



# ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

ปริญญา

วิศวกรรมเคมี

วิศวกรรมเคมี

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การทำนายการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงในการอัดรีดแผ่น

Prediction of High Density Polyethylene Sheet Extrusion Flow

นามผู้วิจัย นางสาวฐิติมา ทองประดิษฐ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( รองศาสตราจารย์เทอดไทย วัฒนธรรม, Ph.D. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( รองศาสตราจารย์สุนันท์ ลิ้มตระกูล, D.Sc. )

หัวหน้าภาควิชา

( รองศาสตราจารย์ผิงผาย พรรณวดี, D.Sc. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การทำนายการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงในการอัดรีดแผ่น

Prediction of High Density Polyethylene Sheet Extrusion Flow

โดย

นางสาวฐิติมา ทองประดิษฐ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

พ.ศ. 2552

ฐิติมา ทองประดิษฐ์ 2552: การทำนายการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงในการ  
อัดรีดแผ่น ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) สาขาวิศวกรรมเคมี  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:  
รองศาสตราจารย์เทอดไทย วัฒนธรรม, Ph.D. 134 หน้า

กระบวนการอัดรีดเป็นกระบวนการที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ เมื่อพอลิเมอร์หลอม  
เหลวถูกอัดรีดผ่านดายแผ่นจะเกิดการบวมพองและได้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่กว่าความหนาของ  
ดายแผ่น จึงต้องมีการปรับเปลี่ยนความหนาดายเพื่อชดเชยการบวมพองที่เกิดขึ้น โดยวิธีปรับอัตรา  
ส่วนตามประสบการณ์ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติการไหลและปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการบวมพอง  
ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวอัดรีดผ่านดายแผ่น และสร้างแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม POLYFLOW เพื่อทำนายอัตราส่วนการบวมพอง ซึ่งศึกษาสมบัติ  
การไหลโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวประกบดาย ที่ความเร็วรอบของสกรู 6-15 รอบต่อนาที  
ช่วงอุณหภูมิ 423-473 เคลวิน และใช้ดายแผ่นในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบวมพอง จากการ  
ทดลองวัดค่าสมบัติการไหลโดยใช้ดายรูเล็ก พบว่า ความหนืดเหนือนมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ  
และอัตราเฉือนที่ผนัง โดยเป็นพฤติกรรมการกวนเหลว ส่วนการบวมพอง พบว่า อัตราส่วนการ  
บวมพองลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่อัตราส่วนการบวมพองเพิ่มขึ้น ตามอัตราเฉือนที่ผนัง การ  
ทดลองอัดรีดจากดายแผ่น ความหนาดาย 0.6-1.0 มิลลิเมตร อัตราเฉือนที่ผนัง 5.4-47.4 วินาที<sup>-1</sup> ได้  
อัตราส่วนการบวมพองเป็น 1.42-1.60 จากการใช้กฎสมการ Carreau-Yasuda สำหรับการศึกษ  
การบวมพองโดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงถึงพฤติกรรมการบวมพองของพอลิ  
เอทิลีนความหนาแน่นสูง และใช้เทคนิคไฟไนต์อีลิเมนต์แก้สมการในโปรแกรม POLYFLOW ซึ่ง  
มีสมมุติฐาน คือ การไหลเป็นแบบนอนนิวโตเนียนที่อุณหภูมิกคงที่ รูปแบบของปัญหาเป็นแบบ  
ครึ่งรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า 2 มิติ ไม่มีการลื่นไหลที่ผนัง การไหลเป็นแบบไม่อัดตัว การไหลอยู่ใน  
สภาวะคงตัว และเมื่อพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวผ่านดายแผ่นออกมาเป็นการไหล  
แบบพื้นผิวอิสระ การเปรียบเทียบอัตราส่วนการบวมพองที่ได้จากแบบจำลองกับการทดลอง  
พบว่า แบบจำลองให้อัตราส่วนการบวมพองต่ำกว่าผลการทดลองประมาณ 13%

Titima Thongpradid 2009: Prediction of High Density Polyethylene Sheet Extrusion Flow. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Terdthai Vatanatham, Ph.D. 134 pages.

The extrusion process is used to produce many products. Polymer melt extruded from a sheet die is thicker than the die opening. It is the result of extrudate die swell. Therefore, modification the die opening to compensate the extrudate swelling is necessary to achieve the desired dimensions by adjusting the opening ratio empirically. The aims of this study are to investigate the melt rheological and to study the extrudate swelling behavior of HDPE from sheet die and simulate the swelling by using POLYFLOW program to predict the swell ratio. The melt rheological properties were measured by using a single screw extruder with capillary dies with the screw speed of 6-15 rpm at a temperature range of 423-473 K. The extrudate swell was studied in a sheet die. The experimental results showed that shear viscosity decreased with increasing temperature and wall shear rate which was the shear thinning behavior. Moreover, the results indicated that the extrudate swell ratio decreased with increasing temperature, but extrudate swell ratio increased with wall shear rate. Experiment with sheet die thicknesses in a range of 0.6-1.0 mm at a wall shear rate range of 5.4-47.4 s<sup>-1</sup> showed the extrudate swell ratios of 1.42-1.60. Numerical simulations of extrudate swell for HDPE melt were carried out using the Carreau-Yasuda law model. Numerical model using the finite element method was applied in POLYFLOW program. This model is based on clarified assumptions of generalized non-newtonian isothermal flow problem, with 2D and ½ planar geometry. The assumptions are no slip at the wall, incompressible fluid, steady state, and free surface flow after die exit. Comparisons between the experimental result and the results from POLYFLOW program using Carreau-Yasuda law showed that the simulation result gave lower swell ratio with the error of approximately 13%.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.เทอดไทย วัฒนธรรม ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่  
กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ และตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จ  
ลุล่วง และขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สุนันท์ ลิ้มตระกูล ผศ.ดร.มานพ เจริญไชยตระกูล และ รศ.ดร.  
วิทยา เทพไพฑูรย์ ที่กรุณาสละเวลาในการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณบริษัท บางกอกโพลีเอทิลีน จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านข้อมูล  
และเมล็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงสำหรับงานวิจัย และขอขอบคุณผู้ประสานงานทุกๆ  
ท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์แก่งานวิจัย

ขอขอบคุณทุนวิจัยจาก โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิศวกรรมเคมี ภาควิชา  
วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ภายใต้ศูนย์ความเป็นเลิศด้าน  
ปิโตรเลียมปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง (NCE-PPAM) ที่ให้การสนับสนุนแก่ผู้วิจัย

ท้ายสุดขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และสมาชิกในครอบครัวทุกท่าน ที่คอยให้  
ความรัก ความห่วงใยและกำลังใจอันเปี่ยมล้นตลอดมา รวมถึงพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ที่คอยให้กำลังใจ  
ใจแก่ข้าพเจ้าจนสามารถประสบผลสำเร็จ ประโยชน์อันเนื่องมาจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะพึงมีเพียง  
ใด ขอมอบแต่ คุณพ่อ คุณแม่ ครู อาจารย์ และผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ได้ให้ความเมตตาและ  
อบรมสั่งสอนมาจนถึงปัจจุบัน

ฐิติมา ทองประดิษฐ์

มีนาคม 2552

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	54
อุปกรณ์	54
วิธีการ	54
ผลและวิจารณ์	66
สรุปและข้อเสนอแนะ	91
สรุป	91
ข้อเสนอแนะ	92
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	93
ภาคผนวก	97
ภาคผนวก ก ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลที่ได้จากเครื่องอัดรีดแบบ สกรูเดี่ยว	98
ภาคผนวก ข ผลการทดลองวัดค่าอัตราส่วนการบวมพอง โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบ สกรูเดี่ยวประกอบคายแผ่น	115
ภาคผนวก ค วิธีการคำนวณ	122
ภาคผนวก ง การเปรียบเทียบผลของอัตราส่วนการบวมพองที่ได้จากการทดลอง และโปรแกรม POLYFLOW	127
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	134

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณสมบัติของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง	55

## ตารางผนวกที่

ก1	ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางดวย 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 10	99
ก2	ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางดวย 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 20	99
ก3	ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางดวย 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 30	100
ก4	ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ที่อุณหภูมิ 433 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางดวย 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 10	101
ก5	ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ที่อุณหภูมิ 433 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางดวย 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 20	101
ก6	ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ที่อุณหภูมิ 433 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางดวย 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 30	102
ก7	ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ที่อุณหภูมิ 443 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางดวย 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 10	103
ก8	ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ที่อุณหภูมิ 443 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางดวย 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 20	103
ก9	ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ที่อุณหภูมิ 443 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางดวย 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 30	104
ก10	ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ที่อุณหภูมิ 453 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางดวย 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 10	105
ก11	ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ที่อุณหภูมิ 453 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางดวย 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 20	105

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก12	ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ที่อุณหภูมิ 453 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางดวย 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 30	106
ก13	ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ที่อุณหภูมิ 463 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางดวย 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 10	107
ก14	ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ที่อุณหภูมิ 463 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางดวย 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 20	107
ก15	ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ที่อุณหภูมิ 463 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางดวย 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 30	108
ก16	ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ที่อุณหภูมิ 473 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางดวย 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 10	109
ก17	ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ที่อุณหภูมิ 473 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางดวย 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 20	109
ก18	ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ที่อุณหภูมิ 473 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางดวย 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 30	110
ก19	ผลการทดลองจากการทำ Bagley's Correction เพื่อหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว โดยใช้โปรแกรม Polylab Polycab ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน	111
ก20	ผลการทดลองจากการทำ Bagley's Correction เพื่อหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว โดยใช้โปรแกรม Polylab Polycab ที่อุณหภูมิ 433 เคลวิน	111
ก21	ผลการทดลองจากการทำ Bagley's Correction เพื่อหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว โดยใช้โปรแกรม Polylab Polycab ที่อุณหภูมิ 443 เคลวิน	112
ก22	ผลการทดลองจากการทำ Bagley's Correction เพื่อหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว โดยใช้โปรแกรม Polylab Polycab ที่อุณหภูมิ 453 เคลวิน	113

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก23	ผลการทดลองจากการทำ Bagley's Correction เพื่อหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว โดยใช้โปรแกรม Polylab Polycab ที่อุณหภูมิ 463 เคลวิน	114
ก24	ผลการทดลองจากการทำ Bagley's Correction เพื่อหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว โดยใช้โปรแกรม Polylab Polycab ที่อุณหภูมิ 473 เคลวิน	114
ข1	อัตราส่วนการบวมพองของ HDPE น้ำหนักของผลิตผลอัดรีด (extrudate) ใช้ความเร็วรอบของสกรูต่างๆ และอัตราเฉือนที่ผนังคายต่างๆ จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ณ อุณหภูมิ 423 เคลวิน ใช้ความหนาคายแผ่นเป็น 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร	116
ข2	อัตราส่วนการบวมพองของ HDPE น้ำหนักของผลิตผลอัดรีด (extrudate) ใช้ความเร็วรอบของสกรูต่างๆ และอัตราเฉือนที่ผนังคายต่างๆ จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ณ อุณหภูมิ 433 เคลวิน ใช้ความหนาคายแผ่นเป็น 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร	117
ข3	อัตราส่วนการบวมพองของ HDPE น้ำหนักของผลิตผลอัดรีด (extrudate) ใช้ความเร็วรอบของสกรูต่างๆ และอัตราเฉือนที่ผนังคายต่างๆ จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ณ อุณหภูมิ 443 เคลวิน ใช้ความหนาคายแผ่นเป็น 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร	118
ข4	อัตราส่วนการบวมพองของ HDPE น้ำหนักของผลิตผลอัดรีด (extrudate) ใช้ความเร็วรอบของสกรูต่างๆ และอัตราเฉือนที่ผนังคายต่างๆ จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ณ อุณหภูมิ 453 เคลวิน ใช้ความหนาคายแผ่นเป็น 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร	119
ข5	อัตราส่วนการบวมพองของ HDPE น้ำหนักของผลิตผลอัดรีด (extrudate) ใช้ความเร็วรอบของสกรูต่างๆ และอัตราเฉือนที่ผนังคายต่างๆ จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ณ อุณหภูมิ 463 เคลวิน ใช้ความหนาคายแผ่นเป็น 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร	120

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข6	อัตราส่วนการบวมพองของ HDPE น้ำหนักของผลิตภัณฑ์อัดรีด (extrudate) ใช้ความเร็วรอบของสกรูต่างๆ และอัตราเฉือนที่ผนังคายต่างๆ จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ณ อุณหภูมิ 473 เคลวิน ใช้ความหนาคายแผ่นเป็น 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร	121
ง1	อัตราส่วนการบวมพองของ HDPE ความเร็วรอบของสกรูต่างๆ และอัตราเฉือนที่ผนังคายต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง และโปรแกรม POLYYFLOW ณ อุณหภูมิ 423 เคลวิน ใช้ความหนาคายแผ่น 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร	128
ง2	อัตราส่วนการบวมพองของ HDPE ความเร็วรอบของสกรูต่างๆ และอัตราเฉือนที่ผนังคายต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง และโปรแกรม POLYYFLOW ณ อุณหภูมิ 433 เคลวิน ใช้ความหนาคายแผ่น 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร	129
ง3	อัตราส่วนการบวมพองของ HDPE ความเร็วรอบของสกรูต่างๆ และอัตราเฉือนที่ผนังคายต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง และโปรแกรม POLYYFLOW ณ อุณหภูมิ 443 เคลวิน ใช้ความหนาคายแผ่น 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร	130
ง4	อัตราส่วนการบวมพองของ HDPE ความเร็วรอบของสกรูต่างๆ และอัตราเฉือนที่ผนังคายต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง และโปรแกรม POLYYFLOW ณ อุณหภูมิ 453 เคลวิน ใช้ความหนาคายแผ่น 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร	131
ง5	อัตราส่วนการบวมพองของ HDPE ความเร็วรอบของสกรูต่างๆ และอัตราเฉือนที่ผนังคายต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง และโปรแกรม POLYYFLOW ณ อุณหภูมิ 463 เคลวิน ใช้ความหนาคายแผ่น 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร	132
ง6	อัตราส่วนการบวมพองของ HDPE ความเร็วรอบของสกรูต่างๆ และอัตราเฉือนที่ผนังคายต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง และโปรแกรม POLYYFLOW ณ อุณหภูมิ 473 เคลวิน ใช้ความหนาคายแผ่น 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร	133

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	สูตร โครงสร้างของพอลิเอทิลีน	5
2	ลักษณะการผิดรูปเนื่องจากการเฉือน (shear deformation)	8
3	ลักษณะการไหลในท่อที่เกิดจากความแตกต่างของความดัน	9
4	การผิดรูปเนื่องจากแรงยึด	10
5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของของไหล	12
6	แบบจำลองของไหลวิสโคอีลาสติกของแมกซ์เวลล์และวอยท์	17
7	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิ	20
8	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดเฉือนและโมดูลัสเฉือน	20
9	ความเค้นเฉือนกับเวลาของพอลิเมอร์ที่มีพฤติกรรมไหลแบบค่าแรงเฉือนลดลงตามเวลา	21
10	ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลและความหนืด	22
11	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนนำกลับได้กับเวลา โดยเปรียบเทียบระหว่างระบบพอลิเมอร์ที่มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างและแคบ	23
12	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนกับส่วน โดยปริมาตรของตัวเติม	25
13	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของโคพอลิเมอร์ LDPE/ethylene-octane	27
14	การไหลกับการเกิดการบวมพอง การเกิดริ้วหนังฉลาม และการหักงอของพอลิเมอร์หลอมเหลว	28
15	พฤติกรรมการบวมพองของพอลิเมอร์หลอมเหลวบริเวณทางออกของดาย	29
16	การวัดการบวมพองของ PS ณ อุณหภูมิคงที่ 180 °ซ ที่ L/D = 40	34
17	การบวมพองของพอลิเมอร์หลอมเหลวกับอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางดาย	36
18	ลักษณะรูปทรงเรขาคณิตของพอลิเมอร์หลอมที่เกิดการบวมพอง	39
19	สภาวะขอบการไหลของพอลิเมอร์ที่เกิดการบวมพอง	41
20	สภาวะขอบสำหรับการเปลี่ยนแปลงการลื่นไหล	43

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	สภาวะขอบการไหลของของไหล	45
22	การแบ่งโดเมนการไหลเป็นอติเม้นต์ย่อยๆ	49
23	ลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม POLYFLOW	50
24	การไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมจากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวประกอบคายนุ้เล็กที่ใช้ในงานวิจัย	57
25	เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวประกอบคายนุ้ที่ใช้ในงานวิจัย	57
26	คายนุ้เล็กที่ใช้ในงานวิจัย	58
27	คายนุ้ที่ใช้ในงานวิจัย	58
28	ลักษณะทางกายภาพ	60
29	รูปทรงของปัญหาการบวมพองของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงในกระบวนการอัดรีด	61
30	สภาวะขอบการไหลของของไหลที่ใช้ในงานวิจัย	64
31	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดเฉือนปรับแก้ที่อัตราเฉือนปรับแก้ต่างๆ ของ HDPE ที่อุณหภูมิ 423-473 เคลวิน	67
32	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนปรับแก้ที่อัตราเฉือนปรับแก้ต่างๆ ของ HDPE ที่อุณหภูมิ 423-473 เคลวิน	68
33	อัตราส่วนการบวมพองของ HDPE หลอม จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวประกอบคายนุ้หนา 0.6 มิลลิเมตร ณ อัตราเฉือนที่ผนังคายนุ้ต่างๆ อุณหภูมิ 423-473 เคลวิน	69
34	อัตราส่วนการบวมพองของ HDPE หลอม จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวประกอบคายนุ้หนา 0.8 มิลลิเมตร ณ อัตราเฉือนที่ผนังคายนุ้ต่างๆ อุณหภูมิ 423-473 เคลวิน	70
35	อัตราส่วนการบวมพองของ HDPE หลอม จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวประกอบคายนุ้หนา 1.0 มิลลิเมตร ณ อัตราเฉือนที่ผนังคายนุ้ต่างๆ อุณหภูมิ 423-473 เคลวิน	70

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
36	อัตราส่วนการบวมพองของ HDPE หลอม จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ณ อัตราส่วนความยาวต่อความหนาตายต่างๆ ที่อุณหภูมิคงที่ 423 เคลวิน และใช้ความเร็วรอบของสกรูคงที่	71
37	รูปแบบความเร็วการไหลภายในตายของ HDPE จากแบบจำลอง ณ อัตราเงื่อนไขต่างๆ ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน และความหนาตายแผ่น 0.6 มิลลิเมตร	73
38	รูปแบบความเร็วการไหลภายในตายของ HDPE จากแบบจำลอง ณ อัตราเงื่อนไขต่างๆ ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน และความหนาตายแผ่น 0.8 มิลลิเมตร	73
39	รูปแบบความเร็วการไหลภายในตายของ HDPE จากแบบจำลอง ณ อัตราเงื่อนไขต่างๆ ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน และความหนาตายแผ่น 1.0 มิลลิเมตร	74
40	รูปแบบความเร็วการไหลภายในตายของ HDPE จากแบบจำลอง ณ อุณหภูมิต่างๆ (423-473 เคลวิน) ที่ความหนาตายแผ่น 0.6 มิลลิเมตร และความเร็วรอบของสกรูคงที่เท่ากับ 6 รอบต่อนาที (อัตราเฉือนที่ผนังตายเป็น 13.51-14.50 วินาที <sup>-1</sup> )	75
41	รูปแบบความเร็วการไหลภายในตายของ HDPE จากแบบจำลอง ณ อุณหภูมิต่างๆ (423-473 เคลวิน) ที่ความหนาตายแผ่น 0.8 มิลลิเมตร และความเร็วรอบของสกรูคงที่เท่ากับ 6 รอบต่อนาที (อัตราเฉือนที่ผนังตายเป็น 8.20-8.71 วินาที <sup>-1</sup> )	76
42	รูปแบบความเร็วการไหลภายในตายของ HDPE จากแบบจำลอง ณ อุณหภูมิต่างๆ (423-473 เคลวิน) ที่ความหนาตายแผ่น 1.0 มิลลิเมตร และความเร็วรอบของสกรูคงที่เท่ากับ 6 รอบต่อนาที (อัตราเฉือนที่ผนังตายเป็น 5.86-6.47 วินาที <sup>-1</sup> )	77
43	รูปแบบความเร็วการไหลภายนอกตายของ HDPE จากแบบจำลอง ที่ระยะห่างจากตาย 0.3 มิลลิเมตร ณ อุณหภูมิต่างๆ (423-473 เคลวิน) ที่ความหนาตายแผ่น 1.0 มิลลิเมตร และความเร็วรอบของสกรูคงที่ 6 รอบต่อนาที	78

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
44	รูปแบบความเร็วการไหลภายนอกคายของ HDPE จากแบบจำลอง ที่ระยะห่างจากคาย 5.0 มิลลิเมตร ณ อุณหภูมิต่างๆ (423-473 เคลวิน) ที่ความหนาคายแผ่น 1.0 มิลลิเมตร และความเร็วรอบของสกรูคงที่ 6 รอบต่อนาที	79
45	รูปแบบความเร็วการไหลภายนอกคายของ HDPE จากแบบจำลอง ที่ระยะห่างจากคาย 1.5 มิลลิเมตร ณ อุณหภูมิต่างๆ (423-473 เคลวิน) ที่ความหนาคายแผ่น 1.0 มิลลิเมตร และความเร็วรอบของสกรูคงที่ 6 รอบต่อนาที	80
46	ค่าความดันภายนอกคายของ HDPE จากแบบจำลอง ตามระยะทางตามแนวแกน y ที่ระยะห่างจากคาย 0.3 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน ณ ความหนาคายแผ่น 1.0 มิลลิเมตร และความเร็วรอบของสกรูคงที่ 6 รอบต่อนาที	81
47	ค่าความดันภายนอกคายของ HDPE จากแบบจำลอง ที่ระยะทางตามแนวแกน x ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน ณ ความหนาคายแผ่น 1.0 มิลลิเมตร ความเร็วรอบของสกรูคงที่ 6 รอบต่อนาที ที่ตำแหน่งกึ่งกลางคาย	82
48	การเปรียบเทียบอัตราส่วนการบวมพองของ HDPE ที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลองจากโปรแกรม POLYFLOW ที่อุณหภูมิต่างๆ (423-473 เคลวิน) ณ อัตราเงื่อนไขที่ผนังคายต่างๆ และความหนาคายแผ่น 0.6 มิลลิเมตร	83
49	การเปรียบเทียบอัตราส่วนการบวมพองของ HDPE ที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลองจากโปรแกรม POLYFLOW ที่อุณหภูมิต่างๆ (423-473 เคลวิน) ณ อัตราเงื่อนไขที่ผนังคายต่างๆ และความหนาคายแผ่น 0.8 มิลลิเมตร	84
50	การเปรียบเทียบอัตราส่วนการบวมพองของ HDPE ที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลองจากโปรแกรม POLYFLOW ที่อุณหภูมิต่างๆ (423-473 เคลวิน) ณ อัตราเงื่อนไขที่ผนังคายต่างๆ และความหนาคายแผ่น 1.0 มิลลิเมตร	85
51	การเปรียบเทียบอัตราส่วนการบวมพองของ HDPE ที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลองจากโปรแกรม POLYFLOW ที่อุณหภูมิต่างๆ (423-473 เคลวิน) ใช้ความหนาคายแผ่น 0.6 มิลลิเมตร และความเร็วรอบของสกรูคงที่เท่ากับ 6 รอบต่อนาที (อัตราเงื่อนไขผนังคาย 13.5-14.50 วินาที <sup>-1</sup> )	86

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
52	การเปรียบเทียบอัตราส่วนการบวมพองของ HDPE ที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลองจากโปรแกรม POLYFLOW ที่อุณหภูมิต่างๆ (423-473 เคลวิน) ใช้ความหนาตายแผ่น 0.8 มิลลิเมตร และความเร็วรอบของสกรูคงที่เท่ากับ 6 รอบต่อนาที (อัตราเฉือนที่ผนังตาย 8.20-8.71 วินาที <sup>-1</sup> )	87
53	การเปรียบเทียบอัตราส่วนการบวมพองของ HDPE ที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลองจากโปรแกรม POLYFLOW ที่อุณหภูมิต่างๆ (423-473 เคลวิน) ใช้ความหนาตายแผ่น 1.0 มิลลิเมตร และความเร็วรอบของสกรูคงที่เท่ากับ 6 รอบต่อนาที (อัตราเฉือนที่ผนังตาย 5.86-6.47 วินาที <sup>-1</sup> )	87
54	การเปรียบเทียบอัตราส่วนการบวมพองของ HDPE ที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลองจากโปรแกรม POLYFLOW ณ อัตราส่วนความยาวต่อความหนาตายต่างๆ ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน และความเร็วรอบของสกรูคงที่ 6 รอบต่อนาที	88
55	อัตราส่วนการบวมพองของ HDPE ที่ได้จากแบบจำลองจากโปรแกรม POLYFLOW ณ อัตราส่วนความยาวต่อความหนาตายต่างๆ โดยทำการปรับเปลี่ยนความยาวตาย ใช้ความหนาตาย 1.0 มิลลิเมตร ณ อุณหภูมิ 423 เคลวิน และความเร็วรอบของสกรูคงที่ 6 รอบต่อนาที	90
<b>ภาพผนวกที่</b>		
ก1	ภาพถ่ายการบวมพองของแผ่นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง	116
ก2	รูปแบบความเร็วการไหลภายในตายของ HDPE ณ อุณหภูมิ 423 เคลวิน ที่ความเร็วรอบของสกรู 6 รอบต่อนาที และความหนาตาย 0.6 มิลลิเมตร	118

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$A$	=	ค่าคงที่สมการไอริง
$A$	=	แฟกเตอร์ความถี่ (frequency factor)
$A_1$	=	พื้นที่ของแผ่นเพลต ( $m^2$ )
$A_2$	=	พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นตั้งฉากกับแนวแรง ( $m^2$ )
$A_3$	=	พื้นที่หน้าตัด ( $m^2$ )
$a$	=	ดัชนีคูณการเปลี่ยนช่วงนิวโตเนียน-กฏสมการยกกำลัง
$B$	=	ค่าคงที่สมการไอริง
$B$	=	อัตราส่วนการบวมพอง (-)
$C$	=	ค่าคงที่สมการไอริง
$D$	=	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของดาวย (diameter) (mm)
$D_{\text{exit}}$	=	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ทางออกของดาวย (mm)
$D_R$	=	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของกรวยใส่พลาสติก (reservoir diameter) (mm)
$E$	=	พลังงานกระตุ้น (activation energy) (KJ/mol)
$f$	=	volumetric force
$f_1$	=	ช่องว่างระหว่างโมเลกุล ณ อุณหภูมิใดๆ
$f_g$	=	ช่องว่างระหว่างโมเลกุล ณ อุณหภูมิคล้ายแก้ว
$f_n$	=	ค่าแรงตั้งฉาก (normal force) (N)
$f_s$	=	แรงพื้นที่แนวสัมผัสพื้นผิว (tangential force) (N)
$F$	=	แรงที่กระทำ (N)
$F_2$	=	แรงดึง (N)
$g$	=	ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก ( $m/s^2$ )
$G$	=	โมดูลัสเฉือนเฉือน (shear modulus) (GPa)
$L$	=	ความยาวดาวยแผ่น (m)
$L_0$	=	ความยาวเริ่มต้น (m)
$L_1$	=	ความยาวที่เวลาใดๆ (m)
$L_2$	=	ระยะตัด (m)
$m$	=	ความเหนียวหนืดของของไหล (consistency of fluid) ( $Pa \cdot s^n$ )
$n$	=	ดัชนีกฏสมการยกกำลัง (power law index) (-)

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$n$	=	เวกเตอร์ตั้งฉากภายนอก (outward normal vector) ที่ระนาบการไหลทางออก
$\bar{n}$	=	เวกเตอร์หนึ่งหน่วย
$N_1$	=	ผลต่างความเค้นฉากลำดับที่หนึ่ง (first normal stress difference) ( $N/m^2$ )
$P$	=	ความดัน (Pa)
$\Delta P_{\text{exit}}$	=	ค่าความดันตกคร่อมที่เหลือของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ออกจากปากตาย (exit pressure loss) (Pa)
$\frac{\Delta P}{\Delta L}$	=	เกรเดียนต์ความดันคงที่
$Q$	=	อัตราการไหลบริเวณทางเข้า ( $m^3/s$ )
$r$	=	ระยะระหว่างผนัง (m)
$R$	=	ค่าคงที่ของก๊าซ (gas constant) ( $L/mol.K$ )
$R$	=	รัศมีของคาย (m)
$S_R$	=	ความเครียดเฉือนนำกลับได้ (recoverable shear strain) (-)
$t$	=	เวลา ( $s^{-1}$ )
$T$	=	extra-stress tensor ( $N/m^2$ )
$T$	=	อุณหภูมิ (เคลวิน)
$T_1$	=	ความหนาของแผ่นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (mm)
$T_2$	=	ความหนาของคายแผ่น (mm)
$T_g$	=	อุณหภูมิคล้ายแก้ว (glass transition temperature) (เคลวิน)
$u$	=	ความเร็วแผ่นเพลตด้านบน (m/s)
$u_1$	=	ความเร็วการไหลในแนวแกน x (m/s)
$v$	=	ความเร็วในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการไหล
$v$	=	ความเร็ว (m/s)
$v_n$	=	ความเร็วตั้งฉาก (normal velocity) (m/s)
$v_s$	=	ความเร็วแนวสัมผัสพื้นผิว (tangential velocity) (m/s)
$v_x$	=	ความเร็วในทิศทาง x
$v_y$	=	ความเร็วในทิศทาง y

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$V$	=	ความเร็วรอบลูกสูบ (piston speed) (mm/min)
$V_{in}$	=	ความเร็วการไหลเข้า (m/s)
$w$	=	ความเร็วในทิศทางการไหล
$W_{exit}$	=	น้ำหนักของพอลิเมอร์ที่ไหลออกจากคาน (g)
$\dot{\gamma}$	=	อัตราเฉือน ( $s^{-1}$ )
$\eta$	=	ค่าความหนืด (Pa.s)
$\eta_0$	=	ค่าความหนืดอัตราเฉือนศูนย์ (zero shear viscosity) (Pa.s)
$\eta_\infty$	=	ค่าความหนืดอัตราเฉือนอนันต์ (infinity shear viscosity) (Pa.s)
$\mu$	=	สัมประสิทธิ์ความหนืด
$\rho$	=	ความหนาแน่น ( $g/m^3$ )
$\tau$	=	ความเค้นเฉือน ( $N/m^2$ )
$\tau_{nn}$	=	เทนเซอร์ของความเค้นตั้งฉาก (normal component of the stress tensor)
$\pi_{ij}$	=	ความเค้นโมเลกุล (molecular stress)
$\Delta_{ij}$	=	อัตราการผิดรูป (rate of deformation tensor)
$\delta_{ij}$	=	Kronecker delta
$\beta$	=	อัตราส่วนการหดตัวของช่องทางไหล (channel contraction ratio)
$\lambda$	=	ระยะเวลาในการคลายตัว (s)
$\sigma$	=	ค่าความเค้นดึง ( $N/m^2$ )
$\varepsilon$	=	ค่าความเครียดดึง (-)
$\phi$	=	สมบัติการไหลที่เกิดจากการไหลหนืดและการยืดหยุ่น
$\alpha_f$	=	การขยายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์หลอมเหล่านั้นๆ
$\psi_1, \psi_2$	=	สัมประสิทธิ์ผลต่างค่าความเค้นฉากลำดับที่ 1, 2 normal stress difference coefficient 1, 2)

# การทำนายการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงในการอัดรีดแผ่น

## Prediction of High Density Polyethylene Sheet Extrusion Flow

### คำนำ

พลาสติกเป็นวัสดุที่มีความจำเป็นสำหรับการดำเนินชีวิตของมนุษย์ยุคนี้ มีการใช้พลาสติกในอุตสาหกรรมทุกสาขาและกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันเกือบทุกกิจกรรม ตัวอย่างของการใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติก เช่น ใช้สำหรับทำถังและอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมเคมี ทำชิ้นส่วนของเครื่องใช้ไฟฟ้า เครื่องจักรกล เครื่องใช้สำหรับการเกษตรกรรม ของใช้ในครัวเรือน เฟอร์นิเจอร์ บรรจุภัณฑ์ของยา อาหาร เครื่องดื่ม ใช้ทำอุปกรณ์กีฬา ใช้เป็นส่วนประกอบของรถยนต์ ส่วนประกอบของโครงสร้างอาคาร และเครื่องใช้อื่นๆ ซึ่งพอลิเมอร์ที่ใช้งานในปริมาณสูง (commodity polymer) เช่น พอลิเอทิลีน พอลิสไตรีน พอลิโพรพิลีน พอลิไวนิลคลอไรด์ โดยที่ปริมาณการใช้งานของพอลิเมอร์ทั้งสี่ชนิดรวมกันสูงประมาณ 65-70 % ของปริมาณการใช้พลาสติกทั้งหมด ดังนั้นความรู้เกี่ยวกับวัสดุพลาสติกและกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกจึงเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งกระบวนการขึ้นรูปที่สำคัญ ได้แก่ กระบวนการฉีด (injection molding) กระบวนการเป่า (blow molding processes) และกระบวนการอัดรีด (extrusion processes) ขณะเดียวกันในการขึ้นรูปพลาสติกนั้น สมบัติการไหลของพอลิเมอร์เป็นปัจจัยที่กำหนดและควบคุมสถานะของกระบวนการผลิต เช่น อุณหภูมิ เวลา และความดัน ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิต

กระบวนการอัดรีดจัดเป็นกระบวนการแปรรูปหลักของอุตสาหกรรมพลาสติก ซึ่งจะทำให้วัสดุมีลักษณะเป็นเส้นยาวและมีรูปทรงในภาคตัดขวางตามต้องการโดยการอัดพลาสติกหลอมไหลผ่านตาย (die) กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่แปรรูปอย่างต่อเนื่อง (continuous process) และผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้นั้นเป็นผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูป (semi-finished product) ก่อนที่จะนำไปใช้งานพลาสติกที่นิยมใช้ในงานอัดรีด เช่น พีวีซี (PVC) พอลิเอทิลีน (PE) และพอลิโพรพิลีน (PP) เป็นต้น โดยผลงานวิจัยที่ผ่านมา มีการศึกษาสมบัติการไหลของพอลิโพรพิลีนโดยใช้กระบวนการอัดรีด (ฐิติภาพ, 2545) การศึกษาการบวมพองของพอลิเอทิลีน โดยการใช้กฎสมการยกกำลังและวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (วิระพล, 2547) จากนั้นนำเอาวิธีการของไฟไนต์เอลิเมนต์มาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาการบวมพองของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (ปวีณา, 2548) และนำเอา

โปรแกรมสำเร็จรูป POLYFLOW มาใช้อธิบายสมบัติการไหลและการบวมพองของพอลิสไตรีน (PS) โดยการใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (กิตติมา, 2549) ในงานวิจัยนี้จึงนำพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE: high density polyethylene) มาใช้ในการทดลอง เพราะเป็นข้อมูลที่มีความจำเป็นแต่ยังมีเผยแพร่ น้อย อีกทั้งยังเป็นพลาสติกที่นิยมใช้กระบวนการอัดรีด และสามารถนำไปใช้งานในลักษณะแบบแผ่น ท่อ และฟิล์ม ที่ใช้อย่างแพร่หลาย ในการผลิตภาคอุตสาหกรรมพบว่ากระบวนการอัดรีดเกิดพฤติกรรมการบวมพอง (die swell) ของพอลิเมอร์หลอมขณะไหลผ่านคายนึ่งผลผลิตอัดรีด (extrudate) มีขนาดและรูปร่างโตกว่าคายนึ่ง โดยสาเหตุจากการคลายตัวของสายโซ่ (relaxation) และการสะสมพลังงานในขณะอัดรีด (Cogswell, 1994) ทั้งนี้ พฤติกรรมดังกล่าวเกี่ยวข้องกับปัจจัยการผลิต เช่น ระยะเวลาการไหลของพอลิเมอร์เหลว ซึ่งพบว่า พอลิเมอร์ที่ไหลอยู่ในคายนาน ทำให้สายโซ่ที่ถูกอัดรีดมีเวลาเกิดการคลายตัว ส่งผลให้การบวมพองลดลง ผลของปัจจัยอัตราเฉือน (shear rate) พบว่า ณ อัตราเฉือนสูงๆ ขึ้น การไหลของพอลิเมอร์จะมีความเร็วเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระยะเวลาในการไหลในคายนึ่งลดลง จึงส่งผลให้การบวมพองเพิ่มขึ้น ปัจจัยในส่วนรูปร่างของคายนึ่งจะมีผลโดยตรง ตัวอย่างเช่น คายนึ่งที่มีความยาวแตกต่างกัน ทำให้มีระยะเวลาในการไหลของพอลิเมอร์นั้นแตกต่างกันด้วย คือ เมื่อใช้คายนึ่งยาวมาก พอลิเมอร์จะมีระยะเวลาการไหลในคายนานขึ้น จึงทำให้สายโซ่คลายตัวได้ดี ส่งผลให้การบวมพองลดลง ส่วนผลของปัจจัยอุณหภูมิพบว่า ในกระบวนการอัดรีดที่ใช้อุณหภูมิสูงๆ พอลิเมอร์จะมีการบวมพองลดลง (Wong, 1998) จากปัจจัยที่กล่าวมานั้นจะมีผลเกี่ยวข้องกับขนาดการบวมพองของพอลิเมอร์ทั้งหมด

หากพฤติกรรมการบวมพองสามารถทำนายได้แม่นยำ การปรับแก้ขนาดของคายนึ่งให้เล็กลงเพื่อลดขนาดการบวมพองของผลผลิตอัดรีดในการผลิตจะทำได้แม่นยำขึ้น และสามารถช่วยปรับแต่งการออกแบบคายนึ่งได้ดียิ่งขึ้น ได้มีการศึกษาการบวมพองในกระบวนการอัดรีดของคายนึ่งเล็ก (capillary die) ของ LDPE (Ganvir *et al.*, 2008), PE (Barrera *et al.*, 2006) สำหรับคายนึ่งแผ่น (sheet die) ได้มีการศึกษาโดยใช้ PS (กิตติมา, 2006), พอลิเอทิลีนเชิงเส้นความหนาแน่นต่ำ หรือ LLDPE (Ruifeng, 2007) โดยใช้การทำนายการบวมพองจากโปรแกรมสำเร็จรูป POLYFLOW แต่ยังไม่มีการศึกษาใน HDPE ซึ่งเป็นวัสดุใช้งานผลิตพลาสติกแผ่นมากเช่นกัน

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีความประสงค์จะศึกษาพฤติกรรมการบวมพองเพื่อใช้ในการแก้ไขปัญหาการบวมพองของชิ้นงาน โดยสร้างโมเดลอธิบายสมบัติการไหล และพฤติกรรมการบวมพองของพอลิเมอร์หลอมออกจากคายนึ่งแผ่น (sheet die) จากกระบวนการอัดรีด เพื่อใช้ในการออกแบบคายนึ่งให้

มีคุณภาพด้านขนาดของผลิตภัณฑ์ตามต้องการ และสามารถปรับแก้การบวมพองของชิ้นงานให้  
ใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น

## วัตถุประสงค์

1. ศึกษาพฤติกรรมการบวมพองตลอดจนสมบัติการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่หลอมเหลวขณะไหลออกจากคายแผ่นในกระบวนการอัดรีด
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการบวมพองของ HDPE หลอมในขณะไหลออกจากคายแผ่นในกระบวนการอัดรีด
3. อธิบายสมบัติการไหลของ HDPE หลอมออกจากคายแผ่นในกระบวนการอัดรีด โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงพฤติกรรมการบวมพองของ HDPE

โดยในการศึกษามีขอบเขตในการวิจัย ดังนี้

1. ปัจจัยที่มีผลต่อการบวมพองของ HDPE ที่ทำการศึกษา เช่น อัตราเลื่อน อัตราส่วนความยาวต่อความหนาคาย (ratio of length to thickness of sheet die, L/T) และอุณหภูมิ
2. ศึกษากระบวนการอัดรีดของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว
3. พฤติกรรมสมบัติการไหลของ HDPE เป็นการไหลแบบนอนนิวโตเนียน
4. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป POLYFLOW

ประโยชน์ที่ได้คาดว่าจะได้รับ มีดังต่อไปนี้

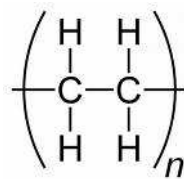
1. สามารถปรับปรุงการออกแบบขนาดและความหนาคายแผ่นในกระบวนการอัดรีด เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดตามต้องการ และลดความผิดพลาดจากการบวมพองของชิ้นงาน
2. สามารถหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการอัดรีดแผ่นพลาสติก เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีความหนาที่สามารถควบคุมได้
3. สามารถนำแบบจำลองที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับพอลิเมอร์อื่นๆ ที่ทราบพฤติกรรมการไหล เพื่อข้อมูลที่ได้อ่อนนำไปทดสอบจริง
4. การใช้แบบจำลองเพื่อทำนายการบวมพอง ทำให้สามารถประหยัดเวลา ค่าใช้จ่าย และวัสดุในการทดสอบก่อนการออกแบบคายได้

## การตรวจเอกสาร

กระบวนการอัดรีดพลาสติกจะทำโดยให้พลาสติกผง (powder) หรือเม็ด (pellets) หลอม เป็นเนื้อเดียวกัน แล้วถูกผลักดันโดยการหมุนของสกรูให้พลาสติกหลอมไหลผ่านหัวดายที่มีรูปร่าง พื้นที่หน้าตัดตามลักษณะชิ้นงานที่ต้องการผลิต และพลาสติกหลอมจะเกิดการแข็งตัวเมื่อออกจาก ดาย เนื่องมาจากการหล่อเย็น โดยทั่วไปเทอร์โมพลาสติกทุกชนิดสามารถทำการอัดรีดได้ แต่จะมี ข้อจำกัด คือ พลาสติกนั้นเมื่ออ่อนตัวจะต้องมีความหนืดสูง ทั้งนี้เนื่องมาจาก เมื่อพลาสติกไหลผ่าน ดายออกมาต้องทรงรูปได้ชั่วระยะเวลาหนึ่งและไม่ไหลยุบมารวมกันก่อนที่จะเย็นตัวลง ซึ่งความรู้ เรื่องของกระบวนการในการแปรรูปพลาสติกมีความสำคัญ ในงานวิจัยนี้สนใจการแปรรูป HDPE โดยการใช้กระบวนการอัดรีด ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

## พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

พอลิเมอร์ชนิดนี้อาจเรียกว่าพอลิเอทิลีนเชิงเส้นตรง แสดงดังภาพที่ 1 เพราะพอลิเมอร์ชนิด นี้มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงเกือบตลอด (มีโซ่กิ่งบ้างแต่น้อยมาก) หรืออาจเรียกว่า พอลิเอทิลีนความ ดันต่ำ เพราะกระบวนการผลิตพอลิเมอร์นี้ทั่วไปใช้ความดันต่ำกว่ามาก เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการ ผลิตพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นต่ำ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงนี้เริ่มมีการผลิตขึ้นในเชิงพาณิชย์ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2498 (Hiemenz and Timothy, 2007)



ภาพที่ 1 สูตรโครงสร้างของพอลิเอทิลีน

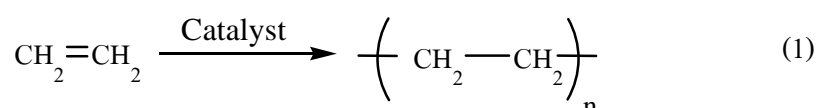
### 1. สมบัติทั่วไป

เนื่องจากพอลิเอทิลีนมีโครงสร้างเชิงเส้นตรงเกือบตลอดทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์มีความ เป็นระเบียบมาก เป็นเหตุให้พอลิเอทิลีนนี้มีความเป็นผลึกสูงมาก (มากกว่า 90%) ความหนาแน่น

และจุดหลอมเหลวจะสูงกว่าพอลิเอทิลีนที่เตรียมจากกระบวนการใช้ความดันสูง โดยทั่วไป HDPE จะมีค่าความหนาแน่น 0.95-0.97 ก/ซม<sup>3</sup> มีจุดหลอมเหลว 135 °ซ ค่าความเหนียว ค่าความแข็งแรง และแรงยึดดึงสูงกว่าด้วย แต่ส่วนของ LDPE มีค่าความหนาแน่น 0.910-0.940 ก/ซม<sup>3</sup> และมีจุดหลอมเหลว 120 °ซ (James, 1999)

## 2. กระบวนการผลิต

ในการผลิตของพอลิเอทิลีนทำได้จากปฏิกิริยาเกิดพอลิเมอร์ (polymerization) โดยการใช้วิธีการป้อนเอทิลีนเข้าปฏิกรณ์ (reactor) และมีตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ซึ่งนำเอทิลีนทำปฏิกิริยากันได้เป็นพอลิเอทิลีน (Rodriguez et al., 2003) แสดงดังสมการที่ 1



วิธีการผลิตพอลิเอทิลีนที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีหลายวิธี ที่สำคัญได้แก่

### 2.1 กระบวนการซีกเกลอร์ (ziegler process)

กระบวนการนี้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีกเกลอร์-นาททา (ziegler-natta catalyst) โดยทั่วไปตัวเร่งที่ใช้ได้แก่ ไทเทเนียมเตตระคลอไรด์-อะลูมิเนียมแอลคิล ( $\text{TiCl}_4\text{-R}_3\text{Al}$ ) ณ ความดันที่สูงกว่าความดันบรรยากาศเพียงเล็กน้อย (2-4 บรรยากาศ) และอุณหภูมิ 50-70 °ซ ในตัวกลางเฉื่อย เช่น น้ำน้ำมันดีเซล (diesel oil) เฮปเทน หรือ โทลูอิน เนื่องจากพอลิเอทิลีนจะไม่ละลายในตัวกลางเฉื่อย ฉะนั้น เมื่อเกิดเป็นพอลิเมอร์จะตกตะกอนออกมาเมื่อปฏิกิริยาเกิดพอลิเมอร์สิ้นสุดลง และตัวเร่งปฏิกิริยาซีกเกลอร์-นาททานั้นจะถูกทำลายโดยการเติมแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล เอทานอล โดยที่สารทั้งหมดที่เกิดขึ้น (ยกเว้นพอลิเมอร์) สามารถถูกสกัดออกโดยกรดไฮโดรคลอริกในแอลกอฮอล์ และนำพอลิเมอร์ที่ได้ไปทำการหมุนเหวี่ยง (centrifuge) แล้วนำไปทำให้แห้ง (Rodriguez, 2003) วิธีนี้เหมาะสำหรับเตรียม HDPE แต่ปัจจุบันนี้มีการนำเอาเมทัลลอสซีน (metallocene) มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะทรานซิชัน ซึ่งนิยมใช้ผลิตพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบไอโซแทคติก (isotactic) ที่มีการจัดตำแหน่งหมู่แทนที่อยู่ด้านเดียวกัน โดยตัวโครงสร้างของเมทัลลอสซีนเป็นโครงสร้างเปิดช่องทางเดียวที่สามารถเข้ามาทำปฏิกิริยาได้ ในขณะที่ตัวซีกเกลอร์-

นาทามีโครงสร้างที่เปิดหลายช่องทางให้มอนอเมอร์เข้ามาทำปฏิกิริยาได้ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาเมทัลโลซีนมีข้อดีกว่าซีกเกลอร์-นาททา คือ ว่องไวต่อก๊าซไฮโดรเจนมากกว่า ทำให้ใช้กับโคมอนอเมอร์ได้หลายชนิด (Syriac and Ragabah, 2000 )

พอลิเอทิลีนที่ผลิตได้นั้นต่างจากพอลิเอทิลีนที่ผลิตจากกระบวนการความดันสูงมาก กล่าวคือ มีโซ่กิ่งเพียงเล็กน้อย จากการศึกษาโครงสร้างโดยวิธีอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี พบว่าปรากฏหมู่เอทิลเพียง 5-7 หมู่ต่อคาร์บอนอะตอม 1,000 อะตอมเท่านั้น และไม่ปรากฏโซ่กิ่งเป็นหมู่บิวทิล ( $-C_4H_9$ )

## 2.2 กระบวนการฟิลลิปส์ (philips process)

กระบวนการนี้คล้ายคลึงกับกระบวนการซีกเกลอร์ โดยจะใช้โครเมียมออกไซด์ ( $CrO_3$ ) ซึ่งมีตัวรองรับ เช่น ซิลิกาหรืออะลูมินา เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในตัวกลางเฉื่อย เช่น ไซโคลเฮกเซน โดยที่สภาวะของปฏิกิริยาอยู่ระหว่างกลางของกระบวนการความดันและกระบวนการซีกเกลอร์ ซึ่งความดันที่ใช้ทั่วไปอยู่ที่ 30-40 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 90-160 °ซ นิยมใช้ในการเตรียม LDPE

พอลิเอทิลีนที่ผลิตได้มีโครงสร้างเชิงเส้นตรงเกือบสมบูรณ์ ซึ่งจากการศึกษาโดยวิธีอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี พบว่า ไม่ปรากฏหมู่เอทิลหรือบิวทิลเป็นโซ่กิ่ง แต่ปรากฏมีหมู่เมทิล ( $CH_3$ ) เพียง 3 หมู่ต่อคาร์บอนอะตอม 1,000 อะตอมเท่านั้น

## 2.3 กระบวนการสแตนดาร์ดออยล์ (standard oil process)

กระบวนการสแตนดาร์ดออยล์นี้คล้ายคลึงกับกระบวนการฟิลลิปส์มาก ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ได้แก่ ออกไซด์ของโลหะ เช่น โมลิบดีนัมไดออกไซด์ ( $MoO_3$ ) บนตัวรองรับ เช่น อะลูมินา ( $AlO_3$ ) ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ ) หรือเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ ( $ZrO_2$ ) ใช้ความดัน 40-100 บรรยากาศ และอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาช่วง 200-300 °ซ ซึ่งพอลิเมอร์ที่ผลิตได้มีลักษณะเช่นเดียวกับพอลิเมอร์ที่ได้จากกระบวนการฟิลลิปส์ คือ มีโครงสร้างเชิงเส้นตรงเกือบสมบูรณ์

### 3. การนำไปใช้ประโยชน์

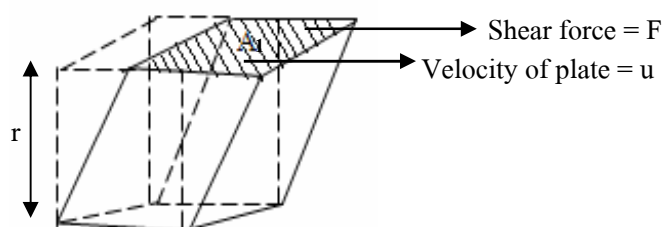
ปริมาณมากกว่าร้อยละ 40 ของพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นสูงจะถูกนำไปใช้ในการผลิตขวดพลาสติก และภาชนะบรรจุใช้ของอื่นๆ เช่น ภาชนะบรรจุกรดและเบส เคมีภัณฑ์ สารชำระล้าง อีกประมาณร้อยละ 20 ใช้ทำเป็นของใช้ในครัวเรือนและของเด็กเล่น และส่วนที่เหลือใช้ทำฟิล์มเพื่อห่อหุ้มของและอาหาร ถุงพลาสติก (ถุงร้อน) หุ้มสายไฟฟ้า ทำสายยาง และอื่นๆ (Hiemenz and Timothy, 2007)

### สมบัติการไหลของพอลิเมอร์

เมื่อพิจารณาลักษณะการไหลของพอลิเมอร์ สามารถแบ่งตามลักษณะการไหลตามรูปแบบการผิดรูปได้ 3 รูปแบบ คือ การไหลเฉือน (shear flow) การไหลยืด (elongation flow) และการผิดรูปยุบกอง (bulk deformation)

#### 1. การไหลเฉือน (shear flow)

เป็นการไหลที่เกิดจากแรงกระทำต่อพื้นผิวผนังที่เกิดการไหล พอลิเมอร์หลอมเหลวที่ไหลจะอยู่ระหว่างผนังทั้งสอง และมีความเร็วต่างกันในแนวระนาบของการไหลของพอลิเมอร์เหลว ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ลักษณะการผิดรูปเนื่องจากการเฉือน (shear deformation)

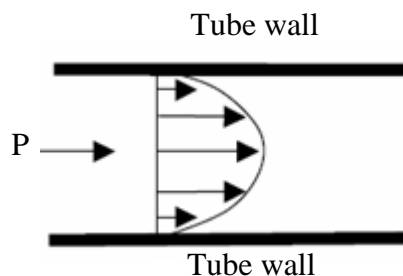
จากภาพที่ 2 แสดงลักษณะพื้นที่แผ่นเพลตบน มีพื้นที่เท่ากับ  $A_1$  และเคลื่อนที่ไปในแนวทิศทางของแรงที่กระทำ ( $F$ ) ทำให้เกิดการผิดรูปไป และเกิดความเค้นเฉือน (shear stress) แสดงดังสมการที่ 2 และเกิดอัตราการเฉือนดังสมการที่ 3

$$\tau = \frac{F}{A_1} \quad (2)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{du}{dr} \quad (3)$$

เมื่อ	$\tau$	คือ ความเค้นเฉือน ( $\text{N/m}^2$ )
	$F$	คือ แรงที่กระทำ (N)
	$A_1$	คือ พื้นที่ของแผ่นเพลต ( $\text{m}^2$ )
	$\mu$	คือ สัมประสิทธิ์ความหนืด
	$\dot{\gamma}$	คือ อัตราเฉือน ( $\text{s}^{-1}$ )
	$u$	คือ ความเร็วของแผ่นเพลตด้านบน (m/s)
	$r$	คือ ระยะห่างระหว่างผนัง (m)

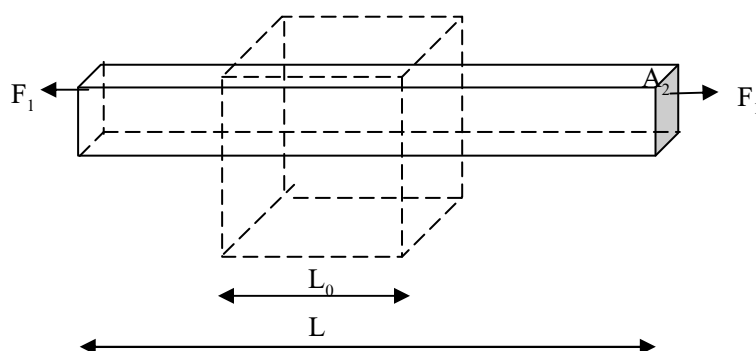
อีกทั้ง เกิดลักษณะการไหลเฉือนอีกรูปแบบหนึ่ง คือ การไหลในท่อที่เกิดจากความแตกต่างของความดันภายใน ซึ่งมีลักษณะการไหลเช่นเดียวกับพอลิเมอร์หลอมที่ไหลอยู่ในหัวดาย แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ลักษณะการไหลในท่อที่เกิดจากความแตกต่างของความดัน

## 2. การไหลยืด (elongational flow)

การไหลรูปแบบนี้เป็นกรไหลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับแรง ดังภาพที่ 4 และมีแรงกระทำกับพอลิเมอร์จะเกิดการไหลยืดออกจากกัน โดยแรงที่เกิดขึ้นเป็นแรงดึงที่ทำให้พื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนไป ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ในสมการที่ 4 และ 5



ภาพที่ 4 การผิดรูปเนื่องจากแรงยืด

$$\sigma = \frac{F_1}{A_2} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \quad (5)$$

เมื่อ	$\sigma$	คือ ค่าความเค้นดึง ( $\text{N/m}^2$ )
	$F_1$	คือ แรงดึง (N)
	$A_2$	คือ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นตั้งฉากกับแนวแรง ( $\text{m}^2$ )
	$\varepsilon$	คือ ค่าความเครียดดึง (-)
	$L_0$	คือ ความยาวเริ่มต้น (m)
	$L_1$	คือ ความยาวที่เวลาใดๆ (m)

จะเห็นได้ว่าการหาค่าความการไหลยืดจากการทดลองมีความยุ่งยาก ในทางปฏิบัติมักจะทำ การวัดความเร็วการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ไม่สัมผัสกับผนังของเครื่องมือวัด เป็นการไหล พื้นผิวอิสระ (free surface flow) และเมื่อวัสดุพอลิเมอร์ถูกยืดในขณะที่หลวมักสูญเสียสภาพยืดหยุ่น (elasticity) ไป โดยสายโซ่โมเลกุลจะมีการจัดเรียงกันเป็นระเบียบ และมีความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้น (Cogswell, 1994)

### 3. การผิดรูปยุบกอง (bulk deformation)

ในกรณีการผิดรูปยุบกองนั้น จะมีการให้ความเค้นตั้งฉากไปทั่วบนพื้นผิวทุกหน้า ซึ่งความเค้นจะถูกให้โดยใช้ความดัน ส่วนความเครียดจะเป็นการเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่อหน่วยปริมาตร

#### ชนิดของของไหล

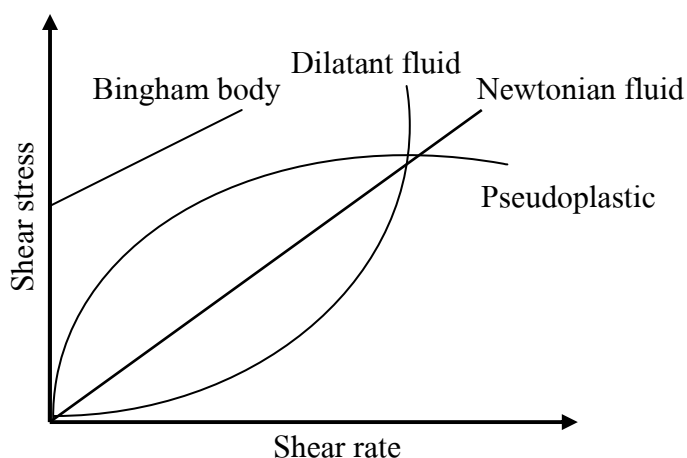
ของไหลสามารถแบ่งตามรูปแบบของการไหลเฉือน ออกเป็น 2 ประเภท คือ ของไหลที่มีสมบัติเป็นไปตามกฎของนิวตัน หรือเรียกว่า ของไหลนิวโตเนียน (newtonian fluids) ส่วนของไหล อีกชนิดหนึ่งเป็นของไหลที่มีสมบัติไม่เป็นไปตามกฎของนิวตัน หรือเรียกว่า ของไหลนอนนิวโตเนียน (non-newtonian fluids)

#### 1. ของไหลนิวโตเนียน (newtonian fluids)

ของไหลประเภทนี้มีค่าความหนืดคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเพิ่มหรือลดของอัตราเฉือน ดังภาพที่ 5 ซึ่งของไหลชนิดนี้การไหลจะไม่ขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการไหล เช่น น้ำ อากาศ

#### 2. ของไหลนอนนิวโตเนียน (non-newtonian fluids)

ของไหลในกลุ่มนี้มีสมบัติไม่เหมือนกับของไหลกลุ่มนิวโตเนียน กล่าวได้คือเป็นของไหล ที่มีค่าความหนืดขึ้นอยู่กับอัตราเฉือน เช่น พอลิเมอร์หลอม สารละลายพอลิเมอร์ แต่ว่าของไหลนอนนิวโตเนียนประเภทนี้มีองค์ประกอบต่างๆ ทำให้เกิดความแตกต่างกันในแต่ละพฤติกรรม การไหลของของไหลประเภทนี้ (Brydson, 1981)



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของของไหล

ด้วยเหตุผลนี้จึงแบ่งของไหลแบบนอนนิวโตเนียนออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ ตามลักษณะพฤติกรรม คือ ของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time independent fluid) แสดงดังภาพที่ 5 ของไหลที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time dependent fluid) และของไหลวิสโคอีลาสติก (viscoelastic fluids) ดังต่อไปนี้

## 2.1 ของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time independent fluids)

2.1.1 ของไหลบิงแฮม (bingham body) ของไหลชนิดนี้จะไม่เกิดการไหลทันทีทันใด แต่จะเริ่มไหลเมื่อของไหลได้รับพลังงานกลและเกิดความเค้นเฉือนสูง แล้วเกิดความเค้นเฉือนคราก (yield stress,  $y$ ) เมื่อของไหลนั้นเกิดการไหลได้จะมีพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียน ดังภาพที่ 5 ตัวอย่างของไหลที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ สี ยาสีฟัน จาระบี ครีม โคลนตม น้ำผลไม้ข้น เชื้อกระด้าง ไขมันสัตว์ และตะกอนของเสีย เป็นต้น

2.1.2 ของไหลไดลาแทนท์ (dilatant fluid) ของไหลชนิดนี้เป็นของไหลที่มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าอัตราเฉือน เรียกพฤติกรรมการไหลแบบนี้ว่า พฤติกรรมการกวนข้น (shear thickening behavior) ดังภาพที่ 5 ซึ่งมีสาเหตุมาจากการที่โมเลกุลจับตัวเข้าด้วยกัน หรือโมเลกุลมีการเกี่ยวพันกันหนาแน่นขึ้นเมื่อได้รับแรงกระทำ ตัวอย่างของไหลในกลุ่มนี้ เช่น ทราซที่ชุ่มไปด้วยน้ำ และน้ำแป้ง เป็นต้น

2.1.3 ของไหลซูโดพลาสติก (pseudoplastic behavior) โดยการไหลของของไหลจะมีค่าความหนืดลดลงเมื่อเพิ่มค่าอัตราเฉือน เรียกการไหลแบบนี้ว่า พฤติกรรมการกวนเหลว (shear thinning behavior) เช่น พอลิเมอร์หลอม ทั้งนี้เส้นโค้งการไหล (flow curve) มีแนวโน้มจะขนานกับแกนของอัตราเฉือน เมื่อมีค่าอัตราเฉือนสูง ดังภาพที่ 5 สมบัติเด่นประการหนึ่งของของไหลชนิดนี้คือ ไม่มีลักษณะที่มีค่าความเค้นคงที่ขณะเพิ่มอัตราเฉือน เช่นที่เกิดกับของไหลบิงแฮม

มีการนำเสนอสมการเพื่อใช้อธิบายสมบัติการไหลของของไหลซูโดพลาสติก แต่ว่าสมการที่ได้รับการยอมรับในความถูกต้องมากที่สุดคือ กฎสมการยกกำลัง (power law model หรือ ostwald-de-waele equation) รายละเอียดสมการแสดงดังสมการที่ 6-8

จาก 
$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (6)$$

แต่ตามกฎสมการยกกำลัง 
$$\eta = m \dot{\gamma}^{n-1} \quad (7)$$

หรือ 
$$\tau = \dot{\gamma}^n \quad (8)$$

เมื่อ	$\eta$	คือ ค่าความหนืด (Pa.s)
	$m$	คือ ความเหนียวหนืดของของไหล (consistency of fluid) (Pa.s <sup>n</sup> )
	$n$	คือ ดัชนีกฎสมการยกกำลัง (power law index) (-)

หลายกรณี การใช้กฎสมการยกกำลังเพียงอย่างเดียวนั้นไม่พอสำหรับการอธิบายพฤติกรรมในทุกๆ ด้านของพอลิเมอร์หลอม โดยเฉพาะอย่างยิ่งปรากฏการณ์ที่เกี่ยวกับการไหลยืด (extensional flow) และสมบัติของการเป็นวิสโคอีลาสติก การใช้กฎสมการยกกำลังเป็นเพียงการประเมินสมบัติการไหลเบื้องต้นเท่านั้น นอกจากนี้พบว่า พอลิเมอร์หลอมทุกชนิดจะมีสมบัติเป็นของไหลซูโดพลาสติกบางช่วงของอัตราเฉือน กล่าวคือ ถ้าพอลิเมอร์ที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของอัตราการเฉือนที่ต่ำมาก (น้อยกว่า  $3 \text{ s}^{-1}$ ) และสูงมาก จะมีสมบัติเป็นของไหลนิวโตเนียน (Han, 1976)

นอกจากกฎสมการยกกำลังแล้วยังมีสมการอื่นๆ ที่นำมาใช้สำหรับอธิบายสมบัติการไหลของของไหลเชิงโพลีเมอร์ เช่น ดังสมการที่ 9-11 แต่ไม่ได้รับความนิยมเท่ากับกฎสมการยกกำลัง

สมการแปรนต์เทิล (prandtl equation)

$$\tau = A \sin^{-1}(\dot{\gamma}/C) \quad (9)$$

สมการไอริง (eyring equation)

$$\tau = \dot{\gamma} / B + C \sin(\tau/A) \quad (10)$$

สมการคาร์โร (carreau equation)

$$\tau = \dot{\gamma}(\eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) / (1 + (\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_c)^2)^{n/2}) \quad (11)$$

เมื่อ  $A, B$  และ  $C$  คือ ค่าคงที่สมการไอริง

$\eta_0$  คือ ค่าความหนืดอัตราเฉือนศูนย์ (zero shear viscosity) (Pa.s)

