรแกรมโปรเอ็นจิเนียร์ (Pro/Engineer)

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- วิโรจน์ เตชะวิญญูธรรม. (2540). *งานฉีดพลาสติก*. กรุงเทพฯ : บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน). ถ่ายเอกสาร.
- วิวัฒน์ ตันติขจรโกศล และ ชัยรัตน์ แก้วด้วง. (2538). *แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก*. กรุงเทพฯ : บริษัท ทีพี. พรินท์ จำกัด. สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ. ถ่ายเอกสาร.
- ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, (2545). *Mechanical Technology Magazine*. ปทุมธานี : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- สมศักดิ์ วรมงคลชัย. (2548). *เทคโนโลยีพอลิเมอร์ 1*. บริษัท บุกเนท จำกัด, กรุงเทพฯ.
- สมศักดิ์ วรมงคลชัย. (2548). *เทคโนโลยีพอลิเมอร์ 2*. บริษัท บุกเนท จำกัด, กรุงเทพฯ.
- สมัชชา โชคชัยวิวัฒน์. (2545). *การศึกษาการแก้ไขปัญหาของการเกิด Weld Line และ Sink Marks ในการขึ้นรูปพลาสติกแบบฉีดโดยใช้โปรแกรม Moldex*. ปรินูญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สุภกิจ ขาวเนตร วิชิต บัวแก้ว และ ไพศาล นาผล. (2548). *การศึกษาการหดตัวเชิงปริมาตรของผลิตภัณฑ์พลาสติกฉีด*. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 19. 19-21 ต.ค. 2548, ภูเก็ต.
- เสฏฐวรรธ สุจริตวาทสกุล. (2545). *Mechanical Technology Magazine, Vol 8*. ซีเอ็ดบุ๊คเซ็นเตอร์. กรุงเทพฯ.
- ARBURG GmbH + Co. (1998). *Operating Manual for ALLROUNDER S series*. Germany.
- ARBURG GmbH + Co. (2003). *Introduction to Injection Moulding*. Germany.
- Clements, L., (1988). *Polymer Science of Engineers*. Engineering Plastics Handbook, American Society of Metals, International, Metals Park, Ohio, USA.
- Deanin, R., (1972). *Polymer Structure Properties and Applications*. Cahnners Publishing, Boston, USA.
- Du-Soon Choi, Yong-Taek Im. (1999). Prediction of Shrinkage and Warpage in Consideration of Residual Stress in Integrated Simulation of Injection Molding. *Journal of Composite Structures* 47. pp.655-665.
- Griskey, R.G., (1995). *Polymer Process Engineering*. Chapman & Hall, New York: USA.
- Intelligent Systems Laboratory., (1999). *Injection Molding*. Department of Computer Science and Engineering, Michigan State University, USA.
- J.A. Brydson., (1989). *Plastics Materials*. Anchor Press Ltd. Tiptree, Essex.

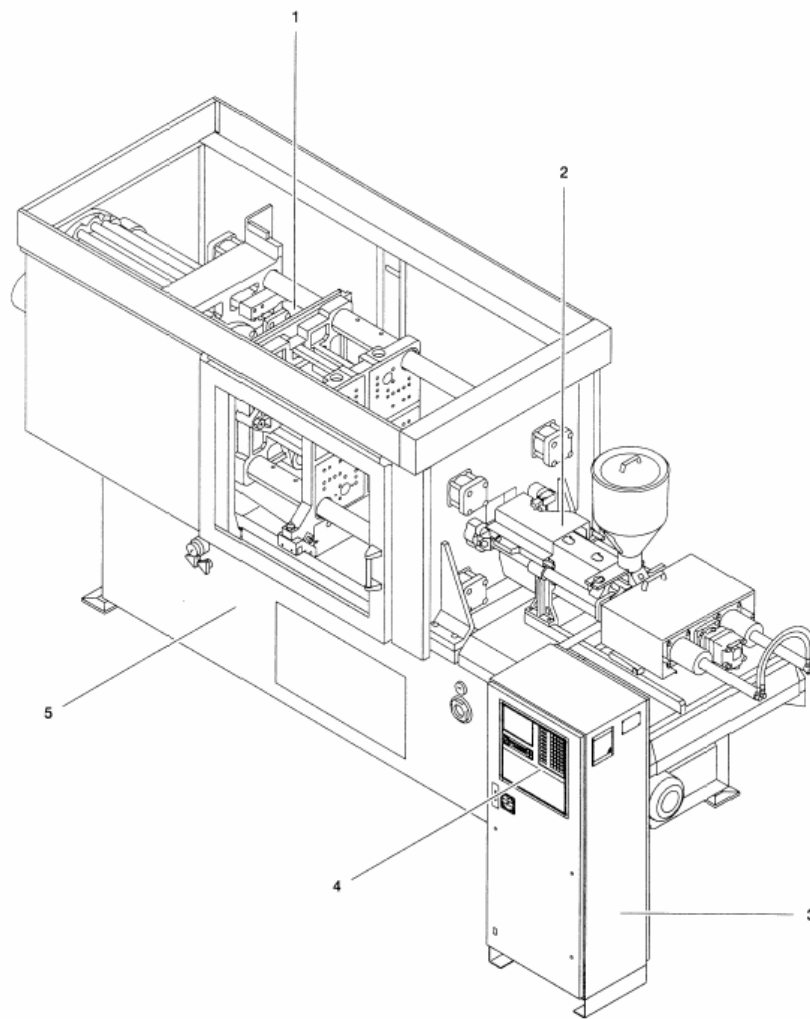
- Kamata Satoru, Fukusima Mutsuji, Nishimura Shinzo, Moritoki Hitoshi. (1989). An Application of Spencer-Gilmore's Equation for Evaluating the Volumetric Shrinkage of Crystalline Polymers in Injection Molding. : *Journal of Japan Society of Polymer Processing*. Vol.1, No.2. pp.213-219.
- L. Sridhar and K.A. Narh. (2000). The Effect of Temperature Dependent Thermal Properties on Process Parameter Prediction in Injection Molding. *Journal of Heat Mass Transfer*. Vol.27, No.3. pp.325-332.
- Michelle Maniscalco., (2004). *All meshes are not created equal*. Injection Molding Magazine. University of Massachusetts Lowell, USA.
- NFWA/NHTSA National Crash Analysis Center. (2003). *Non-Linear Finite Element Modeling and Simulation for Auto Body*. The George Washington University.
- Philip D. Harvey, editor., (1982). Engineering Properties of Steels. *American Society for Metals*. Metals Park, OH.
- P.Posttawa, J. Koszkul. (2005). Change in Injection Moulded Parts Shrinkage and Weight as a Function of Processing Conditions. *Journal of Materials Processing Technology*. pp.109-115.
- Rosato, D.V. and Rosato, D.V., (1990). *Plastics Processing Data Handbook*. Chapman & Hall, London, England.
- Rosato, D.V. and Rosato, D.V., (1995). *Injection Molding Handbook*. Chapman & Hall, New York, USA.
- R.A.Harris, H.A. Newlyn, R.J.M Hague, P.M Dickens. (2003). Part Shrinkage Anomalies from Stereo Lithography Injection Mould Tooling. *Journal of Machine Tools & Manufacture* 43. pp.879-887.
- R. Abbott, R. Combs, D. Kazmer, G. Magnant, S. Winebaum. *Elimination of Process Constraints in Plastics Injection Molding*. Molding 2003 Executive Technology Conference, New Orleans, LA : 2003.
- Sachtling., (1987). *International Plastics Handbook*. Hanser Publisher, Munich, Vienna, New York : USA.
- The Engineering Design Center., (1998). *Shrinkage and Warpage*. Santa Clara University.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก	การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์พลาสติกฉีดด้วยการทดลอง
ภาคผนวก ข	การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมโมลโฟลพลาสติกอินไซท์ เวอร์ชัน 4.0
ภาคผนวก ค	ตารางผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์พลาสติกฉีดด้วยการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
ภาคผนวก ง	บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่
ภาคผนวก จ	คำอธิบายสัญลักษณ์และหน่วย
ภาคผนวก ฉ	แบบผลิตภัณฑ์และแม่พิมพ์ส้อม

ภาคผนวก ก

การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์พลาสติกฉีดด้วยการทดลอง



ภาพประกอบ 47 เครื่องฉีดพลาสติกอาร์เบ็ก ออลราวดอร์ 220 เอส (ARBURG ALLROUNDER 220 S)

จากภาพประกอบ 47 แสดงรายละเอียดดังนี้

1. ชุดเปิด-ปิดแม่พิมพ์พร้อมแม่พิมพ์ (Clamping unit with mold)
2. ชุดฉีด (Injection unit)
3. ตู้ควบคุม (Control cabinet)
4. ชุดควบคุม (Controller)
5. ฐานเครื่องและระบบไฮดรอลิกส์ (Machine base with hydraulics)

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1.1 เครื่องฉีดพลาสติกอาร์เบิก ออลราวเดอร์ 220 เอส (ARBURG ALLROUNDER 220 S) ขนาด 15 tons ดังภาพประกอบ 47 มีคุณลักษณะจำเพาะดังนี้ [ARBURG GmbH + Co: 1998]

- 1.1.1 เครื่องฉีดแนวนอนระบบไฮดรอลิกส์
- 1.1.2 ทำงานด้วยระบบควบคุมด้วยมือ, ระบบกึ่งอัตโนมัติ และอัตโนมัติ
- 1.1.3 มีระบบตั้งเวลาการเปิด-ปิด เครื่องล่วงหน้า
- 1.1.4 มีระบบป้องกันอันตรายในขณะปฏิบัติงาน
- 1.1.5 สกรูมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 18 mm
- 1.1.6 ปริมาตรการฉีด $32 \text{ cm}^3/\text{s}$
- 1.1.7 ความดันฉีดสูงสุด 2500 bar
- 1.1.8 ระยะชักหัวฉีด 220 mm
- 1.1.9 ใช้ Cylinder heating power รวมขนาด 2850 W
- 1.1.10 ใช้ Nozzle heating power ขนาด 300 W
- 1.1.11 แรงปิดแม่พิมพ์ 150 kN
- 1.1.12 ระยะเปิดแม่พิมพ์สูงสุด 275 mm
- 1.1.13 ระยะปลดชิ้นงานสูงสุด 95 mm
- 1.1.14 กำลังปั๊มไฮดรอลิกส์ขนาด 5.5 kW
- 1.1.15 ระบบไฟฟ้า 220/380 V 16 A

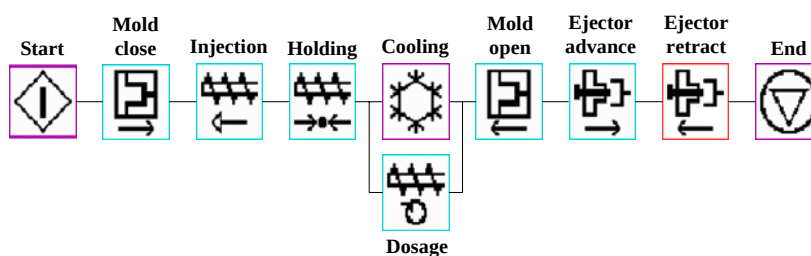
1.2 ระบบน้ำหมุนเวียน (Circulating Water Bath) ยี่ห้อ Julabo รุ่น F12

1.3 เครื่องชั่งขนาด 0.1 mg (มิลลิกรัม) ยี่ห้อ Denver รุ่น TC-254

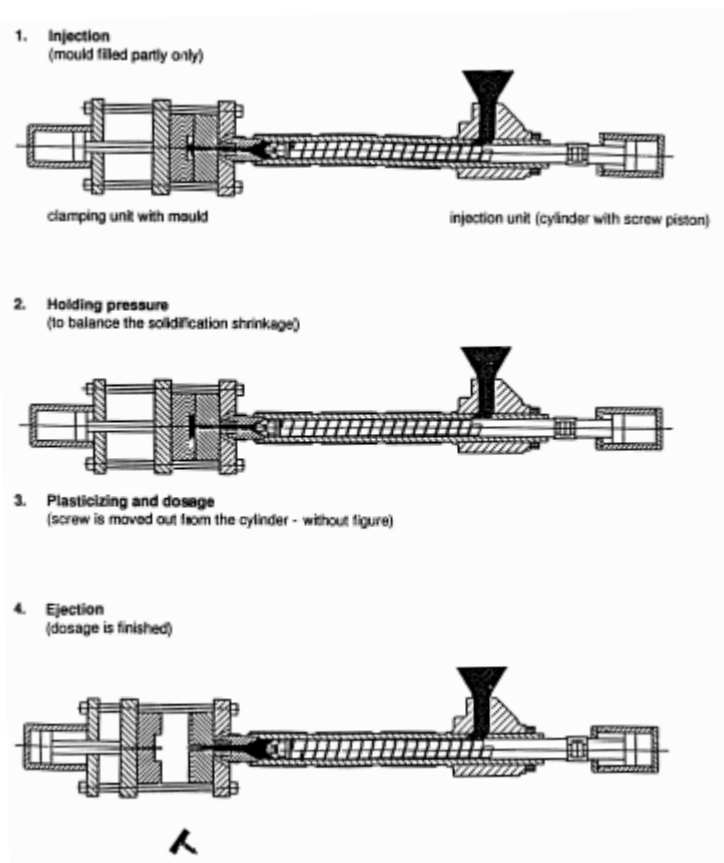
1.4 เทอร์มิสเตอร์แบบพกพา (Handheld thermistor meter) ยี่ห้อ testo รุ่น 110

1.5 เม็ดพลาสติกโพลิสไตรีน (PS) ของมิตซูบิชิ เคมีคัล (MITSUBISHI CHEMICAL) ชนิด ไดเร็กซ์ ฮิปส์ เอช350 (DIAREX HIPS H350) และ เม็ดพลาสติกโพลิโพรพิลีน (PP) ของบาเซล โพลีโอเลฟินส์ (BASELL POLYOLEFINS) ชนิดโมเพลน เอชพี500เอ็น (MOPLEN HP500N)

2. ขั้นตอนการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติกอาร์เบิก ออลราวเดอร์ 220 เอส



ภาพประกอบ 48 แผนภาพการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติกอาร์เบิก ออลราวเดอร์ 220 เอส



ภาพประกอบ 49 การทำงานของเครื่องฉีดพลาสติกอาร์เบ็ก ออลราวเดอร์ 220 เอส

จากภาพประกอบ 48 และ 49 สามารถอธิบายขั้นตอนการทำงานเป็นรอบ (cycle) ของเครื่องฉีดพลาสติกอาร์เบ็ก ออลราวเดอร์ 220 เอส ได้ดังนี้ [วิโรจน์, 2540]

1. Start เริ่มต้นการทำงาน
2. Mold close แม่พิมพ์เคลื่อนที่ในตำแหน่งปิดด้วยแรงปิดแม่พิมพ์ (Clamping Force) ด้วยแรงที่มากกว่าแรงเนื่องจากกระบวนการฉีด
3. Injection ชูตฉีดเคลื่อนที่เข้าหาแม่พิมพ์จนกระทั่งสัมผัสกับแม่พิมพ์และค้างไว้ด้วยแรงเพื่อป้องกันชูดฉีดถอยหลังกลับ และฉีดพลาสติกเหลวเข้าแม่พิมพ์ โดยเกลียวหนอนจะเคลื่อนที่ตามแนวแกน
4. Holding การย่ำรักษาความดันแก่พลาสติกเหลว เพื่อให้พลาสติกเหลวไหลเต็มโพรงแบบมากขึ้นเพิ่มความสมบูรณ์ให้แก่ผลิตภัณฑ์ (ความหนาแน่นของเทอร์โมพลาสติกไม่เปลี่ยนแปลง)
5. Cooling การหล่อเย็นผลิตภัณฑ์ในแม่พิมพ์ ในขั้นตอนนี้จะมีช่วงเวลาควบคุม ซึ่งจะต้องนานกว่าการหลอมและป้อนพลาสติกเหลวไปหน้าปลายเกลียวหนอน (Dosage)
6. Dosage การหลอมและป้อนพลาสติกเหลวไปหน้าปลายเกลียวหนอน โดยเกลียวหนอนจะหมุนรอบตัวเองเพื่อดึงเม็ดพลาสติกจากกรวยเติมเข้ามาในกระบอกฉีด และส่งต่อไปยังหน้า

ปลายเกลียวหนอน ในขณะที่ตัวให้ความร้อน (Heater) ยังทำงานอยู่ ในขณะที่เกลียวหนอนหมุนรอบตัวเองอยู่นั้น เกลียวหนอนจะเคลื่อนตัวถอยหลังกลับไปโดยอัตโนมัติ เนื่องจากความดันของพลาสติกเหลวที่อยู่หน้าปลายเกลียวหนอน เมื่อได้ปริมาณของพลาสติกเหลวตามที่ต้องการแล้ว เกลียวหนอนก็จะหยุดหมุน ขั้นตอนการทำงานนี้จะเริ่มพร้อมกันกับขั้นตอนการหล่อเย็น หลังจากนั้นชุดฉีดถอยหลังกลับเพื่อป้องกันอุณหภูมิของหัวฉีดลดต่ำลงเกินไป ซึ่งอาจทำให้ดำเนินกระบวนการฉีดไม่ได้เนื่องจากพลาสติกเหลวมีความหนืดสูงขึ้น

7. Mold open แม่พิมพ์เคลื่อนที่เปิดออก หลังจากสิ้นสุดเวลาหล่อเย็น
8. Ejector advance แกนกระทุ้ง (Ejector) เคลื่อนที่เดินหน้าปลดผลิตภัณฑ์ หลังจากแม่พิมพ์เปิดออกสุดแล้ว อาจทำครั้งเดียวหรือหลายครั้งก็ได้
9. Ejector retract แกนกระทุ้ง (Ejector) เคลื่อนที่กลับ
10. End สิ้นสุดรอบการทำงาน

3. ตารางและภาพประกอบที่ใช้อ้างอิงสำหรับการทดลอง

ตาราง 38 การอบเม็ดพลาสติกชนิดต่างๆ โดยเวลาและอุณหภูมิ [ARBURG GmbH + Co : 2003]

Abbrevia- tion	Material			Density g/cm ³	Perfor- mance kg/h	Drying Mode
ABS	Acrylonitrile/butadiene/styrene	80 °C	2-3 h	1.05	15	F/R
CA	Cellulose acetate	75 °C	2-3 h	1.28	18	F/R
CAB	Cellulose acetate butyrate	70 °C	2-3 h	1.18	17	F/R
CP	Cellulose propionate	70 °C	3-4 h	1.20	1.5	F/R
PA	Polyamide 6	80 °C	4-5 h	1.13	9.5	D
PA	Polyamide 6.6	80 °C	4-5 h	1.14	9.5	D
PA	Polyamide 6.10	80 °C	4-5 h	1.14	9.5	D
PA	Polyamide 6.11	90 °C	4-6 h	1.04	7.5	D
PA	Polyamide 6.12	90 °C	4-6 h	1.04	7.5	D
PAN	Polyacrylonitrile	80 °C	2-3 h		16	F/R
PBTP	Polybutylene terephthalate	120 °C	2-3 h	1.30	18	D
PC	Polycarbonate	120 °C	2-3 h	1.25	17.5	D
PE	Polyethylene black	90 °C	1-2 h	0.95	20	F/R
PE	Polyethylene	90 °C	3 h	0.94	13	F/R
PETP	Polyethylene terephthalate	150 °C	5 h	1.30	11	D
PI	Polyimide	120 °C	3 h	1.40	20	D
PMMA	Polymethyl methacrylate	80 °C	3-4 h	1.19	12.5	D
POM	Polyoxymethylene	100 °C	3 h	1.41	20	F/R
PP	Polypropylene	90 °C	1-2 h	0.90	19	F/R
PPO	Polyphenylene oxide	110 °C	2 h	1.10	23	F/R
PS	Polystyrene	80 °C	1-2 h	1.05	22	F/R
PSU	Polysulfone	120 °C	2-3 h	1.25	17.5	D
PUR	Polyurethane	90 °C	2-3 h	1.20	17	D
PVC	Polyvinyl chloride	70 °C	1 h	1.40	59	D
SAN	Styrene acrylonitrile	80 °C	2-3 h	1.08	15	F/R

- เมื่อ D คือ การอบแห้ง (Dry Air)
 F คือ การอบแบบมีการระบายอากาศออก (Fresh Air)
 R คือ การอบแบบมีอากาศหมุนเวียน (Recirculation mode)



บริษัท เอชเอ็มที โพลีสไตรีน จำกัด
HMT POLYSTYRENE CO., LTD.

183 ชั้น 18 อาคารเรเจนต์เฮาส์ ถนนราชดำริ แขวงลุมพินี เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร. 0-2254-1701-4 แฟกซ์. 0-2254-1706
183 18th Floor, Regent House Building, Rajdamri Road, Lumpini, Pathumwan, Bangkok 10330 Tel. 66-2254-1701-4 Fax. 66-2254-1706

Ref. No. : 652/2004

Certificate of Analysis

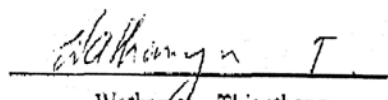
Trade Name : DIAREX

Type : HIPS High Impact

Grade : H 350

Lot No. : 411035

Property	Method	Unit	Result
Tensile strength (at yield)	ASTM D-638	psi	4219
Tensile elongation (at break)	ASTM D-638	%	47.78
Tensile modulus	ASTM D-638	(E+05) psi	2.94
Flexural strength	ASTM D-790	psi	5709
Flexural modulus	ASTM D-790	(E+05) psi	2.63
Izod impact strength	ASTM D-256	ft.lb/in	2.12
Vicat softening point (1 Kg.)	ASTM D-1525	deg. C	103.2
Melt flow rate (200 deg.C, 5 Kg.)	ASTM D-1238	g/10 min	3.52
Specific gravity	-	-	1.04


Wathanya Thianthong
Quality Control Assistance Manager

ภาพประกอบ 50 ใบรับรอง (Certificate) ของโพลิโพลีสไตรีน ชนิดไคเร็กซ์ อีปส์ เอช350 (DIAREX HIPS H350)

Product Data



HMC POLYMERS
COMPANY LIMITED

Moplen HP500N

General Purpose Polypropylene Homopolymer Resin

Features :

- Good stiffness
- Good heat - age life
- Low odor and taste transfer
- Excellent resistance to environmental stress - cracking

Typical Applications :

- Food containers
- Housewares
- Toys
- Closures
- Hospital and institutional wares
- Multifilament fiber

Resin properties (a)	Moplen HP500N	ASTM METHOD(b)
Melt flow rate, dg/min.	12	D 1238
Density, g/cm ³	0.90	D 792B
Tensile strength at yield, MPa	34	D 638
Elongation at yield, %	10	D 638
Flexural modulus, MPa	1480	D 790A
Notched izod impact strength at 23°C, J/m	25	D 256A
Rockwell hardness, R Scale	-	-
Deflection temperature, at 455 kPa, °C	97	D 648

(a) Values shown are averages and are not to be considered as specifications.

(b) ASTM test methods are the latest under Society's current procedures. All molded specimens are prepared by injection.

FDA Statement :

Moplen HP500N meets FDA requirements in the Code of Federal Regulations in 21 CFR 177.1520 for all food contact. All ingredients in Moplen HP500N meets the chemical registration requirements of TSCA (U.S.) and DSL (Canada).

Note: Due to the fact that different regulations in each country set different details of compliance, users of Moplen HP500N are recommended to undertake their own investigation of the requirements and comply with each regulation set forth, for instance, in applicable local F&DA requirements. Ultimately the users must make their own determination that their use of Moplen HP500NS is safe, lawful and technically suitable in their intended applications.

Moplen is a trademark of Basell

HMC Polymers is certified according to ISO 9001 and 14001

Issued 25-Feb-04

The purpose of this document is only for technical support of the use of the product.

HMC cannot anticipate all conditions under which this information and our products, or the products of other manufactures in combination with our products, may be used. We accept no responsibility for results obtained by the application of this information or the safety and suitability of our products, either alone or in combination with other products. Users are advised to make their own tests to determine the safety and suitability of each such product or product combination for their purposes. Unless otherwise agreed in writing, we sell the products without warranty, and buyers and users assume all responsibility and liability for loss or damage arising from the handling and use of our products, whether used alone or in combination with other products.

Office : Sathorn City Tower, 20th Floor, 175 South Sathorn Road, Sathorn, Bangkok 10120, Thailand
Tel: (66-2) 679-6388-89 Fax: (66-2) 679-5748 (Export), 679-6311(Domestic)
Plant : Petrochemical Complex, Mab Ta Phut Industrial Estate, Muang, Rayong 21150, Thailand
Tel: (66-38) 683-861 Fax: (66-38) 683-003 Homepage: www.hmc.co.th



HMC Polymers is a member of the Basell family of polypropylene, polyethylene and advanced polyolefins companies



ภาพประกอบ 51 ใบรับรอง (Certificate) ของโพรพิลีน ชนิดโมเพเลน เอชพี500เอ็น (MOPLEN HP500N)

4. สมบัติของเทอร์โมพลาสติก

4.1 สมบัติของโพลิสไตรีน

Polymer: Diarex H350: Mitsubishi Chemical

PVT Model: 2-domain modified Tait

coefficients: $b_5 = 376.3700 \text{ K}$

$b_6 = 3.5650\text{E-}07 \text{ K/Pa}$

Liquid phase

Solid phase

$b_1 = 0.0010$

$b_1 = 0.0010 \text{ m}^3/\text{kg}$

$b_2 = 5.9960\text{E-}07$

$b_2 = 2.3710\text{E-}07 \text{ m}^3/\text{kg-K}$

$b_3 = 1.7978\text{E+}08$

$b_3 = 2.6402\text{E+}08 \text{ Pa}$

$b_4 = 0.0048$

$b_4 = 0.0039 \text{ 1/K}$

$b_7 = 0.0000 \text{ m}^3/\text{kg}$

$b_8 = 0.0000 \text{ 1/K}$

$b_9 = 0.0000 \text{ 1/Pa}$

Specific heat: Tabulated data:

Temperature

Specific Heat

T (K)

Cp (J/kg-K)

333.1500

1294.0000

353.1500

1432.3000

363.1500

1539.4000

373.1500

1737.3000

383.1500

1776.5000

393.1500

1868.2000

503.1500

2199.1001

533.1500

2328.0000

Thermal conductivity: Tabulated data:

Temperature

Thermal Conductivity

T (K)

K (W/m-K)

361.1500	0.1520
403.1500	0.1720
434.1500	0.1920
485.1500	0.1950
516.1500	0.2010
537.1500	0.2110

Viscosity model: Cross-WLF

coefficients: $n = 0.3083$

TAUS= 3.1250×10^4 Pa

D1 = 1.1700×10^{11} Pa-s

D2 = 373.1500 K

D3 = 0.0000 K/Pa

A1 = 25.3300

A2T = 51.6000 K

Transition temperature = 96.0000 C

Transversely isotropic elastic tensor

coefficients: E1 = 3200.0000 MPa

E2 = 3200.0000 MPa

$\nu_{12} = 0.3530$

$\nu_{23} = 0.3530$

G = 1180.0000 MPa

Transversely isothermal expansion

coefficients: $a_1 = 7.6500 \times 10^{-5}$ 1/C

$a_2 = 7.6500 \times 10^{-5}$ 1/C

Residual stress model without CRIMS

4.2 สมบัติของโพลีโพรพิลีน

Polymer: Moplen HP500N: Basell Polyolefins

PVT Model: 2-domain modified Tait

coefficients: $b_5 = 452.1500 \text{ K}$

$b_6 = 4.6510\text{E-}08 \text{ K/Pa}$

Liquid phase

Solid phase

$b_1 = 0.0013$

$b_1 = 0.0012 \text{ m}^3/\text{kg}$

$b_2 = 9.4810\text{E-}07$

$b_2 = 6.2400\text{E-}07 \text{ m}^3/\text{kg-K}$

$b_3 = 7.1120\text{E+}07$

$b_3 = 1.0240\text{E+}08 \text{ Pa}$

$b_4 = 0.0043$

$b_4 = 0.0084 \text{ 1/K}$

$b_7 = 0.0001 \text{ m}^3/\text{kg}$

$b_8 = 0.1182 \text{ 1/K}$

$b_9 = 7.3280\text{E-}09 \text{ 1/Pa}$

Specific heat (C_p) = 3010.0000 J/kg-C

Thermal conductivity = 0.1600 W/m-C

Viscosity model: Cross-WLF

coefficients: $n = 0.3289$

$TAUS = 1.3840\text{E+}04 \text{ Pa}$

$D_1 = 2.3900\text{E+}14 \text{ Pa-s}$

$D_2 = 263.1500 \text{ K}$

$D_3 = 0.0000 \text{ K/Pa}$

$A_1 = 31.2800$

$A_2T = 51.6000 \text{ K}$

Transition temperature = 130.0000 C

Transversely isotropic elastic tensor

coefficients: $E_1 = 1550.0000 \text{ MPa}$

$E_2 = 1550.0000 \text{ MPa}$

$$\begin{aligned}v_{12} &= 0.3900 \\v_{23} &= 0.3900 \\G &= 560.0000 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Transversely isothermal expansion

coefficients: $a_1 = 0.0001 \text{ 1/C}$

$a_2 = 0.0001 \text{ 1/C}$

Residual stress model without CRIMS

5. สมบัติของแม่พิมพ์

แม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลองทำจากวัสดุตามมาตรฐาน S45C ซึ่งมีสมบัติดังต่อไปนี้ [Philip D. Harvey, 1982]

สมบัติทางกายภาพ

ความหนาแน่น (Density)	7.85	g/cm ³
-----------------------	------	-------------------

สมบัติทางกล

ความแข็ง (Hardness)	179	HB
ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Tensile Strength)	625	MPa
ความต้านทานต่อการยืดตัว (Yield Strength)	530	MPa
การยืดตัวก่อนขาด (Elongation at Break)	12	% (50 mm)
โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)	205	GPa
โมดูลัสเชิงมวล (Bulk Modulus)	140	GPa
โมดูลัสเฉือน (Shear Modulus)	80	GPa
อัตราส่วนปัวซอง (Poissons Ratio)	0.29	

สมบัติทางความร้อน

ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity)	486	kJ/g-K
การนำความร้อน (Thermal Conductivity)	49.8	W/m-K
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Thermal Expansion Coefficient: $\times 10^{-6}$)	11.7	

ภาคผนวก ข

การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมโมลโฟพลาสติกอินไซต์ เวอร์ชัน 4.0

ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมโมลโฟลพลาสติกอินไซท์ เวอร์ชัน 4.0 คือการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะใช้วิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลขรวมอยู่ด้วย ซึ่งเป็นสมการที่ประยุกต์มาจากสมการของสเปนเซอร์และกิลมอร์ (Spencer and Gilmore) ในแบบสองโดเมน (Double-Domain) เรียกว่า เทตพีวีทีโมเดล (Tait PvT Model) [10] ดัง (19) (20) และ (21)

$$v(T, p) = v_0(T) \left\{ 1 - C \ln \left(1 + \frac{p}{B(T)} \right) \right\} + v_t(T, p) \quad (19)$$

และ

$$\left. \begin{aligned} v_0(T) &= b_{1m} + b_{2m}\bar{T} \\ B(T) &= b_{3m}e^{-b_{4m}\bar{T}} \\ v_t(T, p) &= 0 \end{aligned} \right\} \text{for } T > T_t, \quad (20)$$

$$\left. \begin{aligned} v_0(T) &= b_{1s} + b_{2s}\bar{T} \\ B(T) &= b_{3s}e^{-b_{4s}\bar{T}} \\ v_t(T, p) &= b_7e^{(b_8\bar{T} - b_9p)} \end{aligned} \right\} \text{for } T < T_t, \quad (21)$$

โดยที่

p = ความดัน (bar)

T = อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{K}$)

v = ปริมาตรจำเพาะ (cm^3/g)

v_0 = ปริมาตรจำเพาะในสภาวะสุดท้าย (cm^3/g)

v_t = ปริมาตรจำเพาะ ณ เวลาใดๆ (cm^3/g)

$T_t = b_5 + b_6p$ คือ อุณหภูมิกระบวนการฉีด ($^{\circ}\text{K}$)

$\bar{T} = T - b_5$ คือ ผลต่างของสภาวะในรูปอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{K}$)

b_1 to b_9 คือ สัมประสิทธิ์ของสภาวะในรูปอุณหภูมิ

$C = 0.0894$ (ค่าคงที่)

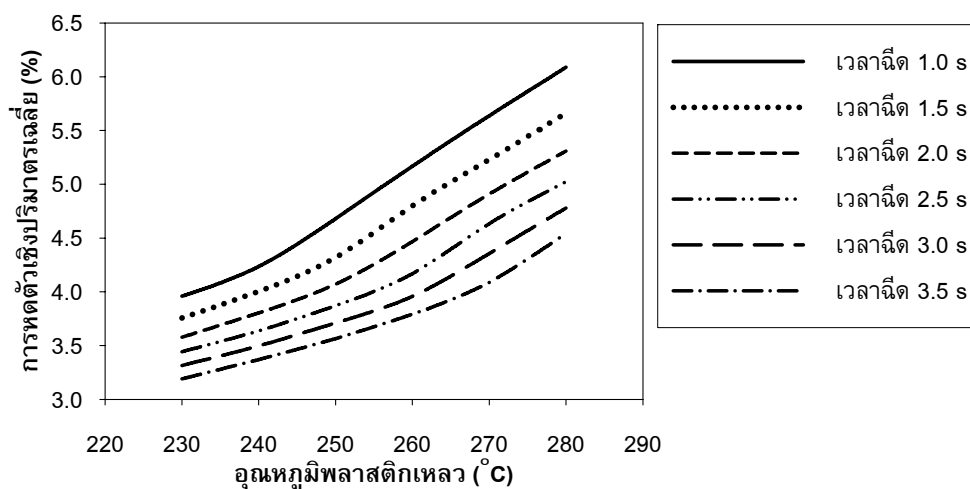
ใน (19) ถึง (21) เป็นสมการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตรจำเพาะ และอุณหภูมิ ดังภาพประกอบ 17 และ 18 ของโพลิเมอร์ทั้งสองชนิด ซึ่งใช้ในการคำนวณการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย

สมบัติของโมเดล :

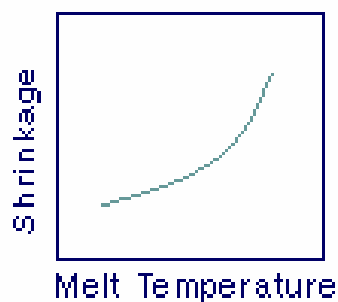
Mesh Type	=	Fusion
Match ratio	=	90 %

Total number of nodes	=	33337
Total number of injection location nodes	=	1
The injection location node labels are:		33318
Total number of elements	=	66642
Number of part elements	=	66620
Number of sprue/runner/gate elements	=	22
Number of channel elements	=	0
Number of connector elements	=	0
Average aspect ratio of triangle elements	=	1.5831
Maximum aspect ratio of triangle elements	=	4.9728
Minimum aspect ratio of triangle elements	=	1.1558
Total volume	=	7.7949 cm ³
Volume filled initially	=	0.0000 cm ³
Volume to be filled	=	7.7949 cm ³
Sprue/runner/gate volume to be filled	=	1.2678 cm ³
Total projected area	=	32.0432 cm ³

ในสภาวะการฉีดของโพลีโพรพิลีนสามารถวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย เมื่ออุณหภูมิพลาสติกเหลวเพิ่มขึ้นในช่วง 230°C ถึง 280°C ในสภาวะเวลาฉีด 1.0 s ถึง 3.5 s โดยแสดงผลของโปรแกรมโมลโฟลพลาสติกอินไซท์ เวอร์ชัน 4.0 และความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับอุณหภูมิพลาสติกเหลวทางทฤษฎี ดังภาพประกอบ 52 และ 53

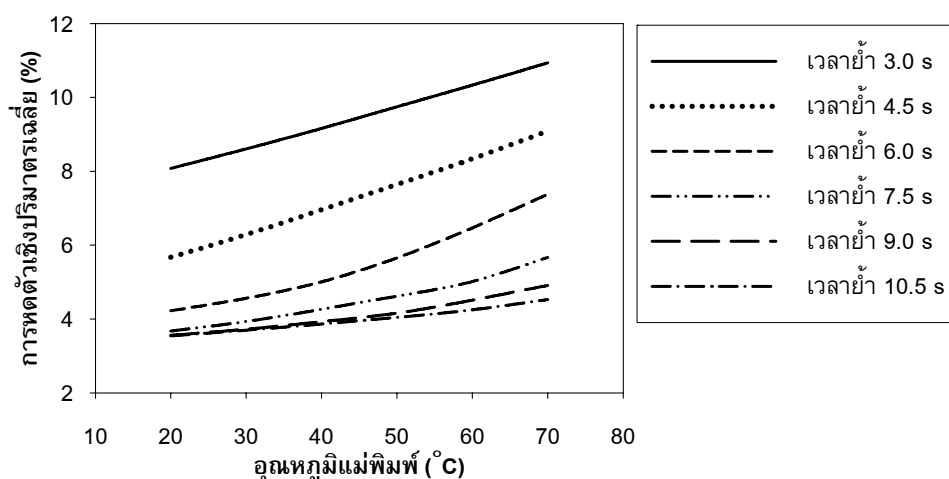


ภาพประกอบ 52 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยกับอุณหภูมิพลาสติกเหลวในสภาวะเวลาฉีด 1.0 s ถึง 3.5 s

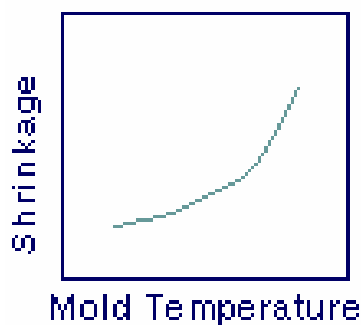


ภาพประกอบ 53 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับอุณหภูมิพลาสติกเหลวทางทฤษฎี [The Engineering Design Center, 1998]

ในขั้นสถานะการย่ำของโพลิโพรพิลีนสามารถวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย เมื่ออุณหภูมิแม่พิมพ์เพิ่มขึ้นในช่วง 20 ถึง 70 °C ในสถานะเวลาย่ำ 3.0 s ถึง 10.5 s โดยแสดงผลของโปรแกรมโมลโฟลพลาสติกอินไซท์ เวอร์ชัน 4.0 และความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ ดังภาพประกอบ 54 และ 55

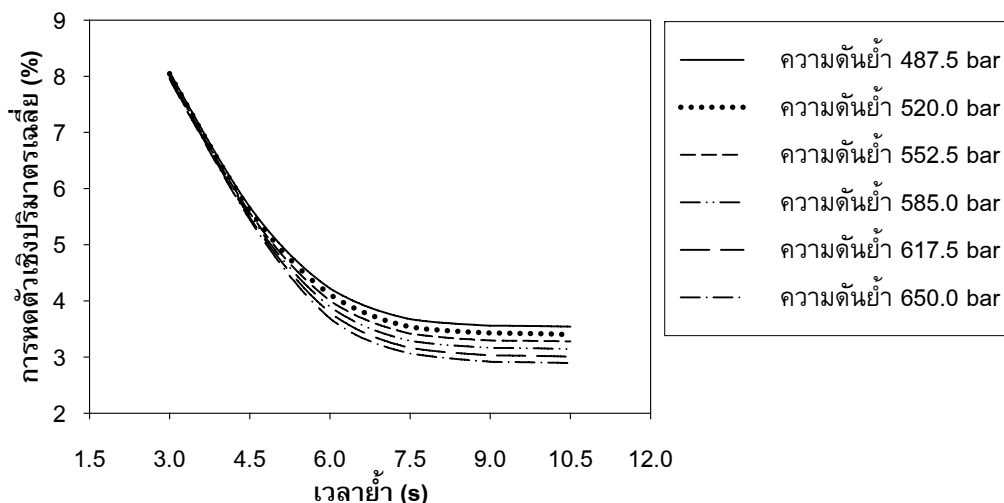


ภาพประกอบ 54 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ในสถานะเวลาย่ำ 3 s ถึง 15 s

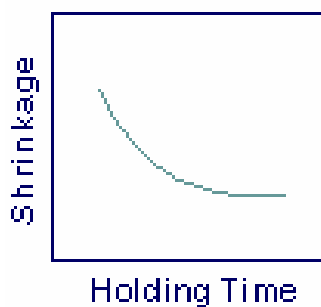


ภาพประกอบ 55 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ทางทฤษฎี [The Engineering Design Center, 1998]

ในขั้นสภาวะการย่ำของโพลิโพรพิลีนสามารถวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย เมื่อเวลา ย่ำเพิ่มขึ้นในช่วง 3.0 s ถึง 10.5 s ในสภาวะความดันย่ำ 487.5 bar ถึง 650 bar โดยแสดงผลของ โปรแกรมโมลโฟลพลาสติกอินไซต์ เวอร์ชัน 4.0 และความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับเวลา ย่ำ ดัง ภาพประกอบ 56 และ 57

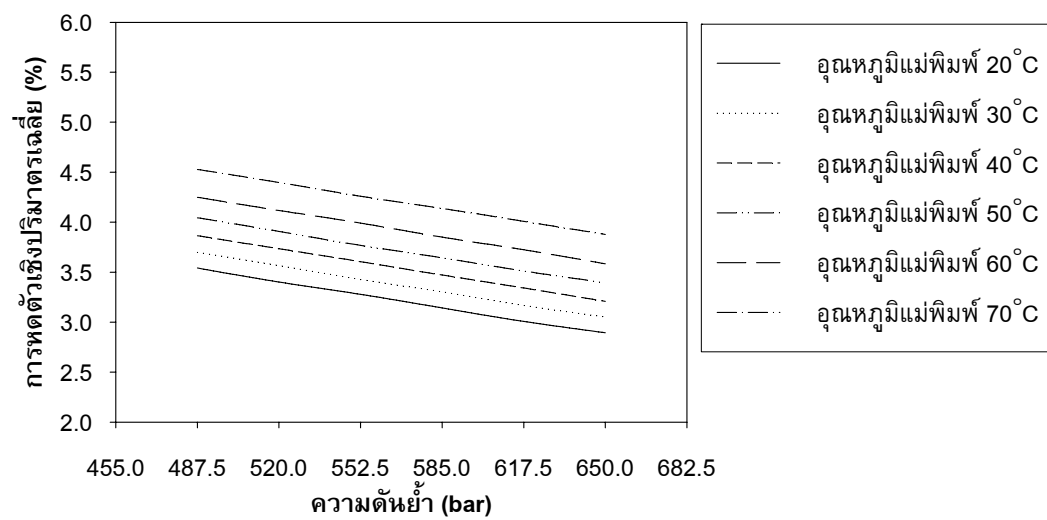


ภาพประกอบ 56 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยกับเวลา ย่ำในสภาวะความดันย่ำ 487.5 bar ถึง 650 bar

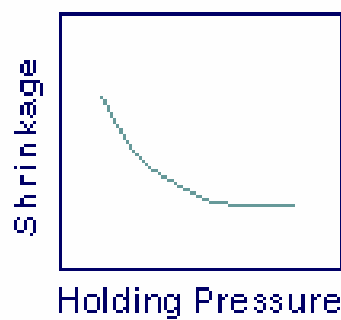


ภาพประกอบ 57 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับเวลา ย่ำทางทฤษฎี [The Engineering Design Center, 1998]

ในขั้นสภาวะการย่ำของโพลิโพรพิลีนสามารถวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย เมื่อ ความดันย่ำเพิ่มขึ้นในช่วง 487.5 bar ถึง 650 bar ในสภาวะอุณหภูมิแม่พิมพ์ 20°C ถึง 70°C โดย แสดงผลของ โปรแกรมโมลโฟลพลาสติกอินไซต์ เวอร์ชัน 4.0 และความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัว กับความดันย่ำได้ดังภาพประกอบ 58 และ 59



ภาพประกอบ 58 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยกับความดันย่ำในสถานะอุณหภูมิแม่พิมพ์ 10°C ถึง 50°C



ภาพประกอบ 59 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับความดันย่ำทางทฤษฎี [The Engineering Design Center, 1998]

ภาคผนวก ค

ตารางผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์พลาสติกฉีด
ด้วยการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ตาราง 39 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 230 °C เวลาฉีด 1 s และความดันฉีด 400 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	6.4152	6.4155	6.4153	6.4156	6.4155	6.4153	6.4154	6.4154	6.4153	6.4153	6.4154	6.16864	5.7259	2.4084	58
		90	6.4682	6.4680	6.4685	6.4683	6.4686	6.4684	6.4686	6.4687	6.4688	6.4689	6.4685	6.21972	4.9452	2.1358	57
		105	6.5317	6.5325	6.5311	6.5323	6.5319	6.5325	6.5323	6.5324	6.5325	6.5325	6.5322	6.29093	4.0098	1.8809	53
	6	75	6.4203	6.4201	6.4205	6.4212	6.4215	6.4209	6.4216	6.4219	6.4221	6.4224	6.4213	6.17429	5.6396	2.3790	58
		90	6.4783	6.4780	6.4785	6.4789	6.4781	6.4783	6.4784	6.4784	6.4785	6.4785	6.4784	6.22922	4.8000	2.0908	56
		105	6.5475	6.5472	6.5480	6.5473	6.5484	6.5479	6.5476	6.5484	6.5477	6.5488	6.5479	6.29603	3.7789	1.8265	52
	9	75	6.4203	6.4200	6.4208	6.4201	6.4212	6.4207	6.4204	6.4212	6.4205	6.4216	6.4207	6.17377	5.6474	2.3790	58
		90	6.4782	6.4779	6.4787	6.4780	6.4791	6.4786	6.4783	6.4791	6.4784	6.4795	6.4786	6.22942	4.7970	2.0911	56
		105	6.5476	6.5473	6.5481	6.5474	6.5485	6.5480	6.5477	6.5485	6.5478	6.5489	6.5479	6.29609	3.7780	1.8263	52
30	3	75	6.3904	6.3901	6.3909	6.3902	6.3913	6.3908	6.3905	6.3913	6.3906	6.3917	6.3907	6.14495	6.0879	2.5617	58
		90	6.4361	6.4358	6.4366	6.4359	6.4370	6.4365	6.4362	6.4370	6.4363	6.4374	6.4364	6.18888	5.4166	2.2933	58
		105	6.4904	6.4901	6.4909	6.4902	6.4913	6.4908	6.4905	6.4913	6.4906	6.4917	6.4908	6.24117	4.6174	2.0390	56
	6	75	6.4058	6.4055	6.4063	6.4056	6.4067	6.4062	6.4059	6.4067	6.4060	6.4071	6.4062	6.15983	5.8605	2.4640	58
		90	6.4583	6.4580	6.4588	6.4581	6.4592	6.4587	6.4584	6.4592	6.4585	6.4596	6.4587	6.21026	5.0897	2.1820	57
		105	6.5221	6.5218	6.5226	6.5219	6.5230	6.5225	6.5222	6.5230	6.5223	6.5234	6.5225	6.27165	4.1515	1.9152	54
	9	75	6.4058	6.4055	6.4063	6.4056	6.4067	6.4062	6.4059	6.4067	6.4060	6.4071	6.4062	6.15982	5.8607	2.4641	58
		90	6.4583	6.4580	6.4588	6.4581	6.4592	6.4587	6.4584	6.4592	6.4585	6.4596	6.4587	6.21028	5.0894	2.1819	57
		105	6.5224	6.5221	6.5229	6.5222	6.5233	6.5228	6.5225	6.5233	6.5226	6.5237	6.5227	6.27186	4.1483	1.9144	54
50	3	75	6.3611	6.3608	6.3616	6.3609	6.3620	6.3615	6.3612	6.3620	6.3613	6.3624	6.3615	6.11680	6.5182	2.7694	58
		90	6.3987	6.3984	6.3992	6.3985	6.3996	6.3991	6.3988	6.3996	6.3989	6.4000	6.3991	6.15300	5.9649	2.5079	58
		105	6.4424	6.4421	6.4429	6.4422	6.4433	6.4428	6.4425	6.4433	6.4426	6.4437	6.4428	6.19502	5.3227	2.2602	58
	6	75	6.3923	6.3920	6.3928	6.3921	6.3932	6.3927	6.3924	6.3932	6.3925	6.3936	6.3927	6.14683	6.0591	2.5489	58
		90	6.4417	6.4414	6.4422	6.4415	6.4426	6.4421	6.4418	6.4426	6.4419	6.4430	6.4421	6.19434	5.3331	2.2638	58
		105	6.5011	6.5008	6.5016	6.5009	6.5020	6.5015	6.5012	6.5020	6.5013	6.5024	6.5015	6.25145	4.4603	1.9955	55
	9	75	6.3922	6.3919	6.3927	6.3920	6.3931	6.3926	6.3923	6.3931	6.3924	6.3935	6.3926	6.14676	6.0603	2.5494	58
		90	6.4418	6.4415	6.4423	6.4416	6.4427	6.4422	6.4419	6.4427	6.4420	6.4431	6.4422	6.19438	5.3325	2.2636	58
		105	6.5017	6.5014	6.5022	6.5015	6.5026	6.5021	6.5018	6.5026	6.5019	6.5030	6.5021	6.25203	4.4514	1.9931	55
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	56

ตาราง 40 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 230 °C เวลาฉีด 1 s และความดันฉีด 550 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่อย (s)	ความดัน ย่อย (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	6.3230	6.3226	6.3234	6.3229	6.3225	6.3235	6.3233	6.3233	6.3234	6.3235	6.3231	6.07994	7.0814	1.9122	73
		90	6.4356	6.4351	6.4362	6.4359	6.4355	6.4365	6.4365	6.4367	6.4369	6.4371	6.4362	6.18865	5.4201	1.5733	71
		105	6.5997	6.5995	6.5984	6.5989	6.5997	6.5990	6.5992	6.5992	6.5993	6.5993	6.5992	6.34540	3.0245	1.2505	59
	6	75	6.3380	6.3377	6.3385	6.3378	6.3389	6.3384	6.3381	6.3389	6.3382	6.3393	6.3383	6.09455	6.8582	1.8589	73
		90	6.4614	6.4611	6.4619	6.4612	6.4623	6.4618	6.4615	6.4623	6.4616	6.4627	6.4618	6.21323	5.0444	1.5120	70
		105	6.6464	6.6461	6.6469	6.6462	6.6473	6.6468	6.6465	6.6473	6.6466	6.6477	6.6468	6.39112	2.3258	1.1815	49
	9	75	6.3380	6.3377	6.3385	6.3378	6.3389	6.3384	6.3381	6.3389	6.3382	6.3393	6.3384	6.09458	6.8577	1.8588	73
		90	6.4617	6.4614	6.4622	6.4615	6.4626	6.4621	6.4618	6.4626	6.4619	6.4630	6.4621	6.21352	5.0399	1.5113	70
		105	6.6477	6.6474	6.6482	6.6475	6.6486	6.6481	6.6478	6.6486	6.6479	6.6490	6.6481	6.39243	2.3057	1.1796	49
30	3	75	6.2830	6.2827	6.2835	6.2828	6.2839	6.2834	6.2831	6.2839	6.2832	6.2843	6.2834	6.04175	7.6650	2.0702	73
		90	6.3762	6.3759	6.3767	6.3760	6.3771	6.3766	6.3763	6.3771	6.3764	6.3775	6.3765	6.13130	6.2966	1.7356	72
		105	6.5038	6.5035	6.5043	6.5036	6.5047	6.5042	6.5039	6.5047	6.5040	6.5051	6.5042	6.25400	4.4213	1.4209	68
	6	75	6.3133	6.3130	6.3138	6.3131	6.3142	6.3137	6.3134	6.3142	6.3135	6.3146	6.3137	6.07087	7.2201	1.9481	73
		90	6.4258	6.4255	6.4263	6.4256	6.4267	6.4262	6.4259	6.4267	6.4260	6.4271	6.4262	6.17904	5.5669	1.5979	71
		105	6.5918	6.5915	6.5923	6.5916	6.5927	6.5922	6.5919	6.5927	6.5920	6.5931	6.5921	6.33860	3.1284	1.2630	60
	9	75	6.3135	6.3132	6.3140	6.3133	6.3144	6.3139	6.3136	6.3144	6.3137	6.3148	6.3139	6.07104	7.2174	1.9474	73
		90	6.4268	6.4265	6.4273	6.4266	6.4277	6.4272	6.4269	6.4277	6.4270	6.4281	6.4271	6.17994	5.5531	1.5955	71
		105	6.5941	6.5938	6.5946	6.5939	6.5950	6.5945	6.5942	6.5950	6.5943	6.5954	6.5945	6.34084	3.0942	1.2593	59
50	3	75	6.2366	6.2363	6.2371	6.2364	6.2375	6.2370	6.2367	6.2375	6.2368	6.2379	6.2370	5.99708	8.3477	2.2905	73
		90	6.3078	6.3075	6.3083	6.3076	6.3087	6.3082	6.3079	6.3087	6.3080	6.3091	6.3082	6.06560	7.3006	1.9691	73
		105	6.3958	6.3955	6.3963	6.3956	6.3967	6.3962	6.3959	6.3967	6.3960	6.3971	6.3962	6.15014	6.0085	1.6785	72
	6	75	6.2930	6.2927	6.2935	6.2928	6.2939	6.2934	6.2931	6.2939	6.2932	6.2943	6.2933	6.05128	7.5195	2.0286	73
		90	6.3974	6.3971	6.3979	6.3972	6.3983	6.3978	6.3975	6.3983	6.3976	6.3987	6.3978	6.15172	5.9845	1.6739	72
		105	6.5482	6.5479	6.5487	6.5480	6.5491	6.5486	6.5483	6.5491	6.5484	6.5495	6.5485	6.29668	3.7690	1.3366	65
	9	75	6.2935	6.2932	6.2940	6.2933	6.2944	6.2939	6.2936	6.2944	6.2937	6.2948	6.2939	6.05179	7.5116	2.0264	73
		90	6.3988	6.3985	6.3993	6.3986	6.3997	6.3992	6.3989	6.3997	6.3990	6.4001	6.3992	6.15306	5.9640	1.6700	72
		105	6.5513	6.5510	6.5518	6.5511	6.5522	6.5517	6.5514	6.5522	6.5515	6.5526	6.5517	6.29971	3.7228	1.3310	64
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	68

ตาราง 41 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 230 °C เวลาฉีด 1 s และความดันฉีด 700 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่อย (s)	ความดัน ย่อย (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	6.2877	6.2875	6.2880	6.2873	6.2884	6.2879	6.2882	6.2883	6.2884	6.2885	6.2880	6.04618	7.5974	1.4541	81
		90	6.5346	6.5362	6.5360	6.5358	6.5355	6.5351	6.5354	6.5349	6.5340	6.5346	6.5352	6.28386	3.9650	1.0700	73
		105	6.6680	6.6682	6.6681	6.6681	6.6680	6.6679	6.6685	6.6672	6.6675	6.6681	6.6680	6.41150	2.0142	0.8562	57
	6	75	6.3194	6.3191	6.3199	6.3192	6.3203	6.3198	6.3195	6.3203	6.3196	6.3207	6.3198	6.07674	7.1304	1.3900	81
		90	6.6052	6.6049	6.6057	6.6050	6.6061	6.6056	6.6053	6.6061	6.6054	6.6065	6.6056	6.35155	2.9305	0.9948	66
		105	6.6589	6.6586	6.6594	6.6587	6.6598	6.6593	6.6590	6.6598	6.6591	6.6602	6.6593	6.40315	2.1418	0.7359	66
	9	75	6.3199	6.3196	6.3204	6.3197	6.3208	6.3203	6.3200	6.3208	6.3201	6.3212	6.3203	6.07723	7.1228	1.3890	80
		90	6.6073	6.6070	6.6078	6.6071	6.6082	6.6077	6.6074	6.6082	6.6075	6.6086	6.6076	6.35349	2.9008	0.9928	66
		105	6.6596	6.6593	6.6601	6.6594	6.6605	6.6600	6.6597	6.6605	6.6598	6.6609	6.6600	6.40383	2.1315	0.7355	65
30	3	75	6.2181	6.2178	6.2186	6.2179	6.2190	6.2185	6.2182	6.2190	6.2183	6.2194	6.2185	5.97929	8.6196	1.6179	81
		90	6.3890	6.3887	6.3895	6.3888	6.3899	6.3894	6.3891	6.3899	6.3892	6.3903	6.3893	6.14359	6.1087	1.2675	79
		105	6.4770	6.4767	6.4775	6.4768	6.4779	6.4774	6.4771	6.4779	6.4772	6.4783	6.4773	6.22821	4.8154	1.1403	76
	6	75	6.2781	6.2778	6.2786	6.2779	6.2790	6.2785	6.2782	6.2790	6.2783	6.2794	6.2785	6.03700	7.7376	1.4747	81
		90	6.5290	6.5287	6.5295	6.5288	6.5299	6.5294	6.5291	6.5299	6.5292	6.5303	6.5294	6.27827	4.0504	1.0764	73
		105	6.6148	6.6145	6.6153	6.6146	6.6157	6.6152	6.6149	6.6157	6.6150	6.6161	6.6152	6.36075	2.7899	0.8232	70
	9	75	6.2794	6.2791	6.2799	6.2792	6.2903	6.2798	6.2795	6.2903	6.2796	6.2907	6.2798	6.03824	7.7187	1.4719	81
		90	6.5332	6.5329	6.5337	6.5330	6.5341	6.5336	6.5333	6.5341	6.5334	6.5345	6.5336	6.28227	3.9892	1.0716	73
		105	6.6219	6.6216	6.6224	6.6217	6.6228	6.6223	6.6220	6.6228	6.6221	6.6232	6.6223	6.36758	2.6855	0.8184	70
50	3	75	6.1382	6.1379	6.1387	6.1380	6.1391	6.1386	6.1383	6.1391	6.1384	6.1395	6.1386	5.90247	9.7938	1.8581	81
		90	6.2410	6.2407	6.2415	6.2408	6.2419	6.2414	6.2411	6.2419	6.2412	6.2423	6.2414	6.00131	8.2831	1.5601	81
		105	6.2873	6.2870	6.2878	6.2871	6.2882	6.2877	6.2874	6.2882	6.2875	6.2886	6.2877	6.04583	7.6027	1.4550	81
	6	75	6.2451	6.2448	6.2456	6.2449	6.2460	6.2455	6.2452	6.2460	6.2453	6.2464	6.2455	6.00529	8.2223	1.5501	81
		90	6.4727	6.4724	6.4732	6.4725	6.4736	6.4731	6.4728	6.4736	6.4729	6.4740	6.4731	6.22409	4.8784	1.1459	77
		105	6.7194	6.7191	6.7199	6.7192	6.7203	6.7198	6.7195	6.7203	6.7196	6.7207	6.7198	6.46137	1.2521	0.8933	29
	9	75	6.2474	6.2471	6.2479	6.2472	6.2483	6.2478	6.2475	6.2483	6.2476	6.2487	6.2478	6.00746	8.1892	1.5447	81
		90	6.4755	6.4752	6.4760	6.4753	6.4764	6.4759	6.4756	6.4764	6.4757	6.4768	6.4759	6.22681	4.8368	1.1422	76
		105	6.7220	6.7217	6.7225	6.7218	6.7229	6.7224	6.7221	6.7229	6.7222	6.7233	6.7223	6.46379	1.2152	0.8913	27
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	72

ตาราง 42 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 230 °C เวลาฉีด 2.5 s และความดันฉีด 400 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่อย (s)	ความดัน ย่อย (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	6.4476	6.4471	6.4472	6.4472	6.4473	6.4472	6.4479	6.4471	6.4481	6.4475	6.4474	6.19944	5.2551	2.2340	57
		90	6.5122	6.5134	6.5134	6.5133	6.5132	6.5132	6.5134	6.5126	6.5128	6.5131	6.5131	6.26255	4.2907	1.9525	54
		105	6.5905	6.5902	6.5901	6.5901	6.5900	6.5898	6.5895	6.5903	6.5899	6.5892	6.5900	6.33650	3.1604	1.6934	46
	6	75	6.4489	6.4486	6.4494	6.4487	6.4498	6.4493	6.4490	6.4498	6.4491	6.4502	6.4493	6.20122	5.2279	2.2277	57
		90	6.5148	6.5145	6.5153	6.5146	6.5157	6.5152	6.5149	6.5157	6.5150	6.5161	6.5152	6.26462	4.2590	1.9424	54
		105	6.5955	6.5952	6.5960	6.5953	6.5964	6.5959	6.5956	6.5964	6.5957	6.5968	6.5959	6.34218	3.0737	1.6793	45
	9	75	6.4489	6.4486	6.4494	6.4487	6.4498	6.4493	6.4490	6.4498	6.4491	6.4502	6.4493	6.20122	5.2279	2.2277	57
		90	6.5148	6.5145	6.5153	6.5146	6.5157	6.5152	6.5149	6.5157	6.5150	6.5161	6.5152	6.26462	4.2590	1.9424	54
		105	6.5954	6.5951	6.5959	6.5952	6.5963	6.5958	6.5955	6.5963	6.5956	6.5967	6.5958	6.34211	3.0747	1.6795	45
30	3	75	6.4276	6.4273	6.4281	6.4274	6.4285	6.4290	6.4277	6.4285	6.4278	6.4289	6.4290	6.18076	5.5407	2.3386	58
		90	6.4838	6.4835	6.4843	6.4836	6.4847	6.4842	6.4839	6.4847	6.4840	6.4851	6.4842	6.23483	4.7143	2.0668	56
		105	6.5533	6.5530	6.5538	6.5531	6.5542	6.5537	6.5534	6.5542	6.5535	6.5546	6.5536	6.30157	3.6943	1.8075	51
	6	75	6.4319	6.4316	6.4324	6.4317	6.4328	6.4323	6.4320	6.4328	6.4321	6.4332	6.4323	6.18488	5.4777	2.3154	58
		90	6.4916	6.4913	6.4921	6.4914	6.4925	6.4920	6.4917	6.4925	6.4918	6.4929	6.4920	6.24231	4.6000	2.0341	56
		105	6.5650	6.5647	6.5655	6.5648	6.5659	6.5654	6.5651	6.5659	6.5652	6.5663	6.5654	6.31287	3.5216	1.7699	50
	9	75	6.4319	6.4316	6.4324	6.4317	6.4328	6.4323	6.4320	6.4328	6.4321	6.4332	6.4323	6.18488	5.4777	2.3154	58
		90	6.4916	6.4913	6.4921	6.4914	6.4925	6.4920	6.4917	6.4925	6.4918	6.4929	6.4920	6.24228	4.6004	2.0342	56
		105	6.5653	6.5650	6.5658	6.5651	6.5662	6.5657	6.5654	6.5662	6.5655	6.5666	6.5657	6.31315	3.5174	1.7690	50
50	3	75	6.4023	6.4020	6.4028	6.4021	6.4032	6.4027	6.4024	6.4032	6.4025	6.4036	6.4026	6.15638	5.9133	2.4860	58
		90	6.4509	6.4506	6.4514	6.4507	6.4518	6.4513	6.4510	6.4518	6.4511	6.4522	6.4513	6.20313	5.1987	2.2179	57
		105	6.5097	6.5094	6.5102	6.5095	6.5106	6.5101	6.5098	6.5106	6.5099	6.5110	6.5100	6.25965	4.3349	1.9621	55
	6	75	6.4161	6.4158	6.4166	6.4159	6.4170	6.4165	6.4162	6.4170	6.4163	6.4174	6.4165	6.16974	5.7091	2.4030	58
		90	6.4718	6.4715	6.4723	6.4716	6.4727	6.4722	6.4719	6.4727	6.4720	6.4731	6.4722	6.22324	4.8915	2.1196	57
		105	6.5401	6.5398	6.5406	6.5399	6.5410	6.5405	6.5402	6.5410	6.5403	6.5414	6.5405	6.28893	3.8876	1.8515	52
	9	75	6.4162	6.4159	6.4167	6.4160	6.4171	6.4166	6.4163	6.4171	6.4164	6.4175	6.4166	6.16977	5.7086	2.4028	58
		90	6.4720	6.4717	6.4725	6.4718	6.4729	6.4724	6.4721	6.4729	6.4722	6.4733	6.4723	6.22341	4.8888	2.1188	57
		105	6.5408	6.5405	6.5413	6.5406	6.5417	6.5412	6.5409	6.5417	6.5410	6.5421	6.5412	6.28957	3.8777	1.8492	52
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	54

ตาราง 43 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 230 °C เวลาฉีด 2.5 s และความดันฉีด 550 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่อย (s)	ความดัน ย่อย (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	6.3796	6.3792	6.3803	6.3793	6.3807	6.3801	6.3797	6.3808	6.3798	6.3812	6.3801	6.1347	6.2447	1.7253	72
		90	6.5231	6.5227	6.5238	6.5228	6.5242	6.5236	6.5232	6.5243	6.5233	6.5247	6.5235	6.2726	4.1366	1.3830	67
		105	6.6467	6.6463	6.6474	6.6464	6.6478	6.6472	6.6468	6.6479	6.6469	6.6483	6.6472	6.3915	2.3198	1.0563	54
	6	75	6.3842	6.3838	6.3849	6.3839	6.3853	6.3847	6.3843	6.3854	6.3844	6.3858	6.3847	6.1392	6.1765	1.7116	72
		90	6.5330	6.5326	6.5337	6.5327	6.5341	6.5335	6.5331	6.5342	6.5332	6.5346	6.5335	6.2822	3.9902	1.3642	66
		105	6.6647	6.6643	6.6654	6.6644	6.6658	6.6652	6.6648	6.6659	6.6649	6.6663	6.6652	6.4088	2.0553	1.0366	50
	9	75	6.3842	6.3838	6.3849	6.3839	6.3853	6.3847	6.3843	6.3854	6.3844	6.3858	6.3847	6.1391	6.1775	1.7118	72
		90	6.5331	6.5327	6.5338	6.5328	6.5342	6.5336	6.5332	6.5343	6.5333	6.5347	6.5336	6.2823	3.9886	1.3640	66
		105	6.6657	6.6653	6.6664	6.6654	6.6668	6.6662	6.6658	6.6669	6.6659	6.6673	6.6662	6.4098	2.0406	1.0355	49
30	3	75	6.3437	6.3433	6.3444	6.3434	6.3448	6.3442	6.3438	6.3449	6.3439	6.3453	6.3441	6.1001	6.7730	1.8394	73
		90	6.4683	6.4679	6.4690	6.4680	6.4694	6.4688	6.4684	6.4695	6.4685	6.4699	6.4687	6.2199	4.9418	1.4964	70
		105	6.6546	6.6542	6.6553	6.6543	6.6557	6.6551	6.6547	6.6558	6.6548	6.6562	6.6550	6.3991	2.2044	1.1702	47
	6	75	6.3550	6.3546	6.3557	6.3547	6.3561	6.3555	6.3551	6.3562	6.3552	6.3566	6.3554	6.1110	6.6068	1.8019	73
		90	6.4888	6.4884	6.4895	6.4885	6.4899	6.4893	6.4889	6.4900	6.4890	6.4904	6.4892	6.2396	4.6408	1.4519	69
		105	6.6900	6.6896	6.6907	6.6897	6.6911	6.6905	6.6901	6.6912	6.6902	6.6916	6.6905	6.4331	1.6835	1.1236	33
	9	75	6.3552	6.3548	6.3559	6.3549	6.3563	6.3557	6.3553	6.3564	6.3554	6.3568	6.3557	6.1112	6.6036	1.8012	73
		90	6.4897	6.4893	6.4904	6.4894	6.4908	6.4902	6.4898	6.4909	6.4899	6.4913	6.4901	6.2405	4.6276	1.4500	69
		105	6.6930	6.6926	6.6937	6.6927	6.6941	6.6935	6.6931	6.6942	6.6932	6.6946	6.6935	6.4360	1.6392	1.1198	32
50	3	75	6.3017	6.3013	6.3024	6.3014	6.3028	6.3022	6.3018	6.3029	6.3019	6.3033	6.3021	6.0597	7.3902	1.9934	73
		90	6.4032	6.4028	6.4039	6.4029	6.4043	6.4037	6.4033	6.4044	6.4034	6.4048	6.4036	6.1573	5.8984	1.6579	72
		105	6.5422	6.5418	6.5429	6.5419	6.5433	6.5427	6.5423	6.5434	6.5424	6.5438	6.5427	6.2911	3.8550	1.3473	65
	6	75	6.3306	6.3302	6.3313	6.3303	6.3317	6.3311	6.3307	6.3318	6.3308	6.3322	6.3311	6.0876	6.9650	1.8847	73
		90	6.4528	6.4524	6.4535	6.4525	6.4539	6.4533	6.4529	6.4540	6.4530	6.4544	6.4533	6.2051	5.1688	1.5318	70
		105	6.6309	6.6305	6.6316	6.6306	6.6320	6.6314	6.6310	6.6321	6.6311	6.6325	6.6314	6.3763	2.5518	1.2035	53
	9	75	6.3312	6.3308	6.3319	6.3309	6.3323	6.3317	6.3313	6.3324	6.3314	6.3328	6.3316	6.0881	6.9568	1.8827	73
		90	6.4547	6.4543	6.4554	6.4544	6.4558	6.4552	6.4548	6.4559	6.4549	6.4563	6.4551	6.2069	5.1417	1.5275	70
		105	6.6344	6.6340	6.6351	6.6341	6.6355	6.6349	6.6345	6.6356	6.6346	6.6360	6.6348	6.3797	2.5009	1.1985	52
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	63

ตาราง 44 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 230 °C เวลาฉีด 2.5 s และความดันฉีด 700 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่อย (s)	ความดัน ย่อย (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	6.3920	6.3917	6.3925	6.3918	6.3929	6.3924	6.3921	6.3929	6.3922	6.3933	6.3924	6.1465	6.0637	1.2626	79
		90	6.5347	6.5344	6.5352	6.5345	6.5356	6.5351	6.5348	6.5356	6.5349	6.5360	6.5351	6.2837	3.9669	0.8813	78
		105	6.6516	6.6513	6.6521	6.6514	6.6525	6.6520	6.6517	6.6525	6.6518	6.6529	6.6520	6.3961	2.2491	0.6445	71
	6	75	6.4047	6.4044	6.4052	6.4045	6.4056	6.4051	6.4048	6.4056	6.4049	6.4060	6.4051	6.1587	5.8773	1.2427	79
		90	6.6608	6.6605	6.6613	6.6606	6.6617	6.6612	6.6609	6.6617	6.6610	6.6621	6.6612	6.4050	2.1139	0.8615	59
		105	6.7034	6.7031	6.7039	6.7032	6.7043	6.7038	6.7035	6.7043	6.7036	6.7047	6.7038	6.4459	1.4879	0.6198	58
	9	75	6.4051	6.4048	6.4056	6.4049	6.4060	6.4055	6.4052	6.4060	6.4053	6.4064	6.4055	6.1591	5.8716	1.2421	79
		90	6.6627	6.6624	6.6632	6.6625	6.6636	6.6631	6.6628	6.6636	6.6629	6.6640	6.6631	6.4068	2.0860	0.8601	59
		105	6.6760	6.6757	6.6765	6.6758	6.6769	6.6764	6.6761	6.6769	6.6762	6.6773	6.6764	6.4196	1.8905	0.6188	67
30	3	75	6.3270	6.3267	6.3275	6.3268	6.3279	6.3274	6.3271	6.3279	6.3272	6.3283	6.3273	6.0840	7.0198	1.3756	80
		90	6.6007	6.6004	6.6012	6.6005	6.6016	6.6011	6.6008	6.6016	6.6009	6.6020	6.6011	6.3472	2.9971	0.9993	67
		105	6.6651	6.6648	6.6656	6.6649	6.6660	6.6655	6.6652	6.6660	6.6653	6.6664	6.6655	6.4091	2.0507	0.7905	61
	6	75	6.3520	6.3517	6.3525	6.3518	6.3529	6.3524	6.3521	6.3529	6.3522	6.3533	6.3524	6.1081	6.6510	1.3297	80
		90	6.6535	6.6532	6.6540	6.6533	6.6544	6.6539	6.6536	6.6544	6.6537	6.6548	6.6539	6.3980	2.2209	0.9492	57
		105	6.7085	6.7082	6.7090	6.7083	6.7094	6.7089	6.7086	6.7094	6.7087	6.7098	6.7089	6.4508	1.4130	0.7100	50
	9	75	6.3535	6.3532	6.3540	6.3533	6.3544	6.3539	6.3536	6.3544	6.3537	6.3548	6.3538	6.1095	6.6302	1.3272	80
		90	6.6574	6.6571	6.6579	6.6572	6.6583	6.6578	6.6575	6.6583	6.6576	6.6587	6.6578	6.4017	2.1636	0.9457	56
		105	6.7114	6.7111	6.7119	6.7112	6.7123	6.7118	6.7115	6.7123	6.7116	6.7127	6.7118	6.4536	1.3703	0.7085	48
50	3	75	6.2491	6.2488	6.2496	6.2489	6.2500	6.2495	6.2492	6.2500	6.2493	6.2504	6.2495	6.0091	8.1639	1.5406	81
		90	6.4273	6.4270	6.4278	6.4271	6.4282	6.4277	6.4274	6.4282	6.4275	6.4286	6.4276	6.1804	5.5457	1.2088	78
		105	6.4990	6.4987	6.4995	6.4988	6.4999	6.4994	6.4991	6.4999	6.4992	6.5003	6.4993	6.2494	4.4922	1.1124	75
	6	75	6.3095	6.3092	6.3100	6.3093	6.3104	6.3099	6.3096	6.3104	6.3097	6.3108	6.3099	6.0672	7.2759	1.4094	81
		90	6.5747	6.5744	6.5752	6.5745	6.5756	6.5751	6.5748	6.5756	6.5749	6.5760	6.5750	6.3222	3.3798	1.0260	70
		105	6.6655	6.6652	6.6660	6.6653	6.6664	6.6659	6.6656	6.6664	6.6657	6.6668	6.6659	6.4095	2.0448	0.7902	61
	9	75	6.3119	6.3116	6.3124	6.3117	6.3128	6.3123	6.3120	6.3128	6.3121	6.3132	6.3123	6.0695	7.2411	1.4047	81
		90	6.5790	6.5787	6.5795	6.5788	6.5799	6.5794	6.5791	6.5799	6.5792	6.5803	6.5793	6.3263	3.3167	1.0215	69
		105	6.6713	6.6710	6.6718	6.6711	6.6722	6.6717	6.6714	6.6722	6.6715	6.6726	6.6717	6.4151	1.9596	0.7866	60
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	69

ตาราง 45 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 230 °C เวลาฉีด 4 s และความดันฉีด 400 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	6.4930	6.4926	6.4937	6.4927	6.4941	6.4935	6.4931	6.4942	6.4932	6.4946	6.4935	6.2438	4.5777	2.0282	56
		90	6.5594	6.5590	6.5601	6.5591	6.5605	6.5599	6.5595	6.5606	6.5596	6.5610	6.5599	6.3076	3.6021	1.7875	50
		105	6.6461	6.6457	6.6468	6.6458	6.6472	6.6466	6.6462	6.6473	6.6463	6.6477	6.6466	6.3910	2.3283	1.5477	34
	6	75	6.4927	6.4923	6.4934	6.4924	6.4938	6.4932	6.4928	6.4939	6.4929	6.4943	6.4932	6.2434	4.5831	2.0297	56
		90	6.5595	6.5591	6.5602	6.5592	6.5606	6.5600	6.5596	6.5607	6.5597	6.5611	6.5600	6.3077	3.6011	1.7873	50
		105	6.6468	6.6464	6.6475	6.6465	6.6479	6.6473	6.6469	6.6480	6.6470	6.6484	6.6473	6.3916	2.3185	1.5461	33
	9	75	6.4927	6.4923	6.4934	6.4924	6.4938	6.4932	6.4928	6.4939	6.4929	6.4943	6.4932	6.2434	4.5831	2.0297	56
		90	6.5595	6.5591	6.5602	6.5592	6.5606	6.5600	6.5596	6.5607	6.5597	6.5611	6.5599	6.3076	3.6016	1.7874	50
		105	6.6467	6.6463	6.6474	6.6464	6.6478	6.6472	6.6468	6.6479	6.6469	6.6483	6.6472	6.3916	2.3191	1.5462	33
30	3	75	6.4621	6.4617	6.4628	6.4618	6.4632	6.4626	6.4622	6.4633	6.4623	6.4637	6.4626	6.2141	5.0317	2.1638	57
		90	6.5254	6.5250	6.5261	6.5251	6.5265	6.5259	6.5255	6.5266	6.5256	6.5270	6.5259	6.2749	4.1018	1.9032	54
		105	6.6052	6.6048	6.6059	6.6049	6.6063	6.6057	6.6053	6.6064	6.6054	6.6068	6.6057	6.3516	2.9294	1.6523	44
	6	75	6.4642	6.4638	6.4649	6.4639	6.4653	6.4647	6.4643	6.4654	6.4644	6.4658	6.4647	6.2160	5.0018	2.1543	57
		90	6.5289	6.5285	6.5296	6.5286	6.5300	6.5294	6.5290	6.5301	6.5291	6.5305	6.5294	6.2783	4.0504	1.8906	53
		105	6.6113	6.6109	6.6120	6.6110	6.6124	6.6118	6.6114	6.6125	6.6115	6.6129	6.6118	6.3575	2.8402	1.6359	42
	9	75	6.4642	6.4638	6.4649	6.4639	6.4653	6.4647	6.4643	6.4654	6.4644	6.4658	6.4647	6.2160	5.0018	2.1543	57
		90	6.5290	6.5286	6.5297	6.5287	6.5301	6.5295	6.5291	6.5302	6.5292	6.5306	6.5295	6.2783	4.0496	1.8904	53
		105	6.6116	6.6112	6.6123	6.6113	6.6127	6.6121	6.6117	6.6128	6.6118	6.6132	6.6121	6.3577	2.8358	1.6351	42
50	3	75	6.4349	6.4345	6.4356	6.4346	6.4360	6.4354	6.4350	6.4361	6.4351	6.4365	6.4354	6.1879	5.4317	2.2992	58
		90	6.4918	6.4914	6.4925	6.4915	6.4929	6.4923	6.4919	6.4930	6.4920	6.4934	6.4923	6.2426	4.5955	2.0332	56
		105	6.5628	6.5624	6.5635	6.5625	6.5639	6.5633	6.5629	6.5640	6.5630	6.5644	6.5632	6.3108	3.5530	1.7769	50
	6	75	6.4418	6.4414	6.4425	6.4415	6.4429	6.4423	6.4419	6.4430	6.4420	6.4434	6.4422	6.1945	5.3312	2.2636	58
		90	6.5026	6.5022	6.5033	6.5023	6.5037	6.5031	6.5027	6.5038	6.5028	6.5042	6.5031	6.2530	4.4371	1.9896	55
		105	6.5794	6.5790	6.5801	6.5791	6.5805	6.5799	6.5795	6.5806	6.5796	6.5810	6.5798	6.3268	3.3091	1.7260	48
	9	75	6.4418	6.4414	6.4425	6.4415	6.4429	6.4423	6.4419	6.4430	6.4420	6.4434	6.4423	6.1945	5.3306	2.2634	58
		90	6.5029	6.5025	6.5036	6.5026	6.5040	6.5034	6.5030	6.5041	6.5031	6.5045	6.5033	6.2532	4.4334	1.9886	55
		105	6.5802	6.5798	6.5809	6.5799	6.5813	6.5807	6.5803	6.5814	6.5804	6.5818	6.5807	6.3276	3.2968	1.7235	48
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	50

ตาราง 46 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 230 °C เวลาฉีด 4 s และความดันฉีด 550 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	6.4339	6.4336	6.4344	6.4337	6.4348	6.4343	6.4340	6.4348	6.4341	6.4352	6.4343	6.1868	5.4480	1.5775	71
		90	6.5969	6.5966	6.5974	6.5967	6.5978	6.5973	6.5970	6.5978	6.5971	6.5982	6.5973	6.3436	3.0523	1.2548	59
		105	6.5969	6.5966	6.5974	6.5967	6.5978	6.5973	6.5970	6.5978	6.5971	6.5982	6.5973	6.3436	3.0523	1.2548	59
	6	75	6.4350	6.4347	6.4355	6.4348	6.4359	6.4354	6.4351	6.4359	6.4352	6.4363	6.4354	6.1879	5.4320	1.5748	71
		90	6.6011	6.6008	6.6016	6.6009	6.6020	6.6015	6.6012	6.6020	6.6013	6.6024	6.6015	6.3476	2.9914	1.2483	58
		105	6.6711	6.6708	6.6716	6.6709	6.6720	6.6715	6.6712	6.6720	6.6713	6.6724	6.6715	6.4149	1.9625	0.9336	52
	9	75	6.4350	6.4347	6.4355	6.4348	6.4359	6.4354	6.4351	6.4359	6.4352	6.4363	6.4353	6.1878	5.4326	1.5749	71
		90	6.6015	6.6012	6.6020	6.6013	6.6024	6.6019	6.6016	6.6024	6.6017	6.6028	6.6019	6.3479	2.9857	1.2477	58
		105	6.6733	6.6730	6.6738	6.6731	6.6742	6.6737	6.6734	6.6742	6.6735	6.6746	6.6737	6.4170	1.9302	0.9317	52
30	3	75	6.3942	6.3939	6.3947	6.3940	6.3951	6.3946	6.3943	6.3951	6.3944	6.3955	6.3946	6.1486	6.0319	1.6830	72
		90	6.5422	6.5419	6.5427	6.5420	6.5431	6.5426	6.5423	6.5431	6.5424	6.5435	6.5426	6.2910	3.8564	1.3473	65
		105	6.6761	6.6758	6.6766	6.6759	6.6770	6.6765	6.6762	6.6770	6.6763	6.6774	6.6765	6.4197	1.8891	1.0245	46
	6	75	6.3997	6.3994	6.4002	6.3995	6.4006	6.4001	6.3998	6.4006	6.3999	6.4010	6.4001	6.1540	5.9502	1.6674	72
		90	6.5532	6.5529	6.5537	6.5530	6.5541	6.5536	6.5533	6.5541	6.5534	6.5545	6.5536	6.3016	3.6945	1.3276	64
		105	6.6933	6.6930	6.6938	6.6931	6.6942	6.6937	6.6934	6.6942	6.6935	6.6946	6.6937	6.4362	1.6363	1.0067	38
	9	75	6.4000	6.3997	6.4005	6.3998	6.4009	6.4004	6.4001	6.4009	6.4002	6.4013	6.4004	6.1542	5.9465	1.6667	72
		90	6.5544	6.5541	6.5549	6.5542	6.5553	6.5548	6.5545	6.5553	6.5546	6.5557	6.5548	6.3027	3.6770	1.3255	64
		105	6.6974	6.6971	6.6979	6.6972	6.6983	6.6978	6.6975	6.6983	6.6976	6.6987	6.6978	6.4402	1.5761	1.0026	36
50	3	75	6.3530	6.3527	6.3535	6.3528	6.3539	6.3534	6.3531	6.3539	6.3532	6.3543	6.3534	6.1090	6.6374	1.8084	73
		90	6.4808	6.4805	6.4813	6.4806	6.4817	6.4812	6.4809	6.4817	6.4810	6.4821	6.4812	6.2319	4.7593	1.4689	69
		105	6.6740	6.6737	6.6745	6.6738	6.6749	6.6744	6.6741	6.6749	6.6742	6.6753	6.6744	6.4176	1.9203	1.1442	40
	6	75	6.3687	6.3684	6.3692	6.3685	6.3696	6.3691	6.3688	6.3696	6.3689	6.3700	6.3691	6.1241	6.4063	1.7584	73
		90	6.5083	6.5080	6.5088	6.5081	6.5092	6.5087	6.5084	6.5092	6.5085	6.5096	6.5086	6.2583	4.3554	1.4119	68
		105	6.7206	6.7203	6.7211	6.7204	6.7215	6.7210	6.7207	6.7215	6.7208	6.7219	6.7210	6.4625	1.2345	1.0862	12
	9	75	6.3694	6.3691	6.3699	6.3692	6.3703	6.3698	6.3695	6.3703	6.3696	6.3707	6.3698	6.1248	6.3959	1.7562	73
		90	6.5104	6.5101	6.5109	6.5102	6.5113	6.5108	6.5105	6.5113	6.5106	6.5117	6.5108	6.2603	4.3243	1.4077	67
		105	6.7236	6.7233	6.7241	6.7234	6.7245	6.7240	6.7237	6.7245	6.7238	6.7249	6.7240	6.4654	1.1908	1.0827	9
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	58

ตาราง 47 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 230 °C เวลาฉีด 4 s และความดันฉีด 700 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	6.4770	6.4766	6.4777	6.4767	6.4781	6.4775	6.4771	6.4782	6.4772	6.4786	6.4775	6.2284	4.8130	1.1402	76
		90	6.5355	6.5351	6.5362	6.5352	6.5366	6.5360	6.5356	6.5367	6.5357	6.5371	6.5360	6.2846	3.9539	0.7488	81
		105	6.5478	6.5474	6.5485	6.5475	6.5489	6.5483	6.5479	6.5490	6.5480	6.5494	6.5483	6.2964	3.7731	0.5134	86
	6	75	6.4833	6.4829	6.4840	6.4830	6.4844	6.4838	6.4834	6.4845	6.4835	6.4849	6.4838	6.2344	4.7207	1.1321	76
		90	6.5492	6.5488	6.5499	6.5489	6.5503	6.5497	6.5493	6.5504	6.5494	6.5508	6.5497	6.2978	3.7525	0.7412	80
		105	6.5732	6.5728	6.5739	6.5729	6.5743	6.5737	6.5733	6.5744	6.5734	6.5748	6.5737	6.3208	3.3999	0.5068	85
	9	75	6.4842	6.4838	6.4849	6.4839	6.4853	6.4847	6.4843	6.4854	6.4844	6.4858	6.4846	6.2352	4.7081	1.1310	76
		90	6.5543	6.5539	6.5550	6.5540	6.5554	6.5548	6.5544	6.5555	6.5545	6.5559	6.5548	6.3027	3.6776	0.7384	80
		105	6.5841	6.5837	6.5848	6.5838	6.5852	6.5846	6.5842	6.5853	6.5843	6.5857	6.5846	6.3313	3.2397	0.5040	84
30	3	75	6.4141	6.4137	6.4148	6.4138	6.4152	6.4146	6.4142	6.4153	6.4143	6.4157	6.4145	6.1678	5.7383	1.2284	79
		90	6.5806	6.5802	6.5813	6.5803	6.5817	6.5811	6.5807	6.5818	6.5808	6.5822	6.5811	6.3290	3.2911	0.8470	74
		105	6.6006	6.6002	6.6013	6.6003	6.6017	6.6011	6.6007	6.6018	6.6008	6.6022	6.6011	6.3472	2.9972	0.6287	79
	6	75	6.4271	6.4267	6.4278	6.4268	6.4282	6.4276	6.4272	6.4283	6.4273	6.4287	6.4276	6.1804	5.5464	1.2090	78
		90	6.6061	6.6057	6.6068	6.6058	6.6072	6.6066	6.6062	6.6073	6.6063	6.6077	6.6066	6.3525	2.9164	0.8291	72
		105	6.6644	6.6640	6.6651	6.6641	6.6655	6.6649	6.6645	6.6656	6.6646	6.6660	6.6649	6.4085	2.0597	0.6008	71
	9	75	6.4293	6.4289	6.4300	6.4290	6.4304	6.4298	6.4294	6.4305	6.4295	6.4309	6.4297	6.1824	5.5151	1.2059	78
		90	6.6111	6.6107	6.6118	6.6108	6.6122	6.6116	6.6112	6.6123	6.6113	6.6127	6.6116	6.3573	2.8429	0.8257	71
		105	6.6700	6.6696	6.6707	6.6697	6.6711	6.6705	6.6701	6.6712	6.6702	6.6716	6.6705	6.4139	1.9774	0.5988	70
50	3	75	6.3412	6.3408	6.3419	6.3409	6.3423	6.3417	6.3413	6.3424	6.3414	6.3428	6.3416	6.0977	6.8094	1.3492	80
		90	6.6120	6.6116	6.6127	6.6117	6.6131	6.6125	6.6121	6.6132	6.6122	6.6136	6.6125	6.3582	2.8291	0.9881	65
		105	6.6623	6.6619	6.6630	6.6620	6.6634	6.6628	6.6624	6.6635	6.6625	6.6639	6.6628	6.4065	2.0905	0.8604	59
	6	75	6.3746	6.3742	6.3753	6.3743	6.3757	6.3751	6.3747	6.3758	6.3748	6.3762	6.3751	6.1299	6.3184	1.2910	80
		90	6.6384	6.6380	6.6391	6.6381	6.6395	6.6389	6.6385	6.6396	6.6386	6.6400	6.6389	6.3835	2.4418	0.9188	62
		105	6.7053	6.7049	6.7060	6.7050	6.7064	6.7058	6.7054	6.7065	6.7055	6.7069	6.7058	6.4479	1.4587	0.6967	52
	9	75	6.3771	6.3767	6.3778	6.3768	6.3782	6.3776	6.3772	6.3783	6.3773	6.3787	6.3776	6.1323	6.2812	1.2868	80
		90	6.6521	6.6517	6.6528	6.6518	6.6532	6.6526	6.6522	6.6533	6.6523	6.6537	6.6526	6.3967	2.2404	0.9157	59
		105	6.7436	6.7432	6.7443	6.7433	6.7447	6.7441	6.7437	6.7448	6.7438	6.7452	6.7441	6.4847	0.8958	0.6927	23
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	72

ตาราง 48 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 260 °C เวลาฉีด 1 s และความดันฉีด 400 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คูที่ 1	คูที่ 2	คูที่ 3	คูที่ 4	คูที่ 5	คูที่ 6	คูที่ 7	คูที่ 8	คูที่ 9	คูที่ 10					
10	3	75	6.4105	6.4102	6.4110	6.4103	6.4114	6.4109	6.4106	6.4114	6.4107	6.4118	6.4109	6.1643	5.7919	2.4360	58
		90	6.4562	6.4559	6.4567	6.4560	6.4571	6.4566	6.4563	6.4571	6.4564	6.4575	6.4566	6.2082	5.1207	2.1921	57
		105	6.5097	6.5094	6.5102	6.5095	6.5106	6.5101	6.5098	6.5106	6.5099	6.5110	6.5101	6.2597	4.3342	1.9619	55
	6	75	6.4446	6.4443	6.4451	6.4444	6.4455	6.4450	6.4447	6.4455	6.4448	6.4459	6.4450	6.1971	5.2906	2.2491	57
		90	6.5051	6.5048	6.5056	6.5049	6.5060	6.5055	6.5052	6.5060	6.5053	6.5064	6.5055	6.2553	4.4019	1.9798	55
		105	6.5797	6.5794	6.5802	6.5795	6.5806	6.5801	6.5798	6.5806	6.5799	6.5810	6.5801	6.3270	3.3060	1.7251	48
	9	75	6.4446	6.4443	6.4451	6.4444	6.4455	6.4450	6.4447	6.4455	6.4448	6.4459	6.4450	6.1971	5.2903	2.2490	57
		90	6.5052	6.5049	6.5057	6.5050	6.5061	6.5056	6.5053	6.5061	6.5054	6.5065	6.5056	6.2553	4.4008	1.9795	55
		105	6.5798	6.5795	6.5803	6.5796	6.5807	6.5802	6.5799	6.5807	6.5800	6.5811	6.5802	6.3271	3.3035	1.7246	48
30	3	75	6.3717	6.3714	6.3722	6.3715	6.3726	6.3721	6.3718	6.3726	6.3719	6.3730	6.3720	6.1270	6.3628	2.6906	58
		90	6.4073	6.4070	6.4078	6.4071	6.4082	6.4077	6.4074	6.4082	6.4075	6.4086	6.4077	6.1613	5.8386	2.4550	58
		105	6.4476	6.4473	6.4481	6.4474	6.4485	6.4480	6.4477	6.4485	6.4478	6.4489	6.4480	6.2000	5.2465	2.2340	57
	6	75	6.4261	6.4258	6.4266	6.4259	6.4270	6.4265	6.4262	6.4270	6.4263	6.4274	6.4265	6.1793	5.5624	2.3467	58
		90	6.4816	6.4813	6.4821	6.4814	6.4825	6.4820	6.4817	6.4825	6.4818	6.4829	6.4819	6.2326	4.7479	2.0766	56
		105	6.5495	6.5492	6.5500	6.5493	6.5504	6.5499	6.5496	6.5504	6.5497	6.5508	6.5499	6.2979	3.7497	1.8199	51
	9	75	6.4259	6.4256	6.4264	6.4257	6.4268	6.4263	6.4260	6.4268	6.4261	6.4272	6.4262	6.1791	5.5664	2.3482	58
		90	6.4814	6.4811	6.4819	6.4812	6.4823	6.4818	6.4815	6.4823	6.4816	6.4827	6.4818	6.2325	4.7499	2.0772	56
		105	6.5501	6.5498	6.5506	6.5499	6.5510	6.5505	6.5502	6.5510	6.5503	6.5514	6.5504	6.2985	3.7413	1.8180	51
50	3	75	6.3326	6.3323	6.3331	6.3324	6.3335	6.3330	6.3327	6.3335	6.3328	6.3339	6.3330	6.0894	6.9371	3.0068	57
		90	6.3598	6.3595	6.3603	6.3596	6.3607	6.3602	6.3599	6.3607	6.3600	6.3611	6.3602	6.1155	6.5373	2.7794	57
		105	6.3892	6.3889	6.3897	6.3890	6.3901	6.3896	6.3893	6.3901	6.3894	6.3905	6.3895	6.1438	6.1056	2.5696	58
	6	75	6.4076	6.4073	6.4081	6.4074	6.4085	6.4080	6.4077	6.4085	6.4078	6.4089	6.4080	6.1615	5.8342	2.4532	58
		90	6.4589	6.4586	6.4594	6.4587	6.4598	6.4593	6.4590	6.4598	6.4591	6.4602	6.4593	6.2109	5.0804	2.1790	57
		105	6.5212	6.5209	6.5217	6.5210	6.5221	6.5216	6.5213	6.5221	6.5214	6.5225	6.5216	6.2708	4.1651	1.9186	54
	9	75	6.4093	6.4090	6.4098	6.4091	6.4102	6.4097	6.4094	6.4102	6.4095	6.4106	6.4097	6.1632	5.8092	2.4430	58
		90	6.4616	6.4613	6.4621	6.4614	6.4625	6.4620	6.4617	6.4625	6.4618	6.4629	6.4620	6.2135	5.0406	2.1662	57
		105	6.5254	6.5251	6.5259	6.5252	6.5263	6.5258	6.5255	6.5263	6.5256	6.5267	6.5258	6.2748	4.1036	1.9033	54
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	56