$\eta_{\infty}$  คือ ค่าความหนืดอัตราเฉือนอนันต์ (infinity shear viscosity) (Pa.s)

มีข้อสังเกตว่า โดยปกติพอลิเมอร์หลอมจะแสดงพฤติกรรมที่สอดคล้องกับการไหลของของไหลเชิงโพลีเมอร์ ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา แต่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าตัวพอลิเมอร์หลอม แสดงสมบัติของไหลที่ขึ้นอยู่กับเวลาด้วย คือ มีสมบัติการไหลเป็นแบบของไหลวิสโคอีลาสติก เนื่องมาจากปรากฏการณ์หลายอย่างบ่งบอกการมีสมบัติการไหลวิสโคอีลาสติกของพอลิเมอร์หลอม เช่น การบวมพองของคาน (die swell หรือ extrudate swell) การบวมพองในขณะรีด (calender swell) และการเกิด frozen-in ในกระบวนการฉีดพอลิเมอร์

หากพอลิเมอร์หลอมไม่มีสมบัติการไหลที่เป็นของไหลเชิงโพลีเมอร์ กล่าวได้คือ ค่าความหนืดไม่ลดลงตามค่าอัตราเฉือนทำให้ค่าความเค้นเฉือนมีค่ามาก โดยที่มีค่าความหนืดของ

พอลิเมอร์หลอมลดลง ทำให้สามารถแปรรูปพอลิเมอร์หลอมได้ง่ายขึ้น ซึ่งการที่มีสมบัติเป็นของไหลซูโดพลาสติกของพอลิเมอร์หลอม ทำให้มีข้อดีหลายประการ ดังนี้

- ทำให้ลดพลังงานที่ใช้ในการแปรรูป
- สามารถผลิตชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ได้ง่ายขึ้น
- สามารถใช้เครื่องจักรที่มีกำลังต่ำได้
- ความดันที่ใช้ในการแปรรูปต่ำ
- สามารถทำให้พอลิเมอร์หลอมไหลเข้าเบ้าที่มีความซับซ้อนได้
- เพิ่มปริมาณการผลิตของผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ได้ดี

## 2.2 ของไหลที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time dependent fluids)

สมบัติการไหลของของไหลชนิดนี้ มีค่าความหนืดเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาที่ของไหลถูกเฉือน หรือเรียกได้ว่าของไหลชนิดนี้มีประวัติของการเฉือน ของไหลที่แสดงพฤติกรรมในลักษณะนี้ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท (Chhabra and Richardson, 1999)

2.2.1 ของไหลที่มีค่าแรงเฉือนลดลงตามเวลา (thixotropic fluids) เป็นของไหลที่มีค่าอัตราเฉือนคงที่ค่าหนึ่ง และลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป เพราะฉะนั้นสมบัติการไหลของของไหลชนิดนี้ขึ้นกับระยะเวลาที่ถูกเฉือน เช่น ถ้ากวนของไหลนี้เป็นเวลานานด้วยอัตราเฉือนคงที่ ทำให้สมบัติการไหล เช่น ความหนืดเฉือนลดลง นอกเหนือจากนี้หากเปรียบเทียบค่าความเค้นเฉือนจะส่งผลให้ค่าความเค้นเฉือนลดลง ตัวอย่างเช่น ดิน โคลน

2.2.2 ของไหลที่มีค่าแรงเฉือนเพิ่มขึ้นตามเวลา (rheopectic fluids) เป็นของไหลที่มีสมบัติตรงข้ามกับของไหลที่แรงเฉือนลดลงตามเวลา โดยมีความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเวลาผ่านไป ตัวอย่างเช่น แร่ยิปซั่มในน้ำ ดินทนไฟ เป็นต้น

## 2.3 ของไหลวิสโคอีลาสติก (viscoelastic fluids)

ของไหลวิสโคอีลาสติกเป็นของไหลที่มีสมบัติการคืนรูปได้เมื่อถูกแรงมากระทำให้มีการผิดรูปไป เพราะว่า ของไหลวิสโคอีลาสติกมีสมบัติผสมระหว่างการไหลหนืด (viscous flow)

และการยืดหยุ่น (elastic) และสามารถคืนรูปได้หากหยุดให้แรงกระทำ ซึ่งเรียกว่า วิสโคอีลาสติก โดยสามารถอธิบายได้ว่าของไหลใดมีความยืดหยุ่นโดยสมบูรณ์ (perfectly elastic) การตอบสนองต่อค่าความเค้น (stress,  $\sigma$ ) เป็นค่าความเครียด (strain,  $\gamma$ ) จะเป็นไปตามสมบูรณ์ในทันทีทันใด (in phase deformation) แต่หากของไหลนั้นมีความเป็นเนื้อหนืดอย่างแท้จริง (purely viscous) จะทำให้การตอบสนองของของไหลต่อค่าความเค้นเกิดเป็นค่าความเครียดไม่สมบูรณ์ในทันที ซึ่งเรียกว่า พฤติกรรมเฟสแลก (phase lag,  $\delta$ ) ซึ่งพอลิเมอร์เกือบทุกชนิดแสดงพฤติกรรมดังกล่าว (Brydson, 1981) เมื่อพอลิเมอร์เหลวมีพฤติกรรมผิดรูปเมื่อได้รับแรง โดยมีจำนวนความถี่การเสียรูปต่ำ (low frequency deformation) จะมีแนวโน้มที่พอลิเมอร์เหลวมีสมบัติเป็นเนื้อหนืดมากขึ้น แต่หากจำนวนความถี่การผิดรูปสูง (high frequency deformation) จะมีแนวโน้มที่พอลิเมอร์มีสมบัติยืดหยุ่นมากขึ้น พฤติกรรมดังกล่าวที่เกิดขึ้นจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการแปรรูป ซึ่งเกี่ยวข้องเมื่อพอลิเมอร์มีการผิดรูป หลังจากนั้นมีการคืนรูปมักก่อให้เกิดปัญหาการบวมพองที่ตาย การบวมพองในขณะรีด neck-in และ frozen-in orientation โดยมีสาเหตุมาจากพอลิเมอร์มีสายโซ่โมเลกุลที่ยาวมาก เมื่อมีแรงที่มากกระทำสายโซ่โมเลกุลในลักษณะยืดออกตามแนวแรงและเกิดเป็นความเค้นเฉือนขึ้น ซึ่งเมื่อปล่อยแรงออก สายโซ่โมเลกุลจะพยายามกลับคืนสู่สภาพเดิมในลักษณะการสุ่ม (random form) สามารถอธิบายสมบัติการไหลโดยรวมได้ ดังสมการที่ 12

$$\tau = \phi \left( \frac{d\gamma}{dt}, t \right) \quad (12)$$

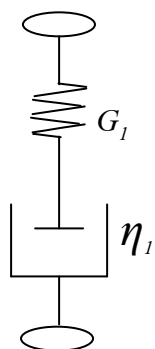
เมื่อ	$\tau$	คือ ความเค้นเฉือน
	$d\gamma/dt$	คือ อัตราเฉือน ( $\dot{\gamma}$ )
	$\phi$	คือ สมบัติการไหลที่เกิดจากการไหลหนืดและการยืดหยุ่น
	$t$	คือ เวลา ( $s^{-1}$ )

ดังนั้น หากพิจารณาพฤติกรรมการไหลของของไหลวิสโคอีลาสติก จะต้องพิจารณาจากพฤติกรรมรวมของตัวแทนสองชนิด คือ ลูกสูบ และสปริง และเมื่อให้แรงเฉือน (shear force) แก่ของไหลวิสโคอีลาสติก เมื่อหยุดให้แรงเฉือนทำให้ลูกสูบนั้นหดตัวกลับระยะหนึ่งเนื่องจากอิทธิพลการหดกลับของสปริง ซึ่งในอดีตมีการพัฒนาแบบจำลองหลายชนิด เพื่ออธิบายพฤติกรรมการไหลวิสโคอีลาสติก แต่สำหรับแบบจำลองของแมกซ์เวลล์ (maxwell model) และแบบจำลองของวอยท์

(voigt model) ประสบความสำเร็จในการอธิบายพฤติกรรมเบื้องต้นของของไหลชนิดนี้มากที่สุด ดังภาพที่ 6

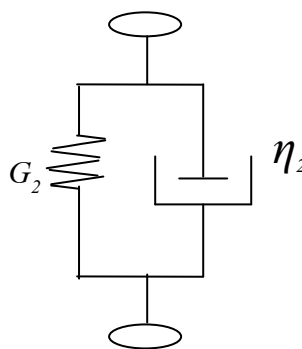
แบบจำลองแมกซ์เวลล์

$$\tau = \eta \dot{\gamma} - \left( \frac{\eta}{G} \right) \dot{\tau}$$



แบบจำลองวอยท์

$$\tau = \eta \dot{\gamma} + G\gamma$$



ภาพที่ 6 แบบจำลองของไหลวิสโคอีลาสติกของแมกซ์เวลล์และวอยท์ (เมื่อ  $G$  คือ โมดูลัสเฉือน)

### ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว

สมบัติทางการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวโดยปกติจะแสดงในรูปเส้นโค้งการไหล ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน อัตราเฉือน และค่าความหนืดเฉือน โดยใช้เป็นตัวกำหนดความเหมาะสมและสถานะของกระบวนการผลิต รวมไปถึงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ โดยสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวจะนิยมตรวจวัดโดยเครื่องมือวัด เรียกว่า มาตรการไหล (rheometers) โดยการวัดสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวในเครื่องมือผลิต สามารถแบ่งประเภทได้ดังนี้

- ระบบที่นำเอาอุปกรณ์ตรวจวัดสมบัติทางการไหลเข้าไปติดตั้งร่วมกับเครื่องมือการผลิตจริง มีการป้อนพอลิเมอร์หลอมเหลวอัตโนมัติโดยใช้ปั๊มจากเครื่องมือผลิตสู่อุปกรณ์ตรวจวัดสมบัติการไหล ข้อดีของระบบนี้คือ ไม่เสียเวลาในการตรวจสอบ และผลการทดสอบใกล้เคียงกับสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ในเครื่องมือผลิต เนื่องมาจากใช้วัสดุดิบเดียวกัน แต่ความคลาดเคลื่อนของ

ผลการทดสอบอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะถ่ายโอนจากเครื่องมือผลิตมาที่อุปกรณ์ทดสอบ

- ระบบที่ใช้เครื่องมือผลิตผลิตภัณฑ์เป็นเสมือนอุปกรณ์ตรวจวัดสมบัติการไหล เช่น มีการวัดค่าความดันตกคร่อมเกิดขึ้นบริเวณหัวฉีดของเครื่องฉีดพลาสติก หรือที่บริเวณคายของเครื่องอัดรีดพลาสติก หรือจะเป็นการใส่คายที่มีลักษณะที่ต้องการใส่เข้าไปหน้าสกรูภายในห้องหลอมเหลว (barrel) ของเครื่องฉีดและอัดรีดพลาสติก ข้อดีของระบบนี้คือ ไม่เสียเวลาในการทดสอบ และผลการทดสอบใกล้เคียงกับสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ในเครื่องมือผลิต ส่วนข้อเสียของระบบนี้คือ การใส่อุปกรณ์เสริมเข้าไปอาจทำให้ระบบการผลิตถูกรบกวน และความยุ่งยากในการถอดประกอบเพื่อปรับปรุงหรือซ่อมแซม

- ระบบที่วัดสมบัติทางการไหลโดยใช้เครื่องวัดมาตรฐานการไหลทั่วไป โดยที่ไม่เกี่ยวข้องกับเครื่องมือหรืออุปกรณ์ในกระบวนการผลิตเลย ตัวอย่างเช่น เครื่องวัดดัชนีการไหลพอลิเมอร์หลอม (melt flow index, MFI) เครื่องวัดมาตรฐานการไหล และเครื่องวัดเลขมูนนี่ เป็นต้น ข้อดีของระบบนี้คือ สามารถทำได้ง่ายสะดวก และไม่รบกวนระบบการผลิต แต่ผลการทดสอบอาจมีความคลาดเคลื่อนสูง เมื่อเทียบกับพฤติกรรมในเครื่องมือผลิต

จากที่ทราบกันคืออยู่แล้วว่ามีปัจจัยอยู่หลายอย่างที่มีผลต่อการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว โดยปัจจัยเหล่านี้ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราเฉือน ความดัน เวลา ลักษณะโครงสร้างทางเคมี และสารเติมแต่ง เป็นต้น โดยในแต่ละปัจจัยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

## 1. อุณหภูมิ และอัตราเฉือน

หากพอลิเมอร์ได้รับความร้อนจะทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นอย่างรวดเร็ว และความสามารถในการเคลื่อนที่จะเพิ่มขึ้น (Cogswell, 1994) เมื่ออุณหภูมิของพอลิเมอร์เพิ่มสูงขึ้น พบว่า ความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวจะมีค่าลดลง โดยทั่วไป พบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทุกๆ  $10^{\circ}\text{C}$  ส่งผลทำให้ความหนืดลดลง 1 เท่าตัว สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนืดได้โดยอาศัยหลัก 2 อย่าง ดังต่อไปนี้

1.1 เนื่องจากโมเลกุลของพอลิเมอร์มีพลังงานมากพอที่จะเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลและไหลผ่านโมเลกุลอื่นๆ ซึ่งจะอธิบายได้จากสมการอาร์เรเนียส ดังสมการที่ 13

$$\eta = Ae^{\frac{E}{RT}} \quad (13)$$

เมื่อ	$\eta$	คือ ค่าของความหนืด
	$A$	คือ แฟกเตอร์ความถี่ (frequency factor)
	$E$	คือ พลังงานก่อกัมมันต์ (activation energy) (kJ/mol)
	$R$	คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (gas constant) (J/mol.K)
	$T$	คือ อุณหภูมิ (temperature) (เคลวิน)

จากสมการที่ 13 พบว่า ค่าของความหนืดมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น โดยที่การลดลงจะอยู่ในรูปของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งหากสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(\eta)$  ในแกน y กับ  $1/T$  ในแกน x ค่าความชันจากกราฟจะมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างพลังงานกระตุ้นกับค่าคงที่ของก๊าซ โดยถ้าค่านี้มีค่าสูงจะบ่งชี้ว่าพอลิเมอร์หลอมเหลวและไหลได้ค่อนข้างยาก

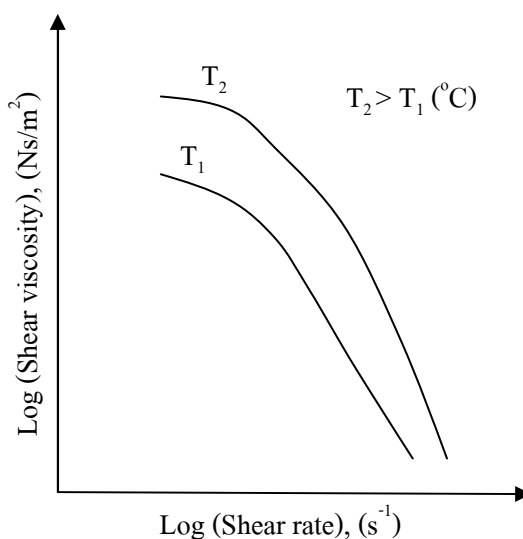
1.2 เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลทำให้เกิดการสร้างช่องว่าง (free volume) ระหว่างโมเลกุล เมื่อช่องว่างระหว่างโมเลกุลมีขนาดใหญ่ โมเลกุลก็สามารถที่จะไหลผ่านออกไปได้ง่ายขึ้น ทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวมีความหนืดลดลงนั่นเอง โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างระหว่างโมเลกุลกับอุณหภูมิ แสดงดังสมการที่ 14

$$f_1 = f_g + \alpha_f \cdot (T - T_g) \quad (14)$$

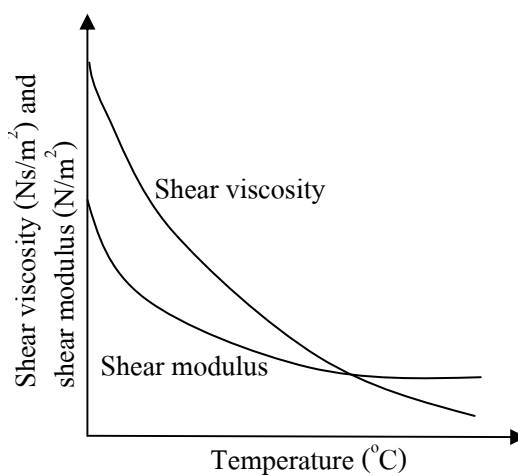
เมื่อ	$f_1$	คือ ช่องว่างระหว่างโมเลกุล ณ อุณหภูมิใดๆ
	$f_g$	คือ ช่องว่างระหว่างโมเลกุล ณ อุณหภูมิคล้ายแก้ว
	$\alpha_f$	คือ การขยายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์หลอมเหลวนั้นๆ
	$T$	คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)
	$T_g$	คือ อุณหภูมิคล้ายแก้ว (glass transition temperature) (เคลวิน)

จากสมการที่ 14 พบว่า ถ้าอุณหภูมิยิ่งสูงกว่าค่าของอุณหภูมิลคล้ายแก้วเท่าไร จะมีช่องว่างที่โมเลกุลสร้างขึ้นมากขึ้นเท่านั้น หมายถึง โมเลกุลจะสามารถไหลผ่านช่องว่างขนาดใหญ่ออกไปได้ง่าย ทำให้พอลิเมอร์มีความหนืดลดลง

ในทางปฏิบัติ พบว่า ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราเฉือนสูงขึ้น ดังภาพที่ 7 นอกจากนี้ยังพบว่า นอกเหนือไปจากความหนืดเฉือนที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าของโมดูลัสเฉือนของพอลิเมอร์หลอมเหลวก็จะลดลงเช่นกัน แต่ลดลงในปริมาณที่น้อยกว่าการลดลงของความหนืดเฉือน ดังภาพที่ 8 โดยทั่วไปนั้น พอลิเมอร์แต่ละชนิดจะมีความว่องไวของการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่มีผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน เนื่องจาก โครงสร้างทางเคมี ลักษณะความเป็นอยู่ รวมถึงปริมาณการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุลที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิ



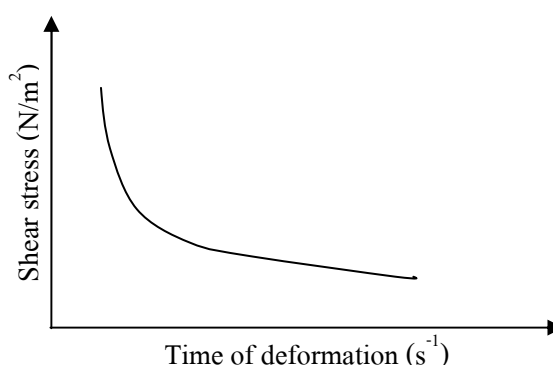
ภาพที่ 8 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดเฉือนและโมดูลัสเฉือน

## 2. ความดัน

ในกระบวนการผลิตนั้น ส่วนมากพอลิเมอร์หลอมเหลวจะผลิตภายใต้ความดันสูง โดยที่ผลของความดันต่อสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว คือ เมื่อความดันมีค่าสูงขึ้นความหนืดของพอลิเมอร์หลอมจะเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้จาก เมื่อความดันของระบบสูงขึ้นจะทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์หลอมเหลวยู่ชิดกันมากขึ้น ทำให้ความสามารถของโมเลกุลที่จะไหลผ่านกันจะทำได้ยากขึ้น แต่ในบางกรณี พบว่า กระบวนการอัดรีดของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่สามารถดกผลึกได้ ภายใต้ความดันที่สูงและอุณหภูมิที่ต่ำ จะเกิดปรากฏการณ์ที่ความหนืดจะสูงกว่าที่ควรจะเป็นมาก เนื่องจากเกิดการตกผลึกขณะที่มีการไหลภายใต้ความดันสูง ซึ่งกรณีที่มีผลึกเกิดขึ้นมาก ความดันที่ใช้จะสูงขึ้นมากจนกระทั่งถึงไม่สามารถทำให้ไหลได้ ซึ่งหมายถึงว่าจะต้องหยุดกระบวนการผลิต

## 3. เวลา

การไหลและการตอบสนองของพอลิเมอร์หลอมเหลวต่อแรงที่มากกระทำขึ้นกับเวลาเป็นอันมาก ยกตัวอย่าง เช่น พอลิเมอร์หลอมเหลวแบบค่าแรงเฉือนลดลงตามเวลา โดยพอลิเมอร์หลอมเหลวจะมีค่าความหนืดลดลงเมื่อให้แรงกระทำเป็นเวลานานขึ้นจนเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง ดังภาพที่ 9 จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและเวลาการแปรรูป โดยความหนืดจะแปรผันโดยตรงกับความเค้นเฉือน ซึ่งการลดลงของความหนืดเกิดจากการแตกออกของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ดังนั้น เมื่อแรงยึดเหนี่ยวลดลงหรือหมดไป โมเลกุลจะสามารถเคลื่อนที่ง่ายขึ้น ความหนืดจึงลดลง

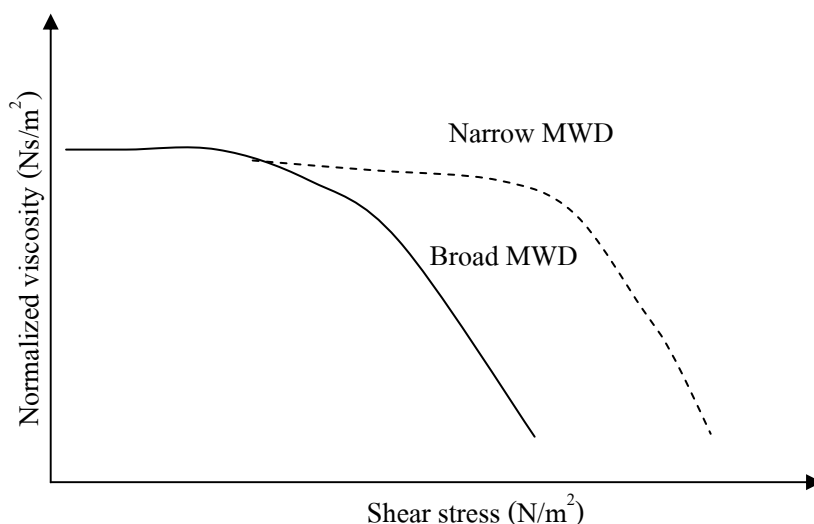


ภาพที่ 9 ความเค้นเฉือนกับเวลาของพอลิเมอร์ที่มีพฤติกรรมไหลแบบค่าแรงเฉือนลดลงตามเวลา

#### 4. ลักษณะโครงสร้างทางเคมี

4.1 น้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) ความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวสูงขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจาก สายโซ่โมเลกุลที่ยาวกว่ามีโอกาสที่จะเกิดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่มากกว่า โดยที่ดัชนีในการบ่งบอกค่าเฉลี่ยของน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์มีอยู่หลายอย่าง แต่ที่นิยมมากที่สุดคือค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย

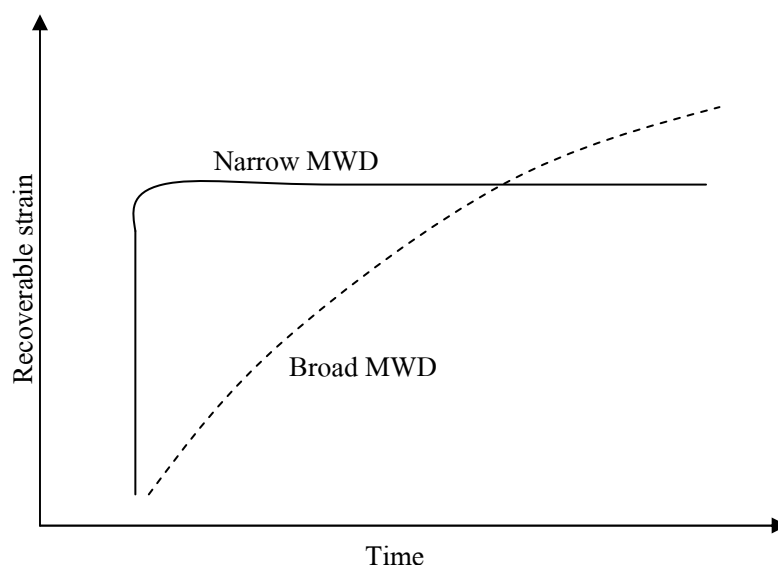
4.2 การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight distribution, MWD) ค่านี้มีผลต่อสมบัติการไหล โดยความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลและความหนืดของพอลิเมอร์ แสดงดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลและความหนืด

จากภาพที่ 10 ในกรณีของพอลิเมอร์ที่มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่แคบนั้น พอลิเมอร์จะมีขนาดสายโซ่โมเลกุลค่อนข้างสม่ำเสมอ โดยแต่ละสายโซ่โมเลกุลจะรับแรงที่กระทำในปริมาณที่เท่ากันทุกโมเลกุล ในทางตรงข้าม ถ้าพอลิเมอร์มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้าง โมเลกุลของพอลิเมอร์หลอมเหลวจะมีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ปนกันอยู่ โดยที่โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่านั้น จะเป็นเหมือน โครงร่างแหที่ใช้ปกคลุม โมเลกุลที่เล็กและเป็นส่วนที่รับแรงที่มากระทำ ฉะนั้น ถ้ามีการเปรียบเทียบพอลิเมอร์ระหว่างระบบที่มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างกับระบบที่มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่แคบ ภายใต้แรงกระทำต่อระบบเท่ากัน จะ

พบว่า ในพอลิเมอร์ที่มีระบบการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างนั้น โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่แต่ละโมเลกุลจะรับแรงที่กระทำในปริมาณมากกว่าค่าแรงโดยเฉลี่ย ทำให้เกิดการลดลงของความหนืดเนื่องจากสมบัติความเป็นซูโดพลาสติก ก่อนระบบที่มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่แคบ หรืออีกนัยหนึ่ง คือ ค่าความหนืดของระบบที่มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างจะมีค่าต่ำกว่าของระบบที่มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่แคบ ถ้าพิจารณาที่ตำแหน่งความเค้นเฉือน หรืออัตราเฉือนหนึ่งๆ ซึ่งในทางการปฏิบัติ จะส่งผลให้เราสามารถทำการฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์ที่มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างได้ง่าย และใช้พลังงานที่ต่ำกว่าพอลิเมอร์ในระบบที่มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่แคบ ซึ่งสาเหตุเนื่องมาจาก ในระบบพอลิเมอร์ที่มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างนั้น โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่จะเป็นโมเลกุลที่รับแรงกระทำซึ่งมีค่าสูงกว่าแรงโดยเฉลี่ย ดังนั้น เมื่อโมเลกุลได้รับแรงในปริมาณที่สูงก็จะมี การตอบสนองทางอีลาสติก คือ ความเครียดนำกลับได้ที่สูงเช่นเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 11



**ภาพที่ 11** ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนนำกลับได้กับเวลา โดยเปรียบเทียบระหว่างระบบพอลิเมอร์ที่มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างและแคบ

โดยจากภาพที่ 11 จะเห็นได้ว่าความเครียดเฉือนนำกลับได้ (เป็นค่าที่บ่งบอกถึงการตอบสนองทางอีลาสติกของระบบ) ของพอลิเมอร์ที่มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างจะมีค่าสูงกว่าระบบพอลิเมอร์ที่มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่แคบ เนื่องจาก โมเลกุลที่มีขนาดเล็ก จะขัดขวางการเกิดการตอบสนองทางอีลาสติกของระบบ ในทางการปฏิบัติ หลักการนี้สามารถ

ใช้ทำนายพฤติกรรมอื่นๆ เช่น พฤติกรรมการบวมพอง กล่าวคือ หากระบบพอลิเมอร์มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างอัตราส่วนการบวมพองที่มากกว่าในระบบพอลิเมอร์ที่มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่แคบ

4.3 ความเป็นสายโซ่ของโมเลกุล (chain branching) สำหรับการพิจารณาผลของความเป็นสายโซ่ของโมเลกุลที่มีต่อสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว นั้น สามารถแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 กลุ่ม ตามลักษณะหรือประเภทของการไหล

4.3.1 การไหลเฉือน หากเปรียบเทียบพอลิเมอร์หลอมเหลวที่มีน้ำหนักโมเลกุลเท่าๆ กัน ความเป็นสายโซ่ของโมเลกุลสามารถทำให้ความหนืดเฉือนมีค่าสูงขึ้นหรือลดลงได้ขึ้นอยู่กับความยาวสายโซ่ โดยหากมีความยาวของสายโซ่มากกว่าค่าน้ำหนักโมเลกุลวิกฤต ส่งผลให้ความหนืดเฉือนมีค่าสูงขึ้น เนื่องจาก ผลของการพันกันของสายโซ่โมเลกุลที่มากขึ้น แต่ในทางตรงข้าม หากความยาวของสายโซ่น้อย ส่งผลให้ความหนืดเฉือนมีค่าต่ำลง เนื่องจาก รูปร่างของโมเลกุลจะมีลักษณะเป็นก้อนมากขึ้นทำให้ขัดขวางการไหลน้อยลง

4.3.2 การไหลยืด ในการไหลยืดสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์จะถูกกระทำเสมือนกำลังถูกดึงแยกออกจากกัน ดังนั้น หากเปรียบเทียบพอลิเมอร์หลอมเหลวที่มีน้ำหนักโมเลกุลเท่าๆ กัน ความเป็นสายโซ่โมเลกุลสามารถทำให้ค่าความหนืดแบบยืดดึงมีค่าสูงขึ้น โดยที่ปริมาณการเพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับความยาวของกิ่งก้านสาขา เนื่องจาก สายโซ่ทำหน้าที่เป็นตะขอที่ยึดเหนี่ยวโมเลกุลเข้าไว้ด้วยกัน

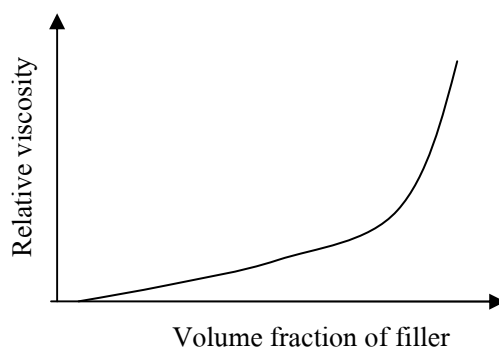
## 5. สารเติมแต่ง (additive)

สารเติมแต่งในที่นี้ หมายถึง วัสดุที่ใส่ลงไปพอลิเมอร์หลอมเหลวในขณะที่ทำการผลิต ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลายประการ ตัวอย่างเช่น

- เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของพอลิเมอร์ เช่น สารตัวเติมประเภทไฟเบอร์ต่างๆ ซิลิกา เหม่าดำ จัดเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรงที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับผลิตภัณฑ์ ส่วนสารประเภทสารหล่อลื่น หรือสารจำพวกพลาสติกไซเซอร์ จัดเป็นสารที่ช่วยให้การผสมและขึ้นรูปเป็นไปได้ง่าย

- เพื่อเพิ่มความสวยงามของผลิตภัณฑ์ เช่น ผงสี (colourant)
- เพื่อป้องกันการสลายตัวของพอลิเมอร์ เช่น สารเพิ่มความเสถียร (stabilizers) สารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน
- เพื่อลดต้นทุนการผลิต เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต โดยจะเรียกสารพวกนี้ว่า ตัวทำเจือจาง (diluent)

โดยทั่วไป การใส่ตัวเติม (filler) ลงไปในพอลิเมอร์มักทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น และเพิ่มมากขึ้นไปอีกหากการกระจายตัวของตัวเติมไม่ดี และหากพิจารณาในระบบที่มีการกระจายตัวของตัวเติมอย่างสมบูรณ์ พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเทียบกับค่าของส่วนโดยปริมาตรของตัวเติม (volume fraction of filler) แสดงดังภาพที่ 12 จากภาพ พบว่า ค่าของความสัมพันธ์ของความหนืดในช่วงแรกจะค่อยเพิ่มขึ้น เมื่อค่าของส่วนโดยปริมาตรของตัวเติมเพิ่มสูงขึ้น และจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อค่าของส่วนโดยปริมาตรของตัวเติมมีค่าสูงขึ้นเกินจุดๆ หนึ่ง เนื่องจากเมื่อปริมาณตัวเติมสูงขึ้นทำให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคของตัวเติมมีค่าลดลงมาก หรืออีกนัยหนึ่งการที่อนุภาคของตัวเติมเข้ามาชิดกันมากขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงกระทำระหว่างอนุภาคของตัวเติมที่สูงขึ้น ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างมาก



ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเทียบกับส่วนโดยปริมาตรของตัวเติม

วัสดุที่มีสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก เช่น พอลิเมอร์หลอม สารละลายพอลิเมอร์ และยางที่เป็นทั้งยางดิบและยางที่มีการเชื่อม โครง (crosslink) แล้ว เป็นต้น โดยที่วัสดุเหล่านี้แสดงพฤติกรรมการไหลที่ซับซ้อนโดยนำเอาเวลาการคลายตัว และ โมดูลัสการคลายตัว (relaxation modulus) นั้นมา

ประกอบการพิจารณา และเพื่อประเมินพฤติกรรมที่แท้จริงของการไหลและการผิดรูป สมการที่ใช้อธิบายสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอม รวมทั้งแบบการไหลหนืดและการไหลยืดไว้ในสมการเดียวกันนั้น เรียกว่า สมการสถานะการไหล (rheological equation of state) หรืออาจเรียกว่า สมการหลักองค์ประกอบ (constitutive equation) ตัวอย่างสมการที่นำมาใช้เพื่อจะอธิบายสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอม ตัวอย่างเช่น Upper-convected Maxwell model, Oldroyd-B model, Phan-Thien-Tanner model, และ K-BKZ model โดยมีการศึกษาและประเมินพฤติกรรมที่แท้จริงของการไหลจากการไหลที่ซับซ้อนของพอลิเมอร์หลอม ดังต่อไปนี้

การศึกษานี้จะจัดต่างๆ ต่อสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ ซึ่งมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก 4 ชนิด คือ HDPE LDPE PP และ HIPS โดยใช้มาตรการไหลรูเล็ก (capillary rheometers) ภายใต้อุณหภูมิ 160-260 °C ความเร็วลูกสูบ 2-75 mm/min อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของดาย (L/D) เท่ากับ 10 20 30 และ 40 ตามลำดับ มีค่าอัตราเฉือนช่วง 25-1000 s<sup>-1</sup> โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปสมการได้ดังนี้

$$\dot{\gamma} = \frac{2\beta^2 V}{15D^3} \quad (15)$$

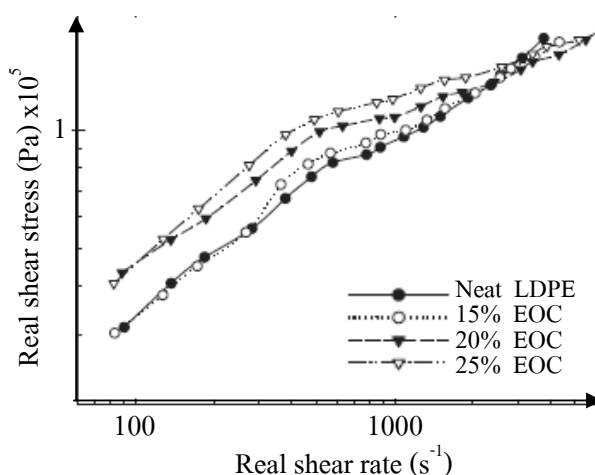
$$\beta = \frac{D_R}{D} \quad (16)$$

เมื่อ	$\beta$	คือ อัตราส่วนการหดตัวของช่องทางไหล (channel contraction ratio) (-)
	$D_R$	คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของกรวยใส่พลาสติก (reservoir diameter) (mm)
	$D$	คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของดาย (mm)
	$V$	คือ ความเร็วลูกสูบ (piston speed) (mm/min)

จากผลการทดลอง พบว่า สามารถนำเอากฎสมการยกกำลังมาอธิบายสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ 4 ชนิด ปรากฏว่ามีค่าดัชนีจากกฎสมการยกกำลังต่ำกว่า 1 โดย HDPE มีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุด แต่สำหรับ HIPS มีค่าน้อยกว่า 1 มากที่สุด แสดงให้เห็นว่า HIPS มีสมบัติการไหลเป็นแบบนอนนิวโตเนียนมากที่สุด อีกทั้งพบว่า ค่าอัตราเฉือนที่ผนัง ( $\dot{\gamma}_w$ ) มีค่าในช่วงต่ำ ส่วนค่าความหนืดที่ผนัง ( $n_w$ ) มีค่าลดลง เมื่ออัตราเฉือนที่ผนังเพิ่มขึ้น จะสังเกตสมบัตการกวนเหลวได้ (Liang, 2002)

การศึกษาสมบัติการไหลและพฤติกรรมการอัดรีดของนาโนคอมโพสิตระหว่าง high-impact polystyrene/organomontmorillonite โดยใช้วิธีมาตรการไหลรูเล็ก ซึ่งทำมาจากทั้งสแตน ใช้ อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของคายน (L/D) 40 mm/mm และใช้เครื่องดัน (plunger) ความเร็ว 0.06-20 cm/min อุณหภูมิ 190-210 °ซ พบว่า มีค่าความหนืดลดลงเมื่อมีค่าของอัตราเฉือนเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของไหลซูโดพลาสติก หรือของไหลกวนเหลว และพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ (load) ของ organomontmorillonite ดัชนีการไหล (flow behavior index) จะลดลงเมื่ออุณหภูมิและอัตราเฉือนคงที่ ขณะที่ความหนืดเฉือนเพิ่มขึ้น อีกทั้งความหนืดเฉือนที่ปรากฏให้ผลการทดลองสอดคล้องกันใน 2 กรณี คือ แปรผันกับอุณหภูมิตามสมการของอาร์รีเนียส-ไอริง และพบว่า นาโนคอมโพสิต high-impact polystyrene/organomontmorillonite มีพฤติกรรมที่สอดคล้องกับกลศาสตร์ยกกำลัง (Dazhu *et al.*, 2005)

การศึกษาสมบัติการไหล และศึกษาพฤติกรรมการบวมพองจากกระบวนการอัดรีดของ โคลิโพลิเมอร์ LDPE/ethylene-octane สามารถทำการตรวจสอบโดยใช้มาตรการไหลรูเล็ก ภายใต้อุณหภูมิ 185 °ซ ใช้อัตราส่วนของความยาวต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของคายน (L/D) เท่ากับ 5/1 10/1 10/2 และ 30/2 mm/mm ตามลำดับ มีค่าอัตราเฉือน 100-7100 s<sup>-1</sup> สำหรับคายนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 mm และค่าอัตราเฉือน 60-1400 s<sup>-1</sup> สำหรับคายนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 mm โดยโคลิโพลิเมอร์มีพฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติก ดังภาพที่ 13 (Dangtungee *et al.*, 2006)



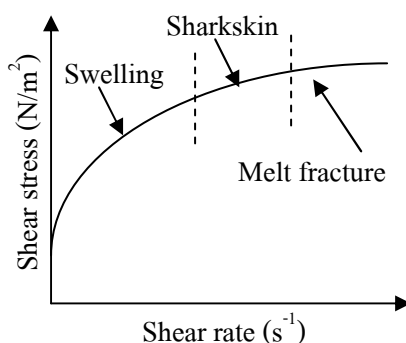
ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของโคลิโพลิเมอร์ LDPE/ethylene-octane

### สมบัติยืดหยุ่นของพอลิเมอร์หลอมเหลว

กระบวนการอัดรีดโดยใช้เครื่องมาตรการไหลรูเล็ก เมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวได้รับแรงกระทำมาจากภายนอก ด้วยผลมาจากความเป็นวิสโคอีลาสติกของพอลิเมอร์หลอมเหลวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างผิดรูปไปทั้งแบบไม่สามารถคืนกลับรูปร่างเดิมได้ เรียกว่า เป็นการผิดรูปแบบพลาสติก (plastic deformation) และในแบบที่ค่อยๆ สามารถคืนกลับสู่รูปร่างเดิมได้ซึ่งเรียกว่า การผิดรูปแบบยืดหยุ่น (elastic deformation) ซึ่งลักษณะการผิดรูปแบบหลังนี้สามารถสะสมแรงที่กระทำไว้ในรูปของพลังงาน โดยพลังงานที่เก็บสะสมบางส่วนนี้สามารถปลดปล่อยได้เมื่อปลดปล่อยแรงที่มากกว่า ซึ่งในการผิดรูปแบบยืดหยุ่นนี้ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิ ชนิดและโครงสร้างของพอลิเมอร์หลอมเหลวนั้นๆ รวมทั้งขนาดและอัตราของแรงที่กระทำในระยะเวลาในการที่พอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง สำหรับพลังงานที่สะสมไว้นั้น เรียกว่า พลังงานยืดหยุ่นสะสม (stored elastic energy) ซึ่งหากพลังงานนี้ได้รับการปลดปล่อยและสามารถวัดได้ในเชิงปริมาณ ก็จะสามารถใช้เป็นตัวแปรหนึ่งที่ใช้สำหรับการกำหนดรูปร่างและลักษณะของพอลิเมอร์ขณะไหลออกมานอกตาย ตามพฤติกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

- การบวมพองของพอลิเมอร์หลอมเหลว (die swell หรือ extrudate swell)
- การเกิดริ้วหนังฉลามที่ผิวของพอลิเมอร์ (sharkskin)
- การเกิดการหักมุมของพอลิเมอร์หลอมเหลว (melt fracture หรือ melt distortion)

ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวมาแล้วมีความสัมพันธ์กับแผนภูมิหรือเส้นโค้งการไหล แสดงดังภาพที่ 14

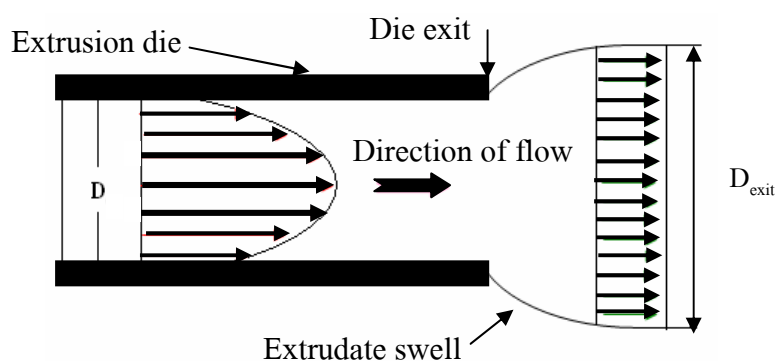


ภาพที่ 14 การไหลกับการเกิดการบวมพอง การเกิดริ้วหนังฉลามและการหักมุมของพอลิเมอร์หลอมเหลว

นอกจากนี้พฤติกรรมเหล่านี้มีความสำคัญมากต่อกระบวนการผลิต กล่าวคือ นอกจากเป็นตัวกำหนดคุณภาพในแง่ของขนาดและรูปร่างของผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์แล้ว ก็ยังเป็นตัวกำหนดอัตราและกำลังการผลิตอีกด้วย

### 1. การบวมพองของพอลิเมอร์หลอมเหลว (die swell หรือ extrudate swell)

จากการที่พอลิเมอร์หลอมเหลวอัดรีดออกมาผ่านคายนั้น ในขณะที่ไหลออกมา พบว่าขนาดของพื้นที่หน้าตัดของพอลิเมอร์จะมีขนาดโตกว่าขนาดพื้นที่หน้าตัดของคาย แสดงดังภาพที่ 15 และแสดงความสัมพันธ์ของพฤติกรรมดังกล่าว ดังสมการที่ 17



ภาพที่ 15 พฤติกรรมการบวมพองของพอลิเมอร์หลอมเหลวบริเวณทางออกของคาย

$$B = \frac{D_{exit}}{D} \quad (17)$$

- เมื่อ  $B$  คือ อัตราส่วนการบวมพอง (-)  
 $D_{exit}$  คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ทางออกของคาย (mm)  
 $D$  คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของคาย (mm)

โดยทั่วไปพฤติกรรมการบวมพองของพอลิเมอร์หลอมจะเกี่ยวกับการกลับคืนรูปของพอลิเมอร์แบบยืดหยุ่นภายหลังการปลดปล่อยแรงที่มากระทำ โดยพอลิเมอร์หลอมไหลอยู่ภายในคายจะมีแรงเฉือนที่เกิดจากการไหล แรงดังกล่าวนี้จะส่งผลให้การพันกันของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เกิด

การคลายตัว (molecular disentanglement) ในขณะที่ไหลอยู่ภายในคายน และมีการสะสมพลังงานบางส่วนไว้ จากนั้นเมื่อพอลิเมอร์ไหลออกมาบริเวณทางออกคายน พลังงานที่สะสมอยู่จะเกิดการปลดปล่อย ซึ่งพลังงานส่วนนี้จะใช้ในการคืนสภาพของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์หลอมเหลว (ที่ยึดตัวขณะไหล) และกลับเข้าสู่สภาวะที่โมเลกุลของพอลิเมอร์กลับสู่การม้วนพันกัน (molecular entanglement) ดังเดิมในขณะที่ไหลออกมาออกคายนและทำให้เกิดการบวมพองในที่สุด ผลงานวิจัยบางส่วน (Christodoulou *et al.*, 1998) จะอธิบายถึงพฤติกรรมของการบวมพองของพอลิเมอร์ในแง่ของการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลภายในคายน เปรียบเทียบกับรูปแบบการไหลที่บริเวณปากคายนนั้นสามารถอธิบายได้ว่า รูปแบบของการไหลภายในคายนเป็นแบบคล้ายพาราโบลา ในขณะที่รูปแบบของการไหลที่บริเวณปากคายนมีลักษณะเป็นแบบปลั๊ก (plug flow) ซึ่งในการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลระหว่างสองรูปแบบนี้ ทำให้เกิดความเค้นเฉือนสะสมมากขึ้น โดยเฉพาะที่บริเวณใกล้ผนังคายน (เนื่องจากความเร็วของของไหลที่รูปแบบการไหลเป็นแบบคล้ายพาราโบลามีบริเวณผนังคายนมีค่าต่ำกว่าบริเวณตรงกลางคายน ดังนั้น เพื่อที่จะสร้างรูปแบบการไหลเป็นแบบปลั๊ก ของไหลที่บริเวณผนังคายนต้องเร่งความเร็วของการไหลมากกว่าของไหลบริเวณกึ่งกลางคายน จึงทำให้เกิดค่าความเค้นเฉือนสูงขึ้น) และค่าความเค้นเฉือนนี้จะส่งผลให้เกิดการบวมพองของพอลิเมอร์เมื่อไหลออกมาตรงบริเวณปากคายน โดยที่สาเหตุของการเกิดการบวมพองสามารถอธิบายได้ใน 2 ทฤษฎี ดังนี้ (White *et al.*, 1985)

### 1.1 ทฤษฎีการสะสมและปลดปล่อยพลังงาน

เนื่องจากพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีความเป็นวิสโคอีลาสติก ขณะถูกอัดรีดไหลผ่านคายน ภายหลังไหลออกมา พบว่า มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิเมอร์โตกว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของคายน เรียกว่า พฤติกรรมการบวมพอง ซึ่งเป็นผลมาจากพอลิเมอร์ถูกกระทำด้วยแรง ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ได้รับพลังงาน และเกิดการเก็บสะสมของพลังงาน (storage energy) และทำให้สายโซ่โมเลกุลยืดออก ในระหว่างนี้สายโซ่โมเลกุลจะถูกแรงผลักออกไปเรื่อยๆ จนถึงบริเวณทางออกของหัวอัดรีดขึ้นรูป และเกิดการปลดปล่อยพลังงานที่สะสมเอาไว้ พร้อมกับสายโซ่ที่ถูกยืดออกก็พยายามม้วนตัวกลับ (recoiling) ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ซึ่งทำให้มีขนาดโตกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวอัดรีดขึ้นรูป ดังภาพที่ 15 แสดงให้เห็นว่าสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เกิดการคลายตัวออก ภายหลังออกจากคายน เพราะพลังงานซึ่งได้รับจากแรงอัดในขณะอัดรีดขึ้นรูปที่สะสมไว้ ถูกนำมาใช้เพื่อการม้วนตัวเข้าด้วยกันใหม่ จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพขึ้นมา ซึ่งเป็นสมบัติการม้วนตัวกลับ แต่หากคายนมีความยาวมาก โดยท่อทางเดินมีความยาว จะส่ง

ผลทำให้เพิ่มเวลาในการคลายตัวของสายโซ่โมเลกุลบางส่วนกลับสู่สภาพเดิม เป็นผลทำให้อัตราส่วนการบวมพองของพอลิเมอร์ลดลง

## 1.2 ทฤษฎีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลภายในคานาอัดรีดขึ้นรูป

ขณะที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลผ่านช่องทางเดินภายในคานา นักวิจัยได้ทำการศึกษาและกล่าวว่ารูปแบบการไหลจะมีลักษณะเป็นแบบคล้ายพาราโบลา ซึ่งจะทำให้รูปแบบความเร็วในการไหล (velocity profile) ของพอลิเมอร์แต่ละตำแหน่งต่างกัน (Sombatsompop and Dangtungee, 2001) โดยเริ่มต้นจากการไหลในคานาเป็นแบบคล้ายพาราโบลาและเปลี่ยนเป็นการไหลแบบปลັถ ซึ่งการเปลี่ยนรูปร่างการไหลทำให้เกิดความเค้นเฉือน และก่อนไหลเข้าไปในช่องทางไหลนั้น รูปร่างการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวเมื่อไหลจากบาร์เรลเข้าสู่คานา โดยพอลิเมอร์จะไหลเข้าคานาเป็นมุมคู่เข้า (convergence) อย่างเป็นระเบียบ ความแตกต่างของรูปร่างการไหลที่มุมทางเข้า อีกทั้งพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันที่มีความแตกต่างของสายโซ่โมเลกุลก็ส่งผลต่อรูปร่างการไหลอีกด้วย ซึ่งลักษณะของการไหลที่เกิดขึ้นมีลักษณะไหลวน (vertex)

## 2. ผลจากการไหลบริเวณทางออกคานาอัดรีดขึ้นรูป (exit flow effect)

หลังจากการที่พอลิเมอร์หลอมเหลวเปลี่ยนแปลงรูปร่างและเร่งความเร็วเข้าสู่คานาแล้ว ขณะไหลออกจากปากคานา พบว่า พอลิเมอร์หลอมเหลวแสดงสมบัติความเป็นวิสโคอีลาสติก โดยที่เป็นการรวมสมบัติการยืดหยุ่นและเนื้อหนืดเข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งสมบัติทั้งสองส่งผลให้เกิดการบวมพอง การเกิดริ้วหนังฉลามที่ผิวชิ้นงาน และการเกิดการหักมุมของพอลิเมอร์หลอมเหลว โดยปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้เกิดพฤติกรรมเหล่านี้คือ ค่าความดันตกคร่อมที่เหลือของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ออกจากปากคานา (exit pressure loss,  $\Delta P_{\text{exit}}$ ) ผลต่างความเค้นจากลำดับที่หนึ่ง (first normal stress difference,  $N_1$ ) และความยืดหยุ่นนำกลับได้ (elastic recovery) (Arthur *et al.*, 1992) ขณะที่สายโซ่โมเลกุลเกี่ยวพันกัน เมื่อสายโซ่โมเลกุลเกิดความเค้นเฉือนขึ้นขณะไหล ทำให้เกิดการผิดรูป และสายโซ่โมเลกุลคลายออกจากกัน หลังจากนั้นเมื่อความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นหมดไป โดยที่สายโซ่โมเลกุลจะพยายามเข้ามาพันกันใหม่อีกครั้ง เรียกว่า การม้วนตัวกลับ เป็นผลจากความเครียดเฉือนนำกลับได้ (recoverable shear strain,  $S_R$ ) ในส่วนของผลต่างความเค้นจากลำดับที่หนึ่งจะเป็นความแตกต่างระหว่างความเค้นในทิศทางการไหลกับทิศทางตั้งฉากกับทิศการไหลของของไหล ( $\sigma_{11} - \sigma_{22}$ ) โดยมีความสัมพันธ์ของค่าความดันตกคร่อมที่เหลือของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ออกจากปาก

คาย ค่าผลต่างความเค้นจากลำดับที่หนึ่ง และค่าความเค้นเฉือนนำกลับได้ ซึ่งสามารถใช้ในการหาค่าของอัตราส่วนการบวมพอง (B) ของพอลิเมอร์ได้ ดังสมการ

$$N_1 = \Delta P_{exit} + \tau_w \times \frac{\partial \Delta P_{exit}}{\partial \tau_w} \quad (18)$$

$$B = (1 + S_R^2)^{\frac{1}{4}} \quad (19)$$

และทำให้อยู่ในรูปสมการอย่างง่ายได้ดังนี้

$$B = \left[ 1 + \left[ \frac{3\Delta P_{exit}}{\tau_w} \right]^2 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (20)$$

ผลงานวิจัยศึกษาถึงพฤติกรรมการบวมพอง จะอยู่บนพื้นฐานการวัดขนาดของพอลิเมอร์ หลอมเหลวที่ไหลออกมานอกคาย และเปรียบเทียบกับขนาดของคายที่ใช้ตามสมการที่ 17 โดยมาก ประสบปัญหาความผิดพลาดเนื่องจาก อิทธิพลการย้อยตัวด้วยแรงโน้มถ่วง (draw-down effect) โดยทั่วไปวิธีการวัดการบวมพองมีลักษณะการวัดได้หลายแบบ ดังนี้

- พอลิเมอร์หลอมเหลวถูกอัดรีดในแนวตั้ง (upstream or vertical extrusion) วิธีนี้จะเหมาะสำหรับการอัดรีดที่อัตราเร็วต่ำๆ และส่วนมากทำในเครื่องมาตรการไหลรูเล็ก

- พอลิเมอร์หลอมเหลวถูกอัดรีดในแนวนอน (transverse extrusion) ซึ่งวิธีนี้เหมาะสำหรับการอัดรีดที่อัตราเร็วสูงๆ

- พอลิเมอร์หลอมเหลวถูกอัดรีดและไหลลงสู่อ่างของเหลวที่มีความหนาแน่นเท่ากับ ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ เพื่อลดผลของแรงโน้มถ่วงของโลกที่มีต่ออัตราการบวมพองที่วัด

- ทำการควบเย็นอย่างทันที (quenching) ขณะในที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลออกมาจากปากคาย แต่หากวิธีนี้อาจจะประสบปัญหาในเรื่องการหดตัว และการตกผลึกของพอลิเมอร์ที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้การวัดอาจผิดพลาดได้ (Bing and Lee, 1987)

- ทำการชั่งน้ำหนักของพอลิเมอร์หลอมเหลว ในช่วงของความยาวคงที่ที่พอลิเมอร์นั้นถูกอัดรีดออกมาจากปากตาย วิธีการนี้เหมาะสำหรับพอลิเมอร์หลอมเหลวที่มีผิวขรุขระ และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง (ตัวอย่างกรณีของคายที่มีหน้าตัดกลม) ไม่สม่ำเสมอ โดยที่อัตราส่วนการบวมพองสามารถคำนวณโดยสมการที่ 21 แต่อย่างไรก็ตาม ผู้ที่ปฏิบัติต้องมีความระมัดระวังเรื่องของการวัดขนาดของความยาวของสายพอลิเมอร์ที่อัดรีดออกมาก่อนนำไปชั่ง

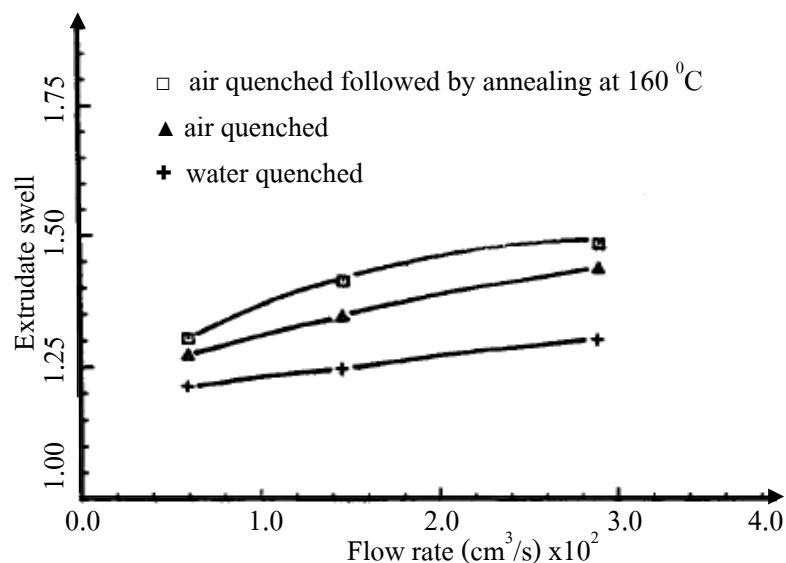
$$B = \frac{W_{exit}}{\rho(\pi R^2 L_2)} \quad (21)$$

เมื่อ	$W_{exit}$	คือ น้ำหนักของพอลิเมอร์ที่ไหลออกจากคาย (g)
	$L_2$	คือ ระยะตัด (m)
	$\rho$	คือ ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ ณ อุณหภูมิทดสอบ ( $\text{g/m}^3$ )
	R	คือ รัศมีของคาย (m)

ในปัจจุบันมีความพยายามจะศึกษาพฤติกรรมการบวมพองที่เป็นแบบแจกแจกตามแนวรัศมี (radial die swell profiles) (Sombatsompop and Dangtungee, 2001) เนื่องจาก พบว่า การศึกษาการบวมพองโดยใช้สมการที่ 17 ซึ่งเป็นการวัดขนาดของพอลิเมอร์ที่ไหลออกจากคายเปรียบเทียบกับขนาดของคายที่ใช้ ส่งผลให้ไม่สามารถอธิบายให้เข้าใจและอธิบายถึงสาเหตุและเหตุผลแท้จริง โดยเฉพาะในแง่ ของการเกิดและการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการบวมพองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสถานะในการทดสอบ สำหรับในเรื่องการศึกษาถึงพฤติกรรมการบวมพองตามแนวรัศมีของพอลิเมอร์ หลอมเหลวนั้น จะศึกษาถึงอัตราการบวมตัวของพอลิเมอร์เชิงปริมาณในตำแหน่งต่างๆ ตลอดถึงพื้นที่หน้าตัดของคาย จากนั้นนำมาหาผลรวมของอัตราส่วนการบวมพอง และเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการวัดอัตราส่วนการบวมพองโดยตรง แสดงดังสมการที่ 17 เพื่อยืนยันความถูกต้อง โดยการศึกษาพฤติกรรม การบวมพองเชิงรัศมีนี้ นอกจากมีความสำคัญกับกระบวนการผลิตแล้ว ยังมีความสำคัญ โดยเฉพาะกับกระบวนการผลิตประเภทการอัดรีดร่วม (co-extrusion) เช่น หากทราบการบวมพองของพอลิเมอร์เชิงรัศมี ก็จะสามารถที่จะควบคุมตำแหน่งและปริมาณของพอลิเมอร์ในชิ้นงานที่ผลิตจากกระบวนการอัดรีดร่วม ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

ผลงานวิจัยศึกษาถึงวิธีการวัดการบวมพองของ PS ที่แตกต่างกัน 3 วิธี คือ วิธีการควมเย้นในน้ำ วิธีการควมเย้นในอากาศ และวิธีการควมเย้นในอากาศตามด้วยการอบอ่อน คือ ทำให้เย็นลง

อย่างช้าๆ (annealing) ในอ่างน้ำมัน ณ อุณหภูมิ 180 °ซ คงที่ เป็นเวลา 25 นาที โดยจากการทดลองพบว่า วิธีการวัดค่าการบวมพองด้วยวิธีการควบเย็นในน้ำ ให้ค่าการบวมพองของ PS น้อยที่สุด ส่วนวิธีการควบเย็นในอากาศและวิธีการควบเย็นในอากาศตามด้วยการเย็นตัวอย่างช้าๆ ในอ่างน้ำมัน ให้ผลการบวมพองแตกต่างกันเล็กน้อย ดังภาพที่ 16 (Bing and Lee, 1987)



ภาพที่ 16 การวัดการบวมพองของ PS ณ อุณหภูมิคงที่ 180 °ซ ที่  $L/D = 40$

แม้ว่าการวัดการบวมพองของพอลิเมอร์หลอมเหลวในกระบวนการอัดรีด ณ อุณหภูมิคงที่ จะเป็นวิธีการวัดการบวมพองที่ดีที่สุด แต่มีข้อเสีย คือ

- ความยากลำบากในการประกอบอ่างน้ำมัน (oil bath) ที่มีความร้อนสูงต่อเข้ากับมาตรการไหล
- การวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางการบวมพองของพอลิเมอร์หลอมเหลว โดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพ โดยภาพที่ได้มีแนวโน้มที่จะเกิดการกระเจิงของแสง (scatter) เนื่องจาก การเปลี่ยนแปลงดัชนีการหักเหของน้ำมันจากการพาความร้อน

- กรณีการควบคุมการอัดรีดลงในอ่างน้ำมัน น้ำมันที่ใช้จะต้องมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับพอลิเมอร์หลอมเหลว ณ อุณหภูมิที่ทำการวัด และพอลิเมอร์ต้องไม่ละลายในน้ำมัน ซึ่งเป็นการยากต่อการหาน้ำมันที่สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงๆ และความหนาแน่นใกล้เคียงกับพอลิเมอร์หลอมเหลว (Bing and Lee, 1987)

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการบวมพองของ polypropylene/diatomite จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ภายใต้อุณหภูมิ 210-230 °ซ โดยใช้ดายรูเล็กยาว 8.00 mm และดายขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.000 1.500 และ 2.095 mm ตามลำดับ ปริมาณของ diatomite เป็น 5-12.5 kg จากการทดลองพบว่า อัตราส่วนการบวมพองจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางดาย อัตราเนื้อและความถี่เนื้อ แต่อัตราส่วนการบวมพองจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ นอกจากนี้เมื่อกำหนดให้ปริมาณของ diatomite และอุณหภูมิคงที่ พบว่า อัตราส่วนการบวมพองจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางดาย (Liang, 2008)

โดยสรุป ตัวแปรซึ่งที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการบวมพองของพอลิเมอร์หลอมเหลว จะแสดงดังต่อไปนี้

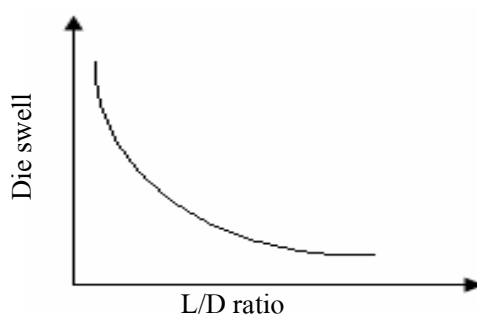
- ระยะเวลาการไหล (residence flow time) คือ ระยะเวลาในการไหลนับตั้งแต่พอลิเมอร์หลอมเหลวเริ่มไหลเข้าไปในดาย จนออกสู่ปากดายที่สภาวะการไหลเดียวกัน โดยมีสาระสำคัญคือ ถ้าพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลอยู่ในดายนานเท่าไร อัตราส่วนการบวมพองยิ่งมีค่าน้อยเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากพอลิเมอร์มีระยะเวลาการคลายตัวภายในดายได้มาก ส่งผลให้ค่าความถี่เนื้อบางส่วนที่สะสมอยู่สามารถปลดปล่อยหรือเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานอื่นๆ (เช่น ความร้อน เป็นต้น) จึงทำให้ค่าการบวมพองลดลง

- รูปแบบการไหล โดยรูปแบบการไหลมีรูปร่างต่างกันซึ่งจะทำให้อัตราส่วนการบวมพองมีความแตกต่างกัน งานวิจัยในปัจจุบัน (Sombatsompop and Dangtungee, 2002) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวกับอัตราส่วนการบวมพอง พบว่าตัวแปรทั้งสอง คือ รูปแบบการไหลและอัตราส่วนการบวมพองนั้นมีความสัมพันธ์กัน และอธิบายได้ในเชิงปริมาณความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ขณะไหลออกในช่องทางการไหลของดาย โดยในการไหลที่มีรูปแบบซับซ้อนจะมีอัตราส่วนการบวมพองน้อยกว่าการไหลที่มีรูปแบบของการไหลแบบธรรมดา

- ความยาวของดาย (die length) จากการศึกษาวิจัย พบว่า อิทธิพลของความยาวของดายสัมพันธ์กับระยะเวลาการไหล กล่าวคือ การใช้ดายที่มีความยาวมากขึ้นทำให้พอลิเมอร์มีระยะเวลาในการไหลภายในดายนานขึ้นและเกิดการคลายตัวของความเค้นเฉือนได้มากขึ้น ส่งผลทำให้มีค่าอัตราส่วนของการบวมพองลดลง แต่ทางปฏิบัติเราไม่สามารถใช้ดายที่มีความยาวมากๆ ได้