ตาราง 49 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 260 °C เวลาฉีด 1 s และความดันฉีด 550 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่อย (s)	ความดัน ย่อย (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	6.3025	6.3021	6.3032	6.3022	6.3036	6.3030	6.3026	6.3037	6.3027	6.3041	6.3030	6.0606	7.3776	1.9900	73
		90	6.3914	6.3910	6.3921	6.3911	6.3925	6.3919	6.3915	6.3926	6.3916	6.3930	6.3919	6.1460	6.0714	1.6909	72
		105	6.5037	6.5033	6.5044	6.5034	6.5048	6.5042	6.5038	6.5049	6.5039	6.5053	6.5042	6.2540	4.4207	1.4210	68
	6	75	6.3695	6.3691	6.3702	6.3692	6.3706	6.3700	6.3696	6.3707	6.3697	6.3711	6.3700	6.1250	6.3926	1.7558	73
		90	6.5040	6.5036	6.5047	6.5037	6.5051	6.5045	6.5041	6.5052	6.5042	6.5056	6.5044	6.2543	4.4171	1.4205	68
		105	6.7112	6.7108	6.7119	6.7109	6.7123	6.7117	6.7113	6.7124	6.7114	6.7128	6.7117	6.4536	1.3713	1.0974	20
	9	75	6.3697	6.3693	6.3704	6.3694	6.3708	6.3702	6.3698	6.3709	6.3699	6.3713	6.3702	6.1252	6.3903	1.7553	73
		90	6.5054	6.5050	6.5061	6.5051	6.5065	6.5059	6.5055	6.5066	6.5056	6.5070	6.5058	6.2556	4.3967	1.4177	68
		105	6.7152	6.7148	6.7159	6.7149	6.7163	6.7157	6.7153	6.7164	6.7154	6.7168	6.7156	6.4573	1.3137	1.0927	17
30	3	75	6.2423	6.2419	6.2430	6.2420	6.2434	6.2428	6.2424	6.2435	6.2425	6.2439	6.2428	6.0027	8.2624	2.2609	73
		90	6.3060	6.3056	6.3067	6.3057	6.3071	6.3065	6.3061	6.3072	6.3062	6.3076	6.3065	6.0640	7.3257	1.9761	73
		105	6.3776	6.3772	6.3783	6.3773	6.3787	6.3781	6.3777	6.3788	6.3778	6.3792	6.3780	6.1327	6.2747	1.7314	72
	6	75	6.3401	6.3397	6.3408	6.3398	6.3412	6.3406	6.3402	6.3413	6.3403	6.3417	6.3406	6.0967	6.8252	1.8515	73
		90	6.4625	6.4621	6.4632	6.4622	6.4636	6.4630	6.4626	6.4637	6.4627	6.4641	6.4629	6.2144	5.0270	1.5095	70
		105	6.6469	6.6465	6.6476	6.6466	6.6480	6.6474	6.6470	6.6481	6.6471	6.6485	6.6474	6.3917	2.3171	1.1808	49
	9	75	6.3406	6.3402	6.3413	6.3403	6.3417	6.3411	6.3407	6.3418	6.3408	6.3422	6.3410	6.0972	6.8184	1.8499	73
		90	6.4632	6.4628	6.4639	6.4629	6.4643	6.4637	6.4633	6.4644	6.4634	6.4648	6.4636	6.2150	5.0167	1.5079	70
		105	6.6488	6.6484	6.6495	6.6485	6.6499	6.6493	6.6489	6.6500	6.6490	6.6504	6.6493	6.3936	2.2886	1.1781	49
50	3	75	6.1853	6.1849	6.1860	6.1850	6.1864	6.1858	6.1854	6.1865	6.1855	6.1869	6.1858	5.9479	9.0994	2.5951	71
		90	6.2284	6.2290	6.2291	6.2281	6.2295	6.2289	6.2285	6.2296	6.2286	6.2300	6.2289	5.9893	8.4668	2.3343	72
		105	6.2666	6.2662	6.2673	6.2663	6.2677	6.2671	6.2667	6.2678	6.2668	6.2682	6.2671	6.0260	7.9052	2.1431	73
	6	75	6.3128	6.3124	6.3135	6.3125	6.3139	6.3133	6.3129	6.3140	6.3130	6.3144	6.3133	6.0705	7.2261	1.9500	73
		90	6.4220	6.4216	6.4227	6.4217	6.4231	6.4225	6.4221	6.4232	6.4222	6.4236	6.4225	6.1755	5.6217	1.6077	71
		105	6.5851	6.5847	6.5858	6.5848	6.5862	6.5856	6.5852	6.5863	6.5853	6.5867	6.5855	6.3322	3.2257	1.2738	61
	9	75	6.3166	6.3162	6.3173	6.3163	6.3177	6.3171	6.3167	6.3178	6.3168	6.3182	6.3171	6.0741	7.1705	1.9357	73
		90	6.4292	6.4288	6.4299	6.4289	6.4303	6.4297	6.4293	6.4304	6.4294	6.4308	6.4297	6.1824	5.5158	1.5893	71
		105	6.5952	6.5948	6.5959	6.5949	6.5963	6.5957	6.5953	6.5964	6.5954	6.5968	6.5956	6.3420	3.0771	1.2576	59
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	65

ตาราง 50 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 260 °C เวลาฉีด 1 s และความดันฉีด 700 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่อย (s)	ความดัน ย่อย (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	6.2302	6.2299	6.2307	6.2300	6.2311	6.2306	6.2303	6.2311	6.2304	6.2315	6.2306	5.9909	8.4416	1.5868	81
		90	6.3602	6.3599	6.3607	6.3600	6.3611	6.3606	6.3603	6.3611	6.3604	6.3615	6.3606	6.1160	6.5309	1.3154	80
		105	6.4290	6.4287	6.4295	6.4288	6.4299	6.4294	6.4291	6.4299	6.4292	6.4303	6.4294	6.1821	5.5205	1.2063	78
	6	75	6.3678	6.3675	6.3683	6.3676	6.3687	6.3682	6.3679	6.3687	6.3680	6.3691	6.3682	6.1233	6.4193	1.3024	80
		90	6.4787	6.4784	6.4792	6.4785	6.4796	6.4791	6.4788	6.4796	6.4789	6.4800	6.4791	6.2299	4.7899	0.9270	81
		105	6.5120	6.5117	6.5125	6.5118	6.5129	6.5124	6.5121	6.5129	6.5122	6.5133	6.5124	6.2619	4.3005	0.7082	84
	9	75	6.3702	6.3699	6.3707	6.3700	6.3711	6.3706	6.3703	6.3711	6.3704	6.3715	6.3706	6.1255	6.3846	1.2984	80
		90	6.5845	6.5842	6.5850	6.5843	6.5854	6.5849	6.5846	6.5854	6.5847	6.5858	6.5849	6.3316	3.2351	0.9221	71
		105	6.6203	6.6200	6.6208	6.6201	6.6212	6.6207	6.6204	6.6212	6.6205	6.6216	6.6207	6.3660	2.7091	0.7041	74
30	3	75	6.1323	6.1320	6.1328	6.1321	6.1332	6.1327	6.1324	6.1332	6.1325	6.1336	6.1327	5.8968	9.8801	1.8786	81
		90	6.2049	6.2046	6.2054	6.2047	6.2058	6.2053	6.2050	6.2058	6.2051	6.2062	6.2053	5.9666	8.8135	1.6532	81
		105	6.2445	6.2442	6.2450	6.2443	6.2454	6.2449	6.2446	6.2454	6.2447	6.2458	6.2448	6.0046	8.2321	1.5517	81
	6	75	6.3199	6.3196	6.3204	6.3197	6.3208	6.3203	6.3200	6.3208	6.3201	6.3212	6.3203	6.0772	7.1236	1.3891	80
		90	6.5902	6.5899	6.5907	6.5900	6.5911	6.5906	6.5903	6.5911	6.5904	6.5915	6.5906	6.3371	3.1514	1.0099	68
		105	6.6614	6.6611	6.6619	6.6612	6.6623	6.6618	6.6615	6.6623	6.6616	6.6627	6.6618	6.4056	2.1051	0.7928	62
	9	75	6.3210	6.3207	6.3215	6.3208	6.3219	6.3214	6.3211	6.3219	6.3212	6.3223	6.3214	6.0782	7.1076	1.3870	80
		90	6.5936	6.5933	6.5941	6.5934	6.5945	6.5940	6.5937	6.5945	6.5938	6.5949	6.5940	6.3404	3.1008	1.0064	68
		105	6.6686	6.6683	6.6691	6.6684	6.6695	6.6690	6.6687	6.6695	6.6688	6.6699	6.6690	6.4125	1.9993	0.7883	61
50	3	75	6.0445	6.0442	6.0450	6.0443	6.0454	6.0449	6.0446	6.0454	6.0447	6.0458	6.0449	5.8124	11.1698	2.2495	80
		90	6.0801	6.0798	6.0806	6.0799	6.0810	6.0805	6.0802	6.0810	6.0803	6.0814	6.0805	5.8466	10.6470	2.0828	80
		105	6.0983	6.0980	6.0988	6.0981	6.0992	6.0987	6.0984	6.0992	6.0985	6.0996	6.0987	5.8641	10.3801	2.0069	81
	6	75	6.2729	6.2726	6.2734	6.2727	6.2738	6.2733	6.2730	6.2738	6.2731	6.2742	6.2733	6.0320	7.8134	1.4860	81
		90	6.5079	6.5076	6.5084	6.5077	6.5088	6.5083	6.5080	6.5088	6.5081	6.5092	6.5082	6.2579	4.3615	1.1015	75
		105	6.7273	6.7270	6.7278	6.7271	6.7282	6.7277	6.7274	6.7282	6.7275	6.7286	6.7276	6.4689	1.1371	0.8871	22
	9	75	6.2815	6.2812	6.2820	6.2813	6.2824	6.2819	6.2816	6.2824	6.2817	6.2828	6.2819	6.0403	7.6874	1.4673	81
		90	6.5223	6.5220	6.5228	6.5221	6.5232	6.5227	6.5224	6.5232	6.5225	6.5236	6.5226	6.2718	4.1498	1.0843	74
		105	6.6583	6.6580	6.6588	6.6581	6.6592	6.6587	6.6584	6.6592	6.6585	6.6596	6.6587	6.4026	2.1506	0.8633	60
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	74

ตาราง 51 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 260°C เวลาฉีด 2.5 s และความดันฉีด 400 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่อย (s)	ความดัน ย่อย (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	(g)	(cc)	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	6.4690	6.4686	6.4697	6.4687	6.4701	6.4695	6.4691	6.4702	6.4692	6.4706	6.4695	6.2207	4.9308	2.1321	57
		90	6.5331	6.5327	6.5338	6.5328	6.5342	6.5336	6.5332	6.5343	6.5333	6.5347	6.5335	6.2823	3.9895	1.8759	53
		105	6.6132	6.6128	6.6139	6.6129	6.6143	6.6137	6.6133	6.6144	6.6134	6.6148	6.6136	6.3593	2.8127	1.6309	42
	6	75	6.4801	6.4797	6.4808	6.4798	6.4812	6.4806	6.4802	6.4813	6.4803	6.4817	6.4805	6.2313	4.7687	2.0831	56
		90	6.5508	6.5504	6.5515	6.5505	6.5519	6.5513	6.5509	6.5520	6.5510	6.5524	6.5513	6.2993	3.7293	1.8156	51
		105	6.6406	6.6402	6.6413	6.6403	6.6417	6.6411	6.6407	6.6418	6.6408	6.6422	6.6411	6.3857	2.4092	1.5610	35
	9	75	6.4800	6.4796	6.4807	6.4797	6.4811	6.4805	6.4801	6.4812	6.4802	6.4816	6.4805	6.2312	4.7693	2.0833	56
		90	6.5508	6.5504	6.5515	6.5505	6.5519	6.5513	6.5509	6.5520	6.5510	6.5524	6.5513	6.2993	3.7293	1.8156	51
		105	6.6408	6.6404	6.6415	6.6405	6.6419	6.6413	6.6409	6.6420	6.6410	6.6424	6.6412	6.3858	2.4068	1.5606	35
30	3	75	6.4304	6.4300	6.4311	6.4301	6.4315	6.4309	6.4305	6.4316	6.4306	6.4320	6.4309	6.1836	5.4977	2.3232	58
		90	6.4819	6.4815	6.4826	6.4816	6.4830	6.4824	6.4820	6.4831	6.4821	6.4835	6.4824	6.2331	4.7411	2.0750	56
		105	6.5436	6.5432	6.5443	6.5433	6.5447	6.5441	6.5437	6.5448	6.5438	6.5452	6.5441	6.2924	3.8349	1.8396	52
	6	75	6.4568	6.4564	6.4575	6.4565	6.4579	6.4573	6.4569	6.4580	6.4570	6.4584	6.4573	6.2089	5.1105	2.1892	57
		90	6.5207	6.5203	6.5214	6.5204	6.5218	6.5212	6.5208	6.5219	6.5209	6.5223	6.5212	6.2704	4.1710	1.9204	54
		105	6.6010	6.6006	6.6017	6.6007	6.6021	6.6015	6.6011	6.6022	6.6012	6.6026	6.6015	6.3476	2.9908	1.6638	44
	9	75	6.4568	6.4564	6.4575	6.4565	6.4579	6.4573	6.4569	6.4580	6.4570	6.4584	6.4573	6.2089	5.1102	2.1891	57
		90	6.5209	6.5205	6.5216	6.5206	6.5220	6.5214	6.5210	6.5221	6.5211	6.5225	6.5214	6.2706	4.1678	1.9196	54
		105	6.6018	6.6014	6.6025	6.6015	6.6029	6.6023	6.6019	6.6030	6.6020	6.6034	6.6023	6.3483	2.9797	1.6617	44
50	3	75	6.3865	6.3861	6.3872	6.3862	6.3876	6.3870	6.3866	6.3877	6.3867	6.3881	6.3870	6.1413	6.1434	2.5873	58
		90	6.4254	6.4250	6.4261	6.4251	6.4265	6.4259	6.4255	6.4266	6.4256	6.4270	6.4258	6.1787	5.5722	2.3509	58
		105	6.4692	6.4688	6.4699	6.4689	6.4703	6.4697	6.4693	6.4704	6.4694	6.4708	6.4697	6.2209	4.9275	2.1311	57
	6	75	6.4368	6.4364	6.4375	6.4365	6.4379	6.4373	6.4369	6.4380	6.4370	6.4384	6.4373	6.1897	5.4040	2.2893	58
		90	6.4954	6.4950	6.4961	6.4951	6.4965	6.4959	6.4955	6.4966	6.4956	6.4970	6.4958	6.2460	4.5436	2.0187	56
		105	6.5687	6.5683	6.5694	6.5684	6.5698	6.5692	6.5688	6.5699	6.5689	6.5703	6.5692	6.3165	3.4655	1.7583	49
	9	75	6.4369	6.4365	6.4376	6.4366	6.4380	6.4374	6.4370	6.4381	6.4371	6.4385	6.4374	6.1898	5.4029	2.2889	58
		90	6.4960	6.4956	6.4967	6.4957	6.4971	6.4965	6.4961	6.4972	6.4962	6.4976	6.4965	6.2466	4.5342	2.0161	56
		105	6.5700	6.5696	6.5707	6.5697	6.5711	6.5705	6.5701	6.5712	6.5702	6.5716	6.5705	6.3178	3.4470	1.7544	49
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	52

ตาราง 52 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 260 °C เวลาฉีด 2.5 s และความดันฉีด 550 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	(g)	(cc)	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	6.4020	6.4017	6.4025	6.4018	6.4029	6.4024	6.4021	6.4029	6.4022	6.4033	6.4024	6.1562	5.9163	1.6610	72
		90	6.5485	6.5482	6.5490	6.5483	6.5494	6.5489	6.5486	6.5494	6.5487	6.5498	6.5489	6.2970	3.7641	1.3360	65
		105	6.6692	6.6689	6.6697	6.6690	6.6701	6.6696	6.6693	6.6701	6.6694	6.6705	6.6696	6.4131	1.9905	1.0318	48
	6	75	6.4290	6.4277	6.4285	6.4278	6.4289	6.4284	6.4281	6.4289	6.4282	6.4293	6.4284	6.1811	5.5352	1.5924	71
		90	6.5961	6.5958	6.5966	6.5959	6.5970	6.5965	6.5962	6.5970	6.5963	6.5974	6.5965	6.3428	3.0645	1.2561	59
		105	6.6585	6.6582	6.6590	6.6583	6.6594	6.6589	6.6586	6.6594	6.6587	6.6598	6.6589	6.4028	2.1477	0.9447	56
	9	75	6.4281	6.4278	6.4286	6.4279	6.4290	6.4285	6.4282	6.4290	6.4283	6.4294	6.4285	6.1813	5.5328	1.5920	71
		90	6.5972	6.5969	6.5977	6.5970	6.5981	6.5976	6.5973	6.5981	6.5974	6.5985	6.5976	6.3438	3.0486	1.2544	59
		105	6.6620	6.6617	6.6625	6.6618	6.6629	6.6624	6.6621	6.6629	6.6622	6.6633	6.6624	6.4061	2.0963	0.9416	55
30	3	75	6.3352	6.3349	6.3357	6.3350	6.3361	6.3356	6.3353	6.3361	6.3354	6.3365	6.3356	6.0919	6.8979	1.8683	73
		90	6.4397	6.4394	6.4402	6.4395	6.4406	6.4401	6.4398	6.4406	6.4399	6.4410	6.4401	6.1924	5.3628	1.5632	71
		105	6.5727	6.5724	6.5732	6.5725	6.5736	6.5731	6.5728	6.5736	6.5729	6.5740	6.5731	6.3202	3.4089	1.2942	62
	6	75	6.3900	6.3897	6.3905	6.3898	6.3909	6.3904	6.3901	6.3909	6.3902	6.3913	6.3904	6.1446	6.0932	1.6949	72
		90	6.5371	6.5368	6.5376	6.5369	6.5380	6.5375	6.5372	6.5380	6.5373	6.5384	6.5375	6.2861	3.9311	1.3566	65
		105	6.6624	6.6621	6.6629	6.6622	6.6633	6.6628	6.6625	6.6633	6.6626	6.6637	6.6628	6.4065	2.0904	1.0391	50
	9	75	6.3907	6.3904	6.3912	6.3905	6.3916	6.3911	6.3908	6.3916	6.3909	6.3920	6.3911	6.1453	6.0830	1.6929	72
		90	6.5392	6.5389	6.5397	6.5390	6.5401	6.5396	6.5393	6.5401	6.5394	6.5405	6.5396	6.2881	3.9007	1.3528	65
		105	6.6660	6.6657	6.6665	6.6658	6.6669	6.6664	6.6661	6.6669	6.6662	6.6673	6.6664	6.4100	2.0375	1.0352	49
50	3	75	6.2634	6.2631	6.2639	6.2632	6.2643	6.2638	6.2635	6.2643	6.2636	6.2647	6.2638	6.0229	7.9532	2.1578	73
		90	6.3330	6.3327	6.3335	6.3328	6.3339	6.3334	6.3331	6.3339	6.3332	6.3343	6.3333	6.0898	6.9315	1.8763	73
		105	6.4093	6.4090	6.4098	6.4091	6.4102	6.4097	6.4094	6.4102	6.4095	6.4106	6.4097	6.1632	5.8090	1.6411	72
	6	75	6.3586	6.3583	6.3591	6.3584	6.3595	6.3590	6.3587	6.3595	6.3588	6.3599	6.3590	6.1144	6.5548	1.7902	73
		90	6.4901	6.4898	6.4906	6.4899	6.4910	6.4905	6.4902	6.4910	6.4903	6.4914	6.4905	6.2408	4.6226	1.4491	69
		105	6.6874	6.6871	6.6879	6.6872	6.6883	6.6878	6.6875	6.6883	6.6876	6.6887	6.6878	6.4305	1.7232	1.1269	35
	9	75	6.3597	6.3594	6.3602	6.3595	6.3606	6.3601	6.3598	6.3606	6.3599	6.3610	6.3601	6.1155	6.5382	1.7866	73
		90	6.4927	6.4924	6.4932	6.4925	6.4936	6.4931	6.4928	6.4936	6.4929	6.4940	6.4930	6.2433	4.5847	1.4437	69
		105	6.6906	6.6903	6.6911	6.6904	6.6915	6.6910	6.6907	6.6915	6.6908	6.6919	6.6910	6.4337	1.6755	1.1228	33
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	63

ตาราง 53 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 260 °C เวลาฉีด 2.5 s และความดันฉีด 700 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่อย (s)	ความดัน ย่อย (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	6.4187	6.4183	6.4194	6.4184	6.4198	6.4192	6.4188	6.4199	6.4189	6.4203	6.4192	6.1723	5.6698	1.2214	78
		90	6.5571	6.5567	6.5578	6.5568	6.5582	6.5576	6.5572	6.5583	6.5573	6.5587	6.5576	6.3054	3.6365	0.8872	76
		105	6.6536	6.6532	6.6543	6.6533	6.6547	6.6541	6.6537	6.6548	6.6538	6.6552	6.6541	6.3981	2.2184	0.7977	64
	6	75	6.4777	6.4773	6.4784	6.4774	6.4788	6.4782	6.4778	6.4789	6.4779	6.4793	6.4782	6.2290	4.8028	1.1393	76
		90	6.5763	6.5759	6.5770	6.5760	6.5774	6.5768	6.5764	6.5775	6.5765	6.5779	6.5768	6.3238	3.3543	0.7835	77
		105	6.6755	6.6751	6.6762	6.6752	6.6766	6.6760	6.6756	6.6767	6.6757	6.6771	6.6760	6.4192	1.8966	0.5729	70
	9	75	6.4797	6.4793	6.4804	6.4794	6.4808	6.4802	6.4798	6.4809	6.4799	6.4813	6.4802	6.2310	4.7733	1.1367	76
		90	6.5798	6.5794	6.5805	6.5795	6.5809	6.5803	6.5799	6.5810	6.5800	6.5814	6.5803	6.3272	3.3029	0.7814	76
		105	6.6998	6.6994	6.7005	6.6995	6.7009	6.7003	6.6999	6.7010	6.7000	6.7014	6.7003	6.4426	1.5395	0.5715	63
30	3	75	6.2861	6.2857	6.2868	6.2858	6.2872	6.2866	6.2862	6.2873	6.2863	6.2877	6.2866	6.0448	7.6187	1.4575	81
		90	6.4385	6.4381	6.4392	6.4382	6.4396	6.4390	6.4386	6.4397	6.4387	6.4401	6.4390	6.1913	5.3792	1.1926	78
		105	6.4970	6.4966	6.4977	6.4967	6.4981	6.4975	6.4971	6.4982	6.4972	6.4986	6.4975	6.2476	4.5193	1.1148	75
	6	75	6.4078	6.4074	6.4085	6.4075	6.4089	6.4083	6.4079	6.4090	6.4080	6.4094	6.4082	6.1618	5.8311	1.2380	79
		90	6.5392	6.5388	6.5399	6.5389	6.5403	6.5397	6.5393	6.5404	6.5394	6.5408	6.5397	6.2881	3.8995	0.8778	77
		105	6.5943	6.5939	6.5950	6.5940	6.5954	6.5948	6.5944	6.5955	6.5945	6.5959	6.5948	6.3411	3.0898	0.6692	78
	9	75	6.4105	6.4101	6.4112	6.4102	6.4116	6.4110	6.4106	6.4117	6.4107	6.4121	6.4110	6.1644	5.7907	1.2338	79
		90	6.5438	6.5434	6.5445	6.5435	6.5449	6.5443	6.5439	6.5450	6.5440	6.5454	6.5443	6.2926	3.8319	0.8743	77
		105	6.6122	6.6118	6.6129	6.6119	6.6133	6.6127	6.6123	6.6134	6.6124	6.6138	6.6127	6.3583	2.8268	0.6657	76
50	3	75	6.1618	6.1614	6.1625	6.1615	6.1629	6.1623	6.1619	6.1630	6.1620	6.1634	6.1622	5.9252	9.4459	1.7801	81
		90	6.2334	6.2330	6.2341	6.2331	6.2345	6.2339	6.2335	6.2346	6.2336	6.2350	6.2339	5.9941	8.3928	1.5787	81
		105	6.2690	6.2686	6.2697	6.2687	6.2701	6.2695	6.2691	6.2702	6.2692	6.2706	6.2695	6.0283	7.8703	1.4948	81
	6	75	6.3519	6.3515	6.3526	6.3516	6.3530	6.3524	6.3520	6.3531	6.3521	6.3535	6.3524	6.1081	6.6513	1.3299	80
		90	6.5376	6.5372	6.5383	6.5373	6.5387	6.5381	6.5377	6.5388	6.5378	6.5392	6.5381	6.2866	3.9230	0.9638	75
		105	6.6214	6.6210	6.6221	6.6211	6.6225	6.6219	6.6215	6.6226	6.6216	6.6230	6.6219	6.3672	2.6916	0.7568	72
	9	75	6.3549	6.3545	6.3556	6.3546	6.3560	6.3554	6.3550	6.3561	6.3551	6.3565	6.3554	6.1109	6.6080	1.3247	80
		90	6.5617	6.5613	6.5624	6.5614	6.5628	6.5622	6.5618	6.5629	6.5619	6.5633	6.5622	6.3098	3.5689	0.9600	73
		105	6.6326	6.6322	6.6333	6.6323	6.6337	6.6331	6.6327	6.6338	6.6328	6.6342	6.6331	6.3780	2.5270	0.7504	70
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	76

ตาราง 54 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 260 °C เวลาฉีด 4 s และความดันฉีด 400 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่อย (s)	ความดัน ย่อย (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	6.5165	6.5162	6.5170	6.5163	6.5174	6.5169	6.5166	6.5174	6.5167	6.5178	6.5169	6.2662	4.2344	1.9361	54
		90	6.5950	6.5947	6.5955	6.5948	6.5959	6.5954	6.5951	6.5959	6.5952	6.5963	6.5954	6.3417	3.0810	1.6807	45
		105	6.6561	6.6558	6.6566	6.6559	6.6570	6.6565	6.6562	6.6570	6.6563	6.6574	6.6565	6.4005	2.1830	1.4366	34
	6	75	6.5226	6.5223	6.5231	6.5224	6.5235	6.5230	6.5227	6.5235	6.5228	6.5239	6.5230	6.2721	4.1447	1.9135	54
		90	6.6047	6.6044	6.6052	6.6045	6.6056	6.6051	6.6048	6.6056	6.6049	6.6060	6.6051	6.3511	2.9377	1.6536	44
		105	6.6635	6.6632	6.6640	6.6633	6.6644	6.6639	6.6636	6.6644	6.6637	6.6648	6.6639	6.4076	2.0742	1.4016	32
	9	75	6.5226	6.5223	6.5231	6.5224	6.5235	6.5230	6.5227	6.5235	6.5228	6.5239	6.5230	6.2721	4.1451	1.9136	54
		90	6.6047	6.6044	6.6052	6.6045	6.6056	6.6051	6.6048	6.6056	6.6049	6.6060	6.6051	6.3510	2.9382	1.6537	44
		105	6.6736	6.6733	6.6741	6.6734	6.6745	6.6740	6.6737	6.6745	6.6738	6.6749	6.6740	6.4173	1.9258	1.4014	27
30	3	75	6.4779	6.4776	6.4784	6.4777	6.4788	6.4783	6.4780	6.4788	6.4781	6.4792	6.4783	6.2291	4.8020	2.0926	56
		90	6.5443	6.5440	6.5448	6.5441	6.5452	6.5447	6.5444	6.5452	6.5445	6.5456	6.5447	6.2929	3.8262	1.8373	52
		105	6.6274	6.6271	6.6279	6.6272	6.6283	6.6278	6.6275	6.6283	6.6276	6.6287	6.6278	6.3729	2.6043	1.5938	39
	6	75	6.4919	6.4916	6.4924	6.4917	6.4928	6.4923	6.4920	6.4928	6.4921	6.4932	6.4923	6.2426	4.5954	2.0328	56
		90	6.5654	6.5651	6.5659	6.5652	6.5663	6.5658	6.5655	6.5663	6.5656	6.5667	6.5657	6.3132	3.5165	1.7688	50
		105	6.6602	6.6599	6.6607	6.6600	6.6611	6.6606	6.6603	6.6611	6.6604	6.6615	6.6605	6.4044	2.1234	1.5148	29
	9	75	6.4919	6.4916	6.4924	6.4917	6.4928	6.4923	6.4920	6.4928	6.4921	6.4932	6.4923	6.2426	4.5961	2.0330	56
		90	6.5656	6.5653	6.5661	6.5654	6.5665	6.5660	6.5657	6.5665	6.5658	6.5669	6.5660	6.3135	3.5127	1.7680	50
		105	6.6609	6.6606	6.6614	6.6607	6.6618	6.6613	6.6610	6.6618	6.6611	6.6622	6.6613	6.4051	2.1119	1.5130	28
50	3	75	6.4321	6.4318	6.4326	6.4319	6.4330	6.4325	6.4322	6.4330	6.4323	6.4334	6.4325	6.1851	5.4747	2.3143	58
		90	6.4829	6.4826	6.4834	6.4827	6.4838	6.4833	6.4830	6.4838	6.4831	6.4842	6.4833	6.2340	4.7277	2.0707	56
		105	6.5429	6.5426	6.5434	6.5427	6.5438	6.5433	6.5430	6.5438	6.5431	6.5442	6.5433	6.2916	3.8462	1.8419	52
	6	75	6.4652	6.4649	6.4657	6.4650	6.4661	6.4656	6.4653	6.4661	6.4654	6.4665	6.4655	6.2169	4.9888	2.1498	57
		90	6.5315	6.5312	6.5320	6.5313	6.5324	6.5319	6.5316	6.5324	6.5317	6.5328	6.5319	6.2906	4.0141	1.8815	53
		105	6.6154	6.6151	6.6159	6.6152	6.6163	6.6158	6.6155	6.6163	6.6156	6.6167	6.6158	6.3613	2.7807	1.6249	42
	9	75	6.4653	6.4650	6.4658	6.4651	6.4662	6.4657	6.4654	6.4662	6.4655	6.4666	6.4657	6.2170	4.9869	2.1492	57
		90	6.5321	6.5318	6.5326	6.5319	6.5330	6.5325	6.5322	6.5330	6.5323	6.5334	6.5325	6.2812	4.0054	1.8794	53
		105	6.6173	6.6170	6.6178	6.6171	6.6182	6.6177	6.6174	6.6182	6.6175	6.6186	6.6177	6.3631	2.7534	1.6200	41
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	47

ตาราง 55 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 260 °C เวลาฉีด 4 s และความดันฉีด 550 bar

อุณหภูมิแม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย้า (s)	ความดัน ย้า (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	6.4816	6.4812	6.4823	6.4813	6.4827	6.4821	6.4817	6.4828	6.4818	6.4832	6.4820	6.2327	4.7464	1.4672	69
		90	6.5750	6.5746	6.5757	6.5747	6.5761	6.5755	6.5751	6.5762	6.5752	6.5766	6.5755	6.3226	3.3734	1.1428	66
		105	6.6925	6.6921	6.6932	6.6922	6.6936	6.6930	6.6926	6.6937	6.6927	6.6941	6.6930	6.4355	1.6468	0.8386	49
	6	75	6.4980	6.4976	6.4987	6.4977	6.4991	6.4985	6.4981	6.4992	6.4982	6.4996	6.4985	6.2486	4.5045	1.4326	68
		90	6.6067	6.6063	6.6074	6.6064	6.6078	6.6072	6.6068	6.6079	6.6069	6.6083	6.6072	6.3530	2.9076	1.1029	62
		105	6.7035	6.7031	6.7042	6.7032	6.7046	6.7040	6.7036	6.7047	6.7037	6.7051	6.7040	6.4461	1.4851	0.7981	46
	9	75	6.4981	6.4977	6.4988	6.4978	6.4992	6.4986	6.4982	6.4993	6.4983	6.4997	6.4986	6.2486	4.5038	1.4325	68
		90	6.6080	6.6076	6.6087	6.6077	6.6091	6.6085	6.6081	6.6092	6.6082	6.6096	6.6085	6.3543	2.8885	1.1013	62
		105	6.7077	6.7073	6.7084	6.7074	6.7088	6.7082	6.7078	6.7089	6.7079	6.7093	6.7082	6.4502	1.4234	0.7951	44
30	3	75	6.4158	6.4154	6.4165	6.4155	6.4169	6.4163	6.4159	6.4170	6.4160	6.4174	6.4163	6.1695	5.7123	1.6238	72
		90	6.5680	6.5676	6.5687	6.5677	6.5691	6.5685	6.5681	6.5692	6.5682	6.5696	6.5685	6.3159	3.4756	1.3020	63
		105	6.6929	6.6925	6.6936	6.6926	6.6940	6.6934	6.6930	6.6941	6.6931	6.6945	6.6934	6.4359	1.6409	1.0072	39
	6	75	6.4467	6.4463	6.4474	6.4464	6.4478	6.4472	6.4468	6.4479	6.4469	6.4483	6.4471	6.1992	5.2593	1.5464	71
		90	6.6244	6.6240	6.6251	6.6241	6.6255	6.6249	6.6245	6.6256	6.6246	6.6260	6.6249	6.3701	2.6474	1.2130	54
		105	6.7014	6.7010	6.7021	6.7011	6.7025	6.7019	6.7015	6.7026	6.7016	6.7030	6.7019	6.4441	1.5160	0.9079	40
	9	75	6.4473	6.4469	6.4480	6.4470	6.4484	6.4478	6.4474	6.4485	6.4475	6.4489	6.4478	6.1998	5.2495	1.5448	71
		90	6.6271	6.6267	6.6278	6.6268	6.6282	6.6276	6.6272	6.6283	6.6273	6.6287	6.6276	6.3727	2.6074	1.2090	54
		105	6.7071	6.7067	6.7078	6.7068	6.7082	6.7076	6.7072	6.7083	6.7073	6.7087	6.7076	6.4496	1.4322	0.9033	37
50	3	75	6.3348	6.3344	6.3355	6.3345	6.3359	6.3353	6.3349	6.3360	6.3350	6.3364	6.3353	6.0916	6.9025	1.8697	73
		90	6.4348	6.4344	6.4355	6.4345	6.4359	6.4353	6.4349	6.4360	6.4350	6.4364	6.4353	6.1878	5.4337	1.5753	71
		105	6.5528	6.5524	6.5535	6.5525	6.5539	6.5533	6.5529	6.5540	6.5530	6.5544	6.5533	6.3012	3.6999	1.3284	64
	6	75	6.4039	6.4035	6.4046	6.4036	6.4050	6.4044	6.4040	6.4051	6.4041	6.4055	6.4043	6.1580	5.8882	1.6560	72
		90	6.5573	6.5569	6.5580	6.5570	6.5584	6.5578	6.5574	6.5585	6.5575	6.5589	6.5578	6.3056	3.6328	1.3204	64
		105	6.6901	6.6897	6.6908	6.6898	6.6912	6.6906	6.6902	6.6913	6.6903	6.6917	6.6906	6.4332	1.6820	1.0100	40
	9	75	6.4055	6.4051	6.4062	6.4052	6.4066	6.4060	6.4056	6.4067	6.4057	6.4071	6.4059	6.1596	5.8646	1.6516	72
		90	6.5605	6.5601	6.5612	6.5602	6.5616	6.5610	6.5606	6.5617	6.5607	6.5621	6.5610	6.3086	3.5863	1.3149	63
		105	6.6932	6.6928	6.6939	6.6929	6.6943	6.6937	6.6933	6.6944	6.6934	6.6948	6.6937	6.4362	1.6365	1.0068	38
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	59

ตาราง 56 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 260 °C เวลาฉีด 4 s และความดันฉีด 700 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่อย (s)	ความดัน ย่อย (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คูที่ 1	คูที่ 2	คูที่ 3	คูที่ 4	คูที่ 5	คูที่ 6	คูที่ 7	คูที่ 8	คูที่ 9	คูที่ 10					
10	3	75	6.5721	6.5718	6.5726	6.5719	6.5730	6.5725	6.5722	6.5730	6.5723	6.5734	6.5725	6.3197	3.4173	1.0287	70
		90	6.6434	6.6431	6.6439	6.6432	6.6443	6.6438	6.6435	6.6443	6.6436	6.6447	6.6438	6.3883	2.3696	0.6928	71
		105	6.6725	6.6722	6.6730	6.6723	6.6734	6.6729	6.6726	6.6734	6.6727	6.6738	6.6729	6.4162	1.9420	0.4969	74
	6	75	6.6117	6.6114	6.6122	6.6115	6.6126	6.6121	6.6118	6.6126	6.6119	6.6130	6.6121	6.3578	2.8349	0.9884	65
		90	6.6599	6.6596	6.6604	6.6597	6.6608	6.6603	6.6600	6.6608	6.6601	6.6612	6.6603	6.4041	2.1271	0.6494	69
		105	6.6940	6.6937	6.6945	6.6938	6.6949	6.6944	6.6941	6.6949	6.6942	6.6953	6.6944	6.4369	1.6260	0.4417	73
	9	75	6.6140	6.6137	6.6145	6.6138	6.6149	6.6144	6.6141	6.6149	6.6142	6.6153	6.6144	6.3600	2.8017	0.9862	65
		90	6.6687	6.6684	6.6692	6.6685	6.6696	6.6691	6.6688	6.6696	6.6689	6.6700	6.6691	6.4126	1.9978	0.6457	68
		105	6.7038	6.7035	6.7043	6.7036	6.7047	6.7042	6.7039	6.7047	6.7040	6.7051	6.7042	6.4463	1.4820	0.4398	70
30	3	75	6.4411	6.4408	6.4416	6.4409	6.4420	6.4415	6.4412	6.4420	6.4413	6.4424	6.4415	6.1937	5.3422	1.1889	78
		90	6.5255	6.5252	6.5260	6.5253	6.5264	6.5259	6.5256	6.5264	6.5257	6.5268	6.5259	6.2749	4.1021	0.8885	78
		105	6.6080	6.6077	6.6085	6.6078	6.6089	6.6084	6.6081	6.6089	6.6082	6.6093	6.6084	6.3542	2.8898	0.8278	71
	6	75	6.5113	6.5110	6.5118	6.5111	6.5122	6.5117	6.5114	6.5122	6.5115	6.5126	6.5117	6.2613	4.3104	1.0973	75
		90	6.6207	6.6204	6.6212	6.6205	6.6216	6.6211	6.6208	6.6216	6.6209	6.6220	6.6211	6.3664	2.7032	0.7572	72
		105	6.7113	6.7110	6.7118	6.7111	6.7122	6.7117	6.7114	6.7122	6.7115	6.7126	6.7117	6.4535	1.3718	0.5521	60
	9	75	6.5153	6.5150	6.5158	6.5151	6.5162	6.5157	6.5154	6.5162	6.5155	6.5166	6.5157	6.2651	4.2516	1.0925	74
		90	6.6273	6.6270	6.6278	6.6271	6.6282	6.6277	6.6274	6.6282	6.6275	6.6286	6.6277	6.3728	2.6062	0.7534	71
		105	6.7232	6.7229	6.7237	6.7230	6.7241	6.7236	6.7233	6.7241	6.7234	6.7245	6.7236	6.4650	1.1969	0.5485	54
50	3	75	6.2782	6.2779	6.2787	6.2780	6.2791	6.2786	6.2783	6.2791	6.2784	6.2795	6.2786	6.0371	7.7356	1.4744	81
		90	6.3971	6.3968	6.3976	6.3969	6.3980	6.3975	6.3972	6.3980	6.3973	6.3984	6.3975	6.1515	5.9885	1.2545	79
		105	6.4418	6.4415	6.4423	6.4416	6.4427	6.4422	6.4419	6.4427	6.4420	6.4431	6.4421	6.1944	5.3328	1.1880	78
	6	75	6.4310	6.4307	6.4315	6.4308	6.4319	6.4314	6.4311	6.4319	6.4312	6.4323	6.4314	6.1841	5.4901	1.2033	78
		90	6.5700	6.5697	6.5705	6.5698	6.5709	6.5704	6.5701	6.5709	6.5702	6.5713	6.5704	6.3177	3.4482	0.8547	75
		105	6.6341	6.6338	6.6346	6.6339	6.6350	6.6345	6.6342	6.6350	6.6343	6.6354	6.6345	6.3793	2.5063	0.6530	74
	9	75	6.4344	6.4341	6.4349	6.4342	6.4353	6.4348	6.4345	6.4353	6.4346	6.4357	6.4348	6.1873	5.4402	1.1984	78
		90	6.5733	6.5730	6.5738	6.5731	6.5742	6.5737	6.5734	6.5742	6.5735	6.5746	6.5737	6.3208	3.3997	0.8523	75
		105	6.6378	6.6375	6.6383	6.6376	6.6387	6.6382	6.6379	6.6387	6.6380	6.6391	6.6382	6.3829	2.4519	0.6507	73
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	72

ตาราง 57 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 290 °C เวลาฉีด 1 s และความดันฉีด 400 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่อย (s)	ความดัน ย่อย (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	6.3774	6.3770	6.3781	6.3771	6.3785	6.3779	6.3775	6.3786	6.3776	6.3790	6.3779	6.1326	6.2771	2.6497	58
		90	6.4106	6.4102	6.4113	6.4103	6.4117	6.4111	6.4107	6.4118	6.4108	6.4122	6.4111	6.1645	5.7886	2.4352	58
		105	6.4473	6.4469	6.4480	6.4470	6.4484	6.4478	6.4474	6.4485	6.4475	6.4489	6.4478	6.1998	5.2493	2.2354	57
	6	75	6.4602	6.4598	6.4609	6.4599	6.4613	6.4607	6.4603	6.4614	6.4604	6.4618	6.4607	6.2122	5.0602	2.1729	57
		90	6.5232	6.5228	6.5239	6.5229	6.5243	6.5237	6.5233	6.5244	6.5234	6.5248	6.5236	6.2727	4.1350	1.9114	54
		105	6.6011	6.6007	6.6018	6.6008	6.6022	6.6016	6.6012	6.6023	6.6013	6.6027	6.6016	6.3477	2.9893	1.6635	44
	9	75	6.4601	6.4597	6.4608	6.4598	6.4612	6.4606	6.4602	6.4613	6.4603	6.4617	6.4606	6.2121	5.0617	2.1734	57
		90	6.5231	6.5227	6.5238	6.5228	6.5242	6.5236	6.5232	6.5243	6.5233	6.5247	6.5236	6.2727	4.1354	1.9115	54
		105	6.6018	6.6014	6.6025	6.6015	6.6029	6.6023	6.6019	6.6030	6.6020	6.6034	6.6022	6.3483	2.9802	1.6618	44
30	3	75	6.3346	6.3342	6.3353	6.3343	6.3357	6.3351	6.3347	6.3358	6.3348	6.3362	6.3350	6.0914	6.9065	2.9889	57
		90	6.3592	6.3588	6.3599	6.3589	6.3603	6.3597	6.3593	6.3604	6.3594	6.3608	6.3597	6.1151	6.5443	2.7838	57
		105	6.3847	6.3843	6.3854	6.3844	6.3858	6.3852	6.3848	6.3859	6.3849	6.3863	6.3852	6.1396	6.1692	2.5991	58
	6	75	6.4365	6.4361	6.4372	6.4362	6.4376	6.4370	6.4366	6.4377	6.4367	6.4381	6.4370	6.1894	5.4083	2.2908	58
		90	6.4928	6.4924	6.4935	6.4925	6.4939	6.4933	6.4929	6.4940	6.4930	6.4944	6.4933	6.2436	4.5809	2.0291	56
		105	6.5627	6.5623	6.5634	6.5624	6.5638	6.5632	6.5628	6.5639	6.5629	6.5643	6.5631	6.3107	3.5549	1.7773	50
	9	75	6.4388	6.4384	6.4395	6.4385	6.4399	6.4393	6.4389	6.4400	6.4390	6.4404	6.4393	6.1916	5.3748	2.2789	58
		90	6.4966	6.4962	6.4973	6.4963	6.4977	6.4971	6.4967	6.4978	6.4968	6.4982	6.4970	6.2472	4.5259	2.0138	56
		105	6.5681	6.5677	6.5688	6.5678	6.5692	6.5686	6.5682	6.5693	6.5683	6.5697	6.5686	6.3160	3.4741	1.7601	49
50	3	75	6.2947	6.2943	6.2954	6.2944	6.2958	6.2952	6.2948	6.2959	6.2949	6.2963	6.2952	6.0530	7.4925	3.3933	55
		90	6.3114	6.3110	6.3121	6.3111	6.3125	6.3119	6.3115	6.3126	6.3116	6.3130	6.3119	6.0691	7.2473	3.2115	56
		105	6.3270	6.3266	6.3277	6.3267	6.3281	6.3275	6.3271	6.3282	6.3272	6.3286	6.3275	6.0841	7.0179	3.0582	56
	6	75	6.4149	6.4145	6.4156	6.4146	6.4160	6.4154	6.4150	6.4161	6.4151	6.4165	6.4154	6.1686	5.7258	2.4101	58
		90	6.4655	6.4651	6.4662	6.4652	6.4666	6.4660	6.4656	6.4667	6.4657	6.4671	6.4660	6.2173	4.9821	2.1481	57
		105	6.5268	6.5264	6.5275	6.5265	6.5279	6.5273	6.5269	6.5290	6.5270	6.5284	6.5273	6.2762	4.0819	1.8983	53
	9	75	6.4209	6.4205	6.4216	6.4206	6.4220	6.4214	6.4210	6.4221	6.4211	6.4225	6.4214	6.1744	5.6372	2.3756	58
		90	6.4748	6.4744	6.4755	6.4745	6.4759	6.4753	6.4749	6.4760	6.4750	6.4764	6.4753	6.2262	4.8457	2.1061	57
		105	6.5410	6.5406	6.5417	6.5407	6.5421	6.5415	6.5411	6.5422	6.5412	6.5426	6.5414	6.2899	3.8734	1.8485	52
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	55