- อุณหภูมิของดาย (die temperature) พบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของดายจะส่งผลให้ค่าความเค้นเฉือน ณ อัตราเฉือนหนึ่งๆ ลดลง ทำให้พอลิเมอร์มีค่าอัตราส่วนการบวมพองลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจาก ค่าความหนืดของพอลิเมอร์ที่ลดลงส่งผลให้ต้องการระยะเวลาในการคลายตัวของโมเลกุลลดลง

- อัตราส่วนของความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดาย (L/D ratio) การใช้ดายที่มีค่า L/D สูงขึ้น ทำให้พอลิเมอร์มีเวลาในการไหลภายในดายนานขึ้น และ/หรือ ความเค้นเฉือน ณ อัตราเฉือนหนึ่งๆ ลดลง ดังนั้นจะส่งผลทำให้ค่าอัตราส่วนการบวมพองลดลง ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 การบวมของพอลิเมอร์หลอมเหลวกับอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางดาย

- ประเภทของดายที่ใช้และจำนวนช่องของการไหล ซึ่งจะเป็นการกำหนดให้ดายมีลักษณะพิเศษออกไป จากการศึกษ พบว่า ดายที่หน้าตัดกลมทำให้มีอัตราส่วนการบวมพองมากกว่า ส่วนของดายที่ช่องทางการไหลผสมระหว่างช่องทางการไหลพื้นที่หน้าตัดกลมและพื้นที่หน้าตัดเหลี่ยมจะมีอัตราส่วนของการบวมพองน้อยกว่าช่องทางการไหลพื้นที่หน้าตัดแบบเดี่ยว

- อัตราเฉือน (shear rate) คือ ค่าอัตราความเร็วการไหลตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวภายในดาย หรือความแตกต่างของความเร็วของพอลิเมอร์ที่สร้างตัวเป็นรูปแบบการไหล กล่าวคือ ถ้า

อัตราเฉือนสูง ค่าสัดส่วนการบวมพองจะมาก จากภาพที่ 14 แสดงผลว่า พอลิเมอร์หลอมเหลวจะมีค่าอัตราเฉือนหนึ่งๆ ที่อัตราส่วนการบวมพองเริ่มจะเพิ่มขึ้นน้อยลง แต่หากว่าพอลิเมอร์หลอมเหลวตั้งแต่อัตราเฉือน ณ จุดนี้ไปลักษณะภายนอกเริ่มเป็นริ้วหนังฉลามบริเวณที่ผิวพอลิเมอร์หลอมเหลว และเสีรูปร่างไปหรือเกิดการหักบวม ซึ่งอัตราเฉือน ณ จุดนี้เราเรียกว่า อัตราเฉือนวิกฤต (critical shear rate) และค่าความเค้นเฉือน ณ จุดอัตราเฉือนวิกฤตนี้เราเรียกว่า ความเค้นเฉือนวิกฤต (critical shear stress) (Musameh and Jodeh, 2002)

- สารเติมแต่ง (additives) โดยทั่วไปเติมแต่งมีอยู่หลากหลายชนิด โดยจะมีบทบาทต่อการบวมพองต่างกัน เช่น กรณีใส่ตัวเติม (filler) มีผลทำให้อัตราส่วนการบวมพองลดลง เนื่องจากสารดังกล่าวไปลดความจำแบบยืดหยุ่น (elastic memory) และพบว่า การกระจายตัวของตัวเติมมีผลอย่างมากต่อการบวมพองในพอลิเมอร์หลอมเหลว (Freakley and Sirisinha, 1997) กรณีสารเติมแต่งพวกพลาสติกไซเซอร์ (plasticizers) นั้น ทำหน้าที่ลดความหนืดเฉือน โดยทำให้เกิดความเค้นเฉือนต่อพอลิเมอร์ในปริมาณที่ลดลง ซึ่งจะส่งผลให้การบวมพองลดลงด้วย

- น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (average molecular weight) เนื่องจากอิทธิพลดังกล่าวนี้ยังหาข้อสรุปไม่ได้ แต่เชื่อว่ามีผลเนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลสมดุล (optimum molecular weight) และยังมีความเห็นในสองแนวทาง คือ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเลยจุดความสมดุลจะเพิ่มอัตราส่วนการบวมพอง และอีกทางหนึ่งพบว่า อัตราส่วนการบวมพองสูงเมื่อลดน้ำหนักโมเลกุลลง ทั้งนี้มีปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ตัวอย่างเช่น การเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุล การเกิดผลึกมากน้อยภายหลังการเย็นตัว รวมทั้งขนาดและกิ่งก้านของสายโซ่โมเลกุล ที่ทำให้อัตราส่วนการบวมพองของพอลิเมอร์สูงขึ้น

### 3. การเกิดริ้วหนังฉลามที่ผิวของพอลิเมอร์ (sharkskin)

พฤติกรรมการเกิดริ้วหนังฉลามที่ผิวของพอลิเมอร์หลอมเหลว หรือเรียกว่า ชาร์กสกิน คือ การเกิดริ้วรอยคล้ายฟันฉลามบนผิวของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ไหลออกมาจากปากคาย โดยที่ริ้วรอยจะมีทิศทางของการเกิดที่ตั้งฉากกับทิศทางของการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว และพบว่า การเกิดริ้วหนังฉลามนี้จะเกิดในสภาวะของการบวมพองค่อนข้างสูง หรือเกิดในตำแหน่งที่มีความเค้นเฉือนและอัตราเฉือนสูงกว่าการเกิดการบวมพองปกติ ซึ่งรูปร่างของพอลิเมอร์หลอมเหลวเริ่มที่จะไม่เป็นแบบลักษณะหน้าตัดของคาย สาเหตุนี้เกิดจากการพัฒนารูปแบบการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวระหว่างการไหลภายในคายจากการไหลในรูปแบบคล้ายพาราโบลามาเป็นการไหลแบบ

ปลีก โดยความเร็วในการไหลของพอลิเมอร์ที่บริเวณใกล้ผนังต้องเร่งให้เร็วมากขึ้น เพื่อให้ความเร็วการไหลเท่ากับความเร็วการไหลของพอลิเมอร์บริเวณศูนย์กลางของคาน การเร่งความเร็วพอลิเมอร์ทำให้เกิดการเสียดสีของสายโซ่โมเลกุลและเกิดความเค้นสะสมมากขึ้น และหากว่าความเค้นสะสมนี้เกิดจากความสามารรถหรือความต้านทานในการรับแรงดึง (tensile strength) ของพอลิเมอร์บริเวณผิว ณ สภาวะการไหลนั้นๆ จะทำให้ผิวของพอลิเมอร์เกิดการฉีกขาดในขณะที่สัมผัสกับปากคานในที่สุด แล้วเกิดเป็นริ้วรอยเมื่อไหลออกมาจากคาน

#### 4. การเกิดการหักมุมของพอลิเมอร์หลอมเหลว (melt fracture หรือ melt distortion)

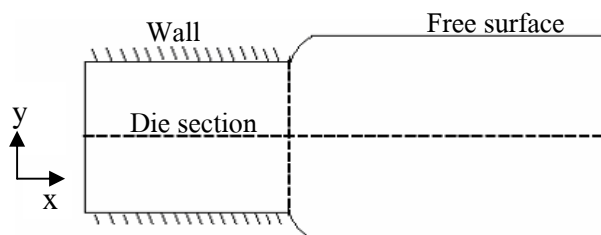
สำหรับเรื่องพฤติกรรมของพอลิเมอร์ไหลออกจากหัวคานในสภาวะสุดท้ายได้เกิดขึ้นที่ความเค้นเฉือนสูงและความเครียดเฉือนที่สูงจนเกินสภาวะของพอลิเมอร์หลอมเหลวจะต้านทานได้ ลักษณะที่ไหลออกจากหัวคานจะผิดรูปไปไม่เหมือนรูปร่างของช่องทางการไหล เช่น แบบที่รูปร่างไม่แน่นอน (irregular melt fracture) แบบคล้ายเกลียวสกรู (screw-like) แบบเกลียววน (spiral) หรือแบบข้อไม้ไผ่ (bamboo-like) ซึ่งเป็นลักษณะของการผิดรูปทรง โดยเรียกว่า การเกิดการหักมุมของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Brydson, 1981)

#### แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับแก้ปัญหาการไหลในกระบวนการอัดรีด

การวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ เช่น ปัญหากลศาสตร์ของแข็ง ของเหลว ของไหล หรือว่าปัญหาทางการไหลนั้น ผลลัพธ์ที่เกิดจากการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ 3 ประการด้วยกัน คือ ลักษณะรูปทรงทางเรขาคณิตของปัญหา ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยหรือสมการที่เกี่ยวข้อง ซึ่งใช้อธิบายปัญหาและสภาวะขอบเขตการไหลของปัญหาที่ศึกษา ซึ่งหากผลลัพธ์ที่ได้เปลี่ยนแปลงไป อาจจะมีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่ทำการวิเคราะห์ สามารถอธิบายปัจจัยต่างๆ ได้ดังนี้

##### 1. ลักษณะรูปทรงทางเรขาคณิตของปัญหา

ปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในการใช้งานส่วนมากมีความสลับซับซ้อน โดยเป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญซึ่งส่งผลต่อผลลัพธ์ที่ได้ เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแม้ว่าปัจจัยอื่นๆ คงที่ ในงานวิจัยนี้การไหลของพอลิเมอร์หลอมออกจากคานแผ่นพิจารณาเป็น 2 มิติ เมื่อมองจากขอบด้านข้างจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า และเกิดการบวมพองเมื่อไหลออกจากคาน แสดงดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ลักษณะรูปทรงเรขาคณิตของพอลิเมอร์หลอมที่เกิดการบวมพอง

## 2. สมการอธิบายการไหลของพอลิเมอร์หลอมในกระบวนการอัดรีด

สมการที่เกี่ยวข้องกับการอธิบายการไหล ประกอบด้วยสมการ คือ สมการความต่อเนื่อง (the equation of continuity) สมการโมเมนตัมในเทอมของความเค้นเฉือน (the equation of motion in terms of shear stress) และสมการพลังงาน (the equation of energy) แสดงดังสมการที่ 22 23 และ 24 (Bird *et al.*, 2002)

- สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\nabla \cdot \rho v) \quad (22)$$

- สมการการโมเมนตัมในเทอมของความเค้นเฉือน

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla p - (\nabla \cdot \tau) + \rho g \quad (23)$$

- สมการพลังงาน

$$\rho c_v \frac{DT}{Dt} = -(\nabla \cdot q) - \left[ \frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln T} \right]_p \frac{Dp}{Dt} - (\tau : \nabla v) \quad (24)$$

เมื่อ  $v$  คือ ความเร็ว (m/s)

$\rho$	คือ ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )
$t$	คือ เวลา (s)
$T$	คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)
$P$	คือ ความดัน (Pa)
$g$	คือ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก ( $\text{m/s}^2$ )
$\tau$	คือ ฟลักซ์โมเมนตัม หรือความเค้นเฉือน (Pa)

จากสมการเชิงอนุพันธ์ของโมเมนตัม จะมีความเกี่ยวข้องกับความเค้นที่กระทำบนชิ้นส่วนของของไหล สามารถเขียนความสัมพันธ์ของความเค้นที่กระทำบนชิ้นส่วนของของไหล ดังสมการต่อไปนี้

$$\tau_{ij} = -\eta \Delta_{ij} \quad (i, j = x, y, z) \quad (25)$$

$$\pi_{ij} = P \delta_{ij} + \tau_{ij} \quad (i, j = x, y, z) \quad (26)$$

เมื่อ	$\eta$	คือ ค่าความหนืด
	$\Delta_{ij}$	คือ อัตราการเปลี่ยนรูป (rate of deformation tensor) หรือ $\dot{\gamma}$
	$\pi_{ij}$	คือ ความเค้น โมเลกุล (molecular stress)
	$\delta_{ij}$	คือ kronecker delta โดยที่ เมื่อ $i = j$ ; $\delta_{ij} = 1$ และ เมื่อ $i \neq j$ ; $\delta_{ij} = 0$

โดยกรณีของไหลมีพฤติกรรมการไหลเป็นของไหลกลุ่มนอนนิวโตเนียน (non-newtonian fluid) ความเค้นเฉือนที่กระทำกับของไหลสามารถใช้กฎสมการ Carreau-Yasuda มาอธิบายได้ดังสมการที่ 27 (Shenoy and Sain, 1996)

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) \left[ 1 + (\lambda \dot{\gamma})^a \right]^{\frac{n-1}{a}} \quad (27)$$

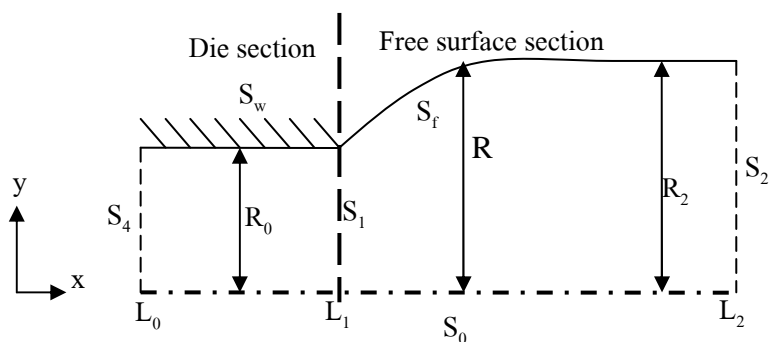
เมื่อ	$\eta$	คือ ค่าความหนืด (Pa.s)
	$\eta_0$	คือ ค่าความหนืดอัตราเฉือนศูนย์ (Pa.s)
	$\eta_{\infty}$	คือ ค่าความหนืดอัตราเฉือนอนันต์ (Pa.s)
	$\lambda$	คือ ระยะเวลาในการคลายตัว (s)

- $\dot{\gamma}$  คือ อัตราเฉือน ( $s^{-1}$ )  
 $a$  คือ ดัชนีคูมการเปลี่ยนช่วงนิวโตเนียน-กฏสมการยกกำลัง  
 $n$  คือ ดัชนีกฏสมการยกกำลัง

เมื่อพิจารณาสมการข้างต้นที่ใช้สำหรับกระบวนการอัดรีด พฤติกรรมการไหลจะพิจารณาจาก 2 สมการหลัก คือ สมการความต่อเนื่องและสมการโมเมนตัม โดยเป็นระบบอนุกรมวิธานที่คือ อนุกรมวิธานการไหลภายในและภายนอกคามีอนุกรมวิธานเท่ากัน เนื่องจากการบวมพองเกิดขึ้นเร็วมากในระยะเวลาและระยะทางสั้นๆ เท่านั้น

### 3. สภาวะขอบของการไหล (boundary condition)

ความสัมพันธ์กันของสมการเชิงอนุพันธ์ทำให้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์เป็นแบบไม่เชิงเส้น โดยสามารถนำมาอธิบายปรากฏการณ์การไหล แต่สิ่งที่ทำให้ระบบสมการให้ผลลัพธ์แตกต่างกันคือ สภาวะขอบของการไหล โดยสภาวะขอบที่ทำให้เกิดการบวมพองของพอลิเมอร์สามารถแสดงได้โดยมีลักษณะ ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 สภาวะขอบการไหลของพอลิเมอร์ที่เกิดการบวมพอง

- สภาวะขอบที่เส้นกึ่งกลางตาย ( $S_0$ )

$$\text{B.C.1 ที่ } y=0, \quad v_y=0, \quad \frac{\partial v_x}{\partial y}=0$$

- สภาวะขอบที่ผนังคาย ( $S_w$ )

$$\text{B.C.2 ที่ } y=R_0, \quad v_x=0, \quad v_y=0$$

- สภาวะขอบที่ตำแหน่งพื้นผิวอิสระ ( $S_f$ )

$$\text{B.C.3 ที่ } y=R, \quad \bar{n} \cdot \bar{v} = 0, \quad \tau_{nn} = 0, \quad \tau_{mm} = 0$$

- สภาวะขอบที่ตำแหน่งปลาย ( $S_2$ ) (ตำแหน่งการบวมพองสูงสุด)

$$\text{B.C.4 ที่ } r=L_2, \quad v_y=0, \quad \tau_{xx}=0$$

ในกระบวนการอัดรีดพอลิเมอร์หลอมที่ไหลผ่านคาย มักจะเกิดการบวมพองของพอลิเมอร์ ซึ่งการเกิดบวมพองนี้ของพอลิเมอร์เป็นสิ่งที่น่าสนใจ โดยมีผู้ศึกษาการบวมพองโดยใช้แบบจำลองต่างๆ มาอธิบายการไหลของพอลิเมอร์หลอม ดังต่อไปนี้

การลื่นไหลที่ผนัง (wall slip) มาเป็นตัวอธิบายการลดการแตกหัก (crack) และการเกิดการบวมพองของการอัดรีดพอลิเมอร์ ซึ่งตรวจสอบโดยใช้การอัดรีดแบบรูเล็กของของไหลนิวโตเนียน และคำนวณโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยโปรแกรม POLYFLOW กับกฎการลื่นไหล (slip law) ซึ่งใช้ทฤษฎีไดนามิกส์ของโมเลกุล และความเค้นวิกฤตเนื่องจากแรงดึงที่ผนัง โดยตั้งสมมติฐานว่า

- พิจารณาระบบสมมาตรในแนวแกน (axisymmetric)
- การไหลไม่เกิดการอัดตัว (incompressible) โดยพิจารณาควบคุมอัตราการไหลในช่วงที่กำหนด
- ไม่คิดแรงเฉื่อย (no inertia)



เมื่อ	$v$	คือ ความเร็ว (m/s)
	$p$	คือ ความดัน
	$\tau$	คือ ความเค้นเฉือน

- สมการความเค้นที่กระทำบนของไหลเป็น

$$\tau = \eta \left( \dot{\gamma} \right) \dot{\gamma} \quad (30)$$

$$\dot{\gamma} = \nabla v + \nabla v^T \quad (31)$$

เมื่อ	$\eta$	คือ ความหนืด
	$\dot{\gamma}$	คือ อัตราเฉือน

สำหรับของไหลนิวโตเนียน

$$\eta = \mu \quad (32)$$

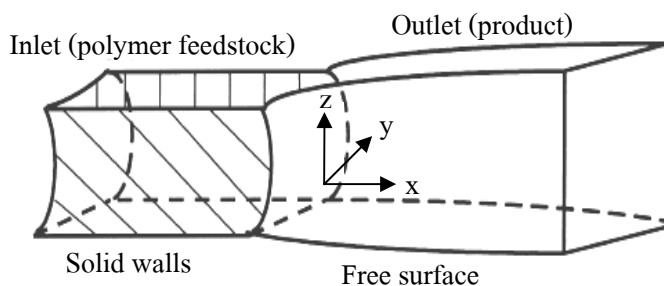
สำหรับของไหลบิงแฮม

$$\eta = \left[ \mu + \tau_y \left[ \frac{1 - \exp(-m |\dot{\gamma}|)}{\dot{\gamma}} \right] \right] \quad (33)$$

สำหรับของไหลวิสโคอีลาสติก

$$\tau = \eta(\dot{\gamma}) \dot{\gamma} + \left( \frac{1}{2} \psi_1 + \psi_2 \right) \left\{ \dot{\gamma} \cdot \dot{\gamma} \right\} - \frac{1}{2} \psi_1 \frac{\partial \dot{\gamma}}{\partial t} \quad (34)$$

เมื่อ	$\psi_1, \psi_2$	คือ สัมประสิทธิ์ผลต่างความเค้นจากลำดับที่ 1, 2 (normal stress difference coefficient 1, 2)
-------	------------------	--



ภาพที่ 21 สภาวะขอบการไหลของของไหล

สภาวะขอบของการไหลเป็น

1. บริเวณทางเข้า (inlet)

- พิจารณาการไหลแบบ fully developed มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ โดยมีทางเข้าและทางออก จากดาวยระยะทาง  $L_1, L_2$  จะได้

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = \frac{\Delta P}{\Delta L} \quad (35)$$

$$\frac{\int_{A_3} u_1 dA_3}{\int_{A_3} dA_3} = Q \quad (36)$$

เมื่อ	$\frac{\Delta P}{\Delta L}$	คือ เกรเดียนต์ความดันคงที่ (constant pressure gradient)
	Q	คือ อัตราการไหลบริเวณทางเข้า ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
	$A_3$	คือ พื้นที่หน้าตัด ( $\text{m}^2$ )
	$u_1$	คือ ความเร็วการไหลในแนวแกน x ( $\text{m/s}$ )

## 2. บริเวณพื้นผิวอิสระ (free surface)

- พิจารณาระยะทางจากคานยาวมาก
- ไม่คิดผลกระทบจากแรงโน้มถ่วง และแรงดึง
- กำหนด แรงตึงฉากที่พื้นที่ผิวอิสระเป็นศูนย์
- สภาวะ fully developed สำหรับการไหลแบบปลັถ

จะได้ว่า 
$$-p + \tau_{nn} = 0, \quad v = 0, \quad w = 0$$

เมื่อ	$n$	คือ เวกเตอร์ตั้งฉากภายนอก (outward normal vector) ที่ระนาบการไหลทางออก
	$\tau_{nn}$	คือ เทนเซอร์ของความเค้นตั้งฉาก (normal component of the stress tensor)
	$v$	คือ ความเร็วในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการไหล
	$w$	คือ ความเร็วในทิศทางการไหล

เนื่องจากพื้นผิวอิสระ ไม่คิดผลกระทบเนื่องจากแรงดึง สภาวะขอบจะเป็นดังนี้

$$\tau \cdot n = 0$$

จากแบบจำลองพบว่า พฤติกรรมการบวมพองที่บริเวณหัวคานสำหรับของไหลนิวโตเนียน ของไหลบิงแฮม และของไหลวิสโคอีลาสติก จากแบบจำลองใน 3 มิติ ให้ผลสอดคล้องเมื่อพิจารณา การไหลแบบสมมาตรในแนวแกนแบบ 2 มิติ

ได้มีการทดลองสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการศึกษาสมบัติ และพฤติกรรมการไหลของพอลิเอทิลีนหลอมในกระบวนการอัดรีดผ่านคานแผ่น ซึ่งเป็นของไหลนอนนิวโตเนียน โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวอัดรีดส่วนการบวมพอง ใช้เครื่องมาตรการไหลรูเล็กวัดสมบัติของการไหล ซึ่งมีกระบอกสูบ 2 อัน ความเร็วรอบ 1-500 mm/min คานขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 mm ยาว 10 และ 30 mm ใช้อุณหภูมิ 413-473 เคลวิน ความเร็วรอบของสกรู 10 รอบ/min และนำเอาวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์มาสร้างแบบจำลอง เพื่อนำมาวิเคราะห์การบวมพองและการไหลของพอลิเอทิลีนผ่านคาน โดยได้ตั้งสมมติฐาน ดังนี้

- การไหลมีลักษณะสมมาตรในแนวแกน
- การไหลมีลักษณะราบเรียบ (laminar flow) และระบบอยู่ในสภาวะคงตัว
- ละทิ้งผลจากแรงโน้มถ่วงของโลก (no gravity force)
- พิจารณาเป็นของไหลแบบไม่เกิดการอัดตัว
- ของไหลมีพฤติกรรมการไหลแบบนอนนิวโตเนียน
- อธิบายการไหลโดยใช้กฎสมการยกกำลัง
- ไม่มีการลื่นไหลบนผิวผนัง
- อุณหภูมิของของไหลในคานคงที่

จากแบบจำลอง พบว่า อัตราการเลื่อนที่ผนังเพิ่มขึ้น ค่าความหนืดเฉือนจะมีค่าลดลง ส่วนค่าความเค้นเฉือนจะเพิ่มขึ้น ตามสมการ

$$\eta = 1.66 \times 10^4 e^{-0.0048(T-298)} \left( \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right)^{0.524}$$

เมื่อนำผลการบวมพองมาเทียบกับผลการทดลอง พบว่า อุณหภูมิในช่วง 413-473 เคลวิน อัตราส่วนการบวมพองที่ได้จากแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง -5.3 ถึง 5.3 % (วีรพล, 2547)

ได้มีการศึกษารูปแบบการไหลและพฤติกรรมการบวมพองของพอลิस्टาไทริน โดยได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สภาวะเดียวกันกับการทดลอง ซึ่งใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 mm ความเร็วรอบสกรู 1-15 รอบ/นาที อุณหภูมิ 200-230 °ซ โดยมีการตั้งสมมติฐานดังนี้

- รูปแบบของปัญหาเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า 2 มิติ
- รูปแบบการไหลของของไหลเป็นแบบนอนนิวโตเนียน
- อุณหภูมิคงที่
- ประยุกต์ใช้กฎสมการยกกำลังเพื่ออธิบายสมบัติความเป็นนอนนิวโตเนียน
- การไหลเป็นแบบไม่อัดตัว
- การไหลอยู่ในสภาวะคงตัว

- ไม่มีการเลื่อนที่ผนัง
- ไม่คิดแรงโน้มถ่วงของโลก

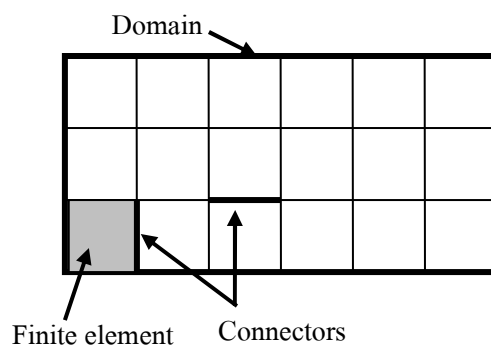
ในการไหลของพอลิสไตรีนหลอมผ่านสายแผ่นจะเป็นแบบพื้นผิวอิสระ โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการแก้สมการในโปรแกรม POLYFLOW จากการทดลองพบว่า อัตราส่วนการบวมพองจากการทำนายคลาดเคลื่อนจากการทดลอง 9-20 % เพราะการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยกฎสมการยกกำลังมาอธิบายสมบัติความเป็นวิสโคอีลาสติกของพอลิสไตรีนหลอม ซึ่งจะเป็นสมบัติหลักของการเกิดการบวมพองของพอลิเมอร์ได้น้อย (กิตติมา, 2549)

งานวิจัยนี้ได้้นำโปรแกรม POLYFLOW ซึ่งใช้เทคนิคการแก้สมการแบบไฟไนต์เอลิเมนต์มาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาอัตราส่วนการบวมพองของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวในกระบวนการอัดรีด โดยโปรแกรม POLYFLOW นี้ สามารถประยุกต์ใช้แก้ปัญหาการไหลในกระบวนการต่างๆ เช่น กระบวนการทางพอลิเมอร์และยาง อาหาร และการหลอมแก้ว เป็นต้น

### การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม POLYFLOW (3.11.0)

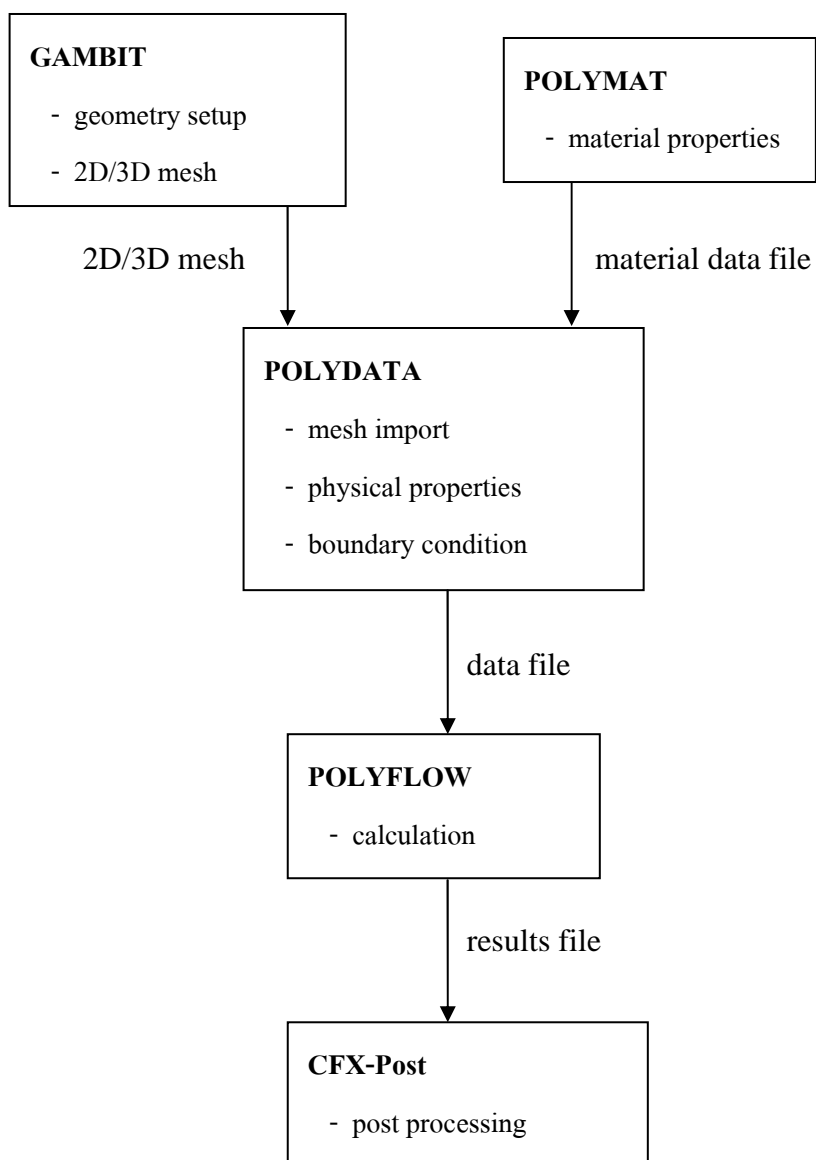
โปรแกรม POLYFLOW เป็นโปรแกรมที่ใช้คำนวณพลศาสตร์ของไหล (computational fluid dynamics, CFD) ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ซึ่งอาศัยความสามารถของเครื่องคอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ อีกทั้งใช้สำหรับแก้ปัญหาการไหลของของไหลที่มีสมบัติหนืด และยืดหยุ่น เช่น พอลิเมอร์ ยาง และพลาสติก เป็นต้น สามารถประยุกต์ใช้กับระบบการไหลได้กว้างขวาง เช่น ระบบการไหลอุณหภูมิกิ่งที่ ระบบการไหลอุณหภูมิตะกุกที่ ระบบการไหลในสภาวะคงตัว ระบบการไหลที่ขึ้นอยู่กับเวลา และระบบการไหลของปฏิกิริยาเคมี (chemically reacting flows) โดยที่รูปทรงเรขาคณิตของปัญหาเป็นแบบ 2 มิติ หรือ 3 มิติ อีกทั้งโปรแกรม POLYFLOW สามารถประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตในรูปแบบต่างๆ เช่น ประยุกต์ใช้ในกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ กระบวนการเป่าขึ้นรูป กระบวนการเป่าฟิล์ม กระบวนการออกแบบสาย กระบวนการขึ้นรูปพลาสติกโดยเทคนิคเทอร์โมฟอร์ม กระบวนการหล่อพลาสติก กระบวนการอัดรีดพลาสติก กระบวนการอัดและการอัดส่ง และกระบวนการดึงเส้นใยแก้ว เป็นต้น

จากการที่โปรแกรม POLYFLOW ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (partial differential equations) นั้น ซึ่งจะต้องมีการกำหนดโดเมนการไหล (flow domain) และกำหนดสภาวะขอบของการไหลบนโดเมน โดยที่โดเมนย่อย (sub domain) และสภาวะขอบสามารถกำหนดในเทอมของเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งโดเมนการไหลนี้จะถูกแบ่งย่อยเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ แสดงดังภาพที่ 22 โดยที่เอลิเมนต์เหล่านั้นจะไม่ซ้อนทับกัน



ภาพที่ 22 การแบ่งโดเมนการไหลเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ

สำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม POLYFLOW ประกอบด้วยโปรแกรมย่อยๆ หลายโปรแกรม เพื่อใช้สำหรับการกำหนดรูปร่างของปัญหา การกำหนดข้อมูลสำหรับการคำนวณ และการแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ โดยที่โปรแกรมย่อยๆ เหล่านี้ประกอบไปด้วย โปรแกรม GAMBIT (2.4.0) โปรแกรม POLYMAT โปรแกรม POLYDATA โปรแกรม POLYFLOW (3.11.0) และ โปรแกรม CFX-Post (11.1) ซึ่งแต่ละโปรแกรมมีลำดับการทำงานและหน้าที่ แสดงดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 ลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม POLYFLOW