ตาราง 58 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 290 °C เวลาฉีด 1 s และความดันฉีด 550 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่อย (s)	ความดัน ย่อย (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	6.2426	6.2423	6.2431	6.2424	6.2435	6.2430	6.2427	6.2435	6.2428	6.2439	6.2429	6.0028	8.2600	2.2596	73
		90	6.2989	6.2986	6.2994	6.2987	6.2998	6.2993	6.2990	6.2998	6.2991	6.3002	6.2993	6.0570	7.4320	2.0044	73
		105	6.3541	6.3538	6.3546	6.3539	6.3550	6.3545	6.3542	6.3550	6.3543	6.3554	6.3545	6.1101	6.6203	1.8046	73
	6	75	6.3903	6.3900	6.3908	6.3901	6.3912	6.3907	6.3904	6.3912	6.3905	6.3916	6.3907	6.1449	6.0891	1.6941	72
		90	6.5329	6.5326	6.5334	6.5327	6.5338	6.5333	6.5330	6.5338	6.5331	6.5342	6.5332	6.2820	3.9939	1.3645	66
		105	6.5555	6.5552	6.5560	6.5553	6.5564	6.5559	6.5556	6.5564	6.5557	6.5568	6.5559	6.3037	3.6613	1.0466	71
	9	75	6.3908	6.3905	6.3913	6.3906	6.3917	6.3912	6.3909	6.3917	6.3910	6.3921	6.3912	6.1453	6.0820	1.6927	72
		90	6.5344	6.5341	6.5349	6.5342	6.5353	6.5348	6.5345	6.5353	6.5346	6.5357	6.5348	6.2834	3.9717	1.3617	66
		105	6.6588	6.6585	6.6593	6.6586	6.6597	6.6592	6.6589	6.6597	6.6590	6.6601	6.6592	6.4031	2.1433	1.0430	51
30	3	75	6.1815	6.1812	6.1820	6.1813	6.1824	6.1819	6.1816	6.1824	6.1817	6.1828	6.1819	5.9441	9.1569	2.6211	71
		90	6.2168	6.2165	6.2173	6.2166	6.2177	6.2172	6.2169	6.2177	6.2170	6.2181	6.2172	5.9781	8.6379	2.3990	72
		105	6.2447	6.2444	6.2452	6.2445	6.2456	6.2451	6.2448	6.2456	6.2449	6.2460	6.2451	6.0049	8.2285	2.2487	73
	6	75	6.3531	6.3528	6.3536	6.3529	6.3540	6.3535	6.3532	6.3540	6.3533	6.3544	6.3535	6.1091	6.6351	1.8079	73
		90	6.4784	6.4781	6.4789	6.4782	6.4793	6.4788	6.4785	6.4793	6.4786	6.4797	6.4788	6.2296	4.7939	1.4740	69
		105	6.6672	6.6669	6.6677	6.6670	6.6681	6.6676	6.6673	6.6681	6.6674	6.6685	6.6676	6.4112	2.0195	1.1531	43
	9	75	6.3583	6.3580	6.3588	6.3581	6.3592	6.3587	6.3584	6.3592	6.3585	6.3596	6.3586	6.1141	6.5598	1.7913	73
		90	6.4868	6.4865	6.4873	6.4866	6.4877	6.4872	6.4869	6.4877	6.4870	6.4881	6.4871	6.2376	4.6713	1.4561	69
		105	6.6832	6.6829	6.6837	6.6830	6.6841	6.6836	6.6833	6.6841	6.6834	6.6845	6.6836	6.4266	1.7842	1.1322	37
50	3	75	6.1251	6.1248	6.1256	6.1249	6.1260	6.1255	6.1252	6.1260	6.1253	6.1264	6.1255	5.8899	9.9857	3.0758	69
		90	6.1446	6.1443	6.1451	6.1444	6.1455	6.1450	6.1447	6.1455	6.1448	6.1459	6.1450	5.9087	9.6991	2.9017	70
		105	6.1572	6.1569	6.1577	6.1570	6.1581	6.1576	6.1573	6.1581	6.1574	6.1585	6.1575	5.9207	9.5150	2.7999	71
	6	75	6.3183	6.3180	6.3188	6.3181	6.3192	6.3187	6.3184	6.3192	6.3185	6.3196	6.3187	6.0757	7.1462	1.9292	73
		90	6.4262	6.4259	6.4267	6.4260	6.4271	6.4266	6.4263	6.4271	6.4264	6.4275	6.4266	6.1794	5.5612	1.5969	71
		105	6.5860	6.5857	6.5865	6.5858	6.5869	6.5864	6.5861	6.5869	6.5862	6.5873	6.5864	6.3330	3.2134	1.2723	60
	9	75	6.3318	6.3315	6.3323	6.3316	6.3327	6.3322	6.3319	6.3327	6.3320	6.3331	6.3322	6.0887	6.9481	1.8803	73
		90	6.4486	6.4483	6.4491	6.4484	6.4495	6.4490	6.4487	6.4495	6.4488	6.4499	6.4489	6.2009	5.2329	1.5419	71
		105	6.6218	6.6215	6.6223	6.6216	6.6227	6.6222	6.6219	6.6227	6.6220	6.6231	6.6221	6.3674	2.6876	1.2169	55
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	67

ตาราง 59 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 290 °C เวลาฉีด 1 s และความดันฉีด 700 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่อย (s)	ความดัน ย่อย (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	6.3212	6.3208	6.3219	6.3209	6.3223	6.3217	6.3213	6.3224	6.3214	6.3228	6.3217	6.0785	7.1028	1.9186	73
		90	6.3761	6.3757	6.3768	6.3758	6.3772	6.3766	6.3762	6.3773	6.3763	6.3777	6.3765	6.1313	6.2967	1.7359	72
		105	6.4108	6.4104	6.4115	6.4105	6.4119	6.4113	6.4109	6.4120	6.4110	6.4124	6.4113	6.1647	5.7864	1.6372	72
	6	75	6.4025	6.4021	6.4032	6.4022	6.4036	6.4030	6.4026	6.4037	6.4027	6.4041	6.4030	6.1567	5.9082	1.2461	79
		90	6.5216	6.5212	6.5223	6.5213	6.5227	6.5221	6.5217	6.5228	6.5218	6.5232	6.5220	6.2712	4.1584	0.8916	79
		105	6.6378	6.6374	6.6385	6.6375	6.6389	6.6383	6.6379	6.6390	6.6380	6.6394	6.6383	6.3830	2.4504	0.6955	72
	9	75	6.5345	6.5341	6.5352	6.5342	6.5356	6.5350	6.5346	6.5357	6.5347	6.5361	6.5350	6.2836	3.9685	1.2430	69
		90	6.5970	6.5966	6.5977	6.5967	6.5981	6.5975	6.5971	6.5982	6.5972	6.5986	6.5975	6.3437	3.0501	0.8873	71
		105	6.6848	6.6844	6.6855	6.6845	6.6859	6.6853	6.6849	6.6860	6.6850	6.6864	6.6853	6.4281	1.7599	0.6874	61
30	3	75	6.2794	6.2790	6.2901	6.2791	6.2905	6.2799	6.2795	6.2906	6.2796	6.2810	6.2799	6.0383	7.7174	2.3289	70
		90	6.3061	6.3057	6.3068	6.3058	6.3072	6.3066	6.3062	6.3073	6.3063	6.3077	6.3065	6.0640	7.3255	2.1927	70
		105	6.3178	6.3174	6.3185	6.3175	6.3189	6.3183	6.3179	6.3190	6.3180	6.3194	6.3183	6.0753	7.1531	2.1377	70
	6	75	6.2887	6.2883	6.2894	6.2884	6.2898	6.2892	6.2888	6.2899	6.2889	6.2903	6.2891	6.0472	7.5812	1.3538	82
		90	6.4131	6.4127	6.4138	6.4128	6.4142	6.4136	6.4132	6.4143	6.4133	6.4147	6.4136	6.1669	5.7525	0.9969	83
		105	6.5470	6.5466	6.5477	6.5467	6.5481	6.5475	6.5471	6.5482	6.5472	6.5486	6.5475	6.2956	3.7849	0.8019	79
	9	75	6.4789	6.4785	6.4796	6.4786	6.4800	6.4794	6.4790	6.4801	6.4791	6.4805	6.4794	6.2302	4.7857	1.3353	72
		90	6.5548	6.5544	6.5555	6.5545	6.5559	6.5553	6.5549	6.5560	6.5550	6.5564	6.5553	6.3031	3.6703	0.9758	73
		105	6.6163	6.6159	6.6170	6.6160	6.6174	6.6168	6.6164	6.6175	6.6165	6.6179	6.6168	6.3623	2.7665	0.7774	72
50	3	75	6.2507	6.2503	6.2514	6.2504	6.2518	6.2512	6.2508	6.2519	6.2509	6.2523	6.2512	6.0108	8.1386	2.8512	65
		90	6.2728	6.2724	6.2735	6.2725	6.2739	6.2733	6.2729	6.2740	6.2730	6.2744	6.2733	6.0320	7.8142	2.7562	65
		105	6.2970	6.2966	6.2977	6.2967	6.2981	6.2975	6.2971	6.2982	6.2972	6.2986	6.2975	6.0553	7.4586	2.7248	63
	6	75	6.2776	6.2772	6.2783	6.2773	6.2787	6.2781	6.2777	6.2788	6.2778	6.2792	6.2781	6.0366	7.7437	1.4757	81
		90	6.3944	6.3940	6.3951	6.3941	6.3955	6.3949	6.3945	6.3956	6.3946	6.3960	6.3949	6.1489	6.0273	1.1181	81
		105	6.5188	6.5184	6.5195	6.5185	6.5199	6.5193	6.5189	6.5200	6.5190	6.5204	6.5193	6.2685	4.1993	0.9445	78
	9	75	6.4037	6.4033	6.4044	6.4034	6.4048	6.4042	6.4038	6.4049	6.4039	6.4053	6.4042	6.1579	5.8907	1.4210	76
		90	6.5263	6.5259	6.5270	6.5260	6.5274	6.5268	6.5264	6.5275	6.5265	6.5279	6.5268	6.2757	4.0891	1.0567	74
		105	6.5875	6.5871	6.5882	6.5872	6.5886	6.5880	6.5876	6.5887	6.5877	6.5891	6.5880	6.3346	3.1897	0.8567	73
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	73

ตาราง 60 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 290 °C เวลาฉีด 2.5 s และความดันฉีด 400 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่อย (s)	ความดัน ย่อย (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	6.4558	6.4555	6.4563	6.4556	6.4567	6.4562	6.4559	6.4567	6.4560	6.4571	6.4561	6.2078	5.1269	2.1941	57
		90	6.5086	6.5083	6.5091	6.5084	6.5095	6.5090	6.5087	6.5095	6.5088	6.5099	6.5090	6.2586	4.3506	1.9662	55
		105	6.5707	6.5704	6.5712	6.5705	6.5716	6.5711	6.5708	6.5716	6.5709	6.5720	6.5711	6.3184	3.4378	1.7522	49
	6	75	6.5003	6.5000	6.5008	6.5001	6.5012	6.5007	6.5004	6.5012	6.5005	6.5016	6.5007	6.2507	4.4725	1.9988	55
		90	6.5753	6.5750	6.5758	6.5751	6.5762	6.5757	6.5754	6.5762	6.5755	6.5766	6.5757	6.3228	3.3697	1.7381	48
		105	6.6714	6.6711	6.6719	6.6712	6.6723	6.6718	6.6715	6.6723	6.6716	6.6727	6.6718	6.4152	1.9580	1.4894	24
	9	75	6.5003	6.5000	6.5008	6.5001	6.5012	6.5007	6.5004	6.5012	6.5005	6.5016	6.5007	6.2507	4.4721	1.9987	55
		90	6.5755	6.5752	6.5760	6.5753	6.5764	6.5759	6.5756	6.5764	6.5757	6.5768	6.5759	6.3230	3.3673	1.7376	48
		105	6.6720	6.6717	6.6725	6.6718	6.6729	6.6724	6.6721	6.6729	6.6722	6.6733	6.6724	6.4157	1.9494	1.4881	24
30	3	75	6.4030	6.4027	6.4035	6.4028	6.4039	6.4034	6.4031	6.4039	6.4032	6.4043	6.4034	6.1571	5.9025	2.4815	58
		90	6.4416	6.4413	6.4421	6.4414	6.4425	6.4420	6.4417	6.4425	6.4418	6.4429	6.4420	6.1942	5.3354	2.2646	58
		105	6.4848	6.4845	6.4853	6.4846	6.4857	6.4852	6.4849	6.4857	6.4850	6.4861	6.4852	6.2358	4.6995	2.0625	56
	6	75	6.4734	6.4731	6.4739	6.4732	6.4743	6.4738	6.4735	6.4743	6.4736	6.4747	6.4738	6.2248	4.8678	2.1124	57
		90	6.5407	6.5404	6.5412	6.5405	6.5416	6.5411	6.5408	6.5416	6.5409	6.5420	6.5411	6.2895	3.8790	1.8495	52
		105	6.6256	6.6253	6.6261	6.6254	6.6265	6.6260	6.6257	6.6265	6.6258	6.6269	6.6260	6.3711	2.6314	1.5985	39
	9	75	6.4734	6.4731	6.4739	6.4732	6.4743	6.4738	6.4735	6.4743	6.4736	6.4747	6.4737	6.2247	4.8685	2.1126	57
		90	6.5413	6.5410	6.5418	6.5411	6.5422	6.5417	6.5414	6.5422	6.5415	6.5426	6.5417	6.2900	3.8704	1.8475	52
		105	6.6270	6.6267	6.6275	6.6268	6.6279	6.6274	6.6271	6.6279	6.6272	6.6283	6.6273	6.3724	2.6112	1.5950	39
50	3	75	6.3516	6.3513	6.3521	6.3514	6.3525	6.3520	6.3517	6.3525	6.3518	6.3529	6.3520	6.1077	6.6577	2.8442	57
		90	6.3787	6.3784	6.3792	6.3785	6.3796	6.3791	6.3788	6.3796	6.3789	6.3800	6.3791	6.1337	6.2596	2.6407	58
		105	6.4068	6.4065	6.4073	6.4066	6.4077	6.4072	6.4069	6.4077	6.4070	6.4081	6.4072	6.1608	5.8462	2.4581	58
	6	75	6.4470	6.4467	6.4475	6.4468	6.4479	6.4474	6.4471	6.4479	6.4472	6.4483	6.4473	6.1994	5.2562	2.2373	57
		90	6.5068	6.5065	6.5073	6.5066	6.5077	6.5072	6.5069	6.5077	6.5070	6.5081	6.5072	6.2569	4.3767	1.9731	55
		105	6.5811	6.5808	6.5816	6.5809	6.5820	6.5815	6.5812	6.5820	6.5813	6.5824	6.5815	6.3284	3.2847	1.7208	48
	9	75	6.4502	6.4499	6.4507	6.4500	6.4511	6.4506	6.4503	6.4511	6.4504	6.4515	6.4506	6.2025	5.2083	2.2211	57
		90	6.5120	6.5117	6.5125	6.5118	6.5129	6.5124	6.5121	6.5129	6.5122	6.5133	6.5124	6.2619	4.3004	1.9531	55
		105	6.5896	6.5893	6.5901	6.5894	6.5905	6.5900	6.5897	6.5905	6.5898	6.5909	6.5899	6.3365	3.1609	1.6962	46
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	51

ตาราง 61 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 290 °C เวลาฉีด 2.5 s และความดันฉีด 550 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่อย (s)	ความดัน ย่อย (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	6.3623	6.3619	6.3630	6.3620	6.3634	6.3628	6.3624	6.3635	6.3625	6.3639	6.3628	6.1181	6.4985	1.7783	73
		90	6.4662	6.4658	6.4669	6.4659	6.4673	6.4667	6.4663	6.4674	6.4664	6.4678	6.4667	6.2180	4.9719	1.5010	70
		105	6.5905	6.5901	6.5912	6.5902	6.5916	6.5910	6.5906	6.5917	6.5907	6.5921	6.5909	6.3374	3.1464	1.2651	60
	6	75	6.4579	6.4575	6.4586	6.4576	6.4590	6.4584	6.4580	6.4591	6.4581	6.4595	6.4583	6.2099	5.0949	1.5201	70
		90	6.6375	6.6371	6.6382	6.6372	6.6386	6.6380	6.6376	6.6387	6.6377	6.6391	6.6380	6.3827	2.4547	1.1940	51
		105	6.7242	6.7238	6.7249	6.7239	6.7253	6.7247	6.7243	6.7254	6.7244	6.7258	6.7247	6.4660	1.1809	0.8895	25
	9	75	6.4584	6.4580	6.4591	6.4581	6.4595	6.4589	6.4585	6.4596	6.4586	6.4600	6.4588	6.2104	5.0873	1.5189	70
		90	6.6402	6.6398	6.6409	6.6399	6.6413	6.6407	6.6403	6.6414	6.6404	6.6418	6.6407	6.3853	2.4154	1.1902	51
		105	6.7291	6.7287	6.7298	6.7288	6.7302	6.7296	6.7292	6.7303	6.7293	6.7307	6.7296	6.4707	1.1089	0.8857	20
30	3	75	6.2792	6.2788	6.2799	6.2789	6.2903	6.2797	6.2793	6.2904	6.2794	6.2908	6.2796	6.0381	7.7208	2.0870	73
		90	6.3466	6.3462	6.3473	6.3463	6.3477	6.3471	6.3467	6.3478	6.3468	6.3482	6.3471	6.1030	6.7294	1.8294	73
		105	6.4145	6.4141	6.4152	6.4142	6.4156	6.4150	6.4146	6.4157	6.4147	6.4161	6.4150	6.1683	5.7317	1.6273	72
	6	75	6.4136	6.4132	6.4143	6.4133	6.4147	6.4141	6.4137	6.4148	6.4138	6.4152	6.4141	6.1674	5.7450	1.6297	72
		90	6.5698	6.5694	6.5705	6.5695	6.5709	6.5703	6.5699	6.5710	6.5700	6.5714	6.5703	6.3176	3.4495	1.2990	62
		105	6.7112	6.7108	6.7119	6.7109	6.7123	6.7117	6.7113	6.7124	6.7114	6.7128	6.7117	6.4535	1.3720	0.9889	28
	9	75	6.4150	6.4146	6.4157	6.4147	6.4161	6.4155	6.4151	6.4162	6.4152	6.4166	6.4154	6.1687	5.7251	1.6261	72
		90	6.5726	6.5722	6.5733	6.5723	6.5737	6.5731	6.5727	6.5738	6.5728	6.5742	6.5730	6.3202	3.4093	1.2944	62
		105	6.7162	6.7158	6.7169	6.7159	6.7173	6.7167	6.7163	6.7174	6.7164	6.7178	6.7167	6.4583	1.2985	0.9841	24
50	3	75	6.2033	6.2029	6.2040	6.2030	6.2044	6.2038	6.2034	6.2045	6.2035	6.2049	6.2037	5.9651	8.8359	2.4797	72
		90	6.2423	6.2419	6.2430	6.2420	6.2434	6.2428	6.2424	6.2435	6.2425	6.2439	6.2427	6.0026	8.2630	2.2611	73
		105	6.2713	6.2709	6.2720	6.2710	6.2724	6.2718	6.2714	6.2725	6.2715	6.2729	6.2718	6.0306	7.8357	2.1216	73
	6	75	6.3708	6.3704	6.3715	6.3705	6.3719	6.3713	6.3709	6.3720	6.3710	6.3724	6.3713	6.1262	6.3740	1.7519	73
		90	6.5045	6.5041	6.5052	6.5042	6.5056	6.5050	6.5046	6.5057	6.5047	6.5061	6.5050	6.2548	4.4091	1.4194	68
		105	6.7069	6.7065	6.7076	6.7066	6.7080	6.7074	6.7070	6.7081	6.7071	6.7085	6.7074	6.4494	1.4345	1.1026	23
	9	75	6.3788	6.3784	6.3795	6.3785	6.3799	6.3793	6.3789	6.3800	6.3790	6.3804	6.3793	6.1339	6.2560	1.7276	72
		90	6.5174	6.5170	6.5181	6.5171	6.5185	6.5179	6.5175	6.5186	6.5176	6.5190	6.5179	6.2672	4.2197	1.3939	67
		105	6.7271	6.7267	6.7278	6.7268	6.7282	6.7276	6.7272	6.7283	6.7273	6.7287	6.7276	6.4688	1.1379	1.0786	5
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	57

ตาราง 62 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 290 °C เวลาฉีด 2.5 s และความดันฉีด 700 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่อย (s)	ความดัน ย่อย (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	6.3112	6.3109	6.3117	6.3110	6.3121	6.3116	6.3113	6.3121	6.3114	6.3125	6.3116	6.0689	7.2507	1.4060	81
		90	6.4410	6.4407	6.4415	6.4408	6.4419	6.4414	6.4411	6.4419	6.4412	6.4423	6.4414	6.1936	5.3443	1.1891	78
		105	6.5067	6.5064	6.5072	6.5065	6.5076	6.5071	6.5068	6.5076	6.5069	6.5080	6.5071	6.2568	4.3784	1.1029	75
	6	75	6.5268	6.5265	6.5273	6.5266	6.5277	6.5272	6.5269	6.5277	6.5270	6.5281	6.5272	6.2761	4.0833	1.0790	74
		90	6.5468	6.5465	6.5473	6.5466	6.5477	6.5472	6.5469	6.5477	6.5470	6.5481	6.5472	6.2954	3.7891	0.7425	80
		105	6.6232	6.6229	6.6237	6.6230	6.6241	6.6236	6.6233	6.6241	6.6234	6.6245	6.6236	6.3688	2.6664	0.5485	79
	9	75	6.5302	6.5299	6.5307	6.5300	6.5311	6.5306	6.5303	6.5311	6.5304	6.5315	6.5306	6.2794	4.0326	1.0750	73
		90	6.6539	6.6536	6.6544	6.6537	6.6548	6.6543	6.6540	6.6548	6.6541	6.6552	6.6543	6.3983	2.2153	0.7386	67
		105	6.7039	6.7036	6.7044	6.7037	6.7048	6.7043	6.7040	6.7048	6.7041	6.7052	6.7043	6.4464	1.4806	0.5453	63
30	3	75	6.2738	6.2735	6.2743	6.2736	6.2747	6.2742	6.2739	6.2747	6.2740	6.2751	6.2742	6.0329	7.8009	1.7427	78
		90	6.3364	6.3361	6.3369	6.3362	6.3373	6.3368	6.3365	6.3373	6.3366	6.3377	6.3368	6.0931	6.8810	1.5713	77
		105	6.4765	6.4762	6.4770	6.4763	6.4774	6.4769	6.4766	6.4774	6.4767	6.4778	6.4769	6.2278	4.8222	1.4826	69
	6	75	6.4462	6.4459	6.4467	6.4460	6.4471	6.4466	6.4463	6.4471	6.4464	6.4475	6.4466	6.1987	5.2669	1.1817	78
		90	6.5888	6.5885	6.5893	6.5886	6.5897	6.5892	6.5889	6.5897	6.5890	6.5901	6.5892	6.3358	3.1719	0.8412	73
		105	6.6347	6.6344	6.6352	6.6345	6.6356	6.6351	6.6348	6.6356	6.6349	6.6360	6.6351	6.3799	2.4974	0.6516	74
	9	75	6.4494	6.4491	6.4499	6.4492	6.4503	6.4498	6.4495	6.4503	6.4496	6.4507	6.4498	6.2017	5.2204	1.1773	77
		90	6.5960	6.5957	6.5965	6.5958	6.5969	6.5964	6.5961	6.5969	6.5962	6.5973	6.5964	6.3427	3.0661	0.8361	73
		105	6.6516	6.6513	6.6521	6.6514	6.6525	6.6520	6.6517	6.6525	6.6518	6.6529	6.6520	6.3961	2.2491	0.6445	71
50	3	75	6.2559	6.2556	6.2564	6.2557	6.2568	6.2563	6.2560	6.2568	6.2561	6.2572	6.2563	6.0157	8.0639	2.1937	73
		90	6.3821	6.3818	6.3826	6.3819	6.3830	6.3825	6.3822	6.3830	6.3823	6.3834	6.3825	6.1370	6.2094	2.0741	67
		105	6.4938	6.4935	6.4943	6.4936	6.4947	6.4942	6.4939	6.4947	6.4940	6.4951	6.4942	6.2444	4.5680	2.0250	56
	6	75	6.3691	6.3688	6.3696	6.3689	6.3700	6.3695	6.3692	6.3700	6.3693	6.3704	6.3695	6.1245	6.4003	1.3002	80
		90	6.4472	6.4469	6.4477	6.4470	6.4481	6.4476	6.4473	6.4481	6.4474	6.4485	6.4476	6.1996	5.2528	0.9549	82
		105	6.5930	6.5927	6.5935	6.5928	6.5939	6.5934	6.5931	6.5939	6.5932	6.5943	6.5934	6.3398	3.1102	0.7734	75
	9	75	6.3838	6.3835	6.3843	6.3836	6.3847	6.3842	6.3839	6.3847	6.3840	6.3851	6.3841	6.1386	6.1850	1.2759	79
		90	6.4778	6.4775	6.4783	6.4776	6.4787	6.4782	6.4779	6.4787	6.4780	6.4791	6.4782	6.2290	4.8031	0.9278	81
		105	6.6091	6.6088	6.6096	6.6089	6.6100	6.6095	6.6092	6.6100	6.6093	6.6104	6.6095	6.3553	2.8736	0.7358	74
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	74

ตาราง 63 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 290 °C เวลาฉีด 4 s และความดันฉีด 400 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่อย (s)	ความดัน ย่อย (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	6.5230	6.5226	6.5237	6.5227	6.5241	6.5235	6.5231	6.5242	6.5232	6.5246	6.5235	6.2726	4.1370	1.9119	54
		90	6.5977	6.5973	6.5984	6.5974	6.5988	6.5982	6.5978	6.5989	6.5979	6.5993	6.5982	6.3444	3.0399	1.6731	45
		105	6.6215	6.6211	6.6222	6.6212	6.6226	6.6220	6.6216	6.6227	6.6217	6.6231	6.6220	6.3673	2.6901	1.4461	46
	6	75	6.5480	6.5476	6.5487	6.5477	6.5491	6.5485	6.5481	6.5492	6.5482	6.5496	6.5484	6.2966	3.7705	1.8249	52
		90	6.6371	6.6367	6.6378	6.6368	6.6382	6.6376	6.6372	6.6383	6.6373	6.6387	6.6376	6.3823	2.4602	1.5695	36
		105	6.6554	6.6550	6.6561	6.6551	6.6565	6.6559	6.6555	6.6566	6.6556	6.6570	6.6559	6.3999	2.1919	1.3238	40
	9	75	6.5479	6.5475	6.5486	6.5476	6.5490	6.5484	6.5480	6.5491	6.5481	6.5495	6.5484	6.2965	3.7719	1.8252	52
		90	6.6373	6.6369	6.6380	6.6370	6.6384	6.6378	6.6374	6.6385	6.6375	6.6389	6.6377	6.3824	2.4584	1.5692	36
		105	6.6760	6.6756	6.6767	6.6757	6.6771	6.6765	6.6761	6.6772	6.6762	6.6776	6.6765	6.4197	1.8892	1.3227	30
30	3	75	6.4630	6.4626	6.4637	6.4627	6.4641	6.4635	6.4631	6.4642	6.4632	6.4646	6.4635	6.2149	5.0185	2.1596	57
		90	6.5167	6.5163	6.5174	6.5164	6.5178	6.5172	6.5168	6.5179	6.5169	6.5183	6.5172	6.2666	4.2295	1.9352	54
		105	6.5799	6.5795	6.5806	6.5796	6.5810	6.5804	6.5800	6.5811	6.5801	6.5815	6.5803	6.3273	3.3017	1.7245	48
	6	75	6.5116	6.5112	6.5123	6.5113	6.5127	6.5121	6.5117	6.5128	6.5118	6.5132	6.5120	6.2616	4.3056	1.9548	55
		90	6.5898	6.5894	6.5905	6.5895	6.5909	6.5903	6.5899	6.5910	6.5900	6.5914	6.5903	6.3368	3.1555	1.6954	46
		105	6.6906	6.6902	6.6913	6.6903	6.6917	6.6911	6.6907	6.6918	6.6908	6.6922	6.6910	6.4337	1.6753	1.4481	14
	9	75	6.5117	6.5113	6.5124	6.5114	6.5128	6.5122	6.5118	6.5129	6.5119	6.5133	6.5121	6.2617	4.3041	1.9544	55
		90	6.5903	6.5899	6.5910	6.5900	6.5914	6.5908	6.5904	6.5915	6.5905	6.5919	6.5908	6.3373	3.1483	1.6940	46
		105	6.6924	6.6920	6.6931	6.6921	6.6935	6.6929	6.6925	6.6936	6.6926	6.6940	6.6929	6.4355	1.6479	1.4442	12
50	3	75	6.4023	6.4019	6.4030	6.4020	6.4034	6.4028	6.4024	6.4035	6.4025	6.4039	6.4027	6.1565	5.9117	2.4859	58
		90	6.4395	6.4391	6.4402	6.4392	6.4406	6.4400	6.4396	6.4407	6.4397	6.4411	6.4399	6.1922	5.3651	2.2755	58
		105	6.4804	6.4800	6.4811	6.4801	6.4815	6.4809	6.4805	6.4816	6.4806	6.4820	6.4809	6.2316	4.7636	2.0816	56
	6	75	6.4796	6.4792	6.4803	6.4793	6.4807	6.4801	6.4797	6.4808	6.4798	6.4812	6.4801	6.2308	4.7754	2.0851	56
		90	6.5487	6.5483	6.5494	6.5484	6.5498	6.5492	6.5488	6.5499	6.5489	6.5503	6.5491	6.2972	3.7604	1.8226	52
		105	6.6361	6.6357	6.6368	6.6358	6.6372	6.6366	6.6362	6.6373	6.6363	6.6377	6.6365	6.3813	2.4763	1.5722	37
	9	75	6.4812	6.4808	6.4819	6.4809	6.4823	6.4817	6.4813	6.4824	6.4814	6.4828	6.4817	6.2324	4.7520	2.0782	56
		90	6.5515	6.5511	6.5522	6.5512	6.5526	6.5520	6.5516	6.5527	6.5517	6.5531	6.5520	6.3000	3.7190	1.8133	51
		105	6.6409	6.6405	6.6416	6.6406	6.6420	6.6414	6.6410	6.6421	6.6411	6.6425	6.6414	6.3859	2.4050	1.5603	35
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	46

ตาราง 64 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 290 °C เวลาฉีด 4 s และความดันฉีด 550 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	6.4785	6.4782	6.4790	6.4783	6.4794	6.4789	6.4786	6.4794	6.4787	6.4798	6.4789	6.2297	4.7925	1.4738	69
		90	6.6494	6.6491	6.6499	6.6492	6.6503	6.6498	6.6495	6.6503	6.6496	6.6507	6.6498	6.3940	2.2814	1.1773	48
		105	6.6639	6.6636	6.6644	6.6637	6.6648	6.6643	6.6640	6.6648	6.6641	6.6652	6.6643	6.4080	2.0684	0.9226	55
	6	75	6.5386	6.5383	6.5391	6.5384	6.5395	6.5390	6.5387	6.5395	6.5388	6.5399	6.5390	6.2875	3.9095	1.3539	65
		90	6.6573	6.6570	6.6578	6.6571	6.6582	6.6577	6.6574	6.6582	6.6575	6.6586	6.6577	6.4016	2.1653	1.0338	52
		105	6.6721	6.6718	6.6726	6.6719	6.6730	6.6725	6.6722	6.6730	6.6723	6.6734	6.6725	6.4158	1.9479	0.7451	62
	9	75	6.5392	6.5389	6.5397	6.5390	6.5401	6.5396	6.5393	6.5401	6.5394	6.5405	6.5395	6.2880	3.9015	1.3529	65
		90	6.6704	6.6701	6.6709	6.6702	6.6713	6.6708	6.6705	6.6713	6.6706	6.6717	6.6708	6.4142	1.9728	1.0305	48
		105	6.6908	6.6905	6.6913	6.6906	6.6917	6.6912	6.6909	6.6917	6.6910	6.6921	6.6912	6.4338	1.6731	0.7403	56
30	3	75	6.3714	6.3711	6.3719	6.3712	6.3723	6.3718	6.3715	6.3723	6.3716	6.3727	6.3718	6.1267	6.3662	1.7500	73
		90	6.4758	6.4755	6.4763	6.4756	6.4767	6.4762	6.4759	6.4767	6.4760	6.4771	6.4761	6.2271	4.8330	1.4798	69
		105	6.5930	6.5927	6.5935	6.5928	6.5939	6.5934	6.5931	6.5939	6.5932	6.5943	6.5934	6.3398	3.1099	1.2610	59
	6	75	6.4765	6.4762	6.4770	6.4763	6.4774	6.4769	6.4766	6.4774	6.4767	6.4778	6.4768	6.2277	4.8229	1.4783	69
		90	6.6672	6.6669	6.6677	6.6670	6.6681	6.6676	6.6673	6.6681	6.6674	6.6685	6.6676	6.4112	2.0195	1.1531	43
		105	6.6650	6.6647	6.6655	6.6648	6.6659	6.6654	6.6651	6.6659	6.6652	6.6663	6.6654	6.4090	2.0522	0.8584	58
	9	75	6.4781	6.4778	6.4786	6.4779	6.4790	6.4785	6.4782	6.4790	6.4783	6.4794	6.4784	6.2293	4.7993	1.4748	69
		90	6.6709	6.6706	6.6714	6.6707	6.6718	6.6713	6.6710	6.6718	6.6711	6.6722	6.6712	6.4146	1.9662	1.1483	42
		105	6.6704	6.6701	6.6709	6.6702	6.6713	6.6708	6.6705	6.6713	6.6706	6.6717	6.6708	6.4142	1.9728	0.8544	57
50	3	75	6.2751	6.2748	6.2756	6.2749	6.2760	6.2755	6.2752	6.2760	6.2753	6.2764	6.2755	6.0341	7.7820	2.1049	73
		90	6.3376	6.3373	6.3381	6.3374	6.3385	6.3380	6.3377	6.3385	6.3378	6.3389	6.3380	6.0942	6.8628	1.8600	73
		105	6.3903	6.3900	6.3908	6.3901	6.3912	6.3907	6.3904	6.3912	6.3905	6.3916	6.3907	6.1449	6.0891	1.6941	72
	6	75	6.4239	6.4236	6.4244	6.4237	6.4248	6.4243	6.4240	6.4248	6.4241	6.4252	6.4243	6.1772	5.5950	1.6028	71
		90	6.5841	6.5838	6.5846	6.5839	6.5850	6.5845	6.5842	6.5850	6.5843	6.5854	6.5845	6.3313	3.2406	1.2753	61
		105	6.6295	6.6292	6.6300	6.6293	6.6304	6.6299	6.6296	6.6304	6.6297	6.6308	6.6299	6.3749	2.5739	0.9713	62
	9	75	6.4285	6.4282	6.4290	6.4283	6.4294	6.4289	6.4286	6.4294	6.4287	6.4298	6.4289	6.1816	5.5276	1.5911	71
		90	6.5911	6.5908	6.5916	6.5909	6.5920	6.5915	6.5912	6.5920	6.5913	6.5924	6.5915	6.3380	3.1376	1.2640	60
		105	6.6405	6.6402	6.6410	6.6403	6.6414	6.6409	6.6406	6.6414	6.6407	6.6418	6.6409	6.3855	2.4122	0.9611	60
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	62

ตาราง 65 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิสไตรีนที่มีอุณหภูมิโพลิสไตรีน 290 °C เวลาฉีด 4 s และความดันฉีด 700 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร		ความคลาด เคลื่อน (%)
			คูที่ 1	คูที่ 2	คูที่ 3	คูที่ 4	คูที่ 5	คูที่ 6	คูที่ 7	คูที่ 8	คูที่ 9	คูที่ 10			เฉลี่ย (%) EXP	เฉลี่ย (%) FEM	
10	3	75	6.5312	6.5308	6.5319	6.5309	6.5323	6.5317	6.5313	6.5324	6.5314	6.5328	6.5317	6.2904	4.0173	1.0739	73
		90	6.5996	6.5992	6.6003	6.5993	6.6007	6.6001	6.5997	6.6008	6.5998	6.6012	6.6001	6.3462	3.0119	0.8336	72
		105	6.6849	6.6845	6.6856	6.6846	6.6860	6.6854	6.6850	6.6861	6.6851	6.6865	6.6854	6.4282	1.7584	0.7783	56
	6	75	6.6840	6.6836	6.6847	6.6837	6.6851	6.6845	6.6841	6.6852	6.6842	6.6856	6.6845	6.4274	1.7715	0.9225	48
		90	6.7578	6.7574	6.7585	6.7575	6.7589	6.7583	6.7579	6.7590	6.7580	6.7594	6.7583	6.4983	0.6872	0.6032	12
		105	6.7678	6.7674	6.7685	6.7675	6.7689	6.7683	6.7679	6.7690	6.7680	6.7694	6.7683	6.5080	0.5402	0.4136	23
	9	75	6.6891	6.6887	6.6898	6.6888	6.6902	6.6896	6.6892	6.6903	6.6893	6.6907	6.6896	6.4323	1.6969	0.9182	46
		90	6.7612	6.7608	6.7619	6.7609	6.7623	6.7617	6.7613	6.7624	6.7614	6.7628	6.7617	6.5016	0.6372	0.5988	6
		105	6.7725	6.7721	6.7732	6.7722	6.7736	6.7730	6.7726	6.7737	6.7727	6.7741	6.7730	6.5125	0.4712	0.4111	13
30	3	75	6.3207	6.3203	6.3214	6.3204	6.3218	6.3212	6.3208	6.3219	6.3209	6.3223	6.3211	6.0780	7.1108	1.3876	80
		90	6.4326	6.4322	6.4333	6.4323	6.4337	6.4331	6.4327	6.4338	6.4328	6.4342	6.4331	6.1857	5.4654	1.2010	78
		105	6.4872	6.4868	6.4879	6.4869	6.4883	6.4877	6.4873	6.4884	6.4874	6.4888	6.4876	6.2381	4.6643	1.1272	76
	6	75	6.5618	6.5614	6.5625	6.5615	6.5629	6.5623	6.5619	6.5630	6.5620	6.5634	6.5623	6.3099	3.5672	1.0397	71
		90	6.5961	6.5957	6.5968	6.5958	6.5972	6.5966	6.5962	6.5973	6.5963	6.5977	6.5966	6.3429	3.0634	0.7163	77
		105	6.6904	6.6900	6.6911	6.6901	6.6915	6.6909	6.6905	6.6916	6.6906	6.6920	6.6909	6.4335	1.6776	0.5290	68
	9	75	6.5663	6.5659	6.5670	6.5660	6.5674	6.5668	6.5664	6.5675	6.5665	6.5679	6.5667	6.3142	3.5016	1.0349	70
		90	6.6023	6.6019	6.6030	6.6020	6.6034	6.6028	6.6024	6.6035	6.6025	6.6039	6.6028	6.3488	2.9722	0.7131	76
		105	6.6993	6.6989	6.7000	6.6990	6.7004	6.6998	6.6994	6.7005	6.6995	6.7009	6.6998	6.4421	1.5468	0.5265	66
50	3	75	6.1612	6.1608	6.1619	6.1609	6.1623	6.1617	6.1613	6.1624	6.1614	6.1628	6.1617	5.9247	9.4538	1.7818	81
		90	6.2046	6.2042	6.2053	6.2043	6.2057	6.2051	6.2047	6.2058	6.2048	6.2062	6.2051	5.9664	8.8160	1.6539	81
		105	6.2286	6.2282	6.2293	6.2283	6.2297	6.2291	6.2287	6.2298	6.2288	6.2302	6.2291	5.9895	8.4636	1.5908	81
	6	75	6.4627	6.4623	6.4634	6.4624	6.4638	6.4632	6.4628	6.4639	6.4629	6.4643	6.4632	6.2146	5.0231	1.1591	77
		90	6.5043	6.5039	6.5050	6.5040	6.5054	6.5048	6.5044	6.5055	6.5045	6.5059	6.5048	6.2546	4.4124	0.8282	81
		105	6.6418	6.6414	6.6425	6.6415	6.6429	6.6423	6.6419	6.6430	6.6420	6.6434	6.6423	6.3868	2.3918	0.6486	73
	9	75	6.4706	6.4702	6.4713	6.4703	6.4717	6.4711	6.4707	6.4718	6.4708	6.4722	6.4711	6.2222	4.9072	1.1486	77
		90	6.5246	6.5242	6.5253	6.5243	6.5257	6.5251	6.5247	6.5258	6.5248	6.5262	6.5251	6.2741	4.1140	0.8166	80
		105	6.6360	6.6356	6.6367	6.6357	6.6371	6.6365	6.6361	6.6372	6.6362	6.6376	6.6365	6.3812	2.4770	0.6305	75
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	64

ตาราง 66 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิโพลิโพรพิลีน 230 °C เวลาฉีด 1 s และความดันฉีด 400 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	5.5405	5.5402	5.5410	5.5403	5.5414	5.5409	5.5406	5.5414	5.5407	5.5418	5.5409	6.1566	5.9102	7.1155	20
		90	5.5436	5.5433	5.5441	5.5434	5.5445	5.5440	5.5437	5.5445	5.5438	5.5449	5.5439	6.1599	5.8590	6.9659	19
		105	5.5459	5.5456	5.5464	5.5457	5.5468	5.5463	5.5460	5.5468	5.5461	5.5472	5.5463	6.1625	5.8195	6.8550	18
	9	75	5.6563	5.6560	5.6568	5.6561	5.6572	5.6567	5.6564	5.6572	5.6565	5.6576	5.6567	6.2852	3.9442	3.9014	1
		90	5.6810	5.6807	5.6815	5.6808	5.6819	5.6814	5.6811	5.6819	5.6812	5.6823	5.6813	6.3126	3.5258	3.5593	1
		105	5.7092	5.7089	5.7097	5.7090	5.7101	5.7096	5.7093	5.7101	5.7094	5.7105	5.7096	6.3440	3.0463	3.2342	6
	15	75	5.6567	5.6564	5.6572	5.6565	5.6576	5.6571	5.6568	5.6576	5.6569	5.6580	5.6570	6.2856	3.9383	3.8961	1
		90	5.6813	5.6810	5.6818	5.6811	5.6822	5.6817	5.6814	5.6822	5.6815	5.6826	5.6817	6.3130	3.5191	3.5543	1
		105	5.7098	5.7095	5.7103	5.7096	5.7107	5.7102	5.7099	5.7107	5.7100	5.7111	5.7102	6.3446	3.0365	3.2282	6
30	3	75	5.5235	5.5232	5.5240	5.5233	5.5244	5.5239	5.5236	5.5244	5.5237	5.5248	5.5239	6.1377	6.1994	8.0965	31
		90	5.5255	5.5252	5.5260	5.5253	5.5264	5.5259	5.5256	5.5264	5.5257	5.5268	5.5259	6.1399	6.1649	7.9654	29
		105	5.5271	5.5268	5.5276	5.5269	5.5290	5.5275	5.5272	5.5290	5.5273	5.5284	5.5275	6.1417	6.1381	7.8667	28
	9	75	5.6368	5.6365	5.6373	5.6366	5.6377	5.6372	5.6369	5.6377	5.6370	5.6381	5.6372	6.2635	4.2761	4.2235	1
		90	5.6583	5.6580	5.6588	5.6581	5.6592	5.6587	5.6584	5.6592	5.6585	5.6596	5.6587	6.2874	3.9110	3.8719	1
		105	5.6824	5.6821	5.6829	5.6822	5.6833	5.6828	5.6825	5.6833	5.6826	5.6837	5.6828	6.3142	3.5013	3.5411	1
	15	75	5.6373	5.6370	5.6378	5.6371	5.6382	5.6377	5.6374	5.6382	5.6375	5.6386	5.6377	6.2641	4.2672	4.2142	1
		90	5.6592	5.6589	5.6597	5.6590	5.6601	5.6596	5.6593	5.6601	5.6594	5.6605	5.6596	6.2884	3.8953	3.8581	1
		105	5.6841	5.6838	5.6846	5.6839	5.6850	5.6845	5.6842	5.6850	5.6843	5.6854	5.6844	6.3160	3.4731	3.5204	1
50	3	75	5.5092	5.5089	5.5097	5.5090	5.5101	5.5096	5.5093	5.5101	5.5094	5.5105	5.5096	6.1218	6.4417	9.1541	42
		90	5.5104	5.5101	5.5109	5.5102	5.5113	5.5108	5.5105	5.5113	5.5106	5.5117	5.5108	6.1231	6.4212	9.0541	41
		105	5.5114	5.5111	5.5119	5.5112	5.5123	5.5118	5.5115	5.5123	5.5116	5.5127	5.5117	6.1242	6.4057	8.9797	40
	9	75	5.6194	5.6191	5.6199	5.6192	5.6203	5.6198	5.6195	5.6203	5.6196	5.6207	5.6198	6.2442	4.5704	4.5570	0
		90	5.6378	5.6375	5.6383	5.6376	5.6387	5.6382	5.6379	5.6387	5.6380	5.6391	5.6382	6.2646	4.2586	4.2052	1
		105	5.6586	5.6583	5.6591	5.6584	5.6595	5.6590	5.6587	5.6595	5.6588	5.6599	5.6589	6.2877	3.9063	3.8677	1
	15	75	5.6209	5.6206	5.6214	5.6207	5.6218	5.6213	5.6210	5.6218	5.6211	5.6222	5.6213	6.2459	4.5455	4.5268	0
		90	5.6400	5.6397	5.6405	5.6398	5.6409	5.6404	5.6401	5.6409	5.6402	5.6413	5.6403	6.2671	4.2218	4.1672	1
		105	5.6623	5.6620	5.6628	5.6621	5.6632	5.6627	5.6624	5.6632	5.6625	5.6636	5.6626	6.2918	3.8432	3.8129	1
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	11

ตาราง 67 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิโพลิโพรพิลีน 230 °C เวลาฉีด 1 s และความดันฉีด 550 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่ที่ 1	คู่ที่ 2	คู่ที่ 3	คู่ที่ 4	คู่ที่ 5	คู่ที่ 6	คู่ที่ 7	คู่ที่ 8	คู่ที่ 9	คู่ที่ 10					
10	3	75	5.4456	5.4452	5.4463	5.4453	5.4467	5.4461	5.4457	5.4468	5.4458	5.4472	5.4461	6.0512	7.5210	6.8685	9
		90	5.4481	5.4477	5.4488	5.4478	5.4492	5.4486	5.4482	5.4493	5.4483	5.4497	5.4485	6.0539	7.4789	6.7536	10
		105	5.4497	5.4493	5.4504	5.4494	5.4508	5.4502	5.4498	5.4509	5.4499	5.4513	5.4502	6.0558	7.4507	6.6787	10
	9	75	5.6053	5.6049	5.6060	5.6050	5.6064	5.6058	5.6054	5.6065	5.6055	5.6069	5.6058	6.2286	4.8090	3.2755	32
		90	5.6512	5.6508	5.6519	5.6509	5.6523	5.6517	5.6513	5.6524	5.6514	5.6528	5.6517	6.2796	4.0298	2.8475	29
		105	5.7084	5.7080	5.7091	5.7081	5.7095	5.7089	5.7085	5.7096	5.7086	5.7100	5.7089	6.3432	3.0580	2.4485	20
	15	75	5.6059	5.6055	5.6066	5.6056	5.6070	5.6064	5.6060	5.6071	5.6061	5.6075	5.6063	6.2293	4.7992	3.2693	32
		90	5.6526	5.6522	5.6533	5.6523	5.6537	5.6531	5.6527	5.6538	5.6528	5.6542	5.6530	6.2811	4.0065	2.8364	29
		105	5.7109	5.7105	5.7116	5.7106	5.7120	5.7114	5.7110	5.7121	5.7111	5.7125	5.7114	6.3460	3.0159	2.4337	19
30	3	75	5.4269	5.4265	5.4276	5.4266	5.4290	5.4274	5.4270	5.4281	5.4271	5.4285	5.4274	6.0305	7.8376	7.8775	1
		90	5.4284	5.4290	5.4291	5.4281	5.4295	5.4289	5.4285	5.4296	5.4286	5.4300	5.4289	6.0321	7.8122	7.7858	0
		105	5.4294	5.4290	5.4301	5.4291	5.4305	5.4299	5.4295	5.4306	5.4296	5.4310	5.4299	6.0332	7.7951	7.7250	1
	9	75	5.5790	5.5786	5.5797	5.5787	5.5801	5.5795	5.5791	5.5802	5.5792	5.5806	5.5795	6.1995	5.2548	3.5836	32
		90	5.6180	5.6176	5.6187	5.6177	5.6191	5.6185	5.6181	5.6192	5.6182	5.6196	5.6185	6.2428	4.5929	3.1444	32
		105	5.6640	5.6636	5.6647	5.6637	5.6651	5.6645	5.6641	5.6652	5.6642	5.6656	5.6645	6.2938	3.8125	2.7474	28
	15	75	5.5806	5.5802	5.5813	5.5803	5.5817	5.5811	5.5807	5.5818	5.5808	5.5822	5.5811	6.2012	5.2286	3.5639	32
		90	5.6213	5.6209	5.6220	5.6210	5.6224	5.6218	5.6214	5.6225	5.6215	5.6229	5.6217	6.2464	4.5379	3.1127	31
		105	5.6665	5.6661	5.6672	5.6662	5.6676	5.6670	5.6666	5.6677	5.6667	5.6681	5.6669	6.2966	3.7702	2.7287	28
50	3	75	5.4113	5.4109	5.4120	5.4110	5.4124	5.4118	5.4114	5.4125	5.4115	5.4129	5.4117	6.0130	8.1039	8.9876	11
		90	5.4122	5.4118	5.4129	5.4119	5.4133	5.4127	5.4123	5.4134	5.4124	5.4138	5.4127	6.0141	8.0882	8.9138	10
		105	5.4128	5.4124	5.4135	5.4125	5.4139	5.4133	5.4129	5.4140	5.4130	5.4144	5.4132	6.0147	8.0783	8.8675	10
	9	75	5.5557	5.5553	5.5564	5.5554	5.5568	5.5562	5.5558	5.5569	5.5559	5.5573	5.5562	6.1736	5.6507	3.9103	31
		90	5.5867	5.5863	5.5874	5.5864	5.5878	5.5872	5.5868	5.5879	5.5869	5.5883	5.5872	6.2080	5.1243	3.4876	32
		105	5.6223	5.6219	5.6230	5.6220	5.6234	5.6228	5.6224	5.6235	5.6225	5.6239	5.6227	6.2475	4.5210	3.1031	31
	15	75	5.5592	5.5588	5.5599	5.5589	5.5603	5.5597	5.5593	5.5604	5.5594	5.5608	5.5597	6.1775	5.5910	3.8573	31
		90	5.5929	5.5925	5.5936	5.5926	5.5940	5.5934	5.5930	5.5941	5.5931	5.5945	5.5933	6.2148	5.0202	3.4146	32
		105	5.6308	5.6304	5.6315	5.6305	5.6319	5.6313	5.6309	5.6320	5.6310	5.6324	5.6313	6.2570	4.3758	3.0229	31
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	22

ตาราง 68 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิโพลิโพรพิลีน 230 °C เวลาฉีด 1 s และความดันฉีด 700 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	5.4488	5.4485	5.4493	5.4486	5.4497	5.4492	5.4489	5.4497	5.4490	5.4501	5.4492	6.0546	7.4681	6.7205	10
		90	5.4508	5.4505	5.4513	5.4506	5.4517	5.4512	5.4509	5.4517	5.4510	5.4521	5.4511	6.0568	7.4348	6.6331	11
		105	5.4516	5.4513	5.4521	5.4514	5.4525	5.4520	5.4517	5.4525	5.4518	5.4529	5.4519	6.0577	7.4211	6.5980	11
	9	75	5.6717	5.6714	5.6722	5.6715	5.6726	5.6721	5.6718	5.6726	5.6719	5.6730	5.6721	6.3024	3.6822	2.6900	27
		90	5.7283	5.7290	5.7288	5.7281	5.7292	5.7287	5.7284	5.7292	5.7285	5.7296	5.7287	6.3652	2.7212	2.3346	14
		105	5.7543	5.7540	5.7548	5.7541	5.7552	5.7547	5.7544	5.7552	5.7545	5.7556	5.7547	6.3941	2.2908	2.2013	3
	15	75	5.6736	5.6733	5.6741	5.6734	5.6745	5.6740	5.6737	5.6745	5.6738	5.6749	5.6740	6.3044	3.6503	2.6765	27
		90	5.7314	5.7311	5.7319	5.7312	5.7323	5.7318	5.7315	5.7323	5.7316	5.7327	5.7318	6.3687	2.6691	2.3180	13
		105	5.7585	5.7582	5.7590	5.7583	5.7594	5.7589	5.7586	5.7594	5.7587	5.7598	5.7589	6.3988	2.2090	2.1810	1
30	3	75	5.4289	5.4286	5.4294	5.4287	5.4298	5.4293	5.4290	5.4298	5.4291	5.4302	5.4293	6.0325	7.8059	7.7579	1
		90	5.4302	5.4299	5.4307	5.4300	5.4311	5.4306	5.4303	5.4311	5.4304	5.4315	5.4306	6.0340	7.7834	7.6789	1
		105	5.4308	5.4305	5.4313	5.4306	5.4317	5.4312	5.4309	5.4317	5.4310	5.4321	5.4312	6.0346	7.7739	7.6460	2
	9	75	5.6331	5.6328	5.6336	5.6329	5.6340	5.6335	5.6332	5.6340	5.6333	5.6344	5.6335	6.2594	4.3383	3.0020	31
		90	5.6781	5.6778	5.6786	5.6779	5.6790	5.6785	5.6782	5.6790	5.6783	5.6794	5.6785	6.3094	3.5743	2.6448	26
		105	5.6934	5.6931	5.6939	5.6932	5.6943	5.6938	5.6935	5.6943	5.6936	5.6947	5.6938	6.3264	3.3147	2.5420	23
	15	75	5.6368	5.6365	5.6373	5.6366	5.6377	5.6372	5.6369	5.6377	5.6370	5.6381	5.6372	6.2635	4.2760	2.9693	31
		90	5.6842	5.6839	5.6847	5.6840	5.6851	5.6846	5.6843	5.6851	5.6844	5.6855	5.6846	6.3162	3.4704	2.6027	25
		105	5.7005	5.7002	5.7010	5.7003	5.7014	5.7009	5.7006	5.7014	5.7007	5.7018	5.7009	6.3343	3.1934	2.4967	22
50	3	75	5.4124	5.4121	5.4129	5.4122	5.4133	5.4128	5.4125	5.4133	5.4126	5.4137	5.4128	6.0142	8.0858	8.8952	10
		90	5.4132	5.4129	5.4137	5.4130	5.4141	5.4136	5.4133	5.4141	5.4134	5.4145	5.4136	6.0151	8.0718	8.8307	9
		105	5.4137	5.4134	5.4142	5.4135	5.4146	5.4141	5.4138	5.4146	5.4139	5.4150	5.4141	6.0157	8.0639	8.7944	9
	9	75	5.6009	5.6006	5.6014	5.6007	5.6018	5.6013	5.6010	5.6018	5.6011	5.6022	5.6012	6.2236	4.8859	3.3238	32
		90	5.6326	5.6323	5.6331	5.6324	5.6335	5.6330	5.6327	5.6335	5.6328	5.6339	5.6329	6.2588	4.3477	3.0070	31
		105	5.6436	5.6433	5.6441	5.6434	5.6445	5.6440	5.6437	5.6445	5.6438	5.6449	5.6440	6.2711	4.1602	2.9104	30
	15	75	5.6078	5.6075	5.6083	5.6076	5.6087	5.6082	5.6079	5.6087	5.6080	5.6091	5.6082	6.2313	4.7681	3.2489	32
		90	5.6424	5.6421	5.6429	5.6422	5.6433	5.6428	5.6425	5.6433	5.6426	5.6437	5.6428	6.2698	4.1804	2.9205	30
		105	5.6543	5.6540	5.6548	5.6541	5.6552	5.6547	5.6544	5.6552	5.6545	5.6556	5.6547	6.2829	3.9790	2.8227	29
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	18

ตาราง 69 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิโพลิโพรพิลีน 230 °C เวลาฉีด 2.5 s และความดันฉีด 400 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)	
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10						
10	3	75	5.5752	5.5748	5.5759	5.5749	5.5763	5.5757	5.5753	5.5764	5.5754	5.5768	5.5757	6.1952	5.3193	5.7062	7	
		90	5.5804	5.5800	5.5811	5.5801	5.5815	5.5809	5.5805	5.5816	5.5806	5.5820	5.5809	6.2010	5.2311	5.5420	6	
		105	5.5848	5.5844	5.5855	5.5845	5.5859	5.5853	5.5849	5.5860	5.5850	5.5864	5.5853	6.2059	5.1568	5.4107	5	
	9	75	5.6745	5.6741	5.6752	5.6742	5.6756	5.6750	5.6746	5.6757	5.6747	5.6761	5.6750	6.3055	3.6342	3.6432	0	
		90	5.7030	5.7026	5.7037	5.7027	5.7041	5.7035	5.7031	5.7042	5.7032	5.7046	5.7034	6.3371	3.1507	3.3008	5	
		105	5.7363	5.7359	5.7370	5.7360	5.7374	5.7368	5.7364	5.7375	5.7365	5.7379	5.7368	6.3742	2.5848	2.9737	15	
	15	75	5.6746	5.6742	5.6753	5.6743	5.6757	5.6751	5.6747	5.6758	5.6748	5.6762	5.6751	6.3056	3.6325	3.6419	0	
		90	5.7030	5.7026	5.7037	5.7027	5.7041	5.7035	5.7031	5.7042	5.7032	5.7046	5.7034	6.3372	3.1504	3.3006	5	
		105	5.7362	5.7358	5.7369	5.7359	5.7373	5.7367	5.7363	5.7374	5.7364	5.7378	5.7367	6.3741	2.5863	2.9745	15	
	30	3	75	5.5476	5.5472	5.5483	5.5473	5.5487	5.5481	5.5477	5.5488	5.5478	5.5492	5.5481	6.1645	5.7888	6.7751	17
			90	5.5507	5.5503	5.5514	5.5504	5.5518	5.5512	5.5508	5.5519	5.5509	5.5523	5.5512	6.1680	5.7360	6.6354	16
			105	5.5531	5.5527	5.5538	5.5528	5.5542	5.5536	5.5532	5.5543	5.5533	5.5547	5.5536	6.1707	5.6946	6.5298	15
9		75	5.6525	5.6521	5.6532	5.6522	5.6536	5.6530	5.6526	5.6537	5.6527	5.6541	5.6530	6.2811	4.0067	3.9597	1	
		90	5.6758	5.6754	5.6765	5.6755	5.6769	5.6763	5.6759	5.6770	5.6760	5.6774	5.6763	6.3070	3.6112	3.6253	0	
		105	5.7019	5.7015	5.7026	5.7016	5.7030	5.7024	5.7020	5.7031	5.7021	5.7035	5.7024	6.3360	3.1684	3.3122	5	
15		75	5.6527	5.6523	5.6534	5.6524	5.6538	5.6532	5.6528	5.6539	5.6529	5.6543	5.6532	6.2813	4.0035	3.9567	1	
		90	5.6762	5.6758	5.6769	5.6759	5.6773	5.6767	5.6763	5.6774	5.6764	5.6778	5.6766	6.3074	3.6055	3.6209	0	
		105	5.7027	5.7023	5.7034	5.7024	5.7038	5.7032	5.7028	5.7039	5.7029	5.7043	5.7032	6.3369	3.1544	3.3032	5	
50		3	75	5.5260	5.5256	5.5267	5.5257	5.5271	5.5265	5.5261	5.5272	5.5262	5.5276	5.5265	6.1405	6.1555	7.9361	29
			90	5.5277	5.5273	5.5284	5.5274	5.5288	5.5282	5.5278	5.5289	5.5279	5.5293	5.5282	6.1424	6.1268	7.8313	28
			105	5.5290	5.5286	5.5297	5.5287	5.5301	5.5295	5.5291	5.5302	5.5292	5.5306	5.5294	6.1438	6.1051	7.7537	27
	9	75	5.6319	5.6315	5.6326	5.6316	5.6330	5.6324	5.6320	5.6331	5.6321	5.6335	5.6324	6.2582	4.3565	4.3113	1	
		90	5.6520	5.6516	5.6527	5.6517	5.6531	5.6525	5.6521	5.6532	5.6522	5.6536	5.6525	6.2906	4.0152	3.9675	1	
		105	5.6749	5.6745	5.6756	5.6746	5.6760	5.6754	5.6750	5.6761	5.6751	5.6765	5.6754	6.3059	3.6274	3.6379	0	
	15	75	5.6329	5.6325	5.6336	5.6326	5.6340	5.6334	5.6330	5.6341	5.6331	5.6345	5.6334	6.2594	4.3395	4.2928	1	
		90	5.6534	5.6530	5.6541	5.6531	5.6545	5.6539	5.6535	5.6546	5.6536	5.6550	5.6538	6.2820	3.9929	3.9470	1	
		105	5.6773	5.6769	5.6780	5.6770	5.6784	5.6778	5.6774	5.6785	5.6775	5.6789	5.6778	6.3086	3.5865	3.6063	1	
	ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	8

ตาราง 70 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิพรพิลีนที่มีอุณหภูมิโพลิพรพิลีน 230 °C เวลาฉีด 2.5 s และความดันฉีด 550 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	5.4843	5.4840	5.4848	5.4841	5.4852	5.4847	5.4844	5.4852	5.4845	5.4856	5.4847	6.0941	6.8651	5.4258	21
		90	5.4893	5.4890	5.4898	5.4891	5.4902	5.4897	5.4894	5.4902	5.4895	5.4906	5.4897	6.0996	6.7802	5.2825	22
		105	5.4927	5.4924	5.4932	5.4925	5.4936	5.4931	5.4928	5.4936	5.4929	5.4940	5.4931	6.1035	6.7219	5.1883	23
	9	75	5.6316	5.6313	5.6321	5.6314	5.6325	5.6320	5.6317	5.6325	5.6318	5.6329	5.6320	6.2578	4.3632	3.0153	31
		90	5.6849	5.6846	5.6854	5.6847	5.6858	5.6853	5.6850	5.6858	5.6851	5.6862	5.6853	6.3170	3.4586	2.5980	25
		105	5.7509	5.7506	5.7514	5.7507	5.7518	5.7513	5.7510	5.7518	5.7511	5.7522	5.7513	6.3903	2.3378	2.2177	5
	15	75	5.6315	5.6312	5.6320	5.6313	5.6324	5.6319	5.6316	5.6324	5.6317	5.6328	5.6319	6.2577	4.3649	3.0162	31
		90	5.6850	5.6847	5.6855	5.6848	5.6859	5.6854	5.6851	5.6859	5.6852	5.6863	5.6854	6.3171	3.4569	2.5973	25
		105	5.7523	5.7520	5.7528	5.7521	5.7532	5.7527	5.7524	5.7532	5.7525	5.7536	5.7527	6.3919	2.3136	2.2107	4
30	3	75	5.4529	5.4526	5.4534	5.4527	5.4538	5.4533	5.4530	5.4538	5.4531	5.4542	5.4532	6.0592	7.3990	6.5417	12
		90	5.4556	5.4553	5.4561	5.4554	5.4565	5.4560	5.4557	5.4565	5.4558	5.4569	5.4560	6.0622	7.3522	6.4258	13
		105	5.4573	5.4570	5.4578	5.4571	5.4582	5.4577	5.4574	5.4582	5.4575	5.4586	5.4577	6.0641	7.3229	6.3554	13
	9	75	5.6003	5.6000	5.6008	5.6001	5.6012	5.6007	5.6004	5.6012	5.6005	5.6016	5.6007	6.2230	4.8957	3.3302	32
		90	5.6421	5.6418	5.6426	5.6419	5.6430	5.6425	5.6422	5.6430	5.6423	5.6434	5.6425	6.2694	4.1860	2.9233	30
		105	5.6942	5.6939	5.6947	5.6940	5.6951	5.6946	5.6943	5.6951	5.6944	5.6955	5.6946	6.3273	3.3010	2.5368	23
	15	75	5.6010	5.6007	5.6015	5.6008	5.6019	5.6014	5.6011	5.6019	5.6012	5.6023	5.6014	6.2238	4.8830	3.3219	32
		90	5.6439	5.6436	5.6444	5.6437	5.6448	5.6443	5.6440	5.6448	5.6441	5.6452	5.6443	6.2714	4.1550	2.9078	30
		105	5.6988	5.6985	5.6993	5.6986	5.6997	5.6992	5.6989	5.6997	5.6990	5.7001	5.6992	6.3324	3.2230	2.5076	22
50	3	75	5.4288	5.4285	5.4293	5.4286	5.4297	5.4292	5.4289	5.4297	5.4290	5.4301	5.4292	6.0325	7.8071	7.7619	1
		90	5.4302	5.4299	5.4307	5.4300	5.4311	5.4306	5.4303	5.4311	5.4304	5.4315	5.4306	6.0340	7.7836	7.6797	1
		105	5.4311	5.4308	5.4316	5.4309	5.4320	5.4315	5.4312	5.4320	5.4313	5.4324	5.4314	6.0349	7.7692	7.6297	2
	9	75	5.5728	5.5725	5.5733	5.5726	5.5737	5.5732	5.5729	5.5737	5.5730	5.5741	5.5732	6.1924	5.3628	3.6660	32
		90	5.6082	5.6079	5.6087	5.6080	5.6091	5.6086	5.6083	5.6091	5.6084	5.6095	5.6086	6.2318	4.7607	3.2443	32
		105	5.6501	5.6498	5.6506	5.6499	5.6510	5.6505	5.6502	5.6510	5.6503	5.6514	5.6504	6.2783	4.0503	2.8566	29
	15	75	5.5739	5.5736	5.5744	5.5737	5.5748	5.5743	5.5740	5.5748	5.5741	5.5752	5.5743	6.1937	5.3431	3.6505	32
		90	5.6127	5.6124	5.6132	5.6125	5.6136	5.6131	5.6128	5.6136	5.6129	5.6140	5.6131	6.2368	4.6848	3.1979	32
		105	5.6564	5.6561	5.6569	5.6562	5.6573	5.6568	5.6565	5.6573	5.6566	5.6577	5.6567	6.2853	3.9434	2.8061	29
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	22

ตาราง 71 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิโพลิโพรพิลีน 230 °C เวลาฉีด 2.5 s และความดันฉีด 700 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	5.4908	5.4904	5.4915	5.4905	5.4919	5.4913	5.4909	5.4920	5.4910	5.4924	5.4913	6.1015	6.7525	5.2398	22
		90	5.4945	5.4941	5.4952	5.4942	5.4956	5.4950	5.4946	5.4957	5.4947	5.4961	5.4950	6.1055	6.6908	5.1419	23
		105	5.4959	5.4955	5.4966	5.4956	5.4970	5.4964	5.4960	5.4971	5.4961	5.4975	5.4964	6.1071	6.6663	5.1040	23
	9	75	5.7048	5.7044	5.7055	5.7045	5.7059	5.7053	5.7049	5.7060	5.7050	5.7064	5.7052	6.3392	3.1198	2.4705	21
		90	5.7845	5.7841	5.7852	5.7842	5.7856	5.7850	5.7846	5.7857	5.7847	5.7861	5.7850	6.4277	1.7661	2.0640	17
		105	5.8045	5.8041	5.8052	5.8042	5.8056	5.8050	5.8046	5.8057	5.8047	5.8061	5.8050	6.4500	1.4264	1.9067	34
	15	75	5.7052	5.7048	5.7059	5.7049	5.7063	5.7057	5.7053	5.7064	5.7054	5.7068	5.7056	6.3396	3.1134	2.4682	21
		90	5.7871	5.7867	5.7878	5.7868	5.7882	5.7876	5.7872	5.7883	5.7873	5.7887	5.7875	6.4306	1.7224	2.0531	19
		105	5.8090	5.8086	5.8097	5.8087	5.8101	5.8095	5.8091	5.8102	5.8092	5.8106	5.8095	6.4550	1.3500	1.8903	40
30	3	75	5.4565	5.4561	5.4572	5.4562	5.4576	5.4570	5.4566	5.4577	5.4567	5.4581	5.4570	6.0633	7.3353	6.3886	13
		90	5.4584	5.4580	5.4591	5.4581	5.4595	5.4589	5.4585	5.4596	5.4586	5.4600	5.4589	6.0654	7.3034	6.3130	14
		105	5.4592	5.4588	5.4599	5.4589	5.4603	5.4597	5.4593	5.4604	5.4594	5.4608	5.4597	6.0663	7.2901	6.2818	14
	9	75	5.6616	5.6612	5.6623	5.6613	5.6627	5.6621	5.6617	5.6628	5.6618	5.6632	5.6621	6.2912	3.8532	2.7656	28
		90	5.7187	5.7183	5.7194	5.7184	5.7198	5.7192	5.7188	5.7199	5.7189	5.7203	5.7192	6.3547	2.8829	2.3882	17
		105	5.7420	5.7416	5.7427	5.7417	5.7431	5.7425	5.7421	5.7432	5.7422	5.7436	5.7425	6.3805	2.4876	2.2624	9
	15	75	5.6642	5.6638	5.6649	5.6639	5.6653	5.6647	5.6643	5.6654	5.6644	5.6658	5.6646	6.2940	3.8096	2.7461	28
		90	5.7255	5.7251	5.7262	5.7252	5.7266	5.7260	5.7256	5.7267	5.7257	5.7271	5.7260	6.3622	2.7680	2.3502	15
		105	5.7496	5.7492	5.7503	5.7493	5.7507	5.7501	5.7497	5.7508	5.7498	5.7512	5.7501	6.3890	2.3583	2.2241	6
50	3	75	5.4306	5.4302	5.4313	5.4303	5.4317	5.4311	5.4307	5.4318	5.4308	5.4322	5.4311	6.0345	7.7753	7.6562	2
		90	5.4317	5.4313	5.4324	5.4314	5.4328	5.4322	5.4318	5.4329	5.4319	5.4333	5.4322	6.0358	7.7565	7.5918	2
		105	5.4323	5.4319	5.4330	5.4320	5.4334	5.4328	5.4324	5.4335	5.4325	5.4339	5.4328	6.0364	7.7469	7.5593	2
	9	75	5.6242	5.6238	5.6249	5.6239	5.6253	5.6247	5.6243	5.6254	5.6244	5.6258	5.6247	6.2497	4.4877	3.0843	31
		90	5.6673	5.6669	5.6680	5.6670	5.6684	5.6678	5.6674	5.6685	5.6675	5.6689	5.6678	6.2975	3.7558	2.7224	28
		105	5.6810	5.6806	5.6817	5.6807	5.6821	5.6815	5.6811	5.6822	5.6812	5.6826	5.6814	6.3127	3.5241	2.6249	26
	15	75	5.6295	5.6291	5.6302	5.6292	5.6306	5.6300	5.6296	5.6307	5.6297	5.6311	5.6300	6.2555	4.3979	3.0348	31
		90	5.6749	5.6745	5.6756	5.6746	5.6760	5.6754	5.6750	5.6761	5.6751	5.6765	5.6754	6.3059	3.6274	2.6675	26
		105	5.6898	5.6894	5.6905	5.6895	5.6909	5.6903	5.6899	5.6910	5.6900	5.6914	5.6903	6.3225	3.3741	2.5654	24
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	20

ตาราง 72 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิโพลิโพรพิลีน 230 °C เวลาฉีด 4 s และความดันฉีด 400 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	5.6100	5.6097	5.6105	5.6098	5.6109	5.6104	5.6101	5.6109	5.6102	5.6113	5.6103	6.2337	4.7312	4.7626	1
		90	5.6191	5.6188	5.6196	5.6189	5.6200	5.6195	5.6192	5.6200	5.6193	5.6204	5.6195	6.2439	4.5755	4.5633	0
		105	5.6273	5.6270	5.6278	5.6271	5.6282	5.6277	5.6274	5.6282	5.6275	5.6286	5.6277	6.2530	4.4372	4.3998	1
	9	75	5.6945	5.6942	5.6950	5.6943	5.6954	5.6949	5.6946	5.6954	5.6947	5.6958	5.6949	6.3277	3.2954	3.3953	3
		90	5.7283	5.7290	5.7288	5.7281	5.7292	5.7287	5.7284	5.7292	5.7285	5.7296	5.7286	6.3652	2.7224	3.0463	12
		105	5.7662	5.7659	5.7667	5.7660	5.7671	5.7666	5.7663	5.7671	5.7664	5.7675	5.7665	6.4073	2.0791	2.7311	31
	15	75	5.6945	5.6942	5.6950	5.6943	5.6954	5.6949	5.6946	5.6954	5.6947	5.6958	5.6949	6.3277	3.2953	3.3952	3
		90	5.7283	5.7290	5.7288	5.7281	5.7292	5.7287	5.7284	5.7292	5.7285	5.7296	5.7286	6.3652	2.7224	3.0463	12
		105	5.7661	5.7658	5.7666	5.7659	5.7670	5.7665	5.7662	5.7670	5.7663	5.7674	5.7665	6.4072	2.0798	2.7314	31
30	3	75	5.5737	5.5734	5.5742	5.5735	5.5746	5.5741	5.5738	5.5746	5.5739	5.5750	5.5740	6.1934	5.3477	5.7581	8
		90	5.5783	5.5780	5.5788	5.5781	5.5792	5.5787	5.5784	5.5792	5.5785	5.5796	5.5787	6.1985	5.2694	5.6093	6
		105	5.5824	5.5821	5.5829	5.5822	5.5833	5.5828	5.5825	5.5833	5.5826	5.5837	5.5827	6.2031	5.2000	5.4835	5
	9	75	5.6681	5.6678	5.6686	5.6679	5.6690	5.6685	5.6682	5.6690	5.6683	5.6694	5.6685	6.2983	3.7437	3.7296	0
		90	5.6948	5.6945	5.6953	5.6946	5.6957	5.6952	5.6949	5.6957	5.6950	5.6961	5.6952	6.3290	3.2911	3.3924	3
		105	5.7277	5.7274	5.7282	5.7275	5.7286	5.7281	5.7278	5.7286	5.7279	5.7290	5.7290	6.3645	2.7327	3.0519	12
	15	75	5.6682	5.6679	5.6687	5.6680	5.6691	5.6686	5.6683	5.6691	5.6684	5.6695	5.6686	6.2984	3.7423	3.7285	0
		90	5.6949	5.6946	5.6954	5.6947	5.6958	5.6953	5.6950	5.6958	5.6951	5.6962	5.6953	6.3281	3.2894	3.3912	3
		105	5.7283	5.7290	5.7288	5.7281	5.7292	5.7287	5.7284	5.7292	5.7285	5.7296	5.7286	6.3652	2.7226	3.0464	12
50	3	75	5.5440	5.5437	5.5445	5.5438	5.5449	5.5444	5.5441	5.5449	5.5442	5.5453	5.5444	6.1605	5.8508	6.9425	19
		90	5.5465	5.5462	5.5470	5.5463	5.5474	5.5469	5.5466	5.5474	5.5467	5.5478	5.5469	6.1632	5.8089	6.8257	18
		105	5.5485	5.5482	5.5490	5.5483	5.5494	5.5489	5.5486	5.5494	5.5487	5.5498	5.5488	6.1654	5.7758	6.7361	17
	9	75	5.6453	5.6450	5.6458	5.6451	5.6462	5.6457	5.6454	5.6462	5.6455	5.6466	5.6457	6.2730	4.1315	4.0769	1
		90	5.6666	5.6663	5.6671	5.6664	5.6675	5.6670	5.6667	5.6675	5.6668	5.6679	5.6669	6.2966	3.7704	3.7516	0
		105	5.6927	5.6924	5.6932	5.6925	5.6936	5.6931	5.6928	5.6936	5.6929	5.6940	5.6931	6.3257	3.3260	3.4162	3
	15	75	5.6458	5.6455	5.6463	5.6456	5.6467	5.6462	5.6459	5.6467	5.6460	5.6471	5.6462	6.2736	4.1223	4.0679	1
		90	5.6678	5.6675	5.6683	5.6676	5.6687	5.6682	5.6679	5.6687	5.6680	5.6691	5.6682	6.2980	3.7486	3.7336	0
		105	5.6952	5.6949	5.6957	5.6950	5.6961	5.6956	5.6953	5.6961	5.6954	5.6965	5.6956	6.3284	3.2837	3.3874	3
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	8

ตาราง 73 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิพรอฟิลีนที่มีอุณหภูมิโพลิพรอฟิลีน 230 °C เวลาฉีด 4 s และความดันฉีด 550 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่ที่ 1	คู่ที่ 2	คู่ที่ 3	คู่ที่ 4	คู่ที่ 5	คู่ที่ 6	คู่ที่ 7	คู่ที่ 8	คู่ที่ 9	คู่ที่ 10					
10	3	75	5.5263	5.5259	5.5270	5.5260	5.5274	5.5268	5.5264	5.5275	5.5265	5.5279	5.5268	6.1409	6.1502	4.4186	28
		90	5.5364	5.5360	5.5371	5.5361	5.5375	5.5369	5.5365	5.5376	5.5366	5.5380	5.5368	6.1520	5.9796	4.2308	29
		105	5.5436	5.5432	5.5443	5.5433	5.5447	5.5441	5.5437	5.5448	5.5438	5.5452	5.5441	6.1601	5.8563	4.1047	30
	9	75	5.6607	5.6603	5.6614	5.6604	5.6618	5.6612	5.6608	5.6619	5.6609	5.6623	5.6612	6.2902	3.8683	2.7724	28
		90	5.7256	5.7252	5.7263	5.7253	5.7267	5.7261	5.7257	5.7268	5.7258	5.7272	5.7261	6.3623	2.7655	2.3494	15
		105	5.8086	5.8082	5.8093	5.8083	5.8097	5.8091	5.8087	5.8098	5.8088	5.8102	5.8090	6.4545	1.3573	1.9663	45
	15	75	5.6606	5.6602	5.6613	5.6603	5.6617	5.6611	5.6607	5.6618	5.6608	5.6622	5.6611	6.2901	3.8694	2.7729	28
		90	5.7257	5.7253	5.7264	5.7254	5.7268	5.7262	5.7258	5.7269	5.7259	5.7273	5.7262	6.3625	2.7637	2.3488	15
		105	5.8100	5.8096	5.8107	5.8097	5.8111	5.8105	5.8101	5.8112	5.8102	5.8116	5.8105	6.4561	1.3326	1.9607	47
30	3	75	5.4818	5.4814	5.4825	5.4815	5.4829	5.4823	5.4819	5.4830	5.4820	5.4834	5.4823	6.0914	6.9055	5.4995	20
		90	5.4868	5.4864	5.4875	5.4865	5.4879	5.4873	5.4869	5.4880	5.4870	5.4884	5.4872	6.0969	6.8218	5.3543	22
		105	5.4899	5.4895	5.4906	5.4896	5.4910	5.4904	5.4900	5.4911	5.4901	5.4915	5.4904	6.1004	6.7686	5.2660	22
	9	75	5.6233	5.6229	5.6240	5.6230	5.6244	5.6238	5.6234	5.6245	5.6235	5.6249	5.6237	6.2486	4.5037	3.0933	31
		90	5.6751	5.6747	5.6758	5.6748	5.6762	5.6756	5.6752	5.6763	5.6753	5.6767	5.6755	6.3062	3.6241	2.6661	26
		105	5.7399	5.7395	5.7406	5.7396	5.7410	5.7404	5.7400	5.7411	5.7401	5.7415	5.7403	6.3782	2.5239	2.2734	10
	15	75	5.6238	5.6234	5.6245	5.6235	5.6249	5.6243	5.6239	5.6250	5.6240	5.6254	5.6242	6.2491	4.4955	3.0887	31
		90	5.6767	5.6763	5.6774	5.6764	5.6778	5.6772	5.6768	5.6779	5.6769	5.6783	5.6771	6.3079	3.5972	2.6549	26
		105	5.7449	5.7445	5.7456	5.7446	5.7460	5.7454	5.7450	5.7461	5.7451	5.7465	5.7453	6.3837	2.4388	2.2478	8
50	3	75	5.4482	5.4478	5.4489	5.4479	5.4493	5.4487	5.4483	5.4494	5.4484	5.4498	5.4487	6.0541	7.4761	6.7461	10
		90	5.4505	5.4501	5.4512	5.4502	5.4516	5.4510	5.4506	5.4517	5.4507	5.4521	5.4510	6.0566	7.4379	6.6452	11
		105	5.4518	5.4514	5.4525	5.4515	5.4529	5.4523	5.4519	5.4530	5.4520	5.4534	5.4523	6.0581	7.4157	6.5879	11
	9	75	5.5900	5.5896	5.5907	5.5897	5.5911	5.5905	5.5901	5.5912	5.5902	5.5916	5.5904	6.2116	5.0693	3.4486	32
		90	5.6321	5.6317	5.6328	5.6318	5.6332	5.6326	5.6322	5.6333	5.6323	5.6337	5.6326	6.2584	4.3535	3.0109	31
		105	5.6827	5.6823	5.6834	5.6824	5.6838	5.6832	5.6828	5.6839	5.6829	5.6843	5.6832	6.3147	3.4944	2.6129	25
	15	75	5.5923	5.5919	5.5930	5.5920	5.5934	5.5928	5.5924	5.5935	5.5925	5.5939	5.5928	6.2142	5.0300	3.4213	32
		90	5.6374	5.6370	5.6381	5.6371	5.6385	5.6379	5.6375	5.6386	5.6376	5.6390	5.6379	6.2643	4.2634	2.9636	30
		105	5.6912	5.6908	5.6919	5.6909	5.6923	5.6917	5.6913	5.6924	5.6914	5.6928	5.6916	6.3240	3.3510	2.5565	24
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	25

ตาราง 74 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิพรอฟิลีนที่มีอุณหภูมิโพลิพรอฟิลีน 230 °C เวลาฉีด 4 s และความดันฉีด 700 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	5.5397	5.5394	5.5402	5.5395	5.5406	5.5401	5.5398	5.5406	5.5399	5.5410	5.5401	6.1557	5.9241	4.1715	30
		90	5.5459	5.5456	5.5464	5.5457	5.5468	5.5463	5.5460	5.5468	5.5461	5.5472	5.5463	6.1626	5.8185	4.0660	30
		105	5.5493	5.5490	5.5498	5.5491	5.5502	5.5497	5.5494	5.5502	5.5495	5.5506	5.5497	6.1663	5.7618	4.0116	30
	9	75	5.7533	5.7530	5.7538	5.7531	5.7542	5.7537	5.7534	5.7542	5.7535	5.7546	5.7537	6.3930	2.2972	2.2060	4
		90	5.7830	5.7827	5.7835	5.7828	5.7839	5.7834	5.7831	5.7839	5.7832	5.7843	5.7834	6.4260	1.7930	1.7761	1
		105	5.8068	5.8065	5.8073	5.8066	5.8077	5.8072	5.8069	5.8077	5.8070	5.8081	5.8072	6.4524	1.3889	1.5953	15
	15	75	5.7537	5.7534	5.7542	5.7535	5.7546	5.7541	5.7538	5.7546	5.7539	5.7550	5.7541	6.3934	2.2906	2.2041	4
		90	5.7858	5.7855	5.7863	5.7856	5.7867	5.7862	5.7859	5.7867	5.7860	5.7871	5.7862	6.4291	1.7455	1.7673	1
		105	5.8026	5.8023	5.8031	5.8024	5.8035	5.8030	5.8027	5.8035	5.8028	5.8039	5.8030	6.4478	1.4602	1.5809	8
30	3	75	5.4884	5.4881	5.4889	5.4882	5.4893	5.4888	5.4885	5.4893	5.4886	5.4897	5.4887	6.0986	6.7963	5.3091	22
		90	5.4914	5.4911	5.4919	5.4912	5.4923	5.4918	5.4915	5.4923	5.4916	5.4927	5.4917	6.1019	6.7454	5.2258	23
		105	5.4926	5.4923	5.4931	5.4924	5.4935	5.4930	5.4927	5.4935	5.4928	5.4939	5.4929	6.1033	6.7248	5.1930	23
	9	75	5.6978	5.6975	5.6983	5.6976	5.6987	5.6982	5.6979	5.6987	5.6980	5.6991	5.6982	6.3313	3.2403	2.5140	22
		90	5.7795	5.7792	5.7800	5.7793	5.7804	5.7799	5.7796	5.7804	5.7797	5.7808	5.7799	6.4221	1.8516	2.0853	13
		105	5.7907	5.7904	5.7912	5.7905	5.7916	5.7911	5.7908	5.7916	5.7909	5.7920	5.7911	6.4345	1.6623	1.9204	16
	15	75	5.7002	5.6999	5.7007	5.7000	5.7011	5.7006	5.7003	5.7011	5.7004	5.7015	5.7005	6.3339	3.1997	2.4990	22
		90	5.7860	5.7857	5.7865	5.7858	5.7869	5.7864	5.7861	5.7869	5.7862	5.7873	5.7864	6.4293	1.7416	2.0575	18
		105	5.8075	5.8072	5.8080	5.8073	5.8084	5.8079	5.8076	5.8084	5.8077	5.8088	5.8079	6.4532	1.3770	1.8956	38
50	3	75	5.4511	5.4508	5.4516	5.4509	5.4520	5.4515	5.4512	5.4520	5.4513	5.4524	5.4515	6.0572	7.4286	6.6173	11
		90	5.4526	5.4523	5.4531	5.4524	5.4535	5.4530	5.4527	5.4535	5.4528	5.4539	5.4530	6.0589	7.4030	6.5518	11
		105	5.4532	5.4529	5.4537	5.4530	5.4541	5.4536	5.4533	5.4541	5.4534	5.4545	5.4536	6.0595	7.3931	6.5270	12
	9	75	5.6509	5.6506	5.6514	5.6507	5.6518	5.6513	5.6510	5.6518	5.6511	5.6522	5.6513	6.2792	4.0355	2.8495	29
		90	5.7090	5.7087	5.7095	5.7088	5.7099	5.7094	5.7091	5.7099	5.7092	5.7103	5.7093	6.3437	3.0502	2.4452	20
		105	5.7315	5.7312	5.7320	5.7313	5.7324	5.7319	5.7316	5.7324	5.7317	5.7328	5.7319	6.3687	2.6679	2.3176	13
	15	75	5.6577	5.6574	5.6582	5.6575	5.6586	5.6581	5.6578	5.6586	5.6579	5.6590	5.6581	6.2867	3.9211	2.7958	29
		90	5.7178	5.7175	5.7183	5.7176	5.7187	5.7182	5.7179	5.7187	5.7180	5.7191	5.7182	6.3535	2.9005	2.3936	17
		105	5.7417	5.7414	5.7422	5.7415	5.7426	5.7421	5.7418	5.7426	5.7419	5.7430	5.7421	6.3801	2.4937	2.2638	9
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	17

ตาราง 75 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิพรอฟิลีนที่มีอุณหภูมิโพลิพรอฟิลีน 260 °C เวลาฉีด 1 s และความดันฉีด 400 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่ที่ 1	คู่ที่ 2	คู่ที่ 3	คู่ที่ 4	คู่ที่ 5	คู่ที่ 6	คู่ที่ 7	คู่ที่ 8	คู่ที่ 9	คู่ที่ 10					
10	3	75	5.5183	5.5179	5.5190	5.5180	5.5194	5.5188	5.5184	5.5195	5.5185	5.5199	5.5188	6.1320	6.2860	8.4518	34
		90	5.5198	5.5194	5.5205	5.5195	5.5209	5.5203	5.5199	5.5210	5.5200	5.5214	5.5203	6.1336	6.2608	8.3469	33
		105	5.5209	5.5205	5.5216	5.5206	5.5220	5.5214	5.5210	5.5221	5.5211	5.5225	5.5213	6.1348	6.2426	8.2730	33
	9	75	5.6584	5.6580	5.6591	5.6581	5.6595	5.6589	5.6585	5.6596	5.6586	5.6600	5.6588	6.2876	3.9077	3.8703	1
		90	5.6816	5.6812	5.6823	5.6813	5.6827	5.6821	5.6817	5.6828	5.6818	5.6832	5.6821	6.3134	3.5136	3.5513	1
		105	5.7083	5.7079	5.7090	5.7080	5.7094	5.7088	5.7084	5.7095	5.7085	5.7099	5.7088	6.3431	3.0598	3.2435	6
	15	75	5.6594	5.6590	5.6601	5.6591	5.6605	5.6599	5.6595	5.6606	5.6596	5.6610	5.6598	6.2887	3.8907	3.8554	1
		90	5.6831	5.6827	5.6838	5.6828	5.6842	5.6836	5.6832	5.6843	5.6833	5.6847	5.6835	6.3150	3.4884	3.5327	1
		105	5.7112	5.7108	5.7119	5.7109	5.7123	5.7117	5.7113	5.7124	5.7114	5.7128	5.7117	6.3463	3.0104	3.2132	7
30	3	75	5.5062	5.5058	5.5069	5.5059	5.5073	5.5067	5.5063	5.5074	5.5064	5.5078	5.5067	6.1185	6.4916	9.4154	45
		90	5.5072	5.5068	5.5079	5.5069	5.5083	5.5077	5.5073	5.5084	5.5074	5.5088	5.5077	6.1196	6.4749	9.3286	44
		105	5.5079	5.5075	5.5086	5.5076	5.5090	5.5084	5.5080	5.5091	5.5081	5.5095	5.5083	6.1204	6.4634	9.2704	43
	9	75	5.6350	5.6346	5.6357	5.6347	5.6361	5.6355	5.6351	5.6362	5.6352	5.6366	5.6355	6.2617	4.3041	4.2547	1
		90	5.6552	5.6548	5.6559	5.6549	5.6563	5.6557	5.6553	5.6564	5.6554	5.6568	5.6557	6.2841	3.9618	3.9186	1
		105	5.6774	5.6770	5.6781	5.6771	5.6785	5.6779	5.6775	5.6786	5.6776	5.6790	5.6779	6.3087	3.5847	3.6049	1
	15	75	5.6389	5.6385	5.6396	5.6386	5.6400	5.6394	5.6390	5.6401	5.6391	5.6405	5.6393	6.2659	4.2393	4.1867	1
		90	5.6592	5.6588	5.6599	5.6589	5.6603	5.6597	5.6593	5.6604	5.6594	5.6608	5.6596	6.2885	3.8943	3.8585	1
		105	5.6839	5.6835	5.6846	5.6836	5.6850	5.6844	5.6840	5.6851	5.6841	5.6855	5.6844	6.3160	3.4741	3.5222	1
50	3	75	5.4955	5.4951	5.4962	5.4952	5.4966	5.4960	5.4956	5.4967	5.4957	5.4971	5.4960	6.1066	6.6736	10.4719	57
		90	5.4962	5.4958	5.4969	5.4959	5.4973	5.4967	5.4963	5.4974	5.4964	5.4978	5.4966	6.1074	6.6620	10.3978	56
		105	5.4967	5.4963	5.4974	5.4964	5.4978	5.4972	5.4968	5.4979	5.4969	5.4983	5.4971	6.1079	6.6535	10.3435	55
	9	75	5.6115	5.6111	5.6122	5.6112	5.6126	5.6120	5.6116	5.6127	5.6117	5.6131	5.6119	6.2355	4.7043	4.7289	1
		90	5.6264	5.6260	5.6271	5.6261	5.6275	5.6269	5.6265	5.6276	5.6266	5.6290	5.6268	6.2520	4.4512	4.4176	1
		105	5.6427	5.6423	5.6434	5.6424	5.6438	5.6432	5.6428	5.6439	5.6429	5.6443	5.6432	6.2702	4.1742	4.1206	1
	15	75	5.6205	5.6201	5.6212	5.6202	5.6216	5.6210	5.6206	5.6217	5.6207	5.6221	5.6210	6.2456	4.5501	4.5342	0
		90	5.6397	5.6393	5.6404	5.6394	5.6408	5.6402	5.6398	5.6409	5.6399	5.6413	5.6401	6.2668	4.2255	4.1726	1
		105	5.6611	5.6607	5.6618	5.6608	5.6622	5.6616	5.6612	5.6623	5.6613	5.6627	5.6616	6.2906	3.8613	3.8298	1
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	16