จากภาพที่ 23 แสดงลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม POLYFLOW ซึ่งมีรายละเอียดในขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

## 1. โปรแกรม GAMBIT

โปรแกรม GAMBIT เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับการสร้างรูปทรงของปัญหาซึ่งในการสร้างรูปทรงของปัญหาสามารถเป็นได้ทั้งรูปทรง 2 มิติ และ 3 มิติ ในกรณีที่รูปทรงเรขาคณิตปัญหาเป็นแบบ 2 มิติ อิเล็กเมนต์ย่อยๆ อาจจะมีรูปทรงเป็นรูปสามเหลี่ยมหรือรูปสี่เหลี่ยม ส่วนกรณีของรูปทรงเรขาคณิตของปัญหาเป็นแบบ 3 มิติ โดยที่อิเล็กเมนต์อาจจะมีรูปทรงเป็นแบบ ก้อนอิฐ (bricks) ลิ่ม (wedges) และทรงสี่หน้า (tetrahedral) เป็นต้น โดยขั้นตอนการสร้างรูปทรงของปัญหาเริ่มต้นจากการเลือกใช้โปรแกรมสำหรับแก้ปัญหา คือ โปรแกรม POLYFLOW ต่อด้วยการกำหนดขนาดของรูปร่าง แบ่งพื้นที่ภายในรูปร่างออกเป็นอิเล็กเมนต์ย่อยๆ และกำหนดชื่อให้กับด้านต่างๆ ที่เป็นสภาวะขอบของการไหล เพื่อใช้ในการกำหนดสภาวะขอบของการไหลในโปรแกรม POLYDATA ต่อไป โดยโปรแกรม GAMBIT ทำการบันทึกเป็นไฟล์นามสกุล neutral file (\*.neu)

## 2. โปรแกรม POLYFLOW

การทำงานในส่วนของโปรแกรม POLYFLOW จะแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ส่วน คือ การทำงานในส่วนของโปรแกรม POLYMAT การทำงานในส่วนของโปรแกรม POLYDATA และการทำงานในส่วนของโปรแกรม CFX-Post ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.1 โปรแกรม POLYMAT

โปรแกรม POLYMAT ใช้สำหรับกำหนดคุณสมบัติของพอลิเมอร์ โดยใช้การคำนวณคุณสมบัติของพอลิเมอร์จากสมการองค์ประกอบหลัก (constitutive equation) และพารามิเตอร์เชิงตัวเลข (numerical parameters) สำหรับระบบการไหลแบบนิวโทเนียนที่อุณหภูมิคงที่ หรือ ไม่คงที่ ระบบของการไหลแบบดิฟเฟอเรนเชียลวิสโคอีลาสติก และระบบของการไหลแบบอินทิกรัลวิสโคอีลาสติก โดยเลือกโมเดลสำหรับใช้อธิบายสมบัติความหนืดของพอลิเมอร์ที่ขึ้นอยู่กับอัตราเฉือนในรูปแบบต่างๆ เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมของการไหลของพอลิเมอร์แบบนอนนิวโทเนียน เช่น กฎสมการยกกำลัง, Bird-Carreau law, Bingham law, Herschel-Bulkley law และ Carreau-Yasuda law เป็นต้น ซึ่งสามารถเปรียบเทียบกับกรทดลองได้ โดยใช้โปรแกรม POLYMAT มาสร้างไฟล์นามสกุล material data file (\*.mat) แล้วคำนวณคุณสมบัติของพอลิเมอร์ผ่านทางโปรแกรม POLYDATA

## 2.2 โปรแกรม POLYDATA

การใช้โปรแกรม POLYDATA เริ่มต้นโดยนำไฟล์ที่สร้างจากโปรแกรม GAMBIT คือ ไฟล์นามสกุล neutral file (\*.neu) เข้ามาในโปรแกรม POLYDATA จากนั้นเปลี่ยนไฟล์นามสกุล เป็น mesh file (\*.msh) แล้วทำการกำหนดคุณสมบัติของพอลิเมอร์โดยนำเข้าไฟล์นามสกุล material data file (\*.mat) ที่สร้างจากโปรแกรม POLYMAT จากนั้นให้กำหนดลักษณะทางกายภาพ กำหนด สภาวะขอบของการไหล และพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อใช้เป็นไฟล์ข้อมูลสำหรับการแก้ปัญหา ซึ่งมี ขั้นตอนการทำงานดังนี้

2.2.1 การกำหนดลักษณะทางกายภาพ เป็นการกำหนดสมมติฐานให้กับระบบนั้น เช่น การกำหนดรูปร่างของปัญหาเป็นแบบ 2 มิติ หรือแบบ 3 มิติ ระบบการไหลอยู่ในสถานะคงตัว หรือ ระบบการไหลขึ้นกับเวลา ระบบการไหลเป็นแบบนิวโทเนียนที่มีอุณหภูมิคงที่ หรือไม่คงที่ ระบบ การไหลเป็นแบบคิฟเฟอเรลเซียลวิส โคอีลาสติกที่มีอุณหภูมิคงที่ หรือไม่คงที่ และระบบการไหลเป็น แบบอินทิกรัลวิส โคอีลาสติกที่มีอุณหภูมิคงที่ หรือไม่คงที่ เป็นต้น

2.2.2 การกำหนดสภาวะขอบของการไหล ขั้นตอนในการกำหนดสภาวะขอบของการ ไหลให้กับรูปร่างของปัญหาที่สร้างขึ้น เพื่อช่วยในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยสำหรับการหาผล ลัพธ์ ตัวอย่างของสภาวะขอบของการไหลที่ประยุกต์ใช้ในโปรแกรมนี้ เช่น กำหนดให้การไหล สมมาตรในแนวแกน กำหนดการไหลสมมาตรตามแนวระนาบ (plane of symmetry) การกำหนด ความเร็วตั้งฉาก (normal velocity,  $v_n$ ) กำหนดความเร็วที่แนวสัมผัสพื้นผิว (tangential velocity,  $v_t$ ) กำหนดค่าแรงตั้งฉาก (normal force,  $f_n$ ) กำหนดค่าแรงที่แนวสัมผัสพื้นผิว (tangential force,  $f_t$ ) การ กำหนดให้มีการลื่นไหลที่ผนัง และการกำหนดพื้นที่ผิวอิสระ เป็นต้น

เมื่อทำการกำหนดคุณสมบัติของพอลิเมอร์ ลักษณะทางกายภาพ คุณสมบัติการไหล และสภาวะขอบของการไหล เพื่อใช้สำหรับการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ ขั้นตอนต่อไป คือ การเลือก โปรแกรมแสดงผล ในที่นี้เลือกใช้โปรแกรม CFX-Post เป็นโปรแกรมแสดงผลลัพท์ และการบันทึก ข้อมูลเพื่อนำไปคำนวณผลลัพท์ โดยทำการบันทึกข้อมูลลงในไฟล์นามสกุล data file (\*.dat) เพื่อนำไปคำนวณในโปรแกรม POLYFLOW ต่อไป

## 2.3 โปรแกรม POLYFLOW

สำหรับในส่วนของโปรแกรม POLYFLOW นี้ จะเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ เพื่อใช้คำนวณหาผลลัพธ์ค่าต่างๆ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ซึ่งมีการตั้งสมมุติฐานเพื่อให้สมการมีความซับซ้อนน้อยลง เมื่อโปรแกรม POLYFLOW ทำการประมวลผลแก้ปัญหาแล้ว จะการสร้างไฟล์นามสกุล uns file (\*.uns) เพื่อแสดงผลลัพธ์ต่อไปในโปรแกรม CFX-Post

## 3. โปรแกรม CFX-Post

โปรแกรม CFX-Post เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการแสดงผลลัพธ์จากโปรแกรม POLYFLOW โดยนำผลลัพธ์ที่ได้จากไฟล์นามสกุล uns file (\*.uns) มาเรียกดูผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ เช่น ค่าการบวมพองของพอลิเมอร์หลอม ค่าความเร็ว ค่าความดัน ค่าความหนืด และค่าอัตราเฉือน เป็นต้น

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. พลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) เกรด THAI-ZEX จากบริษัทบางกอก โพลีเอทิลีน จำกัด (มหาชน) โดยมีสมบัติแสดงดังตารางที่ 1
2. เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (Thermo Haake: Rheocord 300p และ Rheomex 252p) ซึ่งประกอบด้วย ดायรูเล็ก และดายแผ่น แสดงดังภาพที่ 24 และ 25 โดยแสดงลักษณะของดายอย่างชัดเจนดังภาพที่ 26 และ 27 สำหรับวัดค่าคุณสมบัติการไหล และวัดค่าการบวมพอง ตามลำดับ
3. เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.0001 กรัม (Mettler AT400)
4. กล้องถ่ายรูป ใช้สำหรับถ่ายภาพแสดงการบวมพองของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง
5. โปรแกรม SemAfore 4 ใช้สำหรับวัดขนาดการบวมพองจากภาพถ่าย
6. โปรแกรม GAMBIT (2.4.0) ใช้ในการกำหนดรูปร่างลักษณะของปัญหา
7. โปรแกรม POLYFLOW (3.11.0) ใช้ในการแก้สมการการไหล

### วิธีการ

ในงานวิจัยนี้แบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการทดลอง และส่วนของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยในแต่ละส่วนจะแบ่งตามขั้นตอน ดังนี้

#### 1. การทดลอง

สำหรับการดำเนินการทดลองนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนย่อย ดังนี้

1.1 ส่วนของการทดลองเพื่อหาค่าสมบัติต่างๆ ของการไหล ซึ่งได้ทำการทดสอบการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวประกอบเข้ากับดายรูเล็ก ซึ่งเครื่องอัดรีดทำการวัดค่าแรงบิด (torque) อุณหภูมิ ความดัน และความเร็วยวของสกรู และมีการ

เชื่อมโยงข้อมูลเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อกำหนดค่าสมบัติการไหล และแสดงผลทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ โดยมีรายละเอียดแต่ละขั้นตอน ดังนี้

1.1.1 ประกอบคายนรูเล็กเข้ากับเครื่องอัดรีด ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้คายนรู 3 ขนาด คือ คายนรูยาว 15 30 และ 45 มิลลิเมตร

1.1.2 นำเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงใส่ในเครื่องอัดรีด ผ่านกรวยเติมพลาสติก

1.1.3 เปิดเครื่องอัดรีดและเปิดวาล์วลม เพื่อช่วยในการระบายความร้อน

1.1.4 ปรับตั้งค่าของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ 6 ค่า คือ 423 433 443 453 463 และ 473 เคลวิน

1.1.5 ทำการปรับตั้งค่าต่างๆ ของเครื่องอัดรีด โดยใช้การปรับตั้งโปรแกรมของเครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุม คือ ขนาดของคายนรู ชนิดของคายนรู ชนิดของสกรู อุณหภูมิ ความเร็วรอบสกรู และจำนวนครั้งการเก็บตัวอย่าง การทดลองแต่ละครั้งจะปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของสกรู 10 ค่า (ใช้ความเร็วรอบสกรูช่วง 6-15 รอบต่อนาที และเก็บข้อมูล 1 ครั้งต่อความเร็วรอบของสกรู 1 ค่า)

1.1.6 กดปุ่มเริ่มทำงานเมื่อเครื่องอัดรีดถึงสภาวะการทำงานที่ปรับตัดไว้ พร้อมทั้งตัดเศษพอลิเมอร์ที่ติดค้างบริเวณทางออกของคายนรูทิ้ง

1.1.7 ตัดตัวอย่างพอลิเมอร์เมื่อเครื่องเตือน เพื่อการวัดและทำการเก็บข้อมูลตามเวลาที่ได้ตั้งค่าเอาไว้

1.1.8 นำตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ได้มาชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่าน้ำหนักที่ได้ใน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ควบคุม ทำการทดลองจนครบ 10 ค่าของความเร็วรอบสกรู

1.1.9 บันทึกข้อมูลลงในโปรแกรม และทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1.1.1-1.1.8 โดยที่ปรับเปลี่ยนขนาดของคายนรู 3 ขนาด และ 6 อุณหภูมิ จนครบ

1.1.10 วิเคราะห์ข้อมูลและคำนวณสมบัติการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

### ตารางที่ 1 คุณสมบัติของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

สมบัติ	หน่วย	วิธีการทดสอบ	HDPE THAI-ZEX
ดัชนีการไหล	g/10 min	ASTM D 1238	2.38
ความหนาแน่น	g/cm <sup>3</sup>	ASTM D 1505	0.961

ที่มา: บริษัทบางกอกโพลีเอทิลีน จำกัด (มหาชน) (2007)

1.2 การทดลองวัดค่าอัตราส่วนการบวมพองของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ซึ่งทำการทดลองโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวประกอบเข้ากับคายนแผ่น โดยที่วิธีการวัดค่าอัตราส่วนการบวมพองจะแสดงในรูปของอัตราส่วนระหว่างขนาดความหนาของแผ่นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงต่อขนาดความหนาของคายนแผ่น ซึ่งวิธีการคำนวณจะแสดงดังภาคผนวก ก และใช้โปรแกรม SemAfore 4 วัดขนาดความหนาของแผ่นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง โดยใช้ภาพถ่ายของกล้องถ่ายรูป โดยมีรายละเอียดแต่ละขั้นตอน ดังนี้

1.2.1 ประกอบคายนแผ่นเข้ากับเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ซึ่งทำการปรับเปลี่ยนขนาดความหนาของคายน 3 ขนาด คือ 0.6 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร

1.2.2 นำเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงใส่ในเครื่องอัดรีด ผ่านกรวยเติมพลาสติก

1.2.3 เปิดเครื่องอัดรีดและเปิดวาล์วลม เพื่อช่วยในการระบายความร้อน

1.2.4 ปรับตั้งค่าของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ 6 ค่า คือ 423 433 443 453 463 และ 473 เคลวิน

1.2.5 ตั้งค่าต่างๆ ในโปรแกรมของเครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุม คือ ขนาดของคายน ชนิดของคายน ชนิดของสกรู อุณหภูมิ ความเร็วรอบสกรู และเวลาในการเก็บตัวอย่าง โดยในการทดลองแต่ละครั้งจะปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของสกรู 10 ค่า (ใช้ความเร็วรอบสกรูช่วง 6-15 รอบต่อนาที และเก็บข้อมูล 1 ครั้งต่อความเร็วรอบของสกรู 1 ค่า)

1.2.6 กดปุ่มเริ่มทำงานเมื่อเครื่องอัดรีดถึงสภาวะการทำงานที่ปรับตั้งไว้ พร้อมทั้งตัดเศษพอลิเมอร์ที่เหลือข้างบริเวณออกของคายนทิ้ง

1.2.7 ตัดตัวอย่างพอลิเมอร์เมื่อเครื่องเตือน เพื่อการวัดและทำการเก็บข้อมูลตามเวลาที่ตั้งค่าไว้ ทำการทดลองจนครบ 10 ค่าของความเร็วรอบสกรู ในระหว่างทำการทดลองให้ทำการถ่ายภาพตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ออกจากคายน เพื่อใช้ในการวัดความหนาของตัวอย่างพอลิเมอร์

1.2.8 ทำการบันทึกข้อมูลลงในโปรแกรม และทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1.2.1-1.2.8 โดยทำการปรับเปลี่ยนขนาดของคายน 3 ขนาด และ 6 อุณหภูมิ จนครบ

1.2.9 วัดความหนาของแผ่นพอลิเมอร์จากภาพถ่าย โดยใช้โปรแกรม SemAfore 4



ภาพที่ 24 การไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวจากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ประกอบคานารูเล็กที่ใช้ในงานวิจัย



ภาพที่ 25 เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวประกอบคานาแผ่นที่ใช้ในงานวิจัย



ภาพที่ 26 ดายรูเล็กที่ใช้ในงานวิจัย



ภาพที่ 27 ดายแผ่นที่ใช้ในงานวิจัย

## 2. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

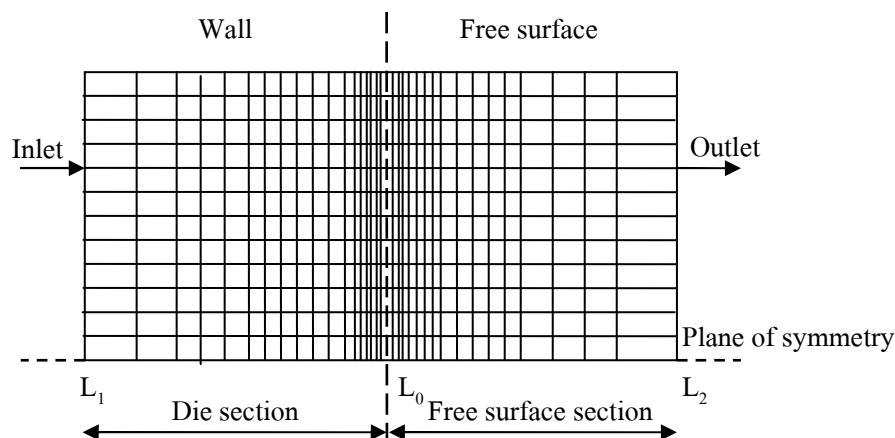
สามารถพิจารณาขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

- ทำการพิจารณาสมการที่เกี่ยวข้อง ซึ่งเป็นส่วนของสมการเริ่มต้น ได้แก่ สมการความต่อเนื่อง (equation of continuity) สมการการเคลื่อนที่ (equation of motion) สมการพลังงาน (equation of energy)
- พิจารณาสภาวะขอบ ที่ใช้สำหรับการไหลของพอลิเมอร์หลอมในกระบวนการอัดรีด
- ตั้งสมมติฐานต่างๆ ที่จะใช้สำหรับลดรูปตัวแปรของสมการการไหลของพอลิเมอร์หลอมในกระบวนการอัดรีด ทำให้สมการที่ได้สามารถนำมาใช้งานง่ายอีกทั้งมีความซับซ้อนน้อยลง
- วิเคราะห์การไหลของพอลิเมอร์หลอมผ่านคาย ซึ่งเป็นส่วนที่ทำการแก้สมการการไหลภายในคาย และทำการวิเคราะห์การไหลภายนอกคายซึ่งเกิดการบวมพองเกิดขึ้น โดยนำโปรแกรม POLYFLOW (3.11.0) มาประยุกต์ใช้เพื่อแก้สมการการไหลภายนอกคาย อีกทั้งสามารถนำมาใช้คำนวณหาลักษณะของการไหลต่างๆ ได้

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง จากกระบวนการอัดรีด ได้มีการนำโปรแกรม POLYFLOW (3.11.0) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา โดยที่การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้โปรแกรมทั้งหมด 3 ชุดประกอบกัน คือ โปรแกรม GAMBIT (2.4.0) สำหรับกำหนดรูปร่างของปัญหา โปรแกรม POLYFLOW (3.11.0) ใช้สำหรับแก้สมการการไหล และโปรแกรม CFX-Post (11.1) สำหรับแสดงผลลัพธ์ต่างๆ ที่ได้จากการแก้สมการการไหล ซึ่งในแต่ละโปรแกรมมีรายละเอียดดังนี้

โปรแกรม GAMBIT ใช้ในการกำหนดรูปร่างลักษณะของปัญหาที่เกิดขึ้น งานวิจัยนี้สนใจลักษณะรูปร่างของปัญหาเป็นแบบ 2 มิติ และแบ่งขอบเขตปัญหาของการไหลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนการไหลที่อยู่ภายในคาย และส่วนของการไหลที่อยู่ภายนอกคาย โดยแบ่งพื้นที่ภายในรูปออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย (mesh) และกำหนดชื่อให้กับด้านต่างๆ

แสดงดังภาพที่ 28 เพื่อนำไปใช้ในการกำหนดสภาวะขอบเขตการไหลให้กับปัญหาในโปรแกรม POLYDATA ต่อไป



ภาพที่ 28 ลักษณะทางกายภาพ

จากภาพที่ 28 แสดงรูปร่างลักษณะของปัญหาการไหลที่เกิดการบวมพองของพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นสูง โดยไฟล์ที่สร้างจากโปรแกรม GAMBIT จะมีไฟล์นามสกุลเป็น neutral file หรือ \*.neu และส่งต่อไปยังส่วนของ POLYDATA เพื่อวิเคราะห์ปัญหาการไหล และแปลงไฟล์นามสกุล จาก neutral file (\*.neu) ไปเป็นไฟล์นามสกุล mesh file (\*.msh)

โปรแกรม POLYFLOW ในงานวิจัยนี้แบ่งการทำงานของโปรแกรมออกเป็น 3 ส่วน คือ โปรแกรม POLYMAT โปรแกรม POLYDATA และโปรแกรม POLYFLOW โดยมีรายละเอียด ดังนี้

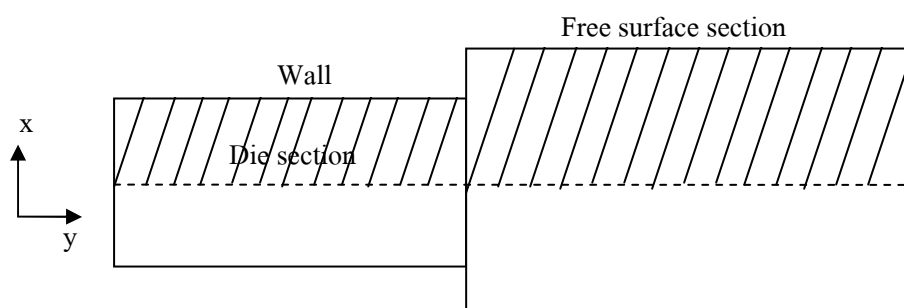
1. โปรแกรม POLYMAT ใช้สำหรับกำหนดคุณสมบัติของพอลิเมอร์ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ กำหนดค่าความหนาแน่น และสมการที่ใช้สำหรับอธิบายพฤติกรรมความเป็นนอนิวโตเนียนของ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลว คือ กฎสมการ Carreau-Yasuda โดยไฟล์ที่สร้างขึ้น มา จากโปรแกรม POLYMAT มีนามสกุลไฟล์เป็น material file หรือ \*.mat

2. โปรแกรม POLYDATA ใช้สำหรับนำเข้าไฟล์นามสกุล material file (\*.mat) ที่ กำหนดคุณสมบัติของพอลิเมอร์จาก โปรแกรม POLYDATA และสร้างไฟล์นามสกุล mesh file

(\* .msh) มาใช้สำหรับกำหนดลักษณะทางกายภาพหรือสมมติฐานที่ใช้พิจารณาระบบการไหล อีกทั้งยังใช้กำหนดสภาวะขอบเขตการไหล ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

## 2.1 การกำหนดลักษณะทางกายภาพ หรือสมมติฐาน ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

2.1.1 กำหนดลักษณะรูปร่างของปัญหา งานวิจัยนี้พิจารณารูปทรงของปัญหาเป็นแบบ 2 มิติ พิจารณาเพียงครึ่งรูปของปัญหาจริง (2D ½ planar geometry) ที่เกิดขึ้น โดยที่แบ่งรูปร่างของปัญหาเป็น 2 ส่วน และสมมาตรในแนวแกน y ทำให้ในการวิเคราะห์การไหลจะพิจารณาเพียงส่วนที่แรเงา ดังภาพที่ 29



ภาพที่ 29 รูปทรงของปัญหาการบวมพองของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงในกระบวนการอัดรีด

2.1.2 การกำหนดรูปแบบของปัญหาการไหล โดยพิจารณาการไหลเป็นแบบนอนนิวโตเนียน ระบบการไหลมีอุณหภูมิคงที่ทั้งส่วนภายในคานและส่วนภายนอกคาน ซึ่งสมการที่นำมาใช้อธิบายสมบัติการไหล คือ กฎสมการ Carreau-Yasuda โดยมีสมการอธิบายการไหลของของไหลแบบนอนนิวโตเนียนที่อุณหภูมิคงที่ประกอบด้วยสมการ โมเมนตัม และสมการความต่อเนื่องแบบของไหลไม่เกิดการอัดตัว โดยรูปแบบสมการที่ใช้ในโปรแกรม POLYFLOW มีลักษณะ ดังนี้

ก. สมการโมเมนตัม

$$\nabla P + \nabla \cdot T + f = \rho g \quad (37)$$

เมื่อ	$P$	คือ ความดัน (Pa)
	$T$	คือ extra stress tensor ( $\text{N/m}^2$ )
	$f$	คือ volumetric force
	$\rho$	คือ ความหนาแน่น ( $\text{g/cm}^3$ )
	$g$	คือ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก ( $\text{m/s}^2$ )

ข. สมการความต่อเนื่อง แบบไม่เกิดการอัดตัว และความหนาแน่นมีค่าคงที่ จะมีรูปแบบสมการ ดังสมการที่ 38

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (38)$$

เมื่อ	$v$	คือ ความเร็ว (m/s)
-------	-----	--------------------

กำหนดให้การไหลของของไหลแบบนิวโทเนียน มีค่าของ extra-stress tensor ตามรูปแบบสมการ ดังสมการที่ 39

$$T = 2\eta\Delta \quad (39)$$

เมื่อ	$T$	คือ ค่า extra-stress tensor ( $\text{N/m}^2$ )
	$\Delta$	คือ อัตราการผิดรูป
	$\eta$	คือ ค่าความหนืดซึ่งเป็นฟังก์ชันอยู่กับอุณหภูมิและค่าอัตราเฉือน ซึ่งค่าความหนืดมีความสัมพันธ์กับอัตราเฉือนอยู่ในรูป สมการที่ 40

$$\dot{\gamma} = \sqrt{2(\Delta^2)} \quad (40)$$

เมื่อ	$\dot{\gamma}$	คือ อัตราเฉือน ( $\text{s}^{-1}$ )
-------	----------------	------------------------------------

ในงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้กฎสมการ Carreau-Yasuda มาอธิบายสมบัติการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลว ซึ่งโปรแกรม POLYFLOW กำหนดให้รูปแบบของสมการ Carreau-Yasuda law ดังสมการที่ 41

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) \left[ 1 + (\lambda \dot{\gamma})^a \right]^{\frac{n-1}{a}} \quad (41)$$

เมื่อ	$\eta$	คือ ความหนืดของของไหล (Pa.s)
	$\eta_0$	คือ ความหนืด ณ อัตราเฉือนเป็นศูนย์ (Pa.s)
	$\eta_{\infty}$	คือ ความหนืด ณ อัตราเฉือน (Pa.s)
	$\lambda$	คือ ระยะเวลาในการคลายตัว (s)
	$\dot{\gamma}$	คือ อัตราเฉือน ( $s^{-1}$ )
	$a$	คือ ดัชนีการเปลี่ยนช่วงนิวโตเนียน-กฏสมการยกกำลัง
	$n$	คือ ดัชนีการยกกำลัง

2.1.3 พิจารณาการไหลของของไหลไม่เกิดการอัดตัว (incompressible fluid) ซึ่งเป็นการพิจารณาให้ระบบมีค่าความหนาแน่นคงที่ ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

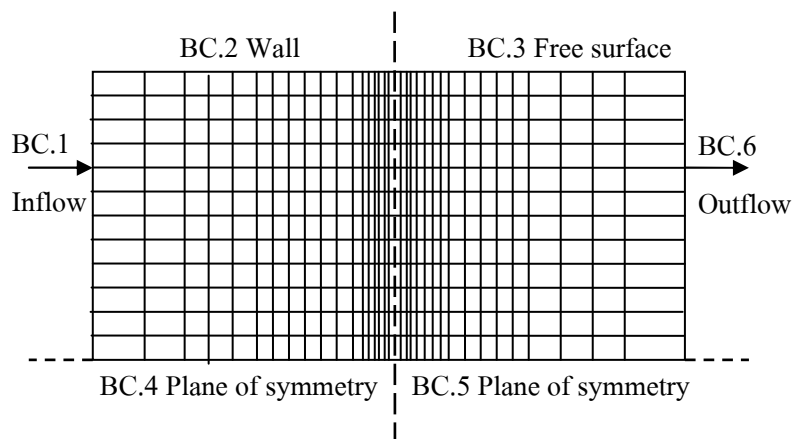
2.1.4 พิจารณาการไหลสมมาตรในแนวระนาบ (plane of symmetry) ทำให้ในการพิจารณาปัญหาการไหล ลดรูปการพิจารณาเหลือเพียงครึ่งรูปของรูปจริงได้ ดังภาพที่ 29

2.1.5 พิจารณาการไหลภายใต้สภาวะคงตัว (steady state) ไม่เป็นฟังก์ชันกับเวลา ส่งผลให้อนุพันธ์ต่างๆ ที่เทียบกับเวลามีค่าเป็นศูนย์ โดยพิจารณาว่าคุณสมบัติการไหลเป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง (x, y)

2.1.6 ไม่คิดผลจากแรงโน้มถ่วงของโลก พิจารณาการไหลในแนวนอน จึงทำให้สามารถตัดเทอมของแรงโน้มถ่วงของโลกออกจากสมการโมเมนตัมได้

2.2 การกำหนดสภาวะขอบของการไหล เพื่อใช้ในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย โดยที่สภาวะขอบของการไหลที่เลือกใช้ที่ตำแหน่งต่างๆ แสดงดังภาพที่ 30 ซึ่งมีรายละเอียดและความหมายของสภาวะขอบการไหล ดังนี้

2.2.1 ตำแหน่งที่ 1 บริเวณทางเข้าของคาน โดยเลือกสภาวะขอบการไหลเป็นแบบ Inflow และมีการกำหนดความเร็วการไหลเข้า แล้วนำไปคำนวณหาผลลัพธ์ในโปรแกรม POLYFLOW



ภาพที่ 30 สภาวะขอบการไหลของของไหลที่ใช้ในงานวิจัย

2.2.2 ตำแหน่งที่ 2 บริเวณผนังคาน กำหนดให้สภาวะขอบการไหลเป็นแบบ กำหนดความเร็วตั้งฉาก (normal velocity,  $v_n$ ) และความเร็วที่แนวสัมผัสพื้นผิว (tangential velocity,  $v_s$ ) โดยงานวิจัยนี้กำหนดให้ความเร็วที่ผนังมีค่าเป็นศูนย์ ทำให้ความเร็วตั้งฉากและความเร็วที่แนวสัมผัสพื้นผิวมีค่าเป็นศูนย์ แสดงดังสมการที่ 42

$$v_n = 0, v_s = 0 \quad (42)$$

2.2.3 ตำแหน่งที่ 3 บริเวณพื้นผิวอิสระ หรือที่บริเวณตำแหน่งทางออกของคาน ซึ่งเกิดการบวมพองของพอลิเมอร์หลอม โดยที่บริเวณพื้นผิวอิสระไม่มีขอบเขตที่แน่นอน ในโปรแกรม POLYFLOW ได้เลือกสภาวะขอบการไหลคำว่า free surface เพื่ออธิบายพฤติกรรม และแสดงดังสมการที่ 43

$$\vec{v} \cdot \vec{n} = 0 \quad (43)$$

2.2.4 ตำแหน่งที่ 4 และ 5 บริเวณกึ่งกลางความหนาตาย หรือเป็นบริเวณที่แบ่งรูปออกเป็นสองส่วนที่เท่ากันจากจุดกึ่งกลางตาย ซึ่งในโปรแกรม POLYFLOW ได้เลือกสถานะขอบการไหลคำว่า plane of symmetry ในงานวิจัยนี้พิจารณาเป็นแบบรูปสี่เหลี่ยม (rectangular) ส่งผลให้ค่าความเร็วตั้งฉาก ( $v_n$ ) และค่าแรงที่แนวสัมผัสพื้นผิว (tangential force,  $f_s$ ) มีค่าเป็นศูนย์ แสดงดังสมการที่ 44

$$v_n = 0, f_s = 0 \quad (44)$$

2.2.5 ตำแหน่งที่ 6 บริเวณจุดสุดท้ายของพื้นที่ผิวอิสระ (outflow) ซึ่งไม่มีการไหลต่อไปอีกจากจุดนี้ โดยกำหนดให้สถานะขอบการไหลแบบค่าแรงตั้งฉาก (normal force,  $f_n$ ) และค่าแรงที่แนวสัมผัสพื้นผิว ( $f_s$ ) มีค่าเป็นศูนย์ แสดงดังสมการที่ 45

$$f_n, f_s = 0 \quad (45)$$

หลังจากขั้นตอนการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้กับรูปปัญหาการไหลที่มีการบวมพองของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวแล้ว ให้ทำการบันทึกข้อมูลทั้งหมดในไฟล์นามสกุล data file (\*.dat) แล้วนำเข้าไปคำนวณในโปรแกรม POLYFLOW จากนั้นโปรแกรม POLYFLOW จะทำการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาค่าผลลัพธ์ และบันทึกผลลัพธ์ที่ได้ในรูปแบบไฟล์นามสกุล uns file (\*.uns)