ตาราง 76 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิโพลิโพรพิลีน 260 °C เวลาฉีด 1 s และความดันฉีด 550 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่อย (s)	ความดัน ย่อย (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	5.4208	5.4205	5.4213	5.4206	5.4217	5.4212	5.4209	5.4217	5.4210	5.4221	5.4211	6.0235	7.9442	8.2909	4
		90	5.4218	5.4215	5.4223	5.4216	5.4227	5.4222	5.4219	5.4227	5.4220	5.4231	5.4222	6.0247	7.9257	8.2071	4
		105	5.4225	5.4222	5.4230	5.4223	5.4234	5.4229	5.4226	5.4234	5.4227	5.4238	5.4229	6.0254	7.9142	8.1617	3
	9	75	5.6045	5.6042	5.6050	5.6043	5.6054	5.6049	5.6046	5.6054	5.6047	5.6058	5.6049	6.2277	4.8234	3.2836	32
		90	5.6503	5.6500	5.6508	5.6501	5.6512	5.6507	5.6504	5.6512	5.6505	5.6516	5.6507	6.2785	4.0464	2.8547	29
		105	5.7011	5.7008	5.7016	5.7009	5.7020	5.7015	5.7012	5.7020	5.7013	5.7024	5.7015	6.3349	3.1842	2.4933	22
	15	75	5.6073	5.6070	5.6078	5.6071	5.6082	5.6077	5.6074	5.6082	5.6075	5.6086	5.6076	6.2307	4.7773	3.2546	32
		90	5.6544	5.6541	5.6549	5.6542	5.6553	5.6548	5.6545	5.6553	5.6546	5.6557	5.6547	6.2830	3.9775	2.8220	29
		105	5.7077	5.7074	5.7082	5.7075	5.7086	5.7081	5.7078	5.7086	5.7079	5.7090	5.7081	6.3423	3.0717	2.4528	20
30	3	75	5.4078	5.4075	5.4083	5.4076	5.4087	5.4082	5.4079	5.4087	5.4080	5.4091	5.4082	6.0091	8.1644	9.2770	14
		90	5.4085	5.4082	5.4090	5.4083	5.4094	5.4089	5.4086	5.4094	5.4087	5.4098	5.4089	6.0099	8.1525	9.2171	13
		105	5.4090	5.4087	5.4095	5.4088	5.4099	5.4094	5.4091	5.4099	5.4092	5.4103	5.4094	6.0104	8.1443	9.1764	13
	9	75	5.5751	5.5748	5.5756	5.5749	5.5760	5.5755	5.5752	5.5760	5.5753	5.5764	5.5755	6.1950	5.3229	3.6347	32
		90	5.6104	5.6101	5.6109	5.6102	5.6113	5.6108	5.6105	5.6113	5.6106	5.6117	5.6108	6.2342	4.7237	3.2215	32
		105	5.6491	5.6488	5.6496	5.6489	5.6500	5.6495	5.6492	5.6500	5.6493	5.6504	5.6495	6.2772	4.0669	2.8646	30
	15	75	5.5805	5.5802	5.5810	5.5803	5.5814	5.5809	5.5806	5.5814	5.5807	5.5818	5.5809	6.2010	5.2317	3.5651	32
		90	5.6204	5.6201	5.6209	5.6202	5.6213	5.6208	5.6205	5.6213	5.6206	5.6217	5.6207	6.2453	4.5548	3.1215	31
		105	5.6653	5.6650	5.6658	5.6651	5.6662	5.6657	5.6654	5.6662	5.6655	5.6666	5.6657	6.2952	3.7915	2.7374	28
50	3	75	5.3966	5.3963	5.3971	5.3964	5.3975	5.3970	5.3967	5.3975	5.3968	5.3979	5.3970	5.9967	8.3540	10.3495	24
		90	5.3972	5.3969	5.3977	5.3970	5.3981	5.3976	5.3973	5.3981	5.3974	5.3985	5.3975	5.9973	8.3449	10.2923	23
		105	5.3976	5.3973	5.3981	5.3974	5.3985	5.3980	5.3977	5.3985	5.3978	5.3989	5.3979	5.9977	8.3380	10.2495	23
	9	75	5.5405	5.5402	5.5410	5.5403	5.5414	5.5409	5.5406	5.5414	5.5407	5.5418	5.5409	6.1566	5.9104	4.1575	30
		90	5.5656	5.5653	5.5661	5.5654	5.5665	5.5660	5.5657	5.5665	5.5658	5.5669	5.5660	6.1844	5.4845	3.7649	31
		105	5.5886	5.5883	5.5891	5.5884	5.5895	5.5890	5.5887	5.5895	5.5888	5.5899	5.5889	6.2099	5.0947	3.4654	32
	15	75	5.5582	5.5579	5.5587	5.5580	5.5591	5.5586	5.5583	5.5591	5.5584	5.5595	5.5586	6.1762	5.6099	3.8726	31
		90	5.5916	5.5913	5.5921	5.5914	5.5925	5.5920	5.5917	5.5925	5.5918	5.5929	5.5919	6.2133	5.0438	3.4298	32
		105	5.6261	5.6258	5.6266	5.6259	5.6270	5.6265	5.6262	5.6270	5.6263	5.6274	5.6265	6.2516	4.4572	3.0665	31
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	24

ตาราง 77 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิพรอฟิลีนที่มีอุณหภูมิโพลิพรอฟิลีน 260 °C เวลาฉีด 1 s และความดันฉีด 700 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่ที่ 1	คู่ที่ 2	คู่ที่ 3	คู่ที่ 4	คู่ที่ 5	คู่ที่ 6	คู่ที่ 7	คู่ที่ 8	คู่ที่ 9	คู่ที่ 10					
10	3	75	5.4222	5.4218	5.4229	5.4219	5.4233	5.4227	5.4223	5.4234	5.4224	5.4238	5.4226	6.0251	7.9190	8.1863	3
		90	5.4231	5.4227	5.4238	5.4228	5.4242	5.4236	5.4232	5.4243	5.4233	5.4247	5.4236	6.0262	7.9031	8.1243	3
		105	5.4236	5.4232	5.4243	5.4233	5.4247	5.4241	5.4237	5.4248	5.4238	5.4252	5.4240	6.0267	7.8950	8.0927	3
	9	75	5.6686	5.6682	5.6693	5.6683	5.6697	5.6691	5.6687	5.6698	5.6688	5.6702	5.6690	6.2989	3.7346	2.7132	27
		90	5.7212	5.7208	5.7219	5.7209	5.7223	5.7217	5.7213	5.7224	5.7214	5.7228	5.7216	6.3574	2.8416	2.3744	16
		105	5.7433	5.7429	5.7440	5.7430	5.7444	5.7438	5.7434	5.7445	5.7435	5.7449	5.7437	6.3819	2.4663	2.2560	9
	15	75	5.6732	5.6728	5.6739	5.6729	5.6743	5.6737	5.6733	5.6744	5.6734	5.6748	5.6737	6.3041	3.6562	2.6796	27
		90	5.7301	5.7297	5.7308	5.7298	5.7312	5.7306	5.7302	5.7313	5.7303	5.7317	5.7306	6.3673	2.6893	2.3249	14
		105	5.7545	5.7541	5.7552	5.7542	5.7556	5.7550	5.7546	5.7557	5.7547	5.7561	5.7550	6.3944	2.2754	2.2002	3
30	3	75	5.4087	5.4083	5.4094	5.4084	5.4098	5.4092	5.4088	5.4099	5.4089	5.4103	5.4091	6.0102	8.1478	9.2014	13
		90	5.4094	5.4090	5.4101	5.4091	5.4105	5.4099	5.4095	5.4106	5.4096	5.4110	5.4098	6.0109	8.1362	9.1440	12
		105	5.4098	5.4094	5.4105	5.4095	5.4109	5.4103	5.4099	5.4110	5.4100	5.4114	5.4102	6.0114	8.1296	9.1114	12
	9	75	5.6238	5.6234	5.6245	5.6235	5.6249	5.6243	5.6239	5.6250	5.6240	5.6254	5.6242	6.2491	4.4955	3.0887	31
		90	5.6601	5.6597	5.6608	5.6598	5.6612	5.6606	5.6602	5.6613	5.6603	5.6617	5.6606	6.2896	3.8780	2.7768	28
		105	5.6740	5.6736	5.6747	5.6737	5.6751	5.6745	5.6741	5.6752	5.6742	5.6756	5.6745	6.3050	3.6424	2.6738	27
	15	75	5.6358	5.6354	5.6365	5.6355	5.6369	5.6363	5.6359	5.6370	5.6360	5.6374	5.6362	6.2625	4.2917	2.9783	31
		90	5.6758	5.6754	5.6765	5.6755	5.6769	5.6763	5.6759	5.6770	5.6760	5.6774	5.6763	6.3070	3.6116	2.6609	26
		105	5.6918	5.6914	5.6925	5.6915	5.6929	5.6923	5.6919	5.6930	5.6920	5.6934	5.6923	6.3248	3.3396	2.5521	24
50	3	75	5.3973	5.3969	5.3980	5.3970	5.3984	5.3978	5.3974	5.3985	5.3975	5.3989	5.3978	5.9975	8.3412	10.2787	23
		90	5.3978	5.3974	5.3985	5.3975	5.3989	5.3983	5.3979	5.3990	5.3980	5.3994	5.3983	5.9981	8.3319	10.2209	23
		105	5.3982	5.3978	5.3989	5.3979	5.3993	5.3987	5.3983	5.3994	5.3984	5.3998	5.3986	5.9985	8.3261	10.1855	22
	9	75	5.5755	5.5751	5.5762	5.5752	5.5766	5.5760	5.5756	5.5767	5.5757	5.5771	5.5760	6.1956	5.3146	3.6294	32
		90	5.5941	5.5937	5.5948	5.5938	5.5952	5.5946	5.5942	5.5953	5.5943	5.5957	5.5946	6.2162	4.9984	3.3997	32
		105	5.5996	5.5992	5.6003	5.5993	5.6007	5.6001	5.5997	5.6008	5.5998	5.6012	5.6001	6.2223	4.9050	3.3373	32
	15	75	5.6047	5.6043	5.6054	5.6044	5.6058	5.6052	5.6048	5.6059	5.6049	5.6063	5.6051	6.2279	4.8196	3.2822	32
		90	5.6343	5.6339	5.6350	5.6340	5.6354	5.6348	5.6344	5.6355	5.6345	5.6359	5.6348	6.2609	4.3161	2.9911	31
		105	5.6461	5.6457	5.6468	5.6458	5.6472	5.6466	5.6462	5.6473	5.6463	5.6477	5.6466	6.2739	4.1165	2.8895	30
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	21

ตาราง 78 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิพรพิลีนที่มีอุณหภูมิโพลิพรพิลีน 260 °C เวลาฉีด 2.5 s และความดันฉีด 400 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	5.5427	5.5424	5.5432	5.5425	5.5436	5.5431	5.5428	5.5436	5.5429	5.5440	5.5431	6.1590	5.8735	7.0076	19
		90	5.5451	5.5448	5.5456	5.5449	5.5460	5.5455	5.5452	5.5460	5.5453	5.5464	5.5454	6.1616	5.8334	6.8937	18
		105	5.5469	5.5466	5.5474	5.5467	5.5478	5.5473	5.5470	5.5478	5.5471	5.5482	5.5473	6.1637	5.8018	6.8062	17
	9	75	5.6763	5.6760	5.6768	5.6761	5.6772	5.6767	5.6764	5.6772	5.6765	5.6776	5.6767	6.3074	3.6047	3.6191	0
		90	5.7036	5.7033	5.7041	5.7034	5.7045	5.7040	5.7037	5.7045	5.7038	5.7049	5.7040	6.3378	3.1405	3.2933	5
		105	5.7351	5.7348	5.7356	5.7349	5.7360	5.7355	5.7352	5.7360	5.7353	5.7364	5.7355	6.3728	2.6057	2.9838	15
	15	75	5.6769	5.6766	5.6774	5.6767	5.6778	5.6773	5.6770	5.6778	5.6771	5.6782	5.6772	6.3080	3.5953	3.6119	0
		90	5.7047	5.7044	5.7052	5.7045	5.7056	5.7051	5.7048	5.7056	5.7049	5.7060	5.7050	6.3389	3.1232	3.2823	5
		105	5.7368	5.7365	5.7373	5.7366	5.7377	5.7372	5.7369	5.7377	5.7370	5.7381	5.7371	6.3746	2.5781	2.9694	15
30	3	75	5.5236	5.5233	5.5241	5.5234	5.5245	5.5240	5.5237	5.5245	5.5238	5.5249	5.5240	6.1377	6.1981	8.0914	31
		90	5.5250	5.5247	5.5255	5.5248	5.5259	5.5254	5.5251	5.5259	5.5252	5.5263	5.5254	6.1393	6.1745	8.0016	30
		105	5.5260	5.5257	5.5265	5.5258	5.5269	5.5264	5.5261	5.5269	5.5262	5.5273	5.5263	6.1404	6.1576	7.9385	29
	9	75	5.6518	5.6515	5.6523	5.6516	5.6527	5.6522	5.6519	5.6527	5.6520	5.6531	5.6522	6.2902	4.0203	3.9708	1
		90	5.6748	5.6745	5.6753	5.6746	5.6757	5.6752	5.6749	5.6757	5.6750	5.6761	5.6752	6.3057	3.6308	3.6394	0
		105	5.7019	5.7016	5.7024	5.7017	5.7028	5.7023	5.7020	5.7028	5.7021	5.7032	5.7023	6.3358	3.1705	3.3126	4
	15	75	5.6533	5.6530	5.6538	5.6531	5.6542	5.6537	5.6534	5.6542	5.6535	5.6546	5.6537	6.2818	3.9959	3.9483	1
		90	5.6777	5.6774	5.6782	5.6775	5.6786	5.6781	5.6778	5.6786	5.6779	5.6790	5.6781	6.3090	3.5807	3.6007	1
		105	5.7054	5.7051	5.7059	5.7052	5.7063	5.7058	5.7055	5.7063	5.7056	5.7067	5.7058	6.3397	3.1111	3.2746	5
50	3	75	5.5077	5.5074	5.5082	5.5075	5.5086	5.5081	5.5078	5.5086	5.5079	5.5090	5.5081	6.1201	6.4671	9.2810	44
		90	5.5086	5.5083	5.5091	5.5084	5.5095	5.5090	5.5087	5.5095	5.5088	5.5099	5.5090	6.1211	6.4528	9.2094	43
		105	5.5092	5.5089	5.5097	5.5090	5.5101	5.5096	5.5093	5.5101	5.5094	5.5105	5.5095	6.1217	6.4431	9.1610	42
	9	75	5.6267	5.6264	5.6272	5.6265	5.6276	5.6271	5.6268	5.6276	5.6269	5.6290	5.6270	6.2523	4.4479	4.4120	1
		90	5.6453	5.6450	5.6458	5.6451	5.6462	5.6457	5.6454	5.6462	5.6455	5.6466	5.6457	6.2730	4.1315	4.0769	1
		105	5.6656	5.6653	5.6661	5.6654	5.6665	5.6660	5.6657	5.6665	5.6658	5.6669	5.6660	6.2956	3.7860	3.7646	1
	15	75	5.6325	5.6322	5.6330	5.6323	5.6334	5.6329	5.6326	5.6334	5.6327	5.6338	5.6329	6.2587	4.3489	4.3014	1
		90	5.6528	5.6525	5.6533	5.6526	5.6537	5.6532	5.6529	5.6537	5.6530	5.6541	5.6532	6.2814	4.0032	3.9550	1
		105	5.6766	5.6763	5.6771	5.6764	5.6775	5.6770	5.6767	5.6775	5.6768	5.6779	5.6769	6.3077	3.6005	3.6159	0
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	12

ตาราง 79 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิพรพิลีนที่มีอุณหภูมิโพลิพรพิลีน 260 °C เวลาฉีด 2.5 s และความดันฉีด 550 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่ที่ 1	คู่ที่ 2	คู่ที่ 3	คู่ที่ 4	คู่ที่ 5	คู่ที่ 6	คู่ที่ 7	คู่ที่ 8	คู่ที่ 9	คู่ที่ 10					
10	3	75	5.4467	5.4463	5.4474	5.4464	5.4478	5.4472	5.4468	5.4479	5.4469	5.4483	5.4472	6.0524	7.5017	6.8153	9
		90	5.4486	5.4482	5.4493	5.4483	5.4497	5.4491	5.4487	5.4498	5.4488	5.4502	5.4491	6.0546	7.4695	6.7283	10
		105	5.4497	5.4493	5.4504	5.4494	5.4508	5.4502	5.4498	5.4509	5.4499	5.4513	5.4502	6.0558	7.4510	6.6794	10
	9	75	5.6306	5.6302	5.6313	5.6303	5.6317	5.6311	5.6307	5.6318	5.6308	5.6322	5.6311	6.2568	4.3792	3.0247	31
		90	5.6835	5.6831	5.6842	5.6832	5.6846	5.6840	5.6836	5.6847	5.6837	5.6851	5.6839	6.3155	3.4819	2.6079	25
		105	5.7435	5.7431	5.7442	5.7432	5.7446	5.7440	5.7436	5.7447	5.7437	5.7451	5.7440	6.3822	2.4616	2.2546	8
	15	75	5.6322	5.6318	5.6329	5.6319	5.6333	5.6327	5.6323	5.6334	5.6324	5.6338	5.6327	6.2585	4.3525	3.0104	31
		90	5.6865	5.6861	5.6872	5.6862	5.6876	5.6870	5.6866	5.6877	5.6867	5.6881	5.6869	6.3188	3.4306	2.5875	25
		105	5.7513	5.7509	5.7520	5.7510	5.7524	5.7518	5.7514	5.7525	5.7515	5.7529	5.7518	6.3909	2.3290	2.2156	5
30	3	75	5.4259	5.4255	5.4266	5.4256	5.4270	5.4264	5.4260	5.4271	5.4261	5.4275	5.4263	6.0293	7.8560	7.9453	1
		90	5.4269	5.4265	5.4276	5.4266	5.4290	5.4274	5.4270	5.4281	5.4271	5.4285	5.4273	6.0304	7.8387	7.8815	1
		105	5.4276	5.4272	5.4283	5.4273	5.4287	5.4281	5.4277	5.4288	5.4278	5.4292	5.4281	6.0312	7.8267	7.8378	0
	9	75	5.5981	5.5977	5.5988	5.5978	5.5992	5.5986	5.5982	5.5993	5.5983	5.5997	5.5986	6.2207	4.9307	3.3542	32
		90	5.6380	5.6376	5.6387	5.6377	5.6391	5.6385	5.6381	5.6392	5.6382	5.6396	5.6385	6.2650	4.2538	2.9586	30
		105	5.6847	5.6843	5.6854	5.6844	5.6858	5.6852	5.6848	5.6859	5.6849	5.6863	5.6852	6.3168	3.4609	2.5995	25
	15	75	5.6015	5.6011	5.6022	5.6012	5.6026	5.6020	5.6016	5.6027	5.6017	5.6031	5.6020	6.2244	4.8731	3.3165	32
		90	5.6435	5.6431	5.6442	5.6432	5.6446	5.6440	5.6436	5.6447	5.6437	5.6451	5.6440	6.2711	4.1599	2.9110	30
		105	5.6937	5.6933	5.6944	5.6934	5.6948	5.6942	5.6938	5.6949	5.6939	5.6953	5.6942	6.3269	3.3073	2.5398	23
50	3	75	5.4091	5.4087	5.4098	5.4088	5.4102	5.4096	5.4092	5.4103	5.4093	5.4107	5.4096	6.0106	8.1407	9.1664	13
		90	5.4097	5.4093	5.4104	5.4094	5.4108	5.4102	5.4098	5.4109	5.4099	5.4113	5.4101	6.0113	8.1309	9.1180	12
		105	5.4101	5.4097	5.4108	5.4098	5.4112	5.4106	5.4102	5.4113	5.4103	5.4117	5.4106	6.0118	8.1235	9.0821	12
	9	75	5.5629	5.5625	5.5636	5.5626	5.5640	5.5634	5.5630	5.5641	5.5631	5.5645	5.5633	6.1815	5.5295	3.8042	31
		90	5.5945	5.5941	5.5952	5.5942	5.5956	5.5950	5.5946	5.5957	5.5947	5.5961	5.5950	6.2167	4.9917	3.3951	32
		105	5.6239	5.6235	5.6246	5.6236	5.6250	5.6244	5.6240	5.6251	5.6241	5.6255	5.6244	6.2493	4.4925	3.0870	31
	15	75	5.5733	5.5729	5.5740	5.5730	5.5744	5.5738	5.5734	5.5745	5.5735	5.5749	5.5737	6.1930	5.3532	3.6596	32
		90	5.6114	5.6110	5.6121	5.6111	5.6125	5.6119	5.6115	5.6126	5.6116	5.6130	5.6118	6.2354	4.7061	3.2117	32
		105	5.6499	5.6495	5.6506	5.6496	5.6510	5.6504	5.6500	5.6511	5.6501	5.6515	5.6504	6.2782	4.0511	2.8577	29
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	20

ตาราง 80 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิพรพิลีนที่มีอุณหภูมิโพลิพรพิลีน 260 °C เวลาฉีด 2.5 s และความดันฉีด 700 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	5.4492	5.4489	5.4497	5.4490	5.4501	5.4496	5.4493	5.4501	5.4494	5.4505	5.4496	6.0551	7.4612	6.7022	10
		90	5.4506	5.4503	5.4511	5.4504	5.4515	5.4510	5.4507	5.4515	5.4508	5.4519	5.4510	6.0566	7.4378	6.6410	11
		105	5.4512	5.4509	5.4517	5.4510	5.4521	5.4516	5.4513	5.4521	5.4514	5.4525	5.4516	6.0573	7.4271	6.6134	11
	9	75	5.7030	5.7027	5.7035	5.7028	5.7039	5.7034	5.7031	5.7039	5.7032	5.7043	5.7034	6.3371	3.1515	2.4814	21
		90	5.7759	5.7756	5.7764	5.7757	5.7768	5.7763	5.7760	5.7768	5.7761	5.7772	5.7762	6.4180	1.9144	2.1015	10
		105	5.8086	5.8083	5.8091	5.8084	5.8095	5.8090	5.8087	5.8095	5.8088	5.8099	5.8089	6.4544	1.3588	1.9663	45
	15	75	5.7066	5.7063	5.7071	5.7064	5.7075	5.7070	5.7067	5.7075	5.7068	5.7079	5.7070	6.3411	3.0906	2.4595	20
		90	5.7809	5.7806	5.7814	5.7807	5.7818	5.7813	5.7810	5.7818	5.7811	5.7822	5.7813	6.4237	1.8281	2.0793	14
		105	5.8056	5.8053	5.8061	5.8054	5.8065	5.8060	5.8057	5.8065	5.8058	5.8069	5.8060	6.4511	1.4092	1.9395	38
30	3	75	5.4272	5.4269	5.4277	5.4270	5.4281	5.4276	5.4273	5.4281	5.4274	5.4285	5.4276	6.0306	7.8351	7.8628	0
		90	5.4281	5.4278	5.4286	5.4279	5.4290	5.4285	5.4282	5.4290	5.4283	5.4294	5.4285	6.0317	7.8188	7.8038	0
		105	5.4286	5.4283	5.4291	5.4284	5.4295	5.4290	5.4287	5.4295	5.4288	5.4299	5.4290	6.0322	7.8107	7.7749	0
	9	75	5.6565	5.6562	5.6570	5.6563	5.6574	5.6569	5.6566	5.6574	5.6567	5.6578	5.6569	6.2854	3.9408	2.8049	29
		90	5.7056	5.7053	5.7061	5.7054	5.7065	5.7060	5.7057	5.7065	5.7058	5.7069	5.7060	6.3400	3.1065	2.4652	21
		105	5.7255	5.7252	5.7260	5.7253	5.7264	5.7259	5.7256	5.7264	5.7257	5.7268	5.7259	6.3621	2.7698	2.3503	15
	15	75	5.6635	5.6632	5.6640	5.6633	5.6644	5.6639	5.6636	5.6644	5.6637	5.6648	5.6639	6.2932	3.8224	2.7511	28
		90	5.7172	5.7169	5.7177	5.7170	5.7181	5.7176	5.7173	5.7181	5.7174	5.7185	5.7176	6.3528	2.9109	2.3971	18
		105	5.7397	5.7394	5.7402	5.7395	5.7406	5.7401	5.7398	5.7406	5.7399	5.7410	5.7401	6.3779	2.5277	2.2741	10
50	3	75	5.4098	5.4095	5.4103	5.4096	5.4107	5.4102	5.4099	5.4107	5.4100	5.4111	5.4102	6.0113	8.1304	9.1082	12
		90	5.4104	5.4101	5.4109	5.4102	5.4113	5.4108	5.4105	5.4113	5.4106	5.4117	5.4108	6.0120	8.1194	9.0547	12
		105	5.4108	5.4105	5.4113	5.4106	5.4117	5.4112	5.4109	5.4117	5.4110	5.4121	5.4112	6.0125	8.1127	9.0224	11
	9	75	5.6063	5.6060	5.6068	5.6061	5.6072	5.6067	5.6064	5.6072	5.6065	5.6076	5.6067	6.2297	4.7933	3.2646	32
		90	5.6335	5.6332	5.6340	5.6333	5.6344	5.6339	5.6336	5.6344	5.6337	5.6348	5.6338	6.2598	4.3324	2.9989	31
		105	5.6397	5.6394	5.6402	5.6395	5.6406	5.6401	5.6398	5.6406	5.6399	5.6410	5.6401	6.2667	4.2266	2.9439	30
	15	75	5.6259	5.6256	5.6264	5.6257	5.6268	5.6263	5.6260	5.6268	5.6261	5.6272	5.6263	6.2515	4.4599	3.0680	31
		90	5.6651	5.6648	5.6656	5.6649	5.6660	5.6655	5.6652	5.6660	5.6653	5.6664	5.6655	6.2950	3.7944	2.7387	28
		105	5.6797	5.6794	5.6802	5.6795	5.6806	5.6801	5.6798	5.6806	5.6799	5.6810	5.6800	6.3112	3.5477	2.6339	26
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	19

ตาราง 81 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิพรอฟิลีนที่มีอุณหภูมิโพลิพรอฟิลีน 260 °C เวลาฉีด 4 s และความดันฉีด 400 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่ที่ 1	คู่ที่ 2	คู่ที่ 3	คู่ที่ 4	คู่ที่ 5	คู่ที่ 6	คู่ที่ 7	คู่ที่ 8	คู่ที่ 9	คู่ที่ 10					
10	3	75	5.5701	5.5697	5.5708	5.5698	5.5712	5.5706	5.5702	5.5713	5.5703	5.5717	5.5706	6.1895	5.4064	5.8782	9
		90	5.5737	5.5733	5.5744	5.5734	5.5748	5.5742	5.5738	5.5749	5.5739	5.5753	5.5742	6.1935	5.3457	5.7573	8
		105	5.5765	5.5761	5.5772	5.5762	5.5776	5.5770	5.5766	5.5777	5.5767	5.5781	5.5770	6.1967	5.2973	5.6644	7
	9	75	5.6981	5.6977	5.6988	5.6978	5.6992	5.6986	5.6982	5.6993	5.6983	5.6997	5.6985	6.3317	3.2338	3.3550	4
		90	5.7297	5.7293	5.7304	5.7294	5.7308	5.7302	5.7298	5.7309	5.7299	5.7313	5.7302	6.3669	2.6965	3.0330	12
		105	5.7660	5.7656	5.7667	5.7657	5.7671	5.7665	5.7661	5.7672	5.7662	5.7676	5.7665	6.4072	2.0801	2.7322	31
	15	75	5.6986	5.6982	5.6993	5.6983	5.6997	5.6991	5.6987	5.6998	5.6988	5.7002	5.6991	6.3323	3.2241	3.3486	4
		90	5.7304	5.7300	5.7311	5.7301	5.7315	5.7309	5.7305	5.7316	5.7306	5.7320	5.7309	6.3676	2.6850	3.0268	13
		105	5.7670	5.7666	5.7677	5.7667	5.7681	5.7675	5.7671	5.7682	5.7672	5.7686	5.7675	6.4083	2.0630	2.7247	32
30	3	75	5.5428	5.5424	5.5435	5.5425	5.5439	5.5433	5.5429	5.5440	5.5430	5.5444	5.5433	6.1592	5.8695	7.0005	19
		90	5.5448	5.5444	5.5455	5.5445	5.5459	5.5453	5.5449	5.5460	5.5450	5.5464	5.5453	6.1615	5.8356	6.9041	18
		105	5.5465	5.5461	5.5472	5.5462	5.5476	5.5470	5.5466	5.5477	5.5467	5.5481	5.5470	6.1633	5.8071	6.8249	18
	9	75	5.6681	5.6677	5.6688	5.6678	5.6692	5.6686	5.6682	5.6693	5.6683	5.6697	5.6686	6.2985	3.7419	3.7294	0
		90	5.6940	5.6936	5.6947	5.6937	5.6951	5.6945	5.6941	5.6952	5.6942	5.6956	5.6944	6.3272	3.3033	3.4017	3
		105	5.7240	5.7236	5.7247	5.7237	5.7251	5.7245	5.7241	5.7252	5.7242	5.7256	5.7245	6.3605	2.7930	3.0862	10
	15	75	5.6691	5.6687	5.6698	5.6688	5.6702	5.6696	5.6692	5.6703	5.6693	5.6707	5.6695	6.2995	3.7264	3.7167	0
		90	5.6955	5.6951	5.6962	5.6952	5.6966	5.6960	5.6956	5.6967	5.6957	5.6971	5.6960	6.3289	3.2769	3.3838	3
		105	5.7265	5.7261	5.7272	5.7262	5.7276	5.7270	5.7266	5.7277	5.7267	5.7281	5.7269	6.3633	2.7515	3.0631	11
50	3	75	5.5206	5.5202	5.5213	5.5203	5.5217	5.5211	5.5207	5.5218	5.5208	5.5222	5.5210	6.1345	6.2480	8.2950	33
		90	5.5216	5.5212	5.5223	5.5213	5.5227	5.5221	5.5217	5.5228	5.5218	5.5232	5.5221	6.1357	6.2295	8.2207	32
		105	5.5224	5.5220	5.5231	5.5221	5.5235	5.5229	5.5225	5.5236	5.5226	5.5240	5.5229	6.1365	6.2163	8.1685	31
	9	75	5.6399	5.6395	5.6406	5.6396	5.6410	5.6404	5.6400	5.6411	5.6401	5.6415	5.6403	6.2670	4.2219	4.1689	1
		90	5.6610	5.6606	5.6617	5.6607	5.6621	5.6615	5.6611	5.6622	5.6612	5.6626	5.6615	6.2905	3.8634	3.8316	1
		105	5.6840	5.6836	5.6847	5.6837	5.6851	5.6845	5.6841	5.6852	5.6842	5.6856	5.6845	6.3161	3.4724	3.5210	1
	15	75	5.6440	5.6436	5.6447	5.6437	5.6451	5.6445	5.6441	5.6452	5.6442	5.6456	5.6444	6.2716	4.1525	4.0990	1
		90	5.6668	5.6664	5.6675	5.6665	5.6679	5.6673	5.6669	5.6680	5.6670	5.6684	5.6673	6.2970	3.7649	3.7483	0
		105	5.6927	5.6923	5.6934	5.6924	5.6938	5.6932	5.6928	5.6939	5.6929	5.6943	5.6932	6.3257	3.3252	3.4167	3
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	11

ตาราง 82 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิโพลิโพรพิลีน 260 °C เวลาฉีด 4 s และความดันฉีด 550 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่ที่ 1	คู่ที่ 2	คู่ที่ 3	คู่ที่ 4	คู่ที่ 5	คู่ที่ 6	คู่ที่ 7	คู่ที่ 8	คู่ที่ 9	คู่ที่ 10					
10	3	75	5.4762	5.4759	5.4767	5.4760	5.4771	5.4766	5.4763	5.4771	5.4764	5.4775	5.4766	6.0851	7.0024	5.6747	19
		90	5.4797	5.4794	5.4802	5.4795	5.4806	5.4801	5.4798	5.4806	5.4799	5.4810	5.4800	6.0889	6.9439	5.5659	20
		105	5.4819	5.4816	5.4824	5.4817	5.4828	5.4823	5.4820	5.4828	5.4821	5.4832	5.4823	6.0915	6.9053	5.4964	20
	9	75	5.6607	5.6604	5.6612	5.6605	5.6616	5.6611	5.6608	5.6616	5.6609	5.6620	5.6611	6.2901	3.8694	2.7722	28
		90	5.7218	5.7215	5.7223	5.7216	5.7227	5.7222	5.7219	5.7227	5.7220	5.7231	5.7222	6.3580	2.8320	2.3707	16
		105	5.7975	5.7972	5.7980	5.7973	5.7984	5.7979	5.7976	5.7984	5.7977	5.7988	5.7979	6.4421	1.5466	2.0100	30
	15	75	5.6616	5.6613	5.6621	5.6614	5.6625	5.6620	5.6617	5.6625	5.6618	5.6629	5.6620	6.2911	3.8545	2.7655	28
		90	5.7239	5.7236	5.7244	5.7237	5.7248	5.7243	5.7240	5.7248	5.7241	5.7252	5.7243	6.3603	2.7964	2.3590	16
		105	5.8015	5.8012	5.8020	5.8013	5.8024	5.8019	5.8016	5.8024	5.8017	5.8028	5.8019	6.4466	1.4784	1.9939	35
30	3	75	5.4462	5.4459	5.4467	5.4460	5.4471	5.4466	5.4463	5.4471	5.4464	5.4475	5.4466	6.0518	7.5120	6.8395	9
		90	5.4480	5.4477	5.4485	5.4478	5.4489	5.4484	5.4481	5.4489	5.4482	5.4493	5.4484	6.0538	7.4815	6.7564	10
		105	5.4488	5.4485	5.4493	5.4486	5.4497	5.4492	5.4489	5.4497	5.4490	5.4501	5.4492	6.0547	7.4678	6.7197	10
	9	75	5.6198	5.6195	5.6203	5.6196	5.6207	5.6202	5.6199	5.6207	5.6200	5.6211	5.6201	6.2446	4.5651	3.1274	31
		90	5.6679	5.6676	5.6684	5.6677	5.6688	5.6683	5.6680	5.6688	5.6681	5.6692	5.6683	6.2981	3.7479	2.7183	27
		105	5.7249	5.7246	5.7254	5.7247	5.7258	5.7253	5.7250	5.7258	5.7251	5.7262	5.7253	6.3615	2.7790	2.3533	15
	15	75	5.6221	5.6218	5.6226	5.6219	5.6230	5.6225	5.6222	5.6230	5.6223	5.6234	5.6224	6.2471	4.5261	3.1051	31
		90	5.6721	5.6718	5.6726	5.6719	5.6730	5.6725	5.6722	5.6730	5.6723	5.6734	5.6724	6.3027	3.6770	2.6878	27
		105	5.7339	5.7336	5.7344	5.7337	5.7348	5.7343	5.7340	5.7348	5.7341	5.7352	5.7343	6.3714	2.6268	2.3047	12
50	3	75	5.4223	5.4220	5.4228	5.4221	5.4232	5.4227	5.4224	5.4232	5.4225	5.4236	5.4227	6.0252	7.9175	8.1747	3
		90	5.4231	5.4228	5.4236	5.4229	5.4240	5.4235	5.4232	5.4240	5.4233	5.4244	5.4235	6.0261	7.9037	8.1206	3
		105	5.4237	5.4234	5.4242	5.4235	5.4246	5.4241	5.4238	5.4246	5.4239	5.4250	5.4241	6.0268	7.8939	8.0829	2
	9	75	5.5808	5.5805	5.5813	5.5806	5.5817	5.5812	5.5809	5.5817	5.5810	5.5821	5.5812	6.2013	5.2265	3.5612	32
		90	5.6188	5.6185	5.6193	5.6186	5.6197	5.6192	5.6189	5.6197	5.6190	5.6201	5.6192	6.2436	4.5808	3.1365	32
		105	5.6606	5.6603	5.6611	5.6604	5.6615	5.6610	5.6607	5.6615	5.6608	5.6619	5.6610	6.2900	3.8709	2.7729	28
	15	75	5.5891	5.5888	5.5896	5.5889	5.5900	5.5895	5.5892	5.5900	5.5893	5.5904	5.5895	6.2105	5.0857	3.4591	32
		90	5.6314	5.6311	5.6319	5.6312	5.6323	5.6318	5.6315	5.6323	5.6316	5.6327	5.6317	6.2575	4.3681	3.0179	31
		105	5.6785	5.6782	5.6790	5.6783	5.6794	5.6789	5.6786	5.6794	5.6787	5.6798	5.6789	6.3099	3.5670	2.6418	26
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	21

ตาราง 83 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิโพลิโพรพิลีน 260 °C เวลาฉีด 4 s และความดันฉีด 700 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่อที่ 1	คู่อที่ 2	คู่อที่ 3	คู่อที่ 4	คู่อที่ 5	คู่อที่ 6	คู่อที่ 7	คู่อที่ 8	คู่อที่ 9	คู่อที่ 10					
10	3	75	5.4808	5.4804	5.4815	5.4805	5.4819	5.4813	5.4809	5.4820	5.4810	5.4824	5.4813	6.0903	6.9229	5.5306	20
		90	5.4832	5.4828	5.4839	5.4829	5.4843	5.4837	5.4833	5.4844	5.4834	5.4848	5.4837	6.0930	6.8817	5.4573	21
		105	5.4841	5.4837	5.4848	5.4838	5.4852	5.4846	5.4842	5.4853	5.4843	5.4857	5.4846	6.0940	6.8667	5.4312	21
	9	75	5.7502	5.7498	5.7509	5.7499	5.7513	5.7507	5.7503	5.7514	5.7504	5.7518	5.7507	6.3897	2.3476	2.2210	5
		90	5.7750	5.7746	5.7757	5.7747	5.7761	5.7755	5.7751	5.7762	5.7752	5.7766	5.7755	6.4172	1.9273	1.8350	5
		105	5.7917	5.7913	5.7924	5.7914	5.7928	5.7922	5.7918	5.7929	5.7919	5.7933	5.7922	6.4357	1.6438	1.6620	1
	15	75	5.7529	5.7525	5.7536	5.7526	5.7540	5.7534	5.7530	5.7541	5.7531	5.7545	5.7534	6.3927	2.3023	2.2079	4
		90	5.7816	5.7812	5.7823	5.7813	5.7827	5.7821	5.7817	5.7828	5.7818	5.7832	5.7821	6.4245	1.8153	1.8129	0
		105	5.8030	5.8026	5.8037	5.8027	5.8041	5.8035	5.8031	5.8042	5.8032	5.8046	5.8035	6.4483	1.4519	1.6313	12
30	3	75	5.4485	5.4481	5.4492	5.4482	5.4496	5.4490	5.4486	5.4497	5.4487	5.4501	5.4490	6.0544	7.4718	6.7345	10
		90	5.4495	5.4491	5.4502	5.4492	5.4506	5.4500	5.4496	5.4507	5.4497	5.4511	5.4500	6.0556	7.4540	6.6874	10
		105	5.4501	5.4497	5.4508	5.4498	5.4512	5.4506	5.4502	5.4513	5.4503	5.4517	5.4506	6.0562	7.4441	6.6613	11
	9	75	5.6892	5.6888	5.6899	5.6889	5.6903	5.6897	5.6893	5.6904	5.6894	5.6908	5.6897	6.3219	3.3838	2.5692	24
		90	5.7566	5.7562	5.7573	5.7563	5.7577	5.7571	5.7567	5.7578	5.7568	5.7582	5.7570	6.3967	2.2401	2.1902	2
		105	5.7849	5.7845	5.7856	5.7846	5.7860	5.7854	5.7850	5.7861	5.7851	5.7865	5.7854	6.4282	1.7585	2.0621	17
	15	75	5.6957	5.6953	5.6964	5.6954	5.6968	5.6962	5.6958	5.6969	5.6959	5.6973	5.6961	6.3290	3.2745	2.5274	23
		90	5.7674	5.7670	5.7681	5.7671	5.7685	5.7679	5.7675	5.7686	5.7676	5.7690	5.7679	6.4087	2.0564	2.1395	4
		105	5.7975	5.7971	5.7982	5.7972	5.7986	5.7980	5.7976	5.7987	5.7977	5.7991	5.7979	6.4421	1.5459	2.0102	30
50	3	75	5.4233	5.4229	5.4240	5.4230	5.4244	5.4238	5.4234	5.4245	5.4235	5.4249	5.4238	6.0265	7.8989	8.1079	3
		90	5.4241	5.4237	5.4248	5.4238	5.4252	5.4246	5.4242	5.4253	5.4243	5.4257	5.4246	6.0273	7.8852	8.0551	2
		105	5.4246	5.4242	5.4253	5.4243	5.4257	5.4251	5.4247	5.4258	5.4248	5.4262	5.4251	6.0279	7.8775	8.0258	2
	9	75	5.6350	5.6346	5.6357	5.6347	5.6361	5.6355	5.6351	5.6362	5.6352	5.6366	5.6355	6.2616	4.3045	2.9850	31
		90	5.6772	5.6768	5.6779	5.6769	5.6783	5.6777	5.6773	5.6784	5.6774	5.6788	5.6777	6.3085	3.5883	2.6512	26
		105	5.6895	5.6891	5.6902	5.6892	5.6906	5.6900	5.6896	5.6907	5.6897	5.6911	5.6900	6.3222	3.3790	2.5673	24
	15	75	5.6488	5.6484	5.6495	5.6485	5.6499	5.6493	5.6489	5.6500	5.6490	5.6504	5.6493	6.2770	4.0696	2.8666	30
		90	5.7012	5.7008	5.7019	5.7009	5.7023	5.7017	5.7013	5.7024	5.7014	5.7028	5.7017	6.3352	3.1805	2.4925	22
		105	5.7230	5.7226	5.7237	5.7227	5.7241	5.7235	5.7231	5.7242	5.7232	5.7246	5.7234	6.3594	2.8107	2.3642	16
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	14

ตาราง 84 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิโพลิโพรพิลีน 290 °C เวลาฉีด 1 s และความดันฉีด 400 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่ที่ 1	คู่ที่ 2	คู่ที่ 3	คู่ที่ 4	คู่ที่ 5	คู่ที่ 6	คู่ที่ 7	คู่ที่ 8	คู่ที่ 9	คู่ที่ 10					
10	3	75	5.5037	5.5034	5.5042	5.5035	5.5046	5.5041	5.5038	5.5046	5.5039	5.5050	5.5041	6.1157	6.5351	9.6395	48
		90	5.5045	5.5042	5.5050	5.5043	5.5054	5.5049	5.5046	5.5054	5.5047	5.5058	5.5049	6.1165	6.5220	9.5684	47
		105	5.5050	5.5047	5.5055	5.5048	5.5059	5.5054	5.5051	5.5059	5.5052	5.5063	5.5054	6.1171	6.5129	9.5196	46
	9	75	5.6533	5.6530	5.6538	5.6531	5.6542	5.6537	5.6534	5.6542	5.6535	5.6546	5.6537	6.2819	3.9953	3.9478	1
		90	5.6746	5.6743	5.6751	5.6744	5.6755	5.6750	5.6747	5.6755	5.6748	5.6759	5.6750	6.3056	3.6330	3.6411	0
		105	5.6991	5.6988	5.6996	5.6989	5.7000	5.6995	5.6992	5.7000	5.6993	5.7004	5.6995	6.3327	3.2181	3.3436	4
	15	75	5.6611	5.6608	5.6616	5.6609	5.6620	5.6615	5.6612	5.6620	5.6613	5.6624	5.6615	6.2906	3.8625	3.8295	1
		90	5.6846	5.6843	5.6851	5.6844	5.6855	5.6850	5.6847	5.6855	5.6848	5.6859	5.6850	6.3167	3.4635	3.5134	1
		105	5.7119	5.7116	5.7124	5.7117	5.7128	5.7123	5.7120	5.7128	5.7121	5.7132	5.7123	6.3470	3.0006	3.2063	7
30	3	75	5.4943	5.4940	5.4948	5.4941	5.4952	5.4947	5.4944	5.4952	5.4945	5.4956	5.4946	6.1052	6.6960	10.6082	58
		90	5.4948	5.4945	5.4953	5.4946	5.4957	5.4952	5.4949	5.4957	5.4950	5.4961	5.4952	6.1058	6.6864	10.5451	58
		105	5.4953	5.4950	5.4958	5.4951	5.4962	5.4957	5.4954	5.4962	5.4955	5.4966	5.4956	6.1063	6.6792	10.4983	57
	9	75	5.6267	5.6264	5.6272	5.6265	5.6276	5.6271	5.6268	5.6276	5.6269	5.6290	5.6270	6.2523	4.4478	4.4119	1
		90	5.6422	5.6419	5.6427	5.6420	5.6431	5.6426	5.6423	5.6431	5.6424	5.6435	5.6426	6.2696	4.1834	4.1283	1
		105	5.6605	5.6602	5.6610	5.6603	5.6614	5.6609	5.6606	5.6614	5.6607	5.6618	5.6608	6.2898	3.8739	3.8394	1
	15	75	5.6397	5.6394	5.6402	5.6395	5.6406	5.6401	5.6398	5.6406	5.6399	5.6410	5.6401	6.2668	4.2262	4.1717	1
		90	5.6592	5.6589	5.6597	5.6590	5.6601	5.6596	5.6593	5.6601	5.6594	5.6605	5.6596	6.2884	3.8949	3.8577	1
		105	5.6836	5.6833	5.6841	5.6834	5.6845	5.6840	5.6837	5.6845	5.6838	5.6849	5.6840	6.3156	3.4802	3.5256	1
50	3	75	5.4863	5.4860	5.4868	5.4861	5.4872	5.4867	5.4864	5.4872	5.4865	5.4876	5.4867	6.0963	6.8314	11.5886	70
		90	5.4867	5.4864	5.4872	5.4865	5.4876	5.4871	5.4868	5.4876	5.4869	5.4880	5.4871	6.0968	6.8236	11.5276	69
		105	5.4871	5.4868	5.4876	5.4869	5.4880	5.4875	5.4872	5.4880	5.4873	5.4884	5.4875	6.0972	6.8181	11.4842	68
	9	75	5.5966	5.5963	5.5971	5.5964	5.5975	5.5970	5.5967	5.5975	5.5968	5.5979	5.5970	6.2189	4.9582	5.0864	3
		90	5.6077	5.6074	5.6082	5.6075	5.6086	5.6081	5.6078	5.6086	5.6079	5.6090	5.6080	6.2312	4.7705	4.8156	1
		105	5.6204	5.6201	5.6209	5.6202	5.6213	5.6208	5.6205	5.6213	5.6206	5.6217	5.6208	6.2453	4.5545	4.5377	0
	15	75	5.6208	5.6205	5.6213	5.6206	5.6217	5.6212	5.6209	5.6217	5.6210	5.6221	5.6212	6.2457	4.5478	4.5296	0
		90	5.6383	5.6380	5.6388	5.6381	5.6392	5.6387	5.6384	5.6392	5.6385	5.6396	5.6387	6.2652	4.2496	4.1958	1
		105	5.6592	5.6589	5.6597	5.6590	5.6601	5.6596	5.6593	5.6601	5.6594	5.6605	5.6596	6.2884	3.8957	3.8584	1
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	20

ตาราง 85 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิโพลิโพรพิลีน 290 °C เวลาฉีด 1 s และความดันฉีด 550 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่ที่ 1	คู่ที่ 2	คู่ที่ 3	คู่ที่ 4	คู่ที่ 5	คู่ที่ 6	คู่ที่ 7	คู่ที่ 8	คู่ที่ 9	คู่ที่ 10					
10	3	75	5.4050	5.4046	5.4057	5.4047	5.4061	5.4055	5.4051	5.4062	5.4052	5.4066	5.4055	6.0061	8.2105	9.5250	16
		90	5.4055	5.4051	5.4062	5.4052	5.4066	5.4060	5.4056	5.4067	5.4057	5.4071	5.4060	6.0067	8.2011	9.4753	16
		105	5.4059	5.4055	5.4066	5.4056	5.4070	5.4064	5.4060	5.4071	5.4061	5.4075	5.4064	6.0071	8.1949	9.4424	15
	9	75	5.5956	5.5952	5.5963	5.5953	5.5967	5.5961	5.5957	5.5968	5.5958	5.5972	5.5961	6.2178	4.9739	3.3831	32
		90	5.6360	5.6356	5.6367	5.6357	5.6371	5.6365	5.6361	5.6372	5.6362	5.6376	5.6364	6.2627	4.2881	2.9764	31
		105	5.6771	5.6767	5.6778	5.6768	5.6782	5.6776	5.6772	5.6783	5.6773	5.6787	5.6776	6.3084	3.5900	2.6519	26
	15	75	5.6079	5.6075	5.6086	5.6076	5.6090	5.6084	5.6080	5.6091	5.6081	5.6095	5.6084	6.2315	4.7648	3.2478	32
		90	5.6518	5.6514	5.6525	5.6515	5.6529	5.6523	5.6519	5.6530	5.6520	5.6534	5.6523	6.2903	4.0187	2.8422	29
		105	5.7049	5.7045	5.7056	5.7046	5.7060	5.7054	5.7050	5.7061	5.7051	5.7065	5.7053	6.3393	3.1184	2.4700	21
30	3	75	5.3952	5.3948	5.3959	5.3949	5.3963	5.3957	5.3953	5.3964	5.3954	5.3968	5.3957	5.9952	8.3766	10.5038	25
		90	5.3956	5.3952	5.3963	5.3953	5.3967	5.3961	5.3957	5.3968	5.3958	5.3972	5.3961	5.9957	8.3691	10.4555	25
		105	5.3960	5.3956	5.3967	5.3957	5.3971	5.3965	5.3961	5.3972	5.3962	5.3976	5.3965	5.9961	8.3631	10.4166	25
	9	75	5.5580	5.5576	5.5587	5.5577	5.5591	5.5585	5.5581	5.5592	5.5582	5.5596	5.5585	6.1761	5.6117	3.8755	31
		90	5.5852	5.5848	5.5859	5.5849	5.5863	5.5857	5.5853	5.5864	5.5854	5.5868	5.5857	6.2063	5.1504	3.5064	32
		105	5.6118	5.6114	5.6125	5.6115	5.6129	5.6123	5.6119	5.6130	5.6120	5.6134	5.6122	6.2358	4.6991	3.2075	32
	15	75	5.5802	5.5798	5.5809	5.5799	5.5813	5.5807	5.5803	5.5814	5.5804	5.5818	5.5807	6.2008	5.2344	3.5683	32
		90	5.6185	5.6181	5.6192	5.6182	5.6196	5.6190	5.6186	5.6197	5.6187	5.6201	5.6190	6.2433	4.5852	3.1399	32
		105	5.6601	5.6597	5.6608	5.6598	5.6612	5.6606	5.6602	5.6613	5.6603	5.6617	5.6606	6.2895	3.8784	2.7770	28
50	3	75	5.3870	5.3866	5.3877	5.3867	5.3881	5.3875	5.3871	5.3882	5.3872	5.3886	5.3875	5.9861	8.5152	11.4890	35
		90	5.3874	5.3870	5.3881	5.3871	5.3885	5.3879	5.3875	5.3886	5.3876	5.3890	5.3879	5.9865	8.5092	11.4419	34
		105	5.3877	5.3873	5.3884	5.3874	5.3888	5.3882	5.3878	5.3889	5.3879	5.3893	5.3882	5.9869	8.5039	11.4018	34
	9	75	5.5187	5.5183	5.5194	5.5184	5.5198	5.5192	5.5188	5.5199	5.5189	5.5203	5.5191	6.1324	6.2900	4.5730	27
		90	5.5387	5.5383	5.5394	5.5384	5.5398	5.5392	5.5388	5.5399	5.5389	5.5403	5.5392	6.1546	5.9397	4.1891	29
		105	5.5573	5.5569	5.5580	5.5570	5.5584	5.5578	5.5574	5.5585	5.5575	5.5589	5.5578	6.1754	5.6233	3.8858	31
	15	75	5.5563	5.5559	5.5570	5.5560	5.5574	5.5568	5.5564	5.5575	5.5565	5.5579	5.5568	6.1742	5.6403	3.9010	31
		90	5.5889	5.5885	5.5896	5.5886	5.5900	5.5894	5.5890	5.5901	5.5891	5.5905	5.5893	6.2104	5.0879	3.4617	32
		105	5.6209	5.6205	5.6216	5.6206	5.6220	5.6214	5.6210	5.6221	5.6211	5.6225	5.6213	6.2459	4.5446	3.1165	31
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																28	

ตาราง 86 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิโพลิโพรพิลีน 290 °C เวลาฉีด 1 s และความดันฉีด 700 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่ที่ 1	คู่ที่ 2	คู่ที่ 3	คู่ที่ 4	คู่ที่ 5	คู่ที่ 6	คู่ที่ 7	คู่ที่ 8	คู่ที่ 9	คู่ที่ 10					
10	3	75	5.4056	5.4053	5.4061	5.4054	5.4065	5.4060	5.4057	5.4065	5.4058	5.4069	5.4060	6.0067	8.2015	9.4692	15
		90	5.4062	5.4059	5.4067	5.4060	5.4071	5.4066	5.4063	5.4071	5.4064	5.4075	5.4066	6.0073	8.1911	9.4143	15
		105	5.4066	5.4063	5.4071	5.4064	5.4075	5.4070	5.4067	5.4075	5.4068	5.4079	5.4070	6.0077	8.1851	9.3832	15
	9	75	5.6520	5.6517	5.6525	5.6518	5.6529	5.6524	5.6521	5.6529	5.6522	5.6533	5.6524	6.2904	4.0177	2.8410	29
		90	5.6901	5.6898	5.6906	5.6899	5.6910	5.6905	5.6902	5.6910	5.6903	5.6914	5.6904	6.3227	3.3712	2.5637	24
		105	5.7056	5.7053	5.7061	5.7054	5.7065	5.7060	5.7057	5.7065	5.7058	5.7069	5.7059	6.3399	3.1079	2.4657	21
	15	75	5.6727	5.6724	5.6732	5.6725	5.6736	5.6731	5.6728	5.6736	5.6729	5.6740	5.6730	6.3034	3.6667	2.6834	27
		90	5.7232	5.7229	5.7237	5.7230	5.7241	5.7236	5.7233	5.7241	5.7234	5.7245	5.7236	6.3595	2.8083	2.3629	16
		105	5.7458	5.7455	5.7463	5.7456	5.7467	5.7462	5.7459	5.7467	5.7460	5.7471	5.7461	6.3846	2.4255	2.2434	8
30	3	75	5.3957	5.3954	5.3962	5.3955	5.3966	5.3961	5.3958	5.3966	5.3959	5.3970	5.3961	5.9957	8.3691	10.4455	25
		90	5.3963	5.3960	5.3968	5.3961	5.3972	5.3967	5.3964	5.3972	5.3965	5.3976	5.3966	5.9963	8.3603	10.3889	24
		105	5.3966	5.3963	5.3971	5.3964	5.3975	5.3970	5.3967	5.3975	5.3968	5.3979	5.3969	5.9966	8.3552	10.3565	24
	9	75	5.5964	5.5961	5.5969	5.5962	5.5973	5.5968	5.5965	5.5973	5.5966	5.5977	5.5968	6.2187	4.9615	3.3737	32
		90	5.6187	5.6184	5.6192	5.6185	5.6196	5.6191	5.6188	5.6196	5.6189	5.6200	5.6191	6.2434	4.5831	3.1378	32
		105	5.6245	5.6242	5.6250	5.6243	5.6254	5.6249	5.6246	5.6254	5.6247	5.6258	5.6249	6.2499	4.4840	3.0814	31
	15	75	5.6357	5.6354	5.6362	5.6355	5.6366	5.6361	5.6358	5.6366	5.6359	5.6370	5.6361	6.2623	4.2942	2.9788	31
		90	5.6722	5.6719	5.6727	5.6720	5.6731	5.6726	5.6723	5.6731	5.6724	5.6735	5.6726	6.3029	3.6742	2.6866	27
		105	5.6877	5.6874	5.6882	5.6875	5.6886	5.6881	5.6878	5.6886	5.6879	5.6890	5.6881	6.3201	3.4118	2.5795	24
50	3	75	5.3875	5.3872	5.3880	5.3873	5.3884	5.3879	5.3876	5.3884	5.3877	5.3888	5.3879	5.9865	8.5095	11.4324	34
		90	5.3879	5.3876	5.3884	5.3877	5.3888	5.3883	5.3880	5.3888	5.3881	5.3892	5.3883	5.9870	8.5022	11.3770	34
		105	5.3882	5.3879	5.3887	5.3880	5.3891	5.3886	5.3883	5.3891	5.3884	5.3895	5.3886	5.9873	8.4974	11.3403	33
	9	75	5.5465	5.5462	5.5470	5.5463	5.5474	5.5469	5.5466	5.5474	5.5467	5.5478	5.5468	6.1632	5.8096	4.0574	30
		90	5.5645	5.5642	5.5650	5.5643	5.5654	5.5649	5.5646	5.5654	5.5647	5.5658	5.5649	6.1832	5.5037	3.7810	31
		105	5.5685	5.5682	5.5690	5.5683	5.5694	5.5689	5.5686	5.5694	5.5687	5.5698	5.5689	6.1876	5.4355	3.7245	31
	15	75	5.6029	5.6026	5.6034	5.6027	5.6038	5.6033	5.6030	5.6038	5.6031	5.6042	5.6033	6.2259	4.8506	3.3010	32
		90	5.6297	5.6294	5.6302	5.6295	5.6306	5.6301	5.6298	5.6306	5.6299	5.6310	5.6301	6.2557	4.3955	3.0327	31
		105	5.6407	5.6404	5.6412	5.6405	5.6416	5.6411	5.6408	5.6416	5.6409	5.6420	5.6411	6.2679	4.2093	2.9351	30
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	26

ตาราง 87 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิโพลิโพรพิลีน 290 °C เวลาฉีด 2.5 s และความดันฉีด 400 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่ที่ 1	คู่ที่ 2	คู่ที่ 3	คู่ที่ 4	คู่ที่ 5	คู่ที่ 6	คู่ที่ 7	คู่ที่ 8	คู่ที่ 9	คู่ที่ 10					
10	3	75	5.5220	5.5216	5.5227	5.5217	5.5231	5.5225	5.5221	5.5232	5.5222	5.5236	5.5225	6.1361	6.2237	8.1974	32
		90	5.5231	5.5227	5.5238	5.5228	5.5242	5.5236	5.5232	5.5243	5.5233	5.5247	5.5236	6.1373	6.2046	8.1227	31
		105	5.5239	5.5235	5.5246	5.5236	5.5250	5.5244	5.5240	5.5251	5.5241	5.5255	5.5244	6.1382	6.1910	8.0700	30
	9	75	5.6748	5.6744	5.6755	5.6745	5.6759	5.6753	5.6749	5.6760	5.6750	5.6764	5.6753	6.3059	3.6284	3.6387	0
		90	5.7016	5.7012	5.7023	5.7013	5.7027	5.7021	5.7017	5.7028	5.7018	5.7032	5.7020	6.3356	3.1741	3.3159	4
		105	5.7313	5.7309	5.7320	5.7310	5.7324	5.7318	5.7314	5.7325	5.7315	5.7329	5.7318	6.3686	2.6692	3.0183	13
	15	75	5.6774	5.6770	5.6781	5.6771	5.6785	5.6779	5.6775	5.6786	5.6776	5.6790	5.6779	6.3088	3.5845	3.6048	1
		90	5.7056	5.7052	5.7063	5.7053	5.7067	5.7061	5.7057	5.7068	5.7058	5.7072	5.7061	6.3401	3.1060	3.2724	5
		105	5.7375	5.7371	5.7382	5.7372	5.7386	5.7380	5.7376	5.7387	5.7377	5.7391	5.7380	6.3755	2.5644	2.9631	16
30	3	75	5.5080	5.5076	5.5087	5.5077	5.5091	5.5085	5.5081	5.5092	5.5082	5.5096	5.5084	6.1205	6.4620	9.2633	43
		90	5.5087	5.5083	5.5094	5.5084	5.5098	5.5092	5.5088	5.5099	5.5089	5.5103	5.5091	6.1213	6.4500	9.2027	43
		105	5.5092	5.5088	5.5099	5.5089	5.5103	5.5097	5.5093	5.5104	5.5094	5.5108	5.5097	6.1218	6.4410	9.1581	42
	9	75	5.6438	5.6434	5.6445	5.6435	5.6449	5.6443	5.6439	5.6450	5.6440	5.6454	5.6442	6.2714	4.1560	4.1025	1
		90	5.6654	5.6650	5.6661	5.6651	5.6665	5.6659	5.6655	5.6666	5.6656	5.6670	5.6658	6.2954	3.7893	3.7686	1
		105	5.6881	5.6877	5.6888	5.6878	5.6892	5.6886	5.6882	5.6893	5.6883	5.6897	5.6886	6.3207	3.4025	3.4707	2
	15	75	5.6528	5.6524	5.6535	5.6525	5.6539	5.6533	5.6529	5.6540	5.6530	5.6544	5.6532	6.2814	4.0032	3.9564	1
		90	5.6761	5.6757	5.6768	5.6758	5.6772	5.6766	5.6762	5.6773	5.6763	5.6777	5.6766	6.3073	3.6069	3.6220	0
		105	5.7034	5.7030	5.7041	5.7031	5.7045	5.7039	5.7035	5.7046	5.7036	5.7050	5.7039	6.3377	3.1427	3.2957	5
50	3	75	5.4960	5.4956	5.4967	5.4957	5.4971	5.4965	5.4961	5.4972	5.4962	5.4976	5.4965	6.1072	6.6644	10.4125	56
		90	5.4965	5.4961	5.4972	5.4962	5.4976	5.4970	5.4966	5.4977	5.4967	5.4981	5.4970	6.1078	6.6562	10.3607	56
		105	5.4969	5.4965	5.4976	5.4966	5.4980	5.4974	5.4970	5.4981	5.4971	5.4985	5.4974	6.1082	6.6494	10.3179	55
	9	75	5.6125	5.6121	5.6132	5.6122	5.6136	5.6130	5.6126	5.6137	5.6127	5.6141	5.6129	6.2366	4.6874	4.7068	0
		90	5.6267	5.6263	5.6274	5.6264	5.6278	5.6272	5.6268	5.6279	5.6269	5.6283	5.6271	6.2524	4.4461	4.4117	1
		105	5.6418	5.6414	5.6425	5.6415	5.6429	5.6423	5.6419	5.6430	5.6420	5.6434	5.6423	6.2692	4.1887	4.1352	1
	15	75	5.6309	5.6305	5.6316	5.6306	5.6320	5.6314	5.6310	5.6321	5.6311	5.6325	5.6314	6.2571	4.3735	4.3300	1
		90	5.6516	5.6512	5.6523	5.6513	5.6527	5.6521	5.6517	5.6528	5.6518	5.6532	5.6521	6.2901	4.0224	3.9742	1
		105	5.6742	5.6738	5.6749	5.6739	5.6753	5.6747	5.6743	5.6754	5.6744	5.6758	5.6747	6.3052	3.6388	3.6468	0
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	16

ตาราง 88 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิโพลิโพรพิลีน 290 °C เวลาฉีด 2.5 s และความดันฉีด 550 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่ที่ 1	คู่ที่ 2	คู่ที่ 3	คู่ที่ 4	คู่ที่ 5	คู่ที่ 6	คู่ที่ 7	คู่ที่ 8	คู่ที่ 9	คู่ที่ 10					
10	3	75	5.4238	5.4235	5.4243	5.4236	5.4247	5.4242	5.4239	5.4247	5.4240	5.4251	5.4242	6.0269	7.8920	8.0756	2
		90	5.4246	5.4243	5.4251	5.4244	5.4255	5.4250	5.4247	5.4255	5.4248	5.4259	5.4250	6.0278	7.8785	8.0238	2
		105	5.4252	5.4249	5.4257	5.4250	5.4261	5.4256	5.4253	5.4261	5.4254	5.4265	5.4256	6.0284	7.8690	7.9880	2
	9	75	5.6271	5.6268	5.6276	5.6269	5.6290	5.6275	5.6272	5.6290	5.6273	5.6284	5.6275	6.2528	4.4404	3.0572	31
		90	5.6771	5.6768	5.6776	5.6769	5.6780	5.6775	5.6772	5.6780	5.6773	5.6784	5.6775	6.3083	3.5910	2.6517	26
		105	5.7330	5.7327	5.7335	5.7328	5.7339	5.7334	5.7331	5.7339	5.7332	5.7343	5.7334	6.3704	2.6418	2.3094	13
	15	75	5.6330	5.6327	5.6335	5.6328	5.6339	5.6334	5.6331	5.6339	5.6332	5.6343	5.6334	6.2593	4.3403	3.0031	31
		90	5.6861	5.6858	5.6866	5.6859	5.6870	5.6865	5.6862	5.6870	5.6863	5.6874	5.6864	6.3183	3.4392	2.5903	25
		105	5.7495	5.7492	5.7500	5.7493	5.7504	5.7499	5.7496	5.7504	5.7497	5.7508	5.7499	6.3888	2.3612	2.2245	6
30	3	75	5.4091	5.4088	5.4096	5.4089	5.4100	5.4095	5.4092	5.4100	5.4093	5.4104	5.4095	6.0106	8.1415	9.1626	13
		90	5.4096	5.4093	5.4101	5.4094	5.4105	5.4100	5.4097	5.4105	5.4098	5.4109	5.4100	6.0111	8.1332	9.1218	12
		105	5.4100	5.4097	5.4105	5.4098	5.4109	5.4104	5.4101	5.4109	5.4102	5.4113	5.4104	6.0116	8.1266	9.0893	12
	9	75	5.5848	5.5845	5.5853	5.5846	5.5857	5.5852	5.5849	5.5857	5.5850	5.5861	5.5851	6.2057	5.1593	3.5117	32
		90	5.6216	5.6213	5.6221	5.6214	5.6225	5.6220	5.6217	5.6225	5.6218	5.6229	5.6220	6.2467	4.5336	3.1094	31
		105	5.6562	5.6559	5.6567	5.6560	5.6571	5.6566	5.6563	5.6571	5.6564	5.6575	5.6566	6.2851	3.9464	2.8075	29
	15	75	5.5996	5.5993	5.6001	5.5994	5.6005	5.6000	5.5997	5.6005	5.5998	5.6009	5.6000	6.2222	4.9073	3.3378	32
		90	5.6433	5.6430	5.6438	5.6431	5.6442	5.6437	5.6434	5.6442	5.6435	5.6446	5.6437	6.2708	4.1646	2.9126	30
		105	5.6917	5.6914	5.6922	5.6915	5.6926	5.6921	5.6918	5.6926	5.6919	5.6930	5.6921	6.3245	3.3437	2.5531	24
50	3	75	5.3969	5.3966	5.3974	5.3967	5.3978	5.3973	5.3970	5.3978	5.3971	5.3982	5.3973	5.9970	8.3497	10.3223	24
		90	5.3972	5.3969	5.3977	5.3970	5.3981	5.3976	5.3973	5.3981	5.3974	5.3985	5.3976	5.9973	8.3439	10.2857	23
		105	5.3975	5.3972	5.3980	5.3973	5.3984	5.3979	5.3976	5.3984	5.3977	5.3988	5.3979	5.9976	8.3393	10.2572	23
	9	75	5.5397	5.5394	5.5402	5.5395	5.5406	5.5401	5.5398	5.5406	5.5399	5.5410	5.5401	6.1557	5.9237	4.1711	30
		90	5.5629	5.5626	5.5634	5.5627	5.5638	5.5633	5.5630	5.5638	5.5631	5.5642	5.5633	6.1815	5.5299	3.8032	31
		105	5.5852	5.5849	5.5857	5.5850	5.5861	5.5856	5.5853	5.5861	5.5854	5.5865	5.5855	6.2061	5.1526	3.5069	32
	15	75	5.5710	5.5707	5.5715	5.5708	5.5719	5.5714	5.5711	5.5719	5.5712	5.5723	5.5714	6.1904	5.3930	3.6901	32
		90	5.6079	5.6076	5.6084	5.6077	5.6088	5.6083	5.6080	5.6088	5.6081	5.6092	5.6083	6.2315	4.7656	3.2473	32
		105	5.6435	5.6432	5.6440	5.6433	5.6444	5.6439	5.6436	5.6444	5.6437	5.6448	5.6439	6.2710	4.1612	2.9109	30
	ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																22

ตาราง 89 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิโพลิโพรพิลีน 290 °C เวลาฉีด 2.5 s และความดันฉีด 700 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่ที่ 1	คู่ที่ 2	คู่ที่ 3	คู่ที่ 4	คู่ที่ 5	คู่ที่ 6	คู่ที่ 7	คู่ที่ 8	คู่ที่ 9	คู่ที่ 10					
10	3	75	5.4248	5.4244	5.4255	5.4245	5.4259	5.4253	5.4249	5.4260	5.4250	5.4264	5.4253	6.0281	7.8734	8.0103	2
		90	5.4257	5.4253	5.4264	5.4254	5.4268	5.4262	5.4258	5.4269	5.4259	5.4273	5.4261	6.0290	7.8592	7.9571	1
		105	5.4261	5.4257	5.4268	5.4258	5.4272	5.4266	5.4262	5.4273	5.4263	5.4277	5.4266	6.0295	7.8517	7.9294	1
	9	75	5.6956	5.6952	5.6963	5.6953	5.6967	5.6961	5.6957	5.6968	5.6958	5.6972	5.6961	6.3290	3.2753	2.5277	23
		90	5.7548	5.7544	5.7555	5.7545	5.7559	5.7553	5.7549	5.7560	5.7550	5.7564	5.7552	6.3947	2.2708	2.1989	3
		105	5.7816	5.7812	5.7823	5.7813	5.7827	5.7821	5.7817	5.7828	5.7818	5.7832	5.7821	6.4245	1.8152	2.0764	14
	15	75	5.7066	5.7062	5.7073	5.7063	5.7077	5.7071	5.7067	5.7078	5.7068	5.7082	5.7070	6.3411	3.0896	2.4597	20
		90	5.7756	5.7752	5.7763	5.7753	5.7767	5.7761	5.7757	5.7768	5.7758	5.7772	5.7761	6.4179	1.9163	2.1024	10
		105	5.8076	5.8072	5.8083	5.8073	5.8087	5.8081	5.8077	5.8088	5.8078	5.8092	5.8081	6.4534	1.3735	1.9700	43
30	3	75	5.4097	5.4093	5.4104	5.4094	5.4108	5.4102	5.4098	5.4109	5.4099	5.4113	5.4102	6.0113	8.1302	9.1144	12
		90	5.4104	5.4100	5.4111	5.4101	5.4115	5.4109	5.4105	5.4116	5.4106	5.4120	5.4108	6.0120	8.1194	9.0618	12
		105	5.4107	5.4103	5.4114	5.4104	5.4118	5.4112	5.4108	5.4119	5.4109	5.4123	5.4111	6.0124	8.1142	9.0368	11
	9	75	5.6346	5.6342	5.6353	5.6343	5.6357	5.6351	5.6347	5.6358	5.6348	5.6362	5.6351	6.2612	4.3112	2.9885	31
		90	5.6678	5.6674	5.6685	5.6675	5.6689	5.6683	5.6679	5.6690	5.6680	5.6694	5.6682	6.2980	3.7482	2.7191	27
		105	5.6760	5.6756	5.6767	5.6757	5.6771	5.6765	5.6761	5.6772	5.6762	5.6776	5.6765	6.3072	3.6087	2.6597	26
	15	75	5.6599	5.6595	5.6606	5.6596	5.6610	5.6604	5.6600	5.6611	5.6601	5.6615	5.6603	6.2892	3.8826	2.7789	28
		90	5.7082	5.7078	5.7089	5.7079	5.7093	5.7087	5.7083	5.7094	5.7084	5.7098	5.7087	6.3430	3.0609	2.4495	20
		105	5.7288	5.7284	5.7295	5.7285	5.7299	5.7293	5.7289	5.7300	5.7290	5.7304	5.7292	6.3658	2.7125	2.3323	14
50	3	75	5.3972	5.3968	5.3979	5.3969	5.3983	5.3977	5.3973	5.3984	5.3974	5.3988	5.3977	5.9974	8.3422	10.2848	23
		90	5.3977	5.3973	5.3984	5.3974	5.3988	5.3982	5.3978	5.3989	5.3979	5.3993	5.3982	5.9980	8.3344	10.2364	23
		105	5.3980	5.3976	5.3987	5.3977	5.3991	5.3985	5.3981	5.3992	5.3982	5.3996	5.3985	5.9983	8.3289	10.2026	22
	9	75	5.5726	5.5722	5.5733	5.5723	5.5737	5.5731	5.5727	5.5738	5.5728	5.5742	5.5730	6.1922	5.3650	3.6690	32
		90	5.5934	5.5930	5.5941	5.5931	5.5945	5.5939	5.5935	5.5946	5.5936	5.5950	5.5938	6.2154	5.0116	3.4087	32
		105	5.5993	5.5989	5.6000	5.5990	5.6004	5.5998	5.5994	5.6005	5.5995	5.6009	5.5998	6.2220	4.9108	3.3411	32
	15	75	5.6219	5.6215	5.6226	5.6216	5.6230	5.6224	5.6220	5.6231	5.6221	5.6235	5.6224	6.2471	4.5265	3.1062	31
		90	5.6553	5.6549	5.6560	5.6550	5.6564	5.6558	5.6554	5.6565	5.6555	5.6569	5.6558	6.2842	3.9597	2.8144	29
		105	5.6687	5.6683	5.6694	5.6684	5.6698	5.6692	5.6688	5.6699	5.6689	5.6703	5.6692	6.2991	3.7326	2.7123	27
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	20

ตาราง 90 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิโพลิโพรพิลีน 290 °C เวลาฉีด 4 s และความดันฉีด 400 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่ที่ 1	คู่ที่ 2	คู่ที่ 3	คู่ที่ 4	คู่ที่ 5	คู่ที่ 6	คู่ที่ 7	คู่ที่ 8	คู่ที่ 9	คู่ที่ 10					
10	3	75	5.5429	5.5426	5.5434	5.5427	5.5438	5.5433	5.5430	5.5438	5.5431	5.5442	5.5432	6.1592	5.8706	6.9994	19
		90	5.5444	5.5441	5.5449	5.5442	5.5453	5.5448	5.5445	5.5453	5.5446	5.5457	5.5448	6.1609	5.8448	6.9256	18
		105	5.5456	5.5453	5.5461	5.5454	5.5465	5.5460	5.5457	5.5465	5.5458	5.5469	5.5460	6.1622	5.8239	6.8672	18
	9	75	5.6969	5.6966	5.6974	5.6967	5.6978	5.6973	5.6970	5.6978	5.6971	5.6982	5.6973	6.3303	3.2550	3.3681	3
		90	5.7282	5.7279	5.7287	5.7290	5.7291	5.7286	5.7283	5.7291	5.7284	5.7295	5.7286	6.3651	2.7230	3.0466	12
		105	5.7640	5.7637	5.7645	5.7638	5.7649	5.7644	5.7641	5.7649	5.7642	5.7653	5.7644	6.4049	2.1153	2.7471	30
	15	75	5.6983	5.6980	5.6988	5.6981	5.6992	5.6987	5.6984	5.6992	5.6985	5.6996	5.6987	6.3319	3.2309	3.3521	4
		90	5.7306	5.7303	5.7311	5.7304	5.7315	5.7310	5.7307	5.7315	5.7308	5.7319	5.7310	6.3678	2.6822	3.0245	13
		105	5.7675	5.7672	5.7680	5.7673	5.7684	5.7679	5.7676	5.7684	5.7677	5.7688	5.7679	6.4088	2.0562	2.7211	32
30	3	75	5.5220	5.5217	5.5225	5.5218	5.5229	5.5224	5.5221	5.5229	5.5222	5.5233	5.5224	6.1360	6.2253	8.1977	32
		90	5.5229	5.5226	5.5234	5.5227	5.5238	5.5233	5.5230	5.5238	5.5231	5.5242	5.5233	6.1370	6.2091	8.1343	31
		105	5.5236	5.5233	5.5241	5.5234	5.5245	5.5240	5.5237	5.5245	5.5238	5.5249	5.5240	6.1378	6.1977	8.0899	31
	9	75	5.6617	5.6614	5.6622	5.6615	5.6626	5.6621	5.6618	5.6626	5.6619	5.6630	5.6621	6.2912	3.8532	3.8215	1
		90	5.6852	5.6849	5.6857	5.6850	5.6861	5.6856	5.6853	5.6861	5.6854	5.6865	5.6856	6.3174	3.4529	3.5057	2
		105	5.7126	5.7123	5.7131	5.7124	5.7135	5.7130	5.7127	5.7135	5.7128	5.7139	5.7130	6.3477	2.9887	3.1991	7
	15	75	5.6674	5.6671	5.6679	5.6672	5.6683	5.6678	5.6675	5.6683	5.6676	5.6687	5.6678	6.2975	3.7563	3.7400	0
		90	5.6934	5.6931	5.6939	5.6932	5.6943	5.6938	5.6935	5.6943	5.6936	5.6947	5.6938	6.3264	3.3148	3.4085	3
		105	5.7238	5.7235	5.7243	5.7236	5.7247	5.7242	5.7239	5.7247	5.7240	5.7251	5.7242	6.3602	2.7977	3.0880	10
50	3	75	5.5062	5.5059	5.5067	5.5060	5.5071	5.5066	5.5063	5.5071	5.5064	5.5075	5.5066	6.1184	6.4930	9.4147	45
		90	5.5068	5.5065	5.5073	5.5066	5.5077	5.5072	5.5069	5.5077	5.5070	5.5081	5.5072	6.1191	6.4833	9.3639	44
		105	5.5072	5.5069	5.5077	5.5070	5.5081	5.5076	5.5073	5.5081	5.5074	5.5085	5.5076	6.1196	6.4759	9.3260	44
	9	75	5.6292	5.6289	5.6297	5.6290	5.6301	5.6296	5.6293	5.6301	5.6294	5.6305	5.6296	6.2551	4.4050	4.3634	1
		90	5.6458	5.6455	5.6463	5.6456	5.6467	5.6462	5.6459	5.6467	5.6460	5.6471	5.6462	6.2735	4.1225	4.0681	1
		105	5.6634	5.6631	5.6639	5.6632	5.6643	5.6638	5.6635	5.6643	5.6636	5.6647	5.6638	6.2931	3.8238	3.7964	1
	15	75	5.6438	5.6435	5.6443	5.6436	5.6447	5.6442	5.6439	5.6447	5.6440	5.6451	5.6442	6.2713	4.1565	4.1015	1
		90	5.6651	5.6648	5.6656	5.6649	5.6660	5.6655	5.6652	5.6660	5.6653	5.6664	5.6655	6.2950	3.7949	3.7720	1
		105	5.6900	5.6897	5.6905	5.6898	5.6909	5.6904	5.6901	5.6909	5.6902	5.6913	5.6904	6.3227	3.3720	3.4481	2
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	15

ตาราง 91 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิโพลิโพรพิลีน 290 °C เวลาฉีด 4 s และความดันฉีด 550 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่ที่ 1	คู่ที่ 2	คู่ที่ 3	คู่ที่ 4	คู่ที่ 5	คู่ที่ 6	คู่ที่ 7	คู่ที่ 8	คู่ที่ 9	คู่ที่ 10					
10	3	75	5.4455	5.4451	5.4462	5.4452	5.4466	5.4460	5.4456	5.4467	5.4457	5.4471	5.4460	6.0511	7.5228	6.8736	9
		90	5.4469	5.4465	5.4476	5.4466	5.4480	5.4474	5.4470	5.4481	5.4471	5.4485	5.4474	6.0527	7.4980	6.8053	9
		105	5.4476	5.4472	5.4483	5.4473	5.4487	5.4481	5.4477	5.4488	5.4478	5.4492	5.4481	6.0534	7.4869	6.7752	10
	9	75	5.6588	5.6584	5.6595	5.6585	5.6599	5.6593	5.6589	5.6600	5.6590	5.6604	5.6592	6.2880	3.9012	2.7874	29
		90	5.7155	5.7151	5.7162	5.7152	5.7166	5.7160	5.7156	5.7167	5.7157	5.7171	5.7160	6.3511	2.9376	2.4067	18
		105	5.7861	5.7857	5.7868	5.7858	5.7872	5.7866	5.7862	5.7873	5.7863	5.7877	5.7865	6.4295	1.7393	2.0573	18
	15	75	5.6622	5.6618	5.6629	5.6619	5.6633	5.6627	5.6623	5.6634	5.6624	5.6638	5.6627	6.2918	3.8430	2.7610	28
		90	5.7238	5.7234	5.7245	5.7235	5.7249	5.7243	5.7239	5.7250	5.7240	5.7254	5.7243	6.3603	2.7961	2.3594	16
		105	5.7967	5.7963	5.7974	5.7964	5.7978	5.7972	5.7968	5.7979	5.7969	5.7983	5.7972	6.4413	1.5589	2.0133	29
30	3	75	5.4235	5.4231	5.4242	5.4232	5.4246	5.4240	5.4236	5.4247	5.4237	5.4251	5.4240	6.0267	7.8953	8.0942	3
		90	5.4242	5.4238	5.4249	5.4239	5.4253	5.4247	5.4243	5.4254	5.4244	5.4258	5.4247	6.0275	7.8836	8.0492	2
		105	5.4248	5.4244	5.4255	5.4245	5.4259	5.4253	5.4249	5.4260	5.4250	5.4264	5.4252	6.0290	7.8747	8.0154	2
	9	75	5.6087	5.6083	5.6094	5.6084	5.6098	5.6092	5.6088	5.6099	5.6089	5.6103	5.6092	6.2324	4.7508	3.2391	32
		90	5.6524	5.6520	5.6531	5.6521	5.6535	5.6529	5.6525	5.6536	5.6526	5.6540	5.6529	6.2810	4.0088	2.8375	29
		105	5.6989	5.6985	5.6996	5.6986	5.7000	5.6994	5.6990	5.7001	5.6991	5.7005	5.6993	6.3326	3.2204	2.5072	22
	15	75	5.6194	5.6190	5.6201	5.6191	5.6205	5.6199	5.6195	5.6206	5.6196	5.6210	5.6199	6.2443	4.5693	3.1307	31
		90	5.6701	5.6697	5.6708	5.6698	5.6712	5.6706	5.6702	5.6713	5.6703	5.6717	5.6706	6.3007	3.7082	2.7018	27
		105	5.7268	5.7264	5.7275	5.7265	5.7279	5.7273	5.7269	5.7290	5.7270	5.7284	5.7273	6.3637	2.7451	2.3428	15
50	3	75	5.4072	5.4068	5.4079	5.4069	5.4083	5.4077	5.4073	5.4084	5.4074	5.4088	5.4076	6.0085	8.1732	9.3301	14
		90	5.4076	5.4072	5.4083	5.4073	5.4087	5.4081	5.4077	5.4088	5.4078	5.4092	5.4081	6.0090	8.1662	9.2943	14
		105	5.4080	5.4076	5.4087	5.4077	5.4091	5.4085	5.4081	5.4092	5.4082	5.4096	5.4085	6.0094	8.1596	9.2609	13
	9	75	5.5612	5.5608	5.5619	5.5609	5.5623	5.5617	5.5613	5.5624	5.5614	5.5628	5.5617	6.1797	5.5571	3.8278	31
		90	5.5884	5.5880	5.5891	5.5881	5.5895	5.5889	5.5885	5.5896	5.5886	5.5900	5.5888	6.2098	5.0967	3.4679	32
		105	5.6153	5.6149	5.6160	5.6150	5.6164	5.6158	5.6154	5.6165	5.6155	5.6169	5.6157	6.2397	4.6399	3.1720	32
	15	75	5.5865	5.5861	5.5872	5.5862	5.5876	5.5870	5.5866	5.5877	5.5867	5.5881	5.5870	6.2077	5.1282	3.4904	32
		90	5.6281	5.6277	5.6288	5.6278	5.6292	5.6286	5.6282	5.6293	5.6283	5.6297	5.6286	6.2539	4.4221	3.0480	31
		105	5.6719	5.6715	5.6726	5.6716	5.6730	5.6724	5.6720	5.6731	5.6721	5.6735	5.6724	6.3026	3.6783	2.6890	27
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	21

ตาราง 92 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของโพลิโพรพิลีนที่มีอุณหภูมิโพลิโพรพิลีน 290 °C เวลาฉีด 4 s และความดันฉีด 700 bar

อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เวลา ย่ำ (s)	ความดัน ย่ำ (%)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (g)										น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	ปริมาตร เฉลี่ย (cc)	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) EXP	การหดตัวเชิง ปริมาตร เฉลี่ย (%) FEM	ความคลาด เคลื่อน (%)
			คู่ที่ 1	คู่ที่ 2	คู่ที่ 3	คู่ที่ 4	คู่ที่ 5	คู่ที่ 6	คู่ที่ 7	คู่ที่ 8	คู่ที่ 9	คู่ที่ 10					
10	3	75	5.4472	5.4469	5.4477	5.4470	5.4481	5.4476	5.4473	5.4481	5.4474	5.4485	5.4476	6.0529	7.4944	6.7913	9
		90	5.4482	5.4479	5.4487	5.4480	5.4491	5.4486	5.4483	5.4491	5.4484	5.4495	5.4486	6.0540	7.4776	6.7461	10
		105	5.4487	5.4484	5.4492	5.4485	5.4496	5.4491	5.4488	5.4496	5.4489	5.4500	5.4491	6.0545	7.4696	6.7247	10
	9	75	5.7420	5.7417	5.7425	5.7418	5.7429	5.7424	5.7421	5.7429	5.7422	5.7433	5.7424	6.3804	2.4891	2.2624	9
		90	5.7656	5.7653	5.7661	5.7654	5.7665	5.7660	5.7657	5.7665	5.7658	5.7669	5.7660	6.4066	2.0885	1.9025	9
		105	5.7900	5.7897	5.7905	5.7898	5.7909	5.7904	5.7901	5.7909	5.7902	5.7913	5.7904	6.4338	1.6741	1.7543	5
	15	75	5.7475	5.7472	5.7480	5.7473	5.7484	5.7479	5.7476	5.7484	5.7477	5.7488	5.7479	6.3865	2.3960	2.2347	7
		90	5.7688	5.7685	5.7693	5.7686	5.7697	5.7692	5.7689	5.7697	5.7690	5.7701	5.7692	6.4102	2.0341	1.8560	9
		105	5.7988	5.7985	5.7993	5.7986	5.7997	5.7992	5.7989	5.7997	5.7990	5.8001	5.7992	6.4435	1.5247	1.6983	11
30	3	75	5.4244	5.4241	5.4249	5.4242	5.4253	5.4248	5.4245	5.4253	5.4246	5.4257	5.4248	6.0275	7.8826	8.0394	2
		90	5.4252	5.4249	5.4257	5.4250	5.4261	5.4256	5.4253	5.4261	5.4254	5.4265	5.4256	6.0284	7.8691	7.9886	2
		105	5.4256	5.4253	5.4261	5.4254	5.4265	5.4260	5.4257	5.4265	5.4258	5.4269	5.4259	6.0288	7.8628	7.9649	1
	9	75	5.6715	5.6712	5.6720	5.6713	5.6724	5.6719	5.6716	5.6724	5.6717	5.6728	5.6719	6.3021	3.6862	2.6917	27
		90	5.7184	5.7181	5.7189	5.7182	5.7193	5.7188	5.7185	5.7193	5.7186	5.7197	5.7188	6.3542	2.8901	2.3901	17
		105	5.7346	5.7343	5.7351	5.7344	5.7355	5.7350	5.7347	5.7355	5.7348	5.7359	5.7350	6.3722	2.6153	2.3011	12
	15	75	5.6902	5.6899	5.6907	5.6900	5.6911	5.6906	5.6903	5.6911	5.6904	5.6915	5.6906	6.3228	3.3691	2.5629	24
		90	5.7542	5.7539	5.7547	5.7540	5.7551	5.7546	5.7543	5.7551	5.7544	5.7555	5.7545	6.3939	2.2829	2.2019	4
		105	5.7809	5.7806	5.7814	5.7807	5.7818	5.7813	5.7810	5.7818	5.7811	5.7822	5.7813	6.4237	1.8281	2.0793	14
50	3	75	5.4077	5.4074	5.4082	5.4075	5.4086	5.4081	5.4078	5.4086	5.4079	5.4090	5.4080	6.0089	8.1666	9.2882	14
		90	5.4082	5.4079	5.4087	5.4080	5.4091	5.4086	5.4083	5.4091	5.4084	5.4095	5.4086	6.0095	8.1577	9.2436	13
		105	5.4085	5.4082	5.4090	5.4083	5.4094	5.4089	5.4086	5.4094	5.4087	5.4098	5.4089	6.0099	8.1517	9.2132	13
	9	75	5.5996	5.5993	5.6001	5.5994	5.6005	5.6000	5.5997	5.6005	5.5998	5.6009	5.6000	6.2222	4.9076	3.3380	32
		90	5.6253	5.6250	5.6258	5.6251	5.6262	5.6257	5.6254	5.6262	5.6255	5.6266	5.6257	6.2508	4.4707	3.0740	31
		105	5.6333	5.6330	5.6338	5.6331	5.6342	5.6337	5.6334	5.6342	5.6335	5.6346	5.6337	6.2597	4.3347	3.0001	31
	15	75	5.6444	5.6441	5.6449	5.6442	5.6453	5.6448	5.6445	5.6453	5.6446	5.6457	5.6448	6.2720	4.1468	2.9037	30
		90	5.6915	5.6912	5.6920	5.6913	5.6924	5.6919	5.6916	5.6924	5.6917	5.6928	5.6919	6.3243	3.3463	2.5541	24
		105	5.7084	5.7081	5.7089	5.7082	5.7093	5.7088	5.7085	5.7093	5.7086	5.7097	5.7088	6.3431	3.0596	2.4485	20
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)																	14

ภาคผนวก ง
บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

การศึกษาการหดตัวเชิงปริมาตรของผลิตภัณฑ์พลาสติกฉีด Study on the Volumetric Shrinkage of Injection Molded Plastic Product

สุภกิจ ขาวเนตร* วิชิต บัวแก้ว ไพศาล นามผล

โครงการความร่วมมือทางวิชาการ ภาควิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

กับ กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

โทรศัพท์ (662) 664 1000 ต่อ 2065 โทรสาร (6637) 322 609 E-mail: suphakij@swu.ac.th*

Subhakij Khaownetr* Vichit Buakaew Paisarn Naphon

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University
and Academy Jointed Graduated Program, Department of Mechanical Engineering, Chulachomklao Royal Military, Thailand.