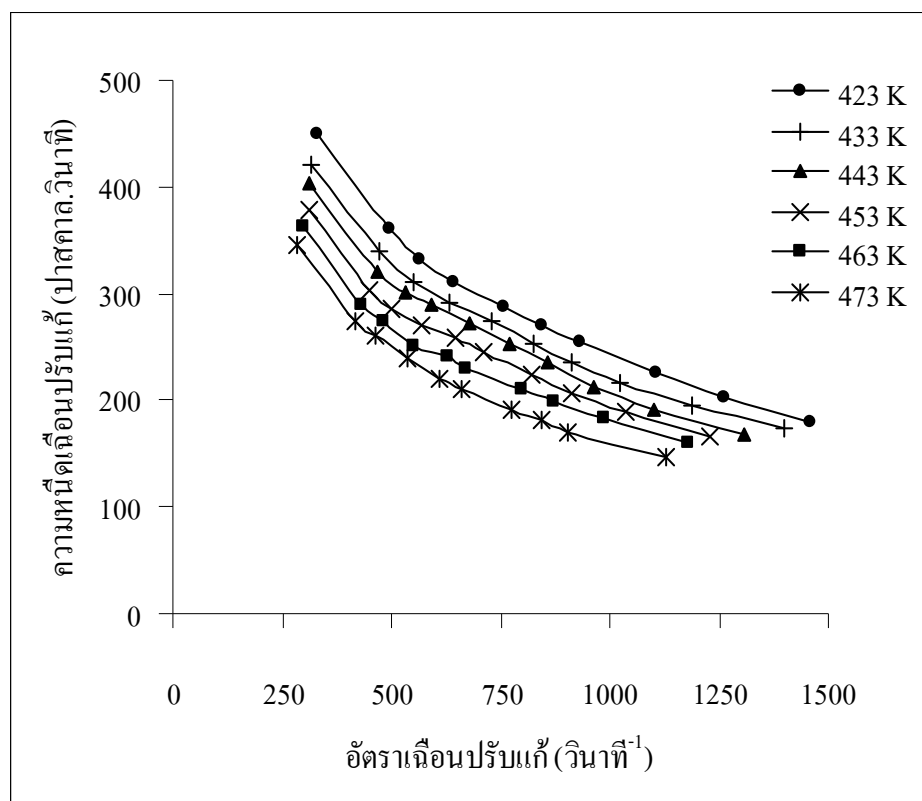
โปรแกรม CFX-Post ใช้สำหรับการแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยในโปรแกรม POLYFLOW โดยโปรแกรม CFX-Post นำเข้าไปไฟล์นามสกุล uns file (\*.uns) เพื่อเรียกผลลัพธ์ค่าต่างๆ เช่น ขนาดการบวมพอง ความเร็ว อัตราเฉือน ความเค้นเฉือน และความหนืด เป็นต้น

## ผลและวิจารณ์

เมื่อทำการทดลองวัดค่าสมบัติการไหล และวัดค่าอัตราการบวมพองของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง โดยใช้กระบวนการอัดรีด จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว แล้วนำผลของการบวมพองที่ได้มาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และใช้โปรแกรม POLYFLOW จากผลของการทดลองสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ (1) ส่วนของการทดลองวัดค่าสมบัติการไหล (2) ส่วนการทดลองหาค่าอัตราส่วนการบวมพองของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง โดยการใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวประกอบคานยูเรติกเพื่อหาค่าสมบัติการไหล และประกอบคานแผ่นเพื่อหาค่าอัตราส่วนการบวมพอง และ (3) ส่วนผลของการประยุกต์ใช้โปรแกรม POLYFLOW ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

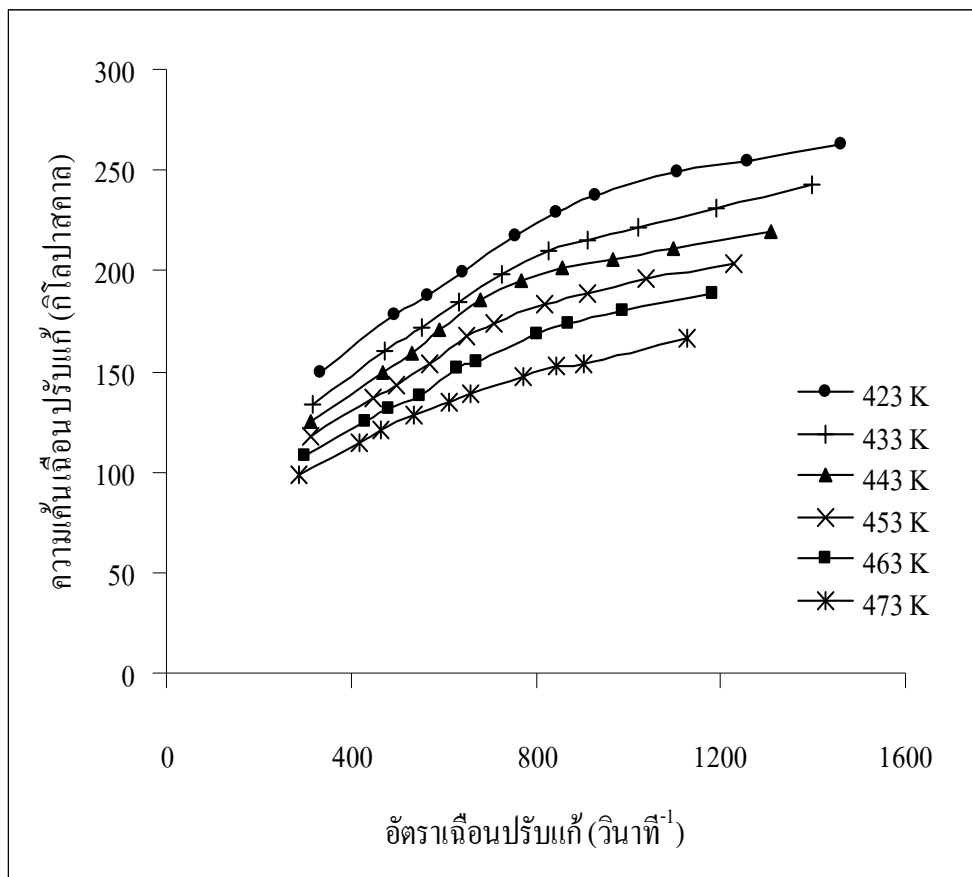
### ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหล

พิจารณาผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวประกอบคานยูเรติก ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 423 433 443 453 463 และ 473 เคลวิน โดยใช้ความเร็วรอบของสกรู 6-15 รอบต่อนาที และใช้ค่าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคานที่ใช้เป็น 10 20 และ 30 ซึ่งได้ผลการทดลองดังตารางภาคผนวกที่ ก1-ก18 และใช้โปรแกรม Polylab Polycab มาคำนวณ Bagley's correction โดยนำผลการทดลองที่ความยาวคาน 3 ค่า มาคำนวณค่าปรับแก้ให้เป็นผลลัพธ์จริงของแต่ละความยาวคาน จากนั้นนำผลลัพธ์จริงซึ่งเป็นค่าปรับแก้ที่ความเร็วรอบของสกรูเท่ากันและความยาวคานต่างกันมาหาค่าเฉลี่ยเป็นค่าเดียวสำหรับแต่ละความเร็วรอบของสกรู แสดงดังภาพที่ 31 และ 32 และแสดงดังตารางภาคผนวกที่ ก19-ก24



ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดเฉือนปรับแก้ที่อัตราเฉือนปรับแก้ต่างๆ ของ HDPE ที่อุณหภูมิ 423-473 เคลวิน

จากภาพที่ 31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดเฉือนปรับแก้กับค่าอัตราเฉือนปรับแก้ของ HDPE ที่อุณหภูมิ 423 433 443 453 463 และ 473 เคลวิน ตามลำดับ พิจารณา ณ อุณหภูมิคงที่ พบว่า ค่าความหนืดเฉือนมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มค่าอัตราเฉือน เนื่องจาก ค่าอัตราเฉือนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้แรงที่กระทำต่อสายโซ่โพลิเมอร์มากขึ้น ทำให้สายโซ่โพลิเมอร์เกิดการจัดเรียงตัวใหม่และเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานการไหลมีค่าลดลง นั่นคือค่าความหนืดเฉือนลดลง โดยเรียกพฤติกรรมการไหลเช่นนี้ของพอลิเมอร์หลอมว่า พฤติกรรมการกวนเหลว (shear thinning behavior) และเมื่อพิจารณา ณ อัตราเฉือนคงที่ พบว่า ค่าความหนืดเฉือนมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจาก อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่โพลิเมอร์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานการไหลของสายโซ่โพลิเมอร์มีค่าลดลง ทำให้ค่าความหนืดเฉือนมีค่าลดลง

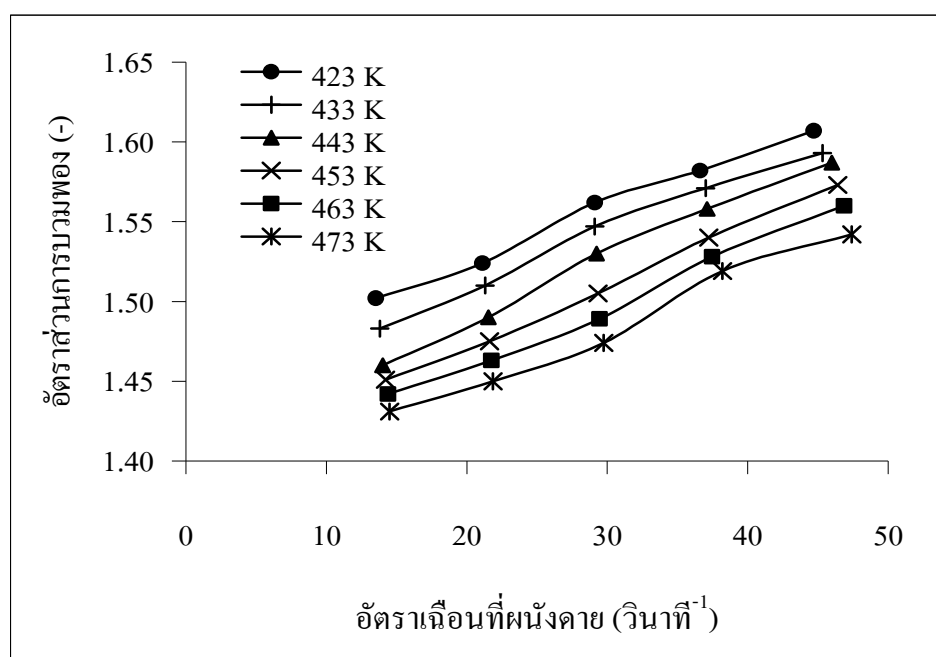


ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนปรับแก้ที่อัตราเฉือนปรับแก้ต่างๆ ของ HDPE ที่อุณหภูมิ 423-473 เคลวิน

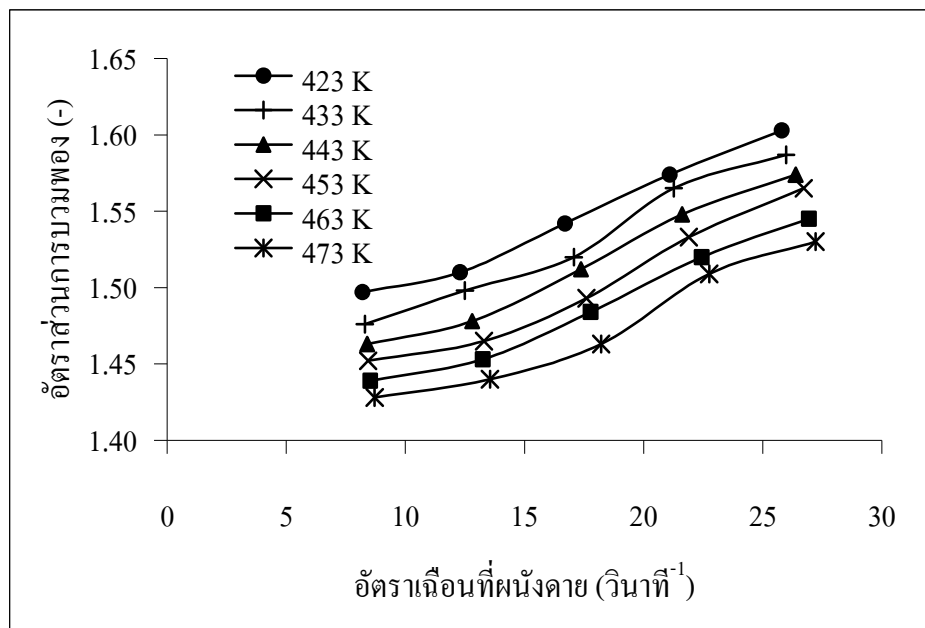
จากภาพที่ 32 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรับแก้กับอัตราเฉือนปรับแก้ที่อุณหภูมิ 423 433 443 453 463 และ 473 เคลวิน เมื่อพิจารณา ณ อุณหภูมิคงที่ พบว่า ความเค้นเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น เนื่องจาก อัตราเฉือนที่เพิ่มขึ้นทำให้มีแรงกระทำเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความเค้นเฉือนซึ่งแปรผันตรงกับแรงที่กระทำกับพื้นผิวพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณา ณ อัตราเฉือนคงที่ พบว่า ความเค้นเฉือนมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจาก อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนั้น ส่งผลให้สมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมดีขึ้น กล่าวคือ ความต้านทานการไหลของพอลิเมอร์หลอมลดลง และแรงเค้นเฉือนที่ผนังที่กระทำต่อพอลิเมอร์หลอมมีค่าลดลง

### ผลการทดลองวัดค่าอัตราส่วนการบวมของผลผลิตอัดรีดแผ่นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

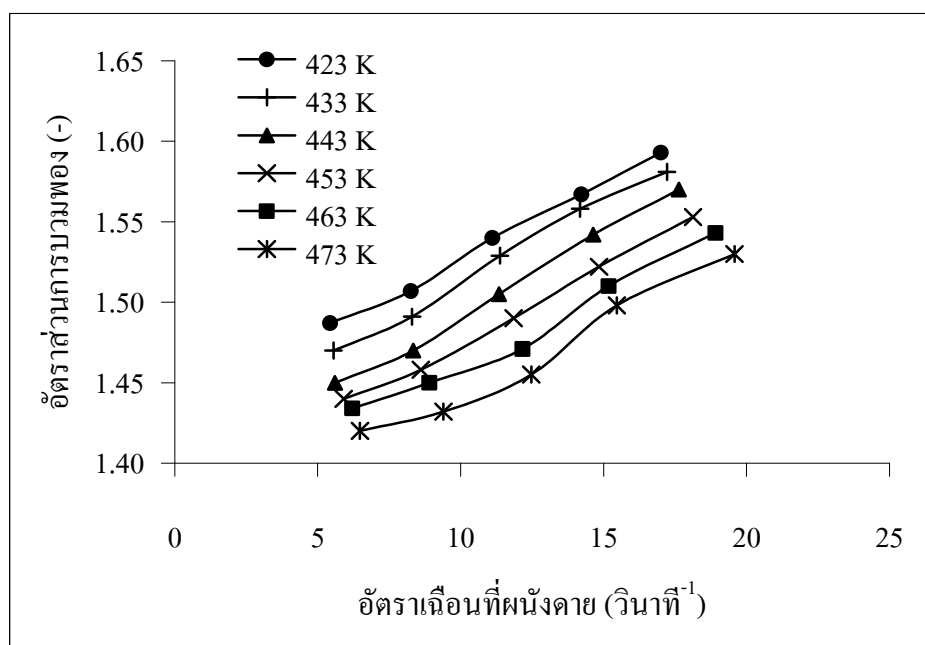
จากการวัดค่าอัตราส่วนการบวมของผลผลิตอัดรีดแผ่นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวประกอบคายแผ่น ณ อุณหภูมิ 423 433 443 453 463 และ 473 เคลวิน ตามลำดับ ใช้ความเร็วรอบของสกรู 6-10 รอบต่อนาที ซึ่งแปลงเป็นอัตราเฉือนที่ผนังคาย (ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของสกรูกับอัตราเฉือนที่ผนังคาย แสดงตัวอย่างวิธีคำนวณดังภาคผนวก ค) และความหนาของคายแผ่นเป็น 0.6 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร ใช้กล้องถ่ายภาพรูปถ่ายภาพแสดงการบวมของแผ่นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง จากนั้นใช้โปรแกรม SemAfore 4 วัดค่าความหนาของแผ่นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ซึ่งผ่านกระบวนการอัดรีดในขณะร้อน แล้วนำมาคำนวณหาอัตราส่วนการบวมของแผ่นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ตามวิธีคำนวณดังภาคผนวก ค ผลการคำนวณดังตารางภาคผนวกที่ ข1-ข6 และแสดงดังภาพที่ 33 34 35 และ 36 ตามลำดับ



ภาพที่ 33 อัตราส่วนการบวมของ HDPE หลอม จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ประกอบคายแผ่นหนา 0.6 มิลลิเมตร ณ อัตราเฉือนที่ผนังคายต่างๆ อุณหภูมิ 423-473 เคลวิน

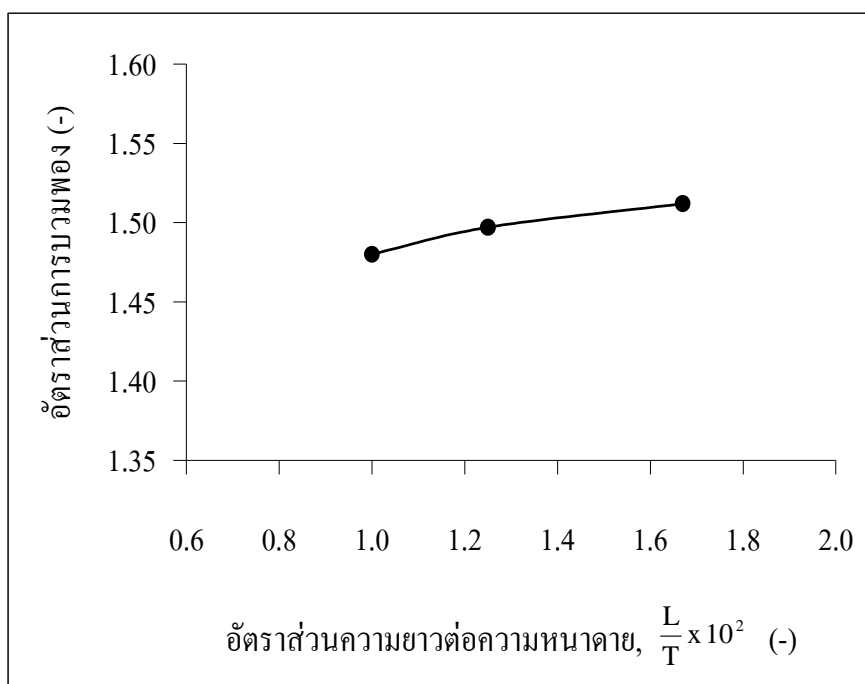


ภาพที่ 34 อัตราส่วนการบวมพองของ HDPE หลอม จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ประกอบ คายแผ่นหนา 0.8 มิลลิเมตร ณ อัตราเนื้อที่ผนังคายต่างๆ อุณหภูมิ 423-473 เคลวิน



ภาพที่ 35 อัตราส่วนการบวมพองของ HDPE หลอม จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ประกอบ คายแผ่นหนา 1.0 มิลลิเมตร ณ อัตราเนื้อที่ผนังคายต่างๆ อุณหภูมิ 423-473 เคลวิน

ภาพที่ 33 34 และ 35 เมื่อพิจารณา ณ อุณหภูมิคงที่ พบว่า เมื่ออัตราเฉือนที่ผนังคายเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนการบวมพองมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก เมื่อเพิ่มความเร็วรอบของสกรู ส่งผลให้อัตราเฉือนที่ผนังคายเพิ่มขึ้น พอลิเมอร์จะถูกกระทำด้วยแรงเพิ่มขึ้น ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ได้รับพลังงานการผิดรูปเฉือน (shear deformation energy) เพิ่มขึ้น และประกอบกับความเร็วที่เพิ่มขึ้นทำให้พอลิเมอร์หลอมมีระยะเวลาในการคลายตัวของความเค้น (stress relaxation) ลดลง ส่งผลให้อัตราส่วนการบวมพองของพอลิเมอร์หลอมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ เมื่อพิจารณา ณ อัตราเฉือนที่ผนังคายคงที่ พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนการบวมพองมีค่าลดลง เนื่องจาก การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลเพิ่มขึ้น และสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมจะดีขึ้น ทำให้ต้องการระยะเวลาในการคลายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นภายในคายลดลง นำไปสู่การลดลงของความเครียดเฉือนนำกลับได้ (recoverable shear strain) ของพอลิเมอร์หลอมเมื่อไหลออกจากคาย ส่งผลให้อัตราส่วนการบวมพองลดลง



ภาพที่ 36 อัตราส่วนการบวมพองของ HDPE หลอม จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ณ อัตราส่วนความยาวต่อความหนาตายต่างๆ ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน และใช้ความเร็วรอบของสกรูคงที่ 6 รอบต่อนาที

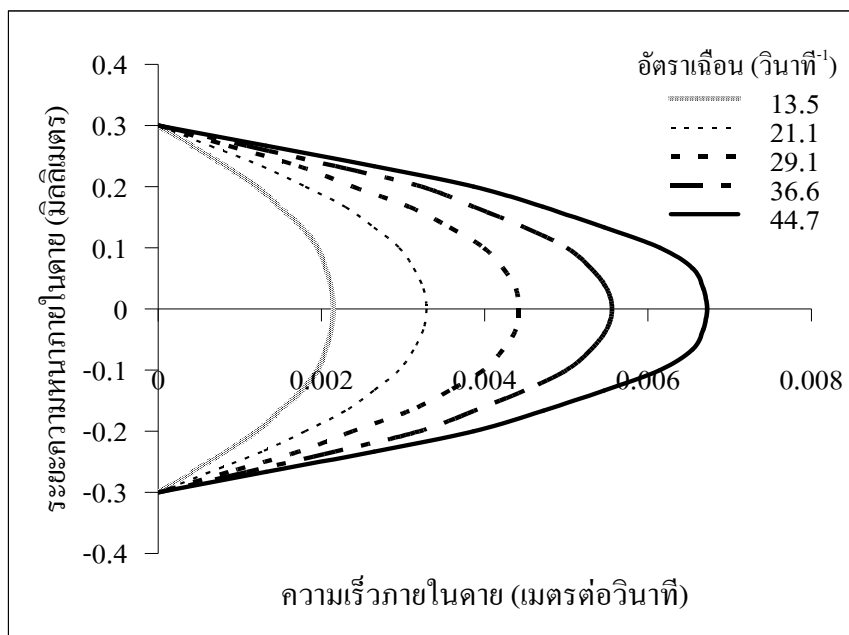
ภาพที่ 36 พบว่า เมื่อพิจารณา ณ อุณหภูมิและความเร็วรอบของสกรูคงที่ พบว่า อัตราส่วนการบวมพองมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนความยาวต่อความหนาตายเพิ่มขึ้น เนื่องจาก การใช้ตายที่มีความหนาตายเล็กลง ความเร็วของพอลิเมอร์หลอมจะเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้พอลิเมอร์หลอมมีระยะเวลาภายในตายในการคลายตัวของความเค้นลดลง และพอลิเมอร์หลอมมีระยะเวลาการไหลภายในตายลดลง ส่งผลทำให้อัตราส่วนการบวมพองของพอลิเมอร์หลอมเพิ่มขึ้น

### ผลการประยุกต์ใช้โปรแกรม POLYFLOW (3.11.0)

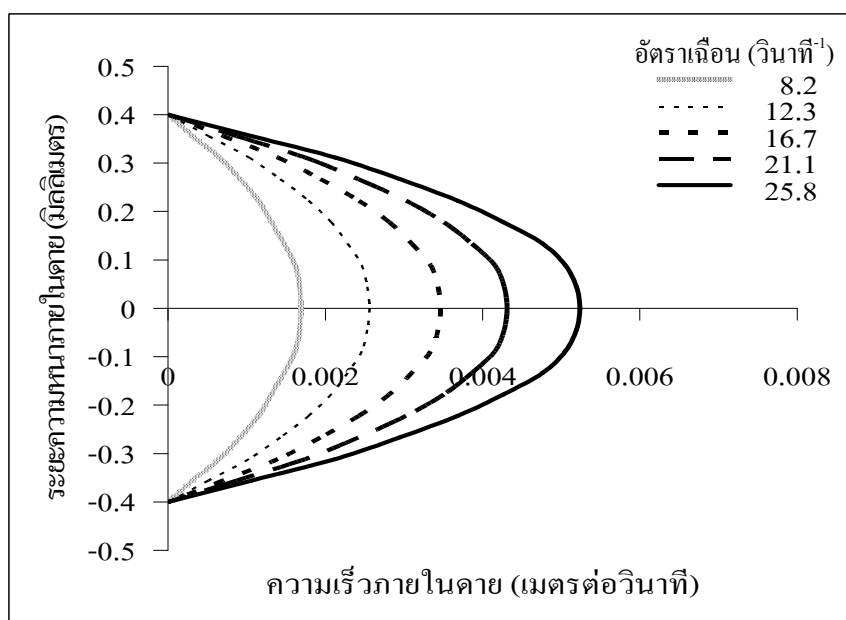
ผลจากการประยุกต์ใช้โปรแกรม POLYFLOW มาสร้างสมการการไหลและแก้สมการการไหลที่สร้างขึ้นตามลักษณะของปัญหาจริงที่เกิดขึ้นในกระบวนการอัดรีด โดยมีคุณสมบัติการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และสภาวะขอบของการไหล มาช่วยสำหรับการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยด้วยวิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์ ซึ่งได้ผลดังนี้

#### 1. แบบจำลองรูปแบบการไหลภายในตายแผ่น

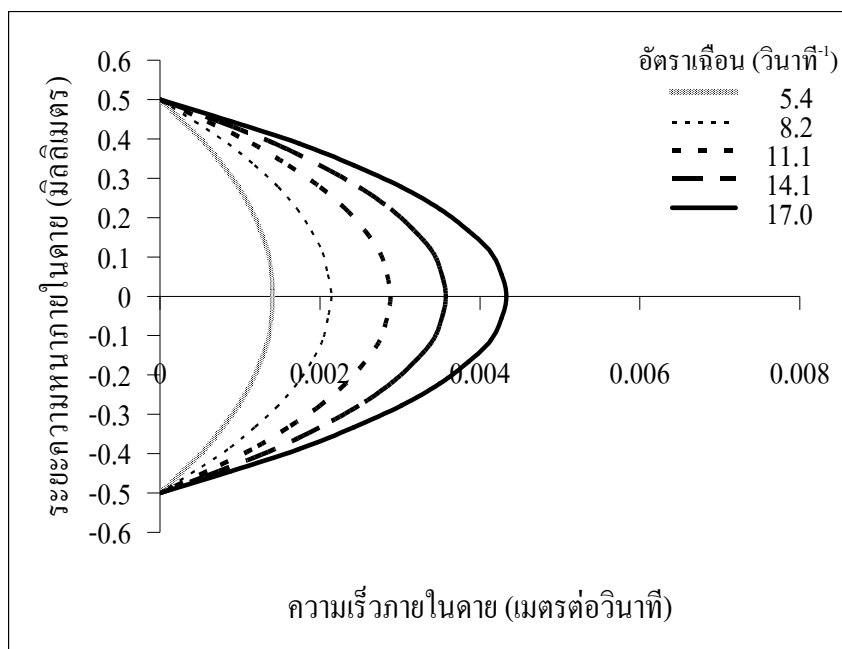
จากการแก้สมการการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลว โดยใช้โปรแกรม POLYFLOW มาสร้างแบบจำลองของปัญหา ทำให้ได้รูปแบบความเร็วการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวภายในตาย ณ อุณหภูมิ 423 433 443 453 463 และ 473 เคลวิน ที่ความหนาตายแผ่นต่างๆ เป็น 0.6 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 37 38 39 40 41 และ 42 ตามลำดับ



ภาพที่ 37 รูปแบบความเร็วการไหลภายในคายนของ HDPE จากแบบจำลอง ณ อัตราเฉือนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน และความหนาคายนแผ่น 0.6 มิลลิเมตร

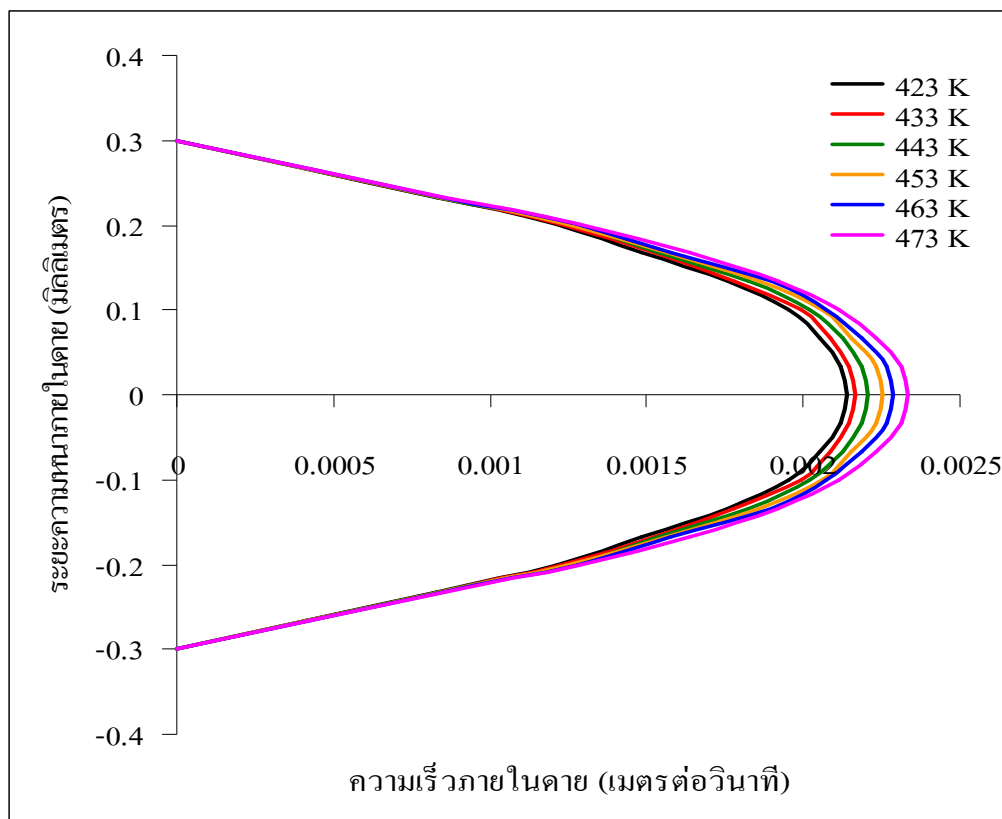


ภาพที่ 38 รูปแบบความเร็วการไหลภายในคายนของ HDPE จากแบบจำลอง ณ อัตราเฉือนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน และความหนาคายนแผ่น 0.8 มิลลิเมตร