Tel: (662) 664 1000 ext. 2065 Fax: (6637) 322 609 Email: suphakij@swu.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้เสนอการศึกษาทั้งการคำนวณ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิธีทดลองเกี่ยวกับการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์พลาสติกฉีด แม่พิมพ์ที่ใช้ในการฉีดผลิตภัณฑ์พลาสติกเป็นพิมพ์ส้อม (fork) ทำจากวัสดุ S45C ขนาด 250x250x200 มิลลิเมตร ใช้เม็ดพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก ได้แก่ โพลีโพรพิลีน (PP) BASELL POLYOLEFINS เกรด MOPLEN HP500N และ โพลิสไตรีน (PS) MITSUBISHI CHEMICAL เกรด DIAREX HIPS H350 เป็นวัตถุดิบในการฉีด ใช้เครื่องฉีดพลาสติก ARBURG รุ่น ALLROUNDER 220 S ซึ่งมีค่าการฉีดต่อครั้งโดยน้ำหนักสูงสุด (Maximum shot capacity) 12 กรัม แรงปิดแม่พิมพ์สูงสุด (Maximum clamping force) 150 กิโลนิวตัน ในการวิเคราะห์ได้ทำการศึกษาในช่วงการย่ำ (Packing) โดยศึกษาถึงผลของความดันย่ำ (Holding Pressure) และ เวลาการย่ำ (Holding Times) เท่ากับ 100-500 บาร์ และ 0-10.5 วินาที ตามลำดับ ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าเมื่อเข้าสู่ช่วงการย่ำ (Packing) การเพิ่มความดันย่ำ (Holding Pressure) และ เวลาการย่ำ (Holding Times) ทำให้การหดตัวเชิงปริมาตรมีแนวโน้มลดลง ดังนั้นผลิตภัณฑ์จึงเกิดการยุบตัว (Sink mark) น้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีทดลอง พบว่าทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกัน

คำสำคัญ: การหดตัวเชิงปริมาตร, การยุบตัว, การย่ำ, ความดันย่ำ, เวลาการย่ำ

Abstract

In this research, the experiment and calculation by finite

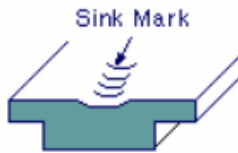
element method on the shrinkage of the injection molded plastic product are presented. The essentiality of mold used in the experiment is S45C material, fork in geometry and outer dimension of 250x250x200 mm. Polypropylene: BASELL Polyolefins, MOPLEN HP500N grade and Polystyrene: MITSUBISHI CHEMICAL, DIAREX HIPS H350 grade are used as working fluids. The injection molding machine is ARBURG model ALLROUNDER 220S with the maximum shot capacity and maximum clamping force of 12 grams and 150kN, respectively. In the analysis, the packing process is considered. The test runs are performed at holding pressure and holding time ranging between 100 and 500 bar, and between 0 and 10.5 second, respectively. It is found that the volumetric shrinkage tends to decrease as the holding pressure and holding time increase. This results in the sink mark also decrease. The results obtained from the experiment and those from the finite element method are reasonable agreement.

Keywords: Volumetric shrinkage, Sink mark, Packing, Holding pressure, Holding time

1. บทนำ

ผลิตภัณฑ์พลาสติกฉีดที่มีคุณภาพดีนั้นบ่งบอกถึง ลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ที่สามารถตอบสนองต่อข้อกำหนดของลูกค้า ซึ่งมีคุณสมบัติครบถ้วนตามประโยชน์ใช้สอย การหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย

(Average volumetric shrinkage) ก็เป็นปัญหาหนึ่งที่มักพบในผลิตภัณฑ์พลาสติก ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพลดลง ทั้งนี้จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของโพลิเมอร์ การเปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิหลอมละลายสู่อุณหภูมิภายนอกมีผลทำให้เกิดการบิดงอ รอยยุบ ขนาดเล็กลง โปร่งอากาศภายใน อีกทั้งความหนาของผนังและการย่ำไม่เพียงพอ ยังเป็นสาเหตุสนับสนุนให้มีค่าการหดตัวเชิงปริมาตรสูงขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 1 แสดงการยุบตัวของผลิตภัณฑ์

Du-Soon Choi, Yong-Tack Im (2000) [1] ศึกษาการทำนายการหดตัวและการบิดงอสำหรับพิจารณาความเค้นตกค้าง (Residual stress) โดยการจำลองกระบวนการฉีด ความแม่นยำในการทำนายการหดตัวและการบิดงอในชิ้นงานฉีด จึงเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบแม่พิมพ์ที่มีความเที่ยงตรงสูง P.Postawa, J. Koszciel (In Press) [2] ศึกษาการเปลี่ยนแปลงเชิงหดตัวและเชิงน้ำหนักในชิ้นงานฉีด พิจารณาตามช่วงของกระบวนการฉีด โดยประเมินผลการทดลองจากกระบวนการฉีดของชิ้นงาน ค่าที่ได้จากการทดลองแสดงว่าการควบคุมค่าการหดตัวควรให้ความสำคัญกับความดันในการอัดแม่พิมพ์ควบคู่ไปกับพารามิเตอร์อื่นๆ ในกระบวนการผลิต Haihong Xu, John Wysocki, David Kazmer (In Press) [3] ศึกษาการหดตัวของชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปทางความร้อน โดยสร้างซอฟต์แวร์สำเร็จรูปสำหรับการวิเคราะห์ทางไฟไนต์อีลิเมนต์ เพื่อใช้ทำนายค่าการหดตัวสำหรับกระบวนการขึ้นรูปทางความร้อน รวมทั้งกระบวนการผลิตอื่นๆ การวิเคราะห์จะพิจารณาจากทฤษฎีทางความร้อน สมัชชา โชคชัยวิวัฒน์ (2545) [4] ศึกษาการประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยศึกษาตัวแปรและปัญหาที่ทำให้เกิดรอยประสาน (Weld line) และ รอยยุบ (Sink mark) ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการไหลของพลาสติกเหลว ที่เงื่อนไขต่างๆ กัน

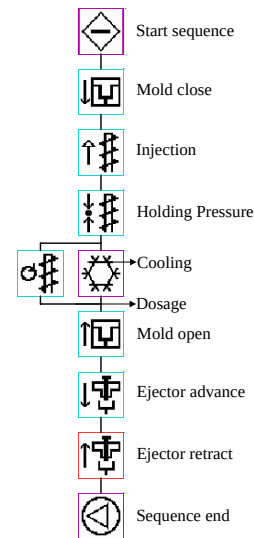
จากงานวิจัยที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ มีงานวิจัยหลายชิ้นที่ศึกษาเกี่ยวกับการบิดงอและการหดตัวของผลิตภัณฑ์ แต่ยังไม่พบการศึกษาที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการหดตัวเชิงปริมาตรมากนัก โดยเฉพาะการศึกษาการหดตัวจากชิ้นงานจริง งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาในประเด็นดังกล่าว โดยทำการคำนวณค่าการหดตัวของชิ้นงานบนสมมุติฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 อุปกรณ์

1. เครื่องฉีดพลาสติก ARBURG รุ่น ALLROUNDER 220 S
2. แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกพิมพ์ส้อม S45C ขนาด 250x250x200 mm

3. เม็ดพลาสติกโพลิโพรพิลีน (PP) และ โพลิสไตรีน (PS)



รูปที่ 2 แสดงลำดับขั้นของกระบวนการฉีดพลาสติก

2.2 วิธีการทดลอง

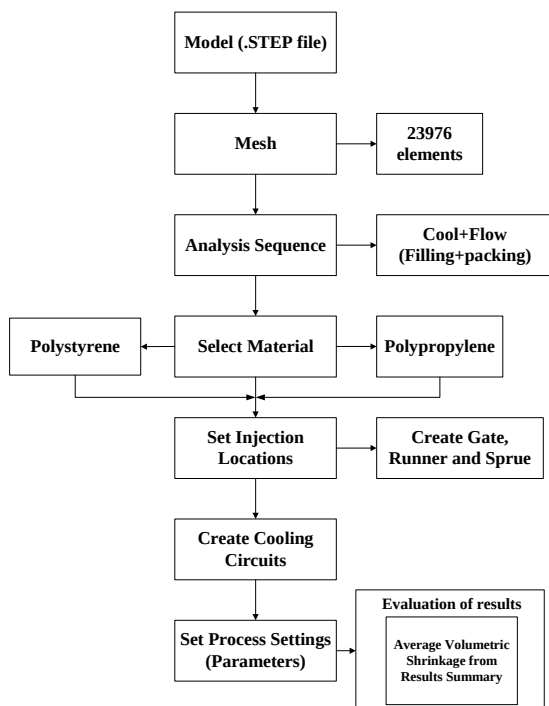
1. อบเม็ดโพลิโพรพิลีนที่อุณหภูมิ 90°C และโพลิสไตรีนที่ 80°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. นำไปใส่ในถังกรวย (Hopper) โดยทำการทดลองแยกกัน
3. ตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยเริ่มจากตั้งค่าอุณหภูมิหลอมละลายพลาสติกที่ 240°C อุณหภูมิแม่พิมพ์ 40°C
4. ตั้งค่าพารามิเตอร์ในช่วงการฉีด (Filling) ได้แก่ ความดันฉีด 500 bar อัตราการฉีด 5 ccm/s โดยใช้เวลาฉีด 3 s ในการสลับจากความดันฉีดเป็นความดันย่ำ
5. ตั้งค่าพารามิเตอร์ในช่วงการย่ำ (Packing) โดยปรับค่าความดันย่ำในช่วง 100-500 bar และใช้เวลาย่ำในช่วง 0-10.5 s
6. ในช่วงหล่อเย็น (Cooling) ที่มีวงจรเป็นรูปตัวยู 2 channel ขนานกัน ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 6 mm ตั้งค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 20°C อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น 6.75 l/min และเวลาหล่อเย็น 15 s
7. ทดลองฉีดผลิตภัณฑ์เพื่ออุ่นแม่พิมพ์จนกระทั่งแม่พิมพ์มีอุณหภูมิ 40°C จึงเริ่มทำการฉีดจริงโดยตั้งรอบการทำงานเท่ากับ 10 cycles
8. เก็บผลิตภัณฑ์ไว้ 48 hr นำมาชั่งน้ำหนักโดยเครื่องชั่งมีความละเอียด 0.0001 g
9. บันทึกผลการทดลอง

3. วิธีวิเคราะห์ทางไฟไนต์อีลิเมนต์



รูปที่ 3 แสดง Model 3 มิติ

1. สร้างแบบจำลองผลิตภัณฑ์ส้อมรูปทรงสามมิติด้วยโปรแกรม SolidWorks 2004
2. บันทึกแฟ้มเป็น STEP file (.STEP)
3. นำแฟ้มแบบจำลองจากโปรแกรม Solidwork 2004 (.STEP) มา Import ในโปรแกรม Moldflow Plastics Insight 4.0
4. สร้าง Mesh สามเหลี่ยมแบบ Fusion พร้อมตั้งค่า Global edge length เท่ากับ 0.99 mm. มีค่า Aspect ratio เท่ากับ 17.4
5. Generate Mesh แล้วพบว่าชิ้นงานทั้งชิ้นประกอบด้วย 23976 elements
6. ตั้งลำดับขั้นการวิเคราะห์เป็น Cool+Flow (Cooling, Filling+packing)
7. เลือกเม็ดพลาสติกให้ตรงกับการทดลอง
8. สร้างขนาดและตำแหน่งของรูเข้า (gate) เท่ากับ 2x2x1 mm รูวิ่ง (runner) แบบครึ่งวงกลมที่มี ϕ เท่ากับ 6 mm หนา 3 mm และ sprue มี ϕ เริ่มต้นเท่ากับ 6.5 mm ϕ สิ้นสุดเท่ากับ 3 mm มีความยาว 56 mm
9. สร้างวงจรน้ำหล่อเย็น
10. ตั้งค่าพารามิเตอร์ในการจำลองกระบวนการฉีด
11. ทำการวิเคราะห์
12. บันทึกผลการวิเคราะห์ Average volumetric shrinkage (at ejection)

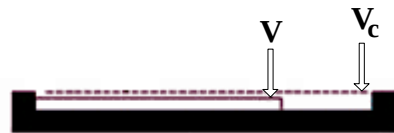


รูปที่ 4 แสดงลำดับสภาวะการทำงานของโปรแกรม Moldflow

โปรแกรม Moldflow จะวิเคราะห์งานฉีดพลาสติกโดยการปรับเปลี่ยนข้อมูลคุณสมบัติทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) บนเงื่อนไขการฉีด เช่น Injection pressure, Injection rate, Mold temperature และ Melt temperature นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ร่วมกับ Molding Window Analysis ซึ่งเป็นฐานข้อมูลที่มีอยู่ในโปรแกรมและวิธีการพิจารณาการแปลผลการวิเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการ Cool+Flow (Fill + Pack)

4. ผลและวิเคราะห์ผล

จากวิธีทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถบอกได้ว่า เมื่อทำการทดลองในหนึ่งรอบการทำงาน (Cycle time) ใช้เวลาเฉลี่ยประมาณ 33.5 วินาที ต่อผลการทดลองหนึ่งตัวอย่าง และเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าใช้เวลาเฉลี่ยประมาณ 8000 วินาที เมื่อนำผลการทดลองไปซิงก์น้ำหนักหลังจากปลดชิ้นงาน 48 ชั่วโมงแล้วพบว่า น้ำหนักเฉลี่ยของโพลีสไตรีนและโพลิโพรพิลีนเท่ากับ 3.2267 และ 2.6732 กรัม ตามลำดับ จากรูปที่ 5 แสดงการหดตัวหลังจากปลดชิ้นงานแล้ว



รูปที่ 5 แสดงลักษณะการหดตัวของชิ้นงาน

จากรูปที่ 5 จะได้

$$S_V = \frac{V_C - V}{V_C} = 1 - \frac{V}{V_C} \quad (1)$$

V_C ปริมาตรของคาร์วี่ที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ

V ปริมาตรของชิ้นงานที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ

ผลิตภัณฑ์เริ่มหดตัวและมีขนาดเล็กกว่าคาร์วี่ เมื่อความดันในคาร์วี่ลดลงหลังจาก Gate ปิด ในสภาวะนี้ความดันย่ำไม่สามารถที่จะเติมพลาสติกเข้าไปในคาร์วี่ได้อีกและความดันโดยทั่วไปจะเท่ากับความดันบรรยากาศแต่ยังมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ ซึ่งน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ (G) สามารถคำนวณได้จาก

$$G = \frac{V_C}{V_{p=1}} \quad (2)$$

เมื่อถึงผลิตภัณฑ์ให้อุณหภูมิลดลงเท่ากับอุณหภูมิบรรยากาศ (ความดันบรรยากาศ) การลดลงของอุณหภูมินี้จะทำให้การหดตัวมากขึ้นโดยน้ำหนักเท่าเดิม ซึ่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ในสมการที่ 2 นี้จะเท่ากับน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นสุดท้ายที่อุณหภูมิบรรยากาศในสมการที่ 3

$$G = \frac{V}{V_{Ta}} \quad (3)$$

จากสมการที่ 2 และ 3 สามารถคำนวณอัตราส่วนปริมาตรได้

$$\frac{V}{V_c} = \frac{V_{Ta}}{V_{p=1}} \quad (4)$$

ดังนั้นสมการที่ 1 สามารถเขียนให้อยู่ในรูป

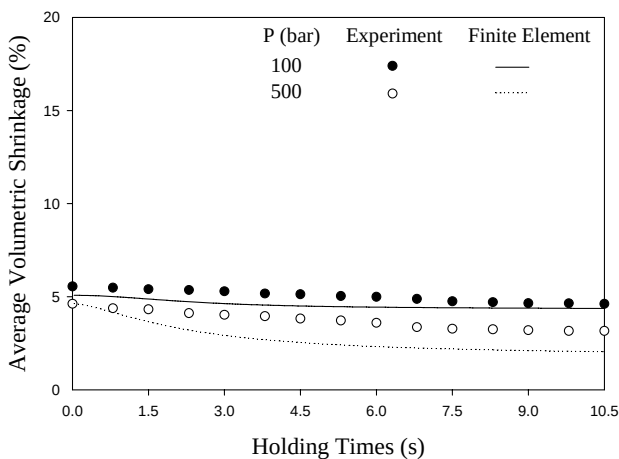
$$S_v = 1 - \frac{V_{Ta}}{V_{p=1}} \quad (5)$$

$V_{p=1}$ คือปริมาตรจำเพาะของพลาสติกที่ความดันบรรยากาศ (อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ)

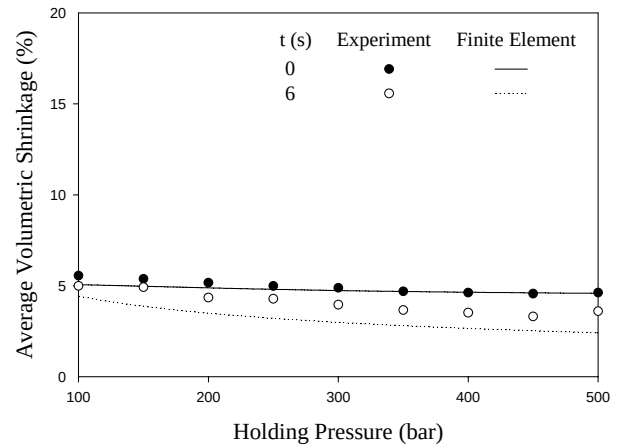
V_{Ta} คือปริมาตรจำเพาะของพลาสติกที่ความดันและอุณหภูมิบรรยากาศ

จากสมการที่ 1 ใช้ในการคำนวณหาค่า Average Volumetric Shrinkage ของผลิตภัณฑ์ และกำหนดให้อุณหภูมิหลอมละลายคงที่ (240°C) ความหนาแน่นของเม็ดพลาสติกกับความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ที่ถูกปลดออกมาจากแม่พิมพ์นาน 48 ชั่วโมงมีค่าเท่ากัน ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม Moldflow Plastics Insight 4.0 แสดงได้ดังนี้

1. โพลิสไตรีน (Polystyrene)

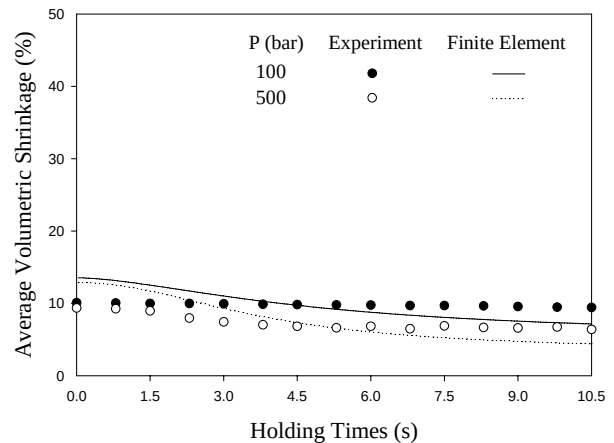


รูปที่ 6 เปรียบเทียบความดัน

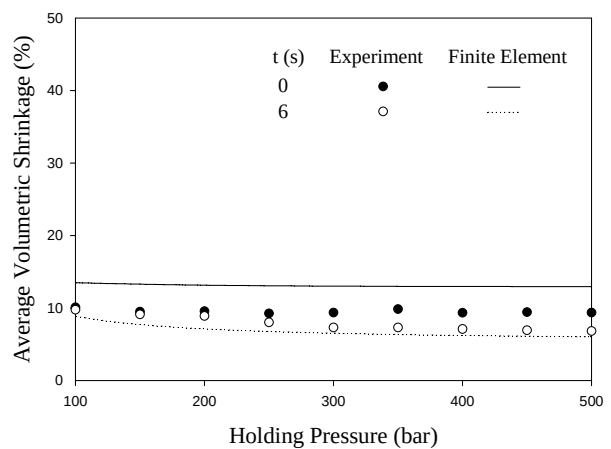


รูปที่ 7 เปรียบเทียบเวลา

2. โพลีโพรพิลีน (Polypropylene)



รูปที่ 8 เปรียบเทียบความดัน



รูปที่ 9 เปรียบเทียบเวลา

จากผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Moldflow Plastics Insight 4.0 พบว่าพลาสติกขณะเหลวและเริ่มแข็งตัวจะมีปริมาตรไม่เท่ากัน เนื่องจากขณะเย็นตัวโมเลกุลของพลาสติกจะมีการจัดเรียงตัวใหม่ให้เป็นระเบียบมากขึ้น ซึ่งก็คือการตกผลึกนั่นเอง ดังนั้น ปริมาณของพลาสติกแข็งจะน้อยกว่าปริมาตรของพลาสติกเหลว ปริมาณและลักษณะการตกผลึกจะขึ้นอยู่กับชนิดของเม็ดพลาสติก สามารถวิเคราะห์เป็นความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวเชิงปริมาตรเฉลี่ย (Average volumetric shrinkage) ความดันย่ำ (Holding pressure) และ เวลา ย่ำ (Holding time) ภายใต้ช่วงการย่ำ (Packing) ได้ดังนี้

เมื่อเพิ่มความดันย่ำ พบว่าโพลิสไตรีนเป็นโพลิเมอร์ชนิดโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ (Amorphous) และโพลิโพรพิลีนเป็นโพลิเมอร์ชนิดโครงสร้างเป็นผลึกบางส่วน (Semi-crystalline) นั้น เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรมีแนวโน้มลดลง ทั้งวิธีทดลองและวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ เนื่องจากความดันย่ำที่ใช้จะอยู่ในช่วงของเวลา ย่ำ เมื่อความดันย่ำเพิ่มขึ้นเนื้อพลาสติกเหลวที่ยังไม่แข็งตัวจะถูกอัดเข้าแม่พิมพ์อย่างต่อเนื่อง ทำให้ปริมาตรของชิ้นงานเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับปริมาตรของคาวิตี (Cavity) ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของปริมาตรมีค่าน้อยลง

เมื่อเพิ่มเวลา ย่ำ พบว่าโพลิเมอร์ทั้งสองชนิดนั้น เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรมีแนวโน้มลดลงทั้งสองวิธี เนื่องจากในช่วงเวลานี้สกรูจะอัดค้ำไว้ด้วยความดันย่ำ เพื่อชดเชยพลาสติกที่จะหดตัว ซึ่งเป็นช่วงระยะเวลาที่นานเพียงพอที่ gate จะปิดคือชิ้นงานเริ่มแข็งตัวและไม่สามารถอัดเนื้อพลาสติกเข้าไปได้อีก

5. สรุป

ช่วงการย่ำเป็นช่วงที่มีความสำคัญมากช่วงหนึ่งในกระบวนการฉีดพลาสติก เมื่อความดันและเวลา ย่ำเพิ่มขึ้น พบว่าผลิตภัณฑ์มีน้ำหนักมากขึ้นและไม่เกิดรอยยุบ แสดงว่าช่วงการย่ำมีอิทธิพลต่อการหดตัวเชิงปริมาตรของผลิตภัณฑ์ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างโพลิสไตรีนและโพลิโพรพิลีน พบว่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรของโพลิโพรพิลีนมีค่ามากกว่าโพลิสไตรีนในสภาวะเดียวกัน และพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Error) เฉลี่ยของโพลิโพรพิลีนมีค่า 22.15 % โพลิสไตรีนมีค่า 18.5 %

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ผศ. สถาพร ชาทาคม รองผู้อำนวยการฝ่ายวิชาการ สำนักคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ความอนุเคราะห์ License โปรแกรม Moldflow Plastic Insight 4.0 ณ โอกาสนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Du-Soon Choi and Yong-Taek Im, 2000 "Prediction of shrinkage and warpage in consideration of residual stress in integrated simulation of injection molding" Published by Elsevier Science Ltd. pp. 655-665
- [2] P.Posttawa, J. Koszkuł (In Press) "Change in injection moulded parts shrinkage and weight as a function of processing conditions" Published by Elsevier Science Ltd.
- [3] Haihong Xu, John Wysocki, David Kazmer (In Press) "SHRINKAGE STUDY OF THERMOFORMED PARTS" Published by Elsevier Science Ltd.
- [4] สมัชชา โชคชัยวิวัฒน์, 2545 "การศึกษาการแก้ไขปัญหาของการเกิด Weld line และ Sink mark ในการขึ้นรูปพลาสติกแบบฉีด โดยใช้โปรแกรม Moldex" สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [5] Gastrow, 1983 "Injection Molds" Hanser Publishers; Munich, Vienna, New York.
- [6] W. Michaeli, H. Kaufmann, H. Greif, G. Kretzschmar and R. Bertuleit, 1995 "Training in Injection Molding" Hanser Publishers; Munich, Vienna, New York.

ภาคผนวก จ
คำอธิบายสัญลักษณ์และหน่วย

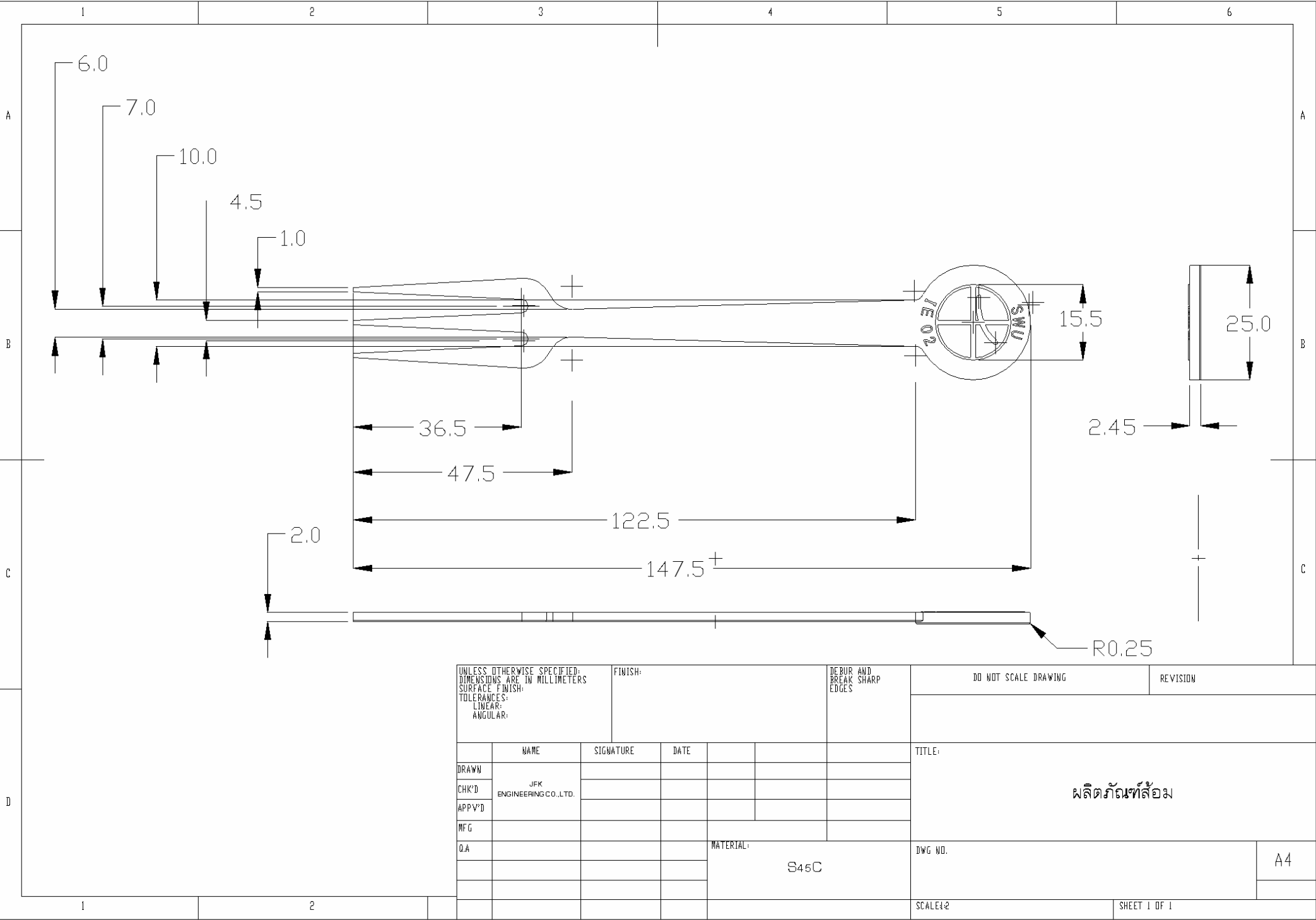
คำอธิบายสัญลักษณ์และหน่วย

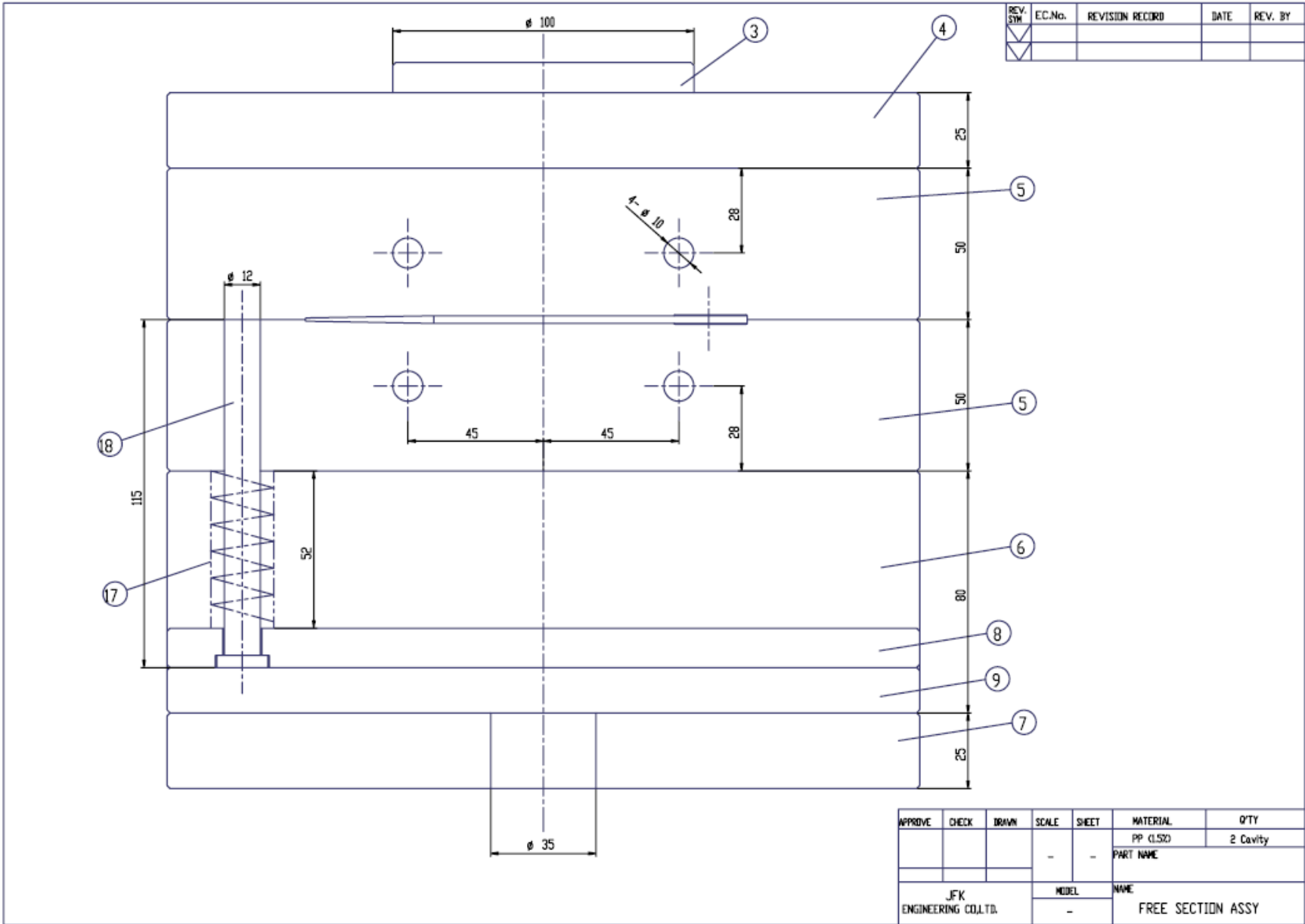
ABS	คือ Acrylonitrile butadiene styrene	-
b	คือ สัมประสิทธิ์ของสภาวะในรูปอุณหภูมิ	-
C	คือ ค่าคงที่	-
CA	คือ Cellulose acetate	-
CAB	คือ Cellulose acetate butyrate	-
c	คือ ความร้อนจำเพาะ	J/kg. °C
EPS	คือ Expandable polystyrene	-
GPS	คือ General purpose polystyrene	-
g	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก	m/s ²
HDPE	คือ High density polyethylene	-
HIPS	คือ High impact polystyrene	-
K	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	W/m. °C
LDPE	คือ Low density polyethylene	-
P305	คือ ความดันฉีด	bar
P311	คือ ความดันย่ำเริ่มต้นในช่วงเวลา t311	bar
P312	คือ ความดันย่ำเริ่มต้นในช่วงเวลา t312	bar
P313	คือ ความดันย่ำแบบขั้นในช่วงเวลา t313	bar
P314	คือ ความดันย่ำสุดท้ายในช่วงเวลา t314	bar
PA	คือ Polyamine	-
PC	คือ Polycarbonate	-
POM	คือ Polyoxymethylene	-
PP	คือ Polypropylene	-
PS	คือ Polystyrene	-
PVC rigid	คือ Polyvinyl chloride rigid	-
PVC soft	คือ Polyvinyl chloride soft	-
p	คือ ความดัน	bar
Q	คือ ปริมาณความร้อนที่ผลิตเองได้	W
SAN	คือ Styrene acrylonitrile	-
$\bar{T}$	คือ ผลต่างของสภาวะในรูปอุณหภูมิ	°K
T ₀	คือ อุณหภูมิเฉลี่ย	°K

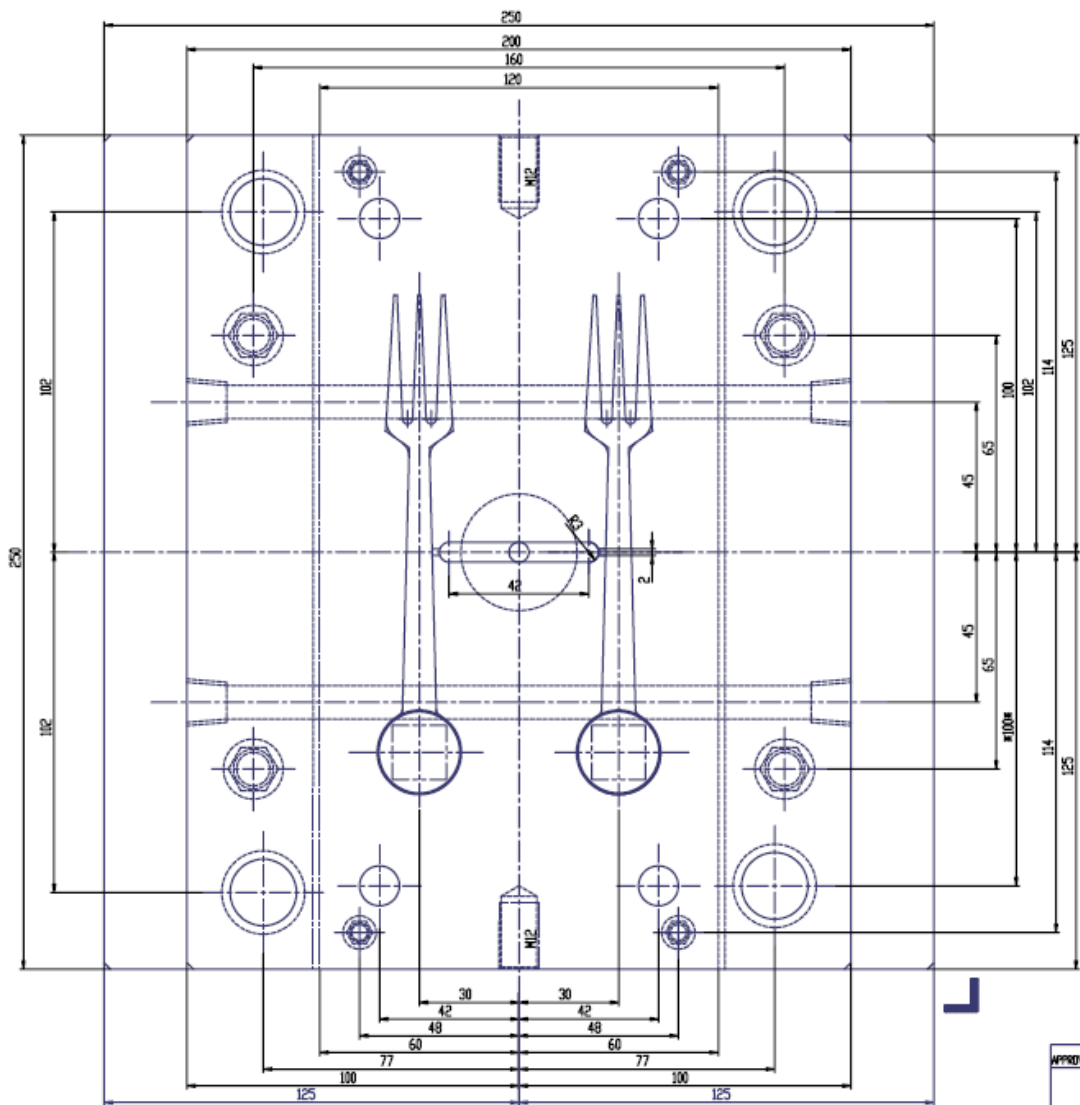
คำอธิบายสัญลักษณ์และหน่วย (ต่อ)

T_t	คือ อุณหภูมิกระบวนการฉีด	$^{\circ}\text{K}$
t_{311}	คือ เวลาเริ่มต้นของการสลับจากความดันฉีดเป็นความดันย่ำ	s
t_{312}	คือ เวลายุ่ำในช่วงความดันย่ำเริ่มต้น	s
t_{313}	คือ เวลายุ่ำในช่วงความดันย่ำแบบขึ้น	s
t_{314}	คือ เวลายุ่ำในช่วงความดันย่ำสุดท้าย	s
t_n	คือ เวลายุ่ำ	s
u	คือ ความเร็วในแนวแกน x	m/s
V	คือ ปริมาตรของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ	cm^3
V_C	คือ ปริมาตรของคาร์บิที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ	cm^3
V_D	คือ ปริมาตรพลาสติกเหลวที่ใช้ในการฉีดแต่ละครั้ง	cm^3
v	คือ ความเร็วในแนวแกน y	m/s
W_s	คือ น้ำหนักรวม (ผลิตภัณฑ์+ทางวิ่ง+ทางเข้า+ทางฉีด)	g
w	คือ ความเร็วในแนวแกน z	m/s
β	คือ สัมประสิทธิ์แรงลอยตัวเนื่องจากอุณหภูมิ	-
γ	คือ ความเครียดเฉือน	-
$\dot{\gamma}$	คือ อัตราการเฉือน	$\frac{1}{\text{s}}$
η	คือ ความหนืดที่เกิดจากการเฉือน	Pa.s
$V_{P=1}$	คือ ปริมาตรจำเพาะของพลาสติกที่ความดันบรรยากาศ	cm^3/g
V_{Ta}	คือ ปริมาตรจำเพาะที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ	cm^3/g
ρ	คือ ความหนาแน่น	g/cm^3
ρ_s	คือ ความหนาแน่นของโพลิเมอร์ในสถานะของแข็ง	g/cm^3
σ	คือ ความเค้นในแนวตั้งฉาก	Pa
τ	คือ ความเค้นเฉือน	Pa

ภาคผนวก จ
แบบผลิตภัณฑ์และแม่พิมพ์ส้อม

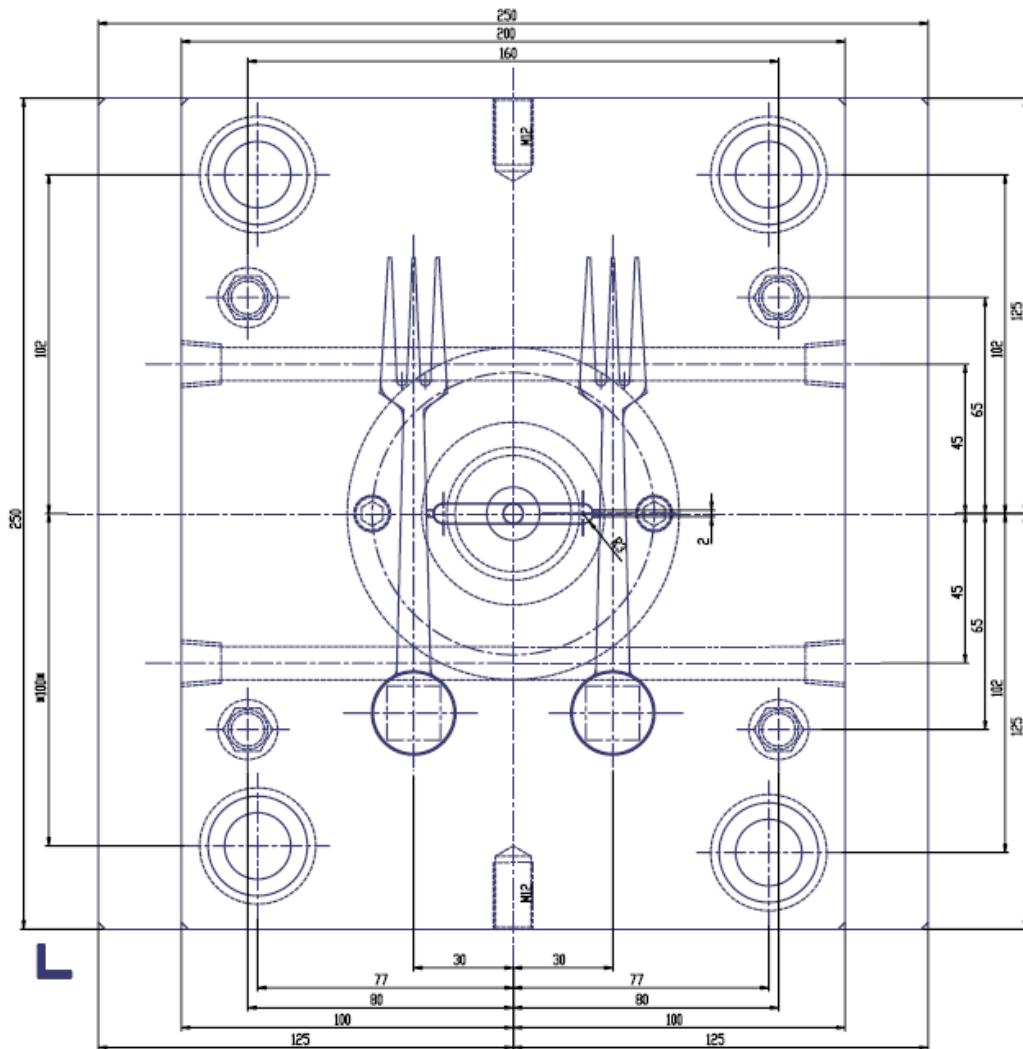






REV. NO.	EC.No.	REVISION RECORD	DATE	REV. BY
1				

APPROVE	CHECK	DRAWN	SCALE	SHEET	MATERIAL	QTY
			-	-	PP (LSD)	2 Cavity
					PART NAME	
JFK ENGINEERING CO., LTD.					NAME	
					MOVING HALF	



REV. STN	EC.No.	REVISION RECORD	DATE	REV. BY

APPROVE	CHECK	DRAWN	SCALE	SHEET	MATERIAL	Q'TY
			-	-	PP GLSD	2 Cavity
					PART NAME	
					NAME	
JFK ENGINEERING CO.,LTD.				-	FIXED HALF	

PART NO.		PART NAME		MODEL		PART LIST	
JFK ENGINEERING CO.,LTD.				REPORTOR			
				CHECKED			
				APPROVED			
DRD	No.	PART NAME	QTY	MAT'L	SIZE	REMARK	
	1	SOCKET SCREWS	2	STD.	M6x20		
	2	LOCATING RING	1	SS 41	LRJS D100-T15-B35		
	3	SPRUE BUSH	1	STD.	SRJB D16 H25 L75		
	4	TOP CLAMPING PLATE	1	S 50C	250x250x25		
	5	CAVITY PLATE	1	P-20	200x250x50		
	6	CORE PLATE	1	P-20	200x250x50		
	7	SPACER BLOCK	2	S 50C	38x250x80		
	8	BOTTOM CLAMPING PLATE	1	S50C	250x250x25		
	9	TOP EJECTOR PLATE	1	S50C	120x250x13		
	10	BOTTOM EJECTOR PLATE	1	S50C	120x250x15		
	11	SOCKET SCREWS	4	STD.	M6x20		
	12	GUIDE PIN	4	STD.	GPH 20 - L90		
	13	GUIDE BUSH	4	STD.	GBHE 20 - L50		
	14	EJECTOR PIN	1	STD.	ø 6x104L		
	15	SOCKET SCREWS	4	STD.	M12x30		
	16	SOCKET SCREWS	4	STD.	M12x120		
	17	SPRING	4	STD.	SVU 21-60		
	18	RETURN PIN	4	STD.	ø 12x115L		
	19						
	20						
	21						
	22						
	23						
	24						
	25						
	26						
	27						
	28						
	29						
	30						
REMARK							

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นายสุภกิจ ขาวเนตร
วันเดือนปีเกิด	19 กรกฎาคม พ.ศ. 2517
สถานที่เกิด	อ่างทอง
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	35/2 ม.1 ต.สายทอง อ.ป่าโมก จ.อ่างทอง 14130

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2531	มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนอ่างทองปัทมโรจน์วิทยาคม
พ.ศ. 2534	ประกาศนียบัตรวิชาชีพ วิทยาลัยเทคนิคอ่างทอง
พ.ศ. 2537	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง วิทยาลัยเทคนิคพระนครศรีอยุธยา
พ.ศ. 2540	อุดมศึกษา (อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต) วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ. 2550	บัณฑิตศึกษา (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต) วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