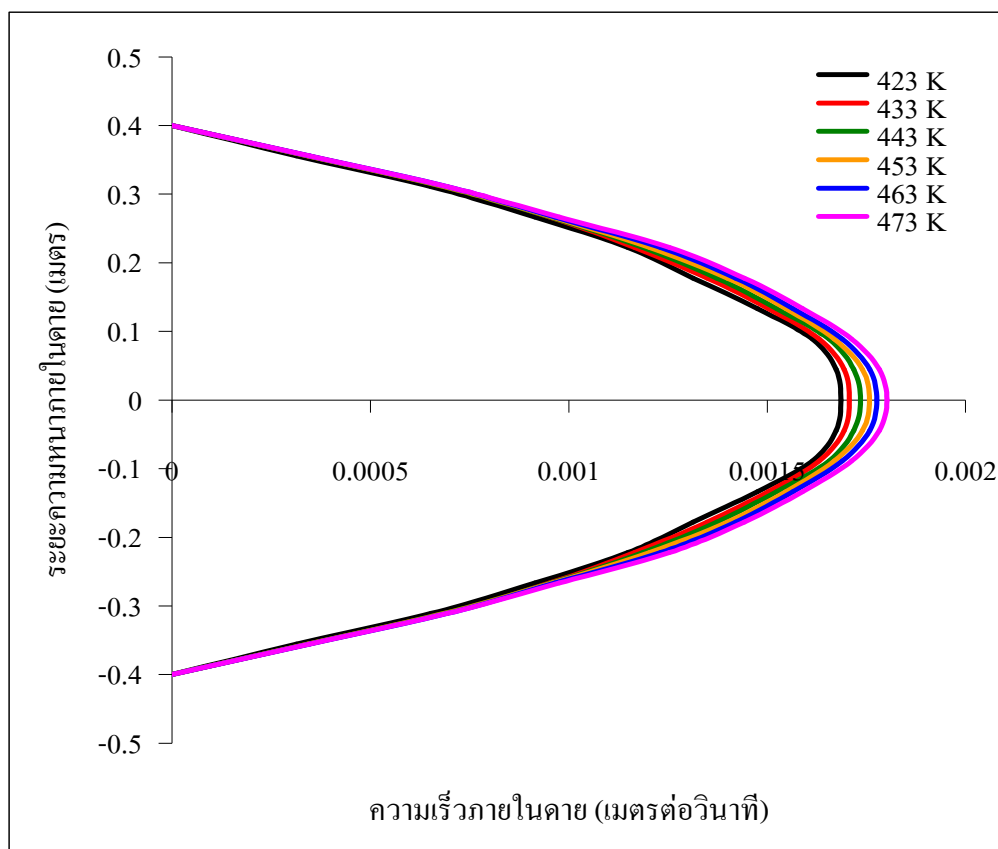


ภาพที่ 39 รูปแบบความเร็วการไหลภายในคายของ HDPE จากแบบจำลอง ณ อัตราเงื่อนไขต่างๆ ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน และความหนาตายแผ่น 1.0 มิลลิเมตร

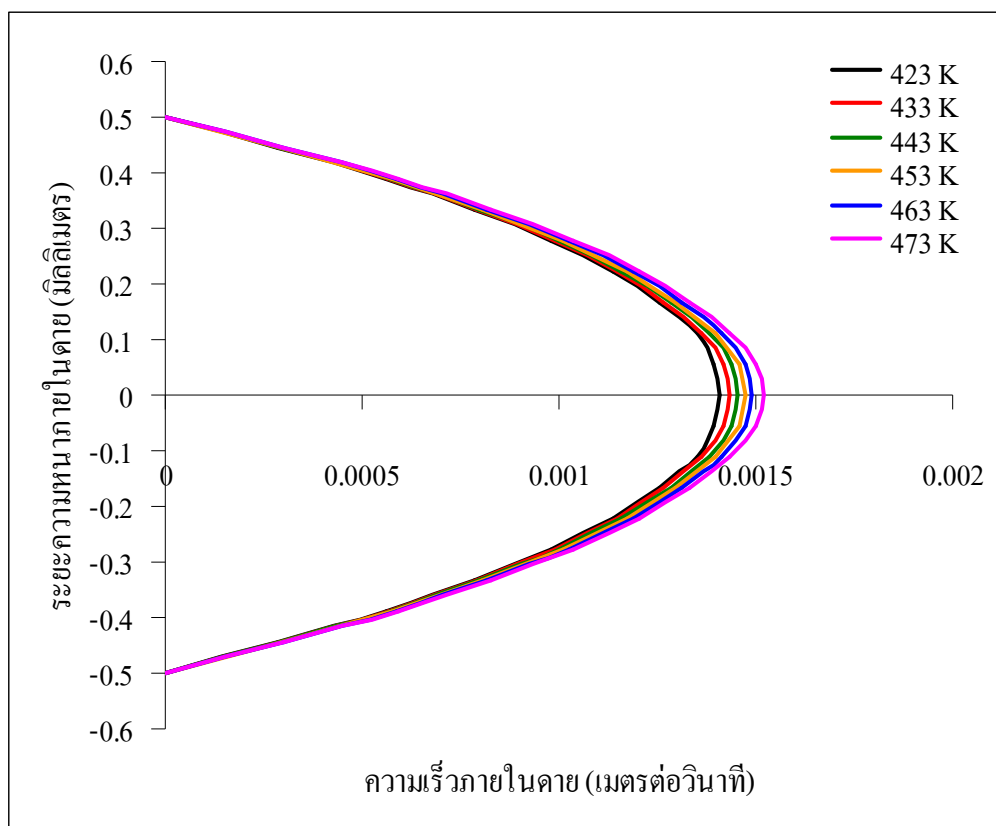
ภาพที่ 37 38 และ 39 แสดงรูปแบบความเร็วการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง หลอมเหลว ณ อุณหภูมิคงที่ 423 เคลวิน ที่ความหนาตายแผ่นต่างๆ เป็น 0.6 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิคงที่ พบว่า เมื่ออัตราเงื่อนไขที่ผนังคายเพิ่มขึ้น ค่าความเร็วการไหลภายในคาย มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก อัตราเงื่อนไขที่ผนังคายที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีแรงมากระทำต่อสายโซ่พอลิเมอร์สูงขึ้น และพอลิเมอร์หลอมไหลตัวได้มากขึ้น ซึ่งแรงที่มากระทำเป็นสัดส่วนที่มากกว่าแรงที่ต่อต้านการไหล ทำให้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวมีการเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ความเร็วการไหล จึงมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ลักษณะของรูปแบบความเร็วการไหลภายในคาย มีลักษณะเป็นเส้นโค้งคล้าย พาราโบลา ซึ่งบริเวณกึ่งกลางคายจะมีความเร็วของการไหลมากที่สุด และความเร็วการไหลค่อยๆ ลดลง เมื่อเข้าไปใกล้ผนังคาย



ภาพที่ 40 รูปแบบความเร็วการไหลภายในคายของ HDPE จากแบบจำลอง ณ อุณหภูมิต่างๆ (423-473 เคลวิน) ที่ความหนาตายแผ่น 0.6 มิลลิเมตร และความเร็วรอบของสกรูคงที่เท่ากับ 6 รอบต่อนาที (อัตราเฉือนที่ผนังคายเป็น  $13.51-14.50$  วินาที<sup>-1</sup>)



ภาพที่ 41 รูปแบบความเร็วการไหลภายในคายของ HDPE จากแบบจำลอง ณ อุณหภูมิต่างๆ (423-473 เคลวิน) ที่ความหนาตายแผ่น 0.8 มิลลิเมตร และความเร็วรอบของสกรูคงที่เท่ากับ 6 รอบต่อนาที (อัตราเฉือนที่ผนังคายเป็น  $8.20-8.71 \text{ วินาที}^{-1}$ )



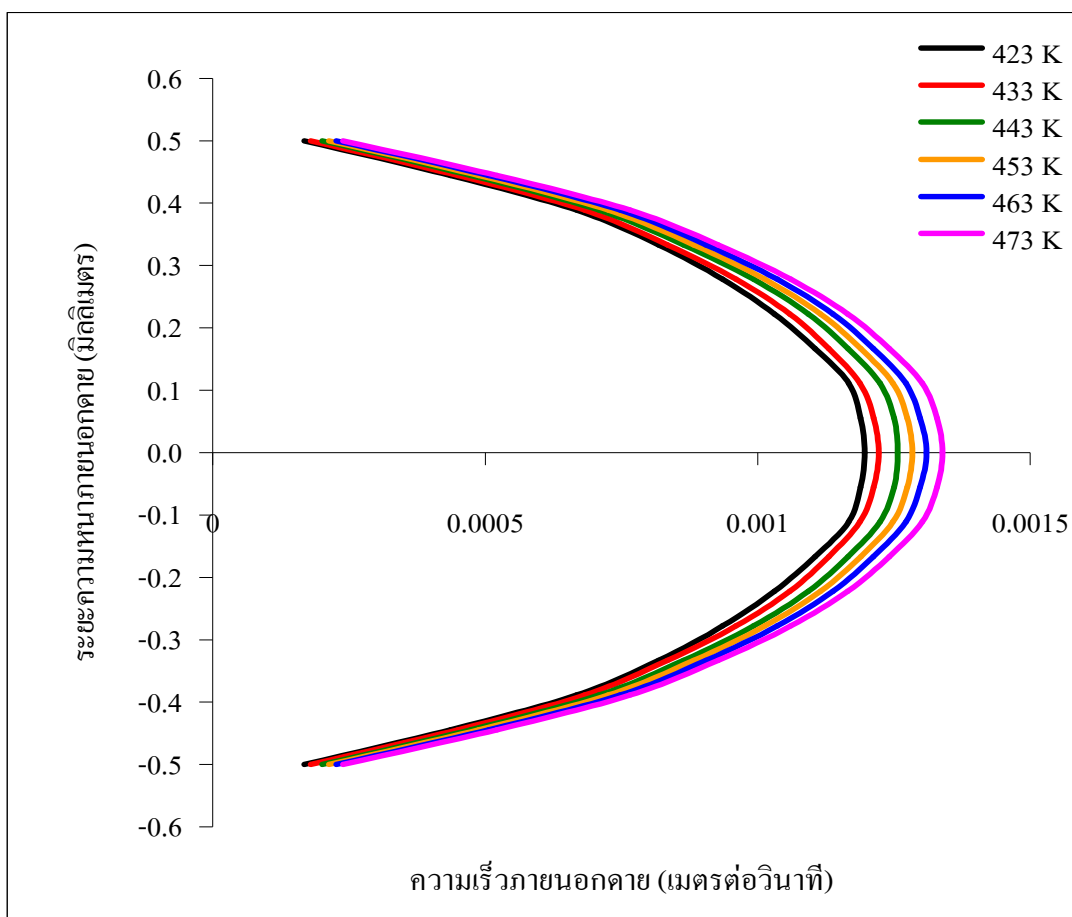
ภาพที่ 42 รูปแบบความเร็วการไหลภายในตายของ HDPE จากแบบจำลอง ณ อุณหภูมิต่างๆ (423-473 เคลวิน) ที่ความหนาตายแผ่น 1.0 มิลลิเมตร และความเร็วรอบของสกรูคงที่เท่ากับ 6 รอบต่อนาที (อัตราเฉือนที่ผนังตาย 5.86-6.47 วินาที<sup>-1</sup>)

ภาพที่ 40 41 และ 42 แสดงรูปแบบความเร็วการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง หลอมเหลว ที่อุณหภูมิต่างๆ เป็น 423 433 443 453 463 และ 473 เคลวิน โดยใช้ความหนาตายแผ่น 0.6 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร พบว่า ลักษณะของรูปแบบความเร็วการไหลภายในตาย มีลักษณะเป็นเส้นโค้งคล้ายพาราโบลา โดยบริเวณกึ่งกลางตายจะมีค่าความเร็วของการไหลมากที่สุด ซึ่งความเร็วการไหลค่อยๆ ลดลง เมื่อเข้าใกล้บริเวณผนังตาย และมีค่าความเร็วเป็นศูนย์ที่ผนังตาย เนื่องจากกำหนดให้สภาวะขอบเขตการไหลไม่มีการลื่นไหล (no slip) ที่ผนัง เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อความเร็วการไหล พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความเร็วการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวจะเพิ่มขึ้น เนื่องจาก เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวหลอมตัวได้ดีขึ้น ส่งผลต่อความต้านทานการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวเนื่องจากความหนืดมีค่าลดลง ทำให้ความเร็วของการไหลมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิ

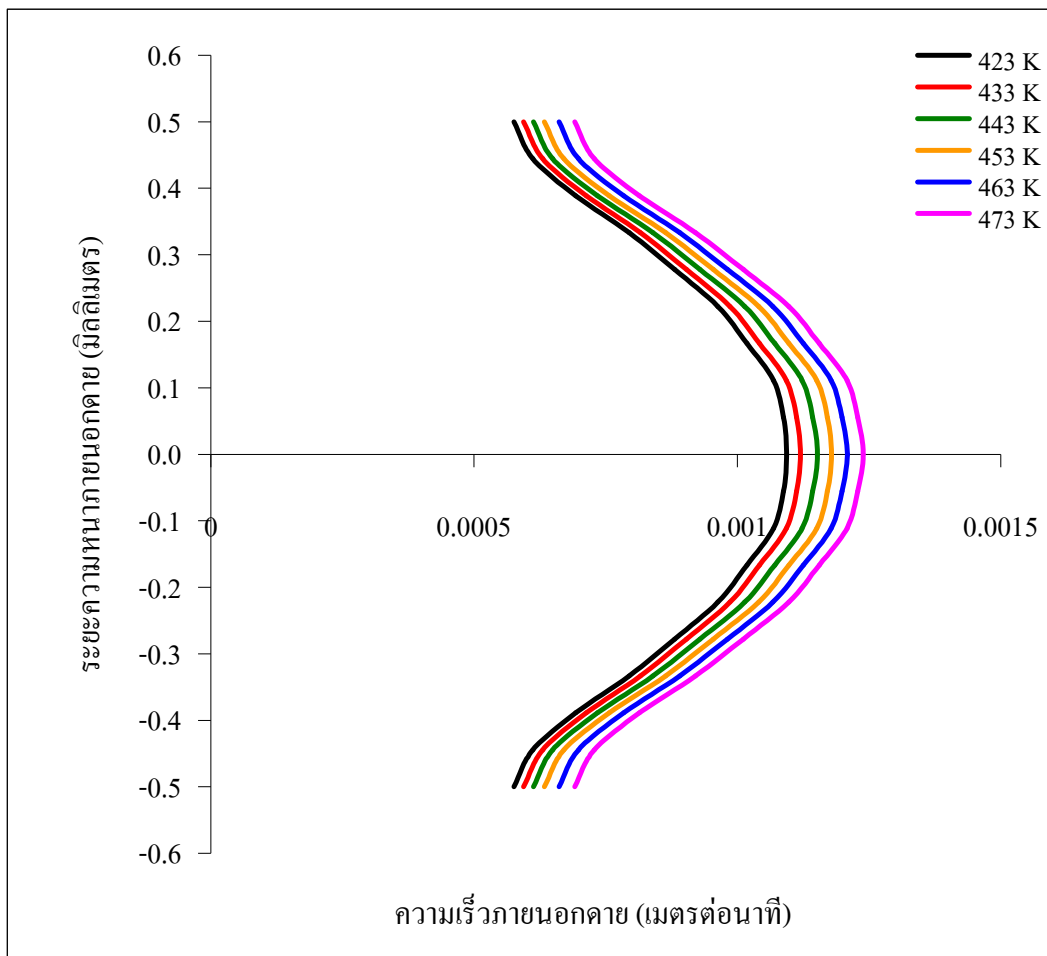
เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ ณ อุณหภูมิและความเร็วรอบของสกรูคงที่ เมื่อปรับเปลี่ยนความหนาของคายนกแผ่นจะทำให้ความเร็วในการไหลเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาของคายนกแผ่นลดลง

## 2. แบบจำลองรูปแบบการไหลภายนอกคายนกแผ่น

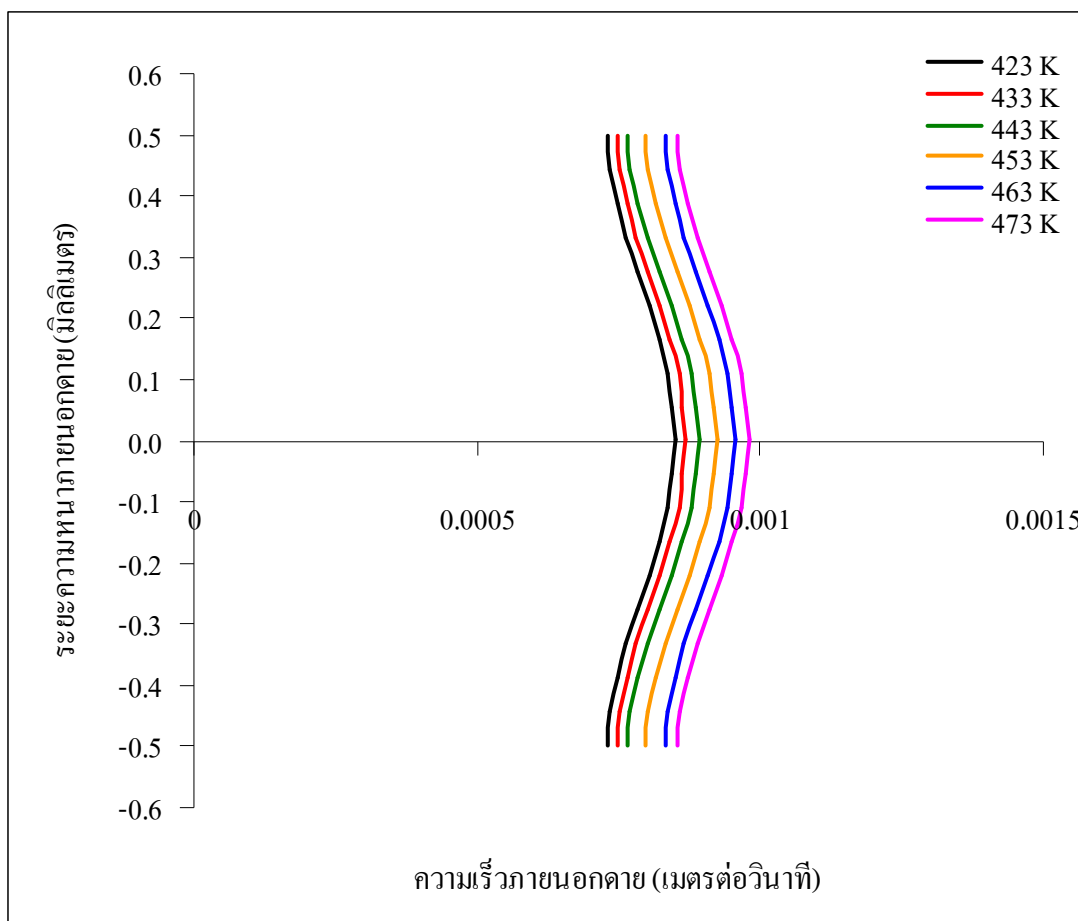
จากการแก้สมการการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลว โดยใช้โปรแกรม POLYFLOW มาสร้างแบบจำลองของปัญหา ทำให้ได้รูปแบบความเร็วการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวภายนอกคายนก ณ อุณหภูมิ 423 433 443 453 463 และ 473 เคลวิน ที่ความหนาคายนกแผ่น 1.0 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 43 44 และ 45 ตามลำดับ



ภาพที่ 43 รูปแบบความเร็วการไหลภายนอกคายนกของ HDPE จากแบบจำลอง ที่ระยะห่างจากคายนก 0.3 มิลลิเมตร ณ อุณหภูมิต่างๆ (423-473 เคลวิน) ที่ความหนาคายนกแผ่น 1.0 มิลลิเมตร และความเร็วรอบของสกรูคงที่ 6 รอบต่อนาที



ภาพที่ 44 รูปแบบความเร็วการไหลภายนอกดาของ HDPE จากแบบจำลอง ที่ระยะห่างจากดา 1.5 มิลลิเมตร ณ อุณหภูมิต่างๆ (423-473 เคลวิน) ที่ความหนาดาแผ่น 1.0 มิลลิเมตร และความเร็วรอบของสกรูคงที่ 6 รอบต่อนาที



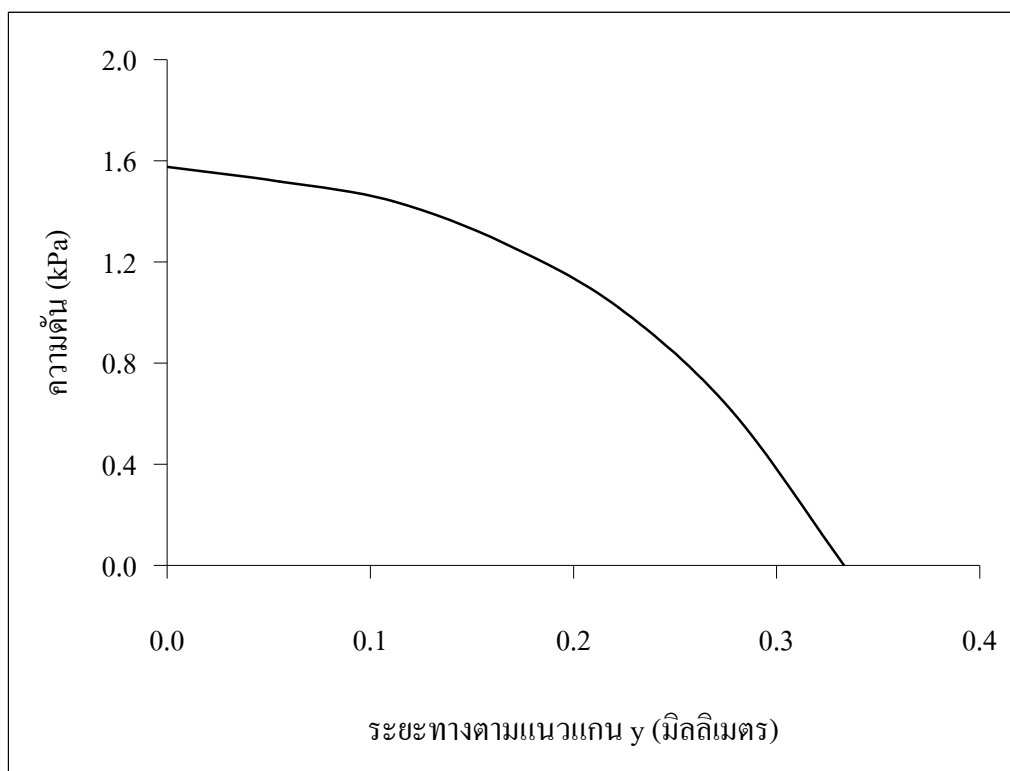
ภาพที่ 45 รูปแบบความเร็วการไหลภายนอกคายของ HDPE จากแบบจำลอง ที่ระยะห่างจากคาย 5.0 มิลลิเมตร ณ อุณหภูมิต่างๆ (423-473 เคลวิน) ที่ความหนาตายแผ่น 1.0 มิลลิเมตร และความเร็วรอบของสกรูคงที่ 6 รอบต่อนาที

ภาพที่ 43 44 และ 45 แสดงรูปแบบความเร็วการไหลภายนอกคายของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลว ที่อุณหภูมิต่างๆ เป็น 423 433 443 453 463 และ 473 เคลวิน โดยใช้ความหนาตายแผ่น 1.0 มิลลิเมตร พบว่า รูปแบบความเร็วการไหลภายนอกคายที่ระยะห่างจากคาย 0.3 มิลลิเมตร มีความเร็วสูงสุดที่บริเวณจุดกึ่งกลางคาย และความเร็วการไหลค่อยๆ ลดลง เมื่อเข้าใกล้ผนังคาย แต่เมื่อเพิ่มระยะห่างจากคายมากขึ้นเป็น 1.5 และ 5.0 มิลลิเมตร ตามลำดับ พบว่า ความเร็วที่บริเวณจุดกึ่งกลางคายมีลักษณะค่อยๆ ลดลง เกือบเท่ากับความเร็วในแนวแกนตลอดรัศมี คือ จะมีลักษณะเป็นแบบปลັก และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อความเร็วการไหลภายนอกคาย พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ความเร็วการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวจะเพิ่มขึ้น เนื่องจาก เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวจะหลอมตัว

ได้ดีขึ้น ส่งผลต่อความต้านทานการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวเนื่องมาจากความหนืดมีค่าลดลง ทำให้ความเร็วการไหลมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

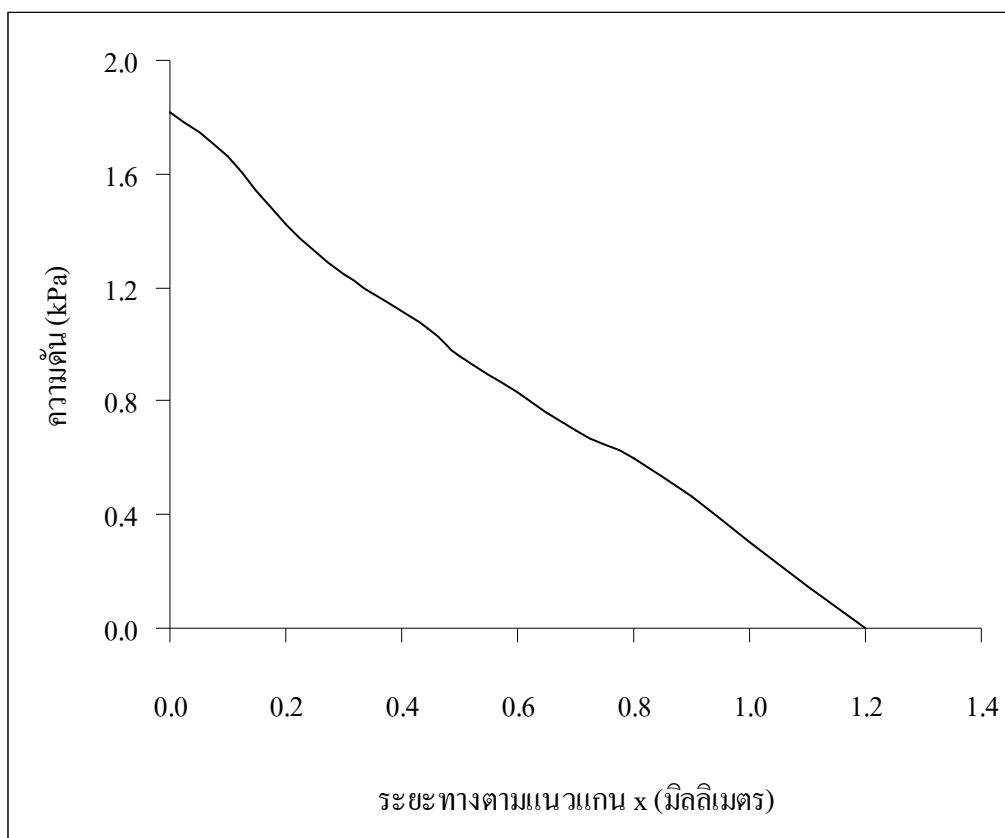
### 3. แบบจำลองค่าความดันภายนอกตาย

จากการแก้สมการการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลว โดยใช้โปรแกรม POLYFLOW มาสร้างแบบจำลองของปัญหา ทำให้ได้ค่าความดันภายนอกตาย ณ อุณหภูมิ 423 ที่ความหนาตายแผ่น 1.0 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 46 และ 47



**ภาพที่ 46** ค่าความดันภายนอกตายของ HDPE จากแบบจำลอง ตามระยะทางตามแนวแกน y ที่ระยะห่างจากตาย 0.3 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน ณ ความหนาตายแผ่น 1.0 มิลลิเมตร และความเร็วรอบของสกรูคงที่ 6 รอบต่อนาที

จากภาพที่ 46 แสดงค่าความดันของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลว ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน โดยใช้ความหนาตายแผ่น 1.0 มิลลิเมตร พบว่า ที่ระยะห่างจากตาย 0.3 มิลลิเมตร ความดันภายนอกตายค่อยๆ ลดลง เมื่อระยะทางตามแนวแกน y มากขึ้น

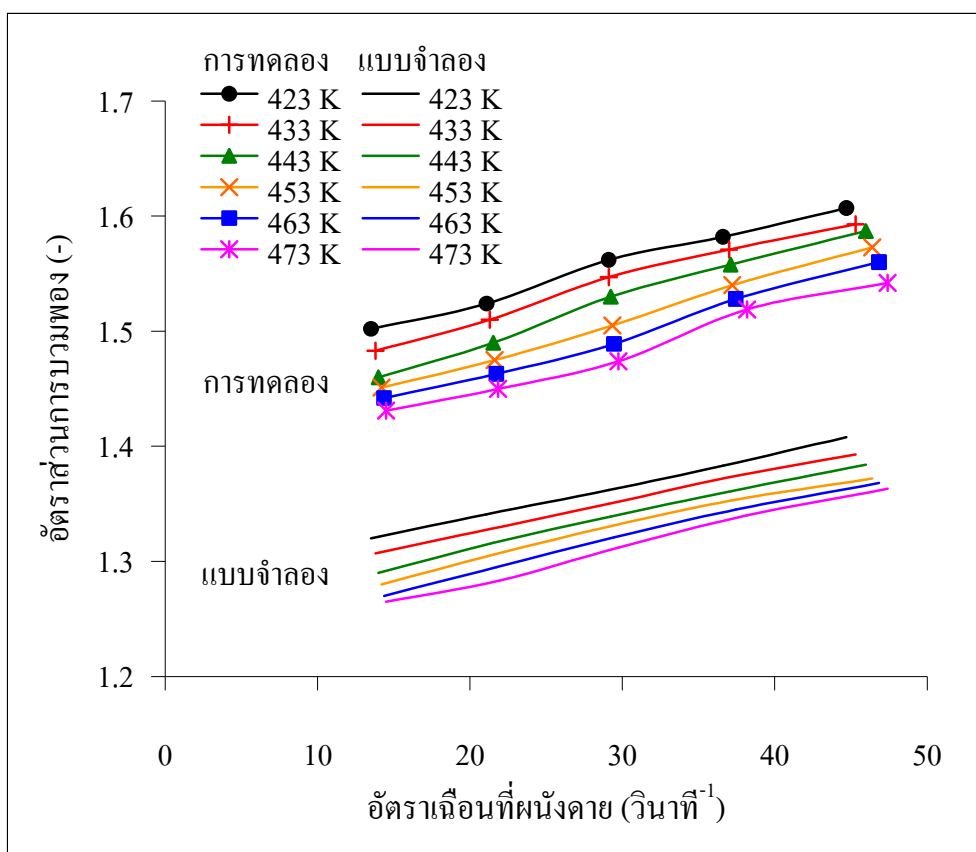


ภาพที่ 47 ค่าความดันภายนอกตายของ HDPE จากแบบจำลอง ที่ระยะทางตามแนวแกน x ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน ณ ความหนาตายแผ่น 1.0 มิลลิเมตร ความเร็วรอบของสกรูคงที่ 6 รอบต่อนาที ที่ตำแหน่งกึ่งกลางตาย

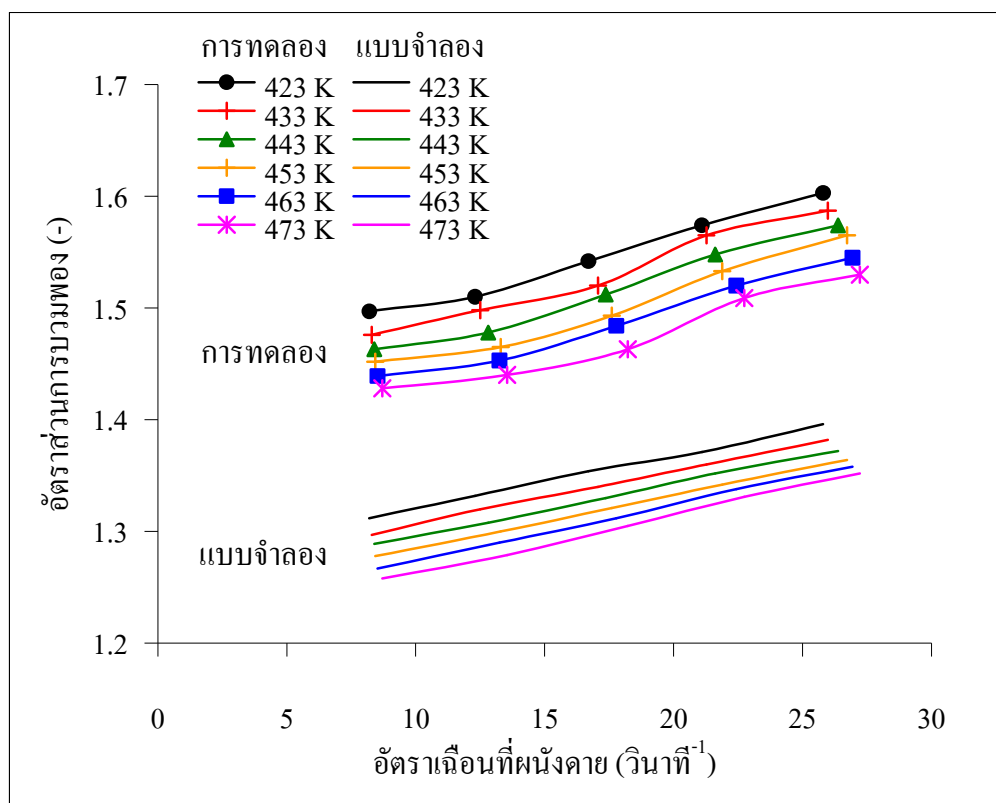
จากภาพที่ 47 แสดงค่าความดันของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลว ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน โดยใช้ความหนาตายแผ่น 1.0 มิลลิเมตร พบว่า ที่ระยะทางตามแนวแกน x ค่าความดันภายนอกตายค่อยๆ ลดลง เมื่อระยะห่างจากตายเพิ่มมากขึ้น

#### 4. การบวมพองของผลผลิตอัดรีดแผ่นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

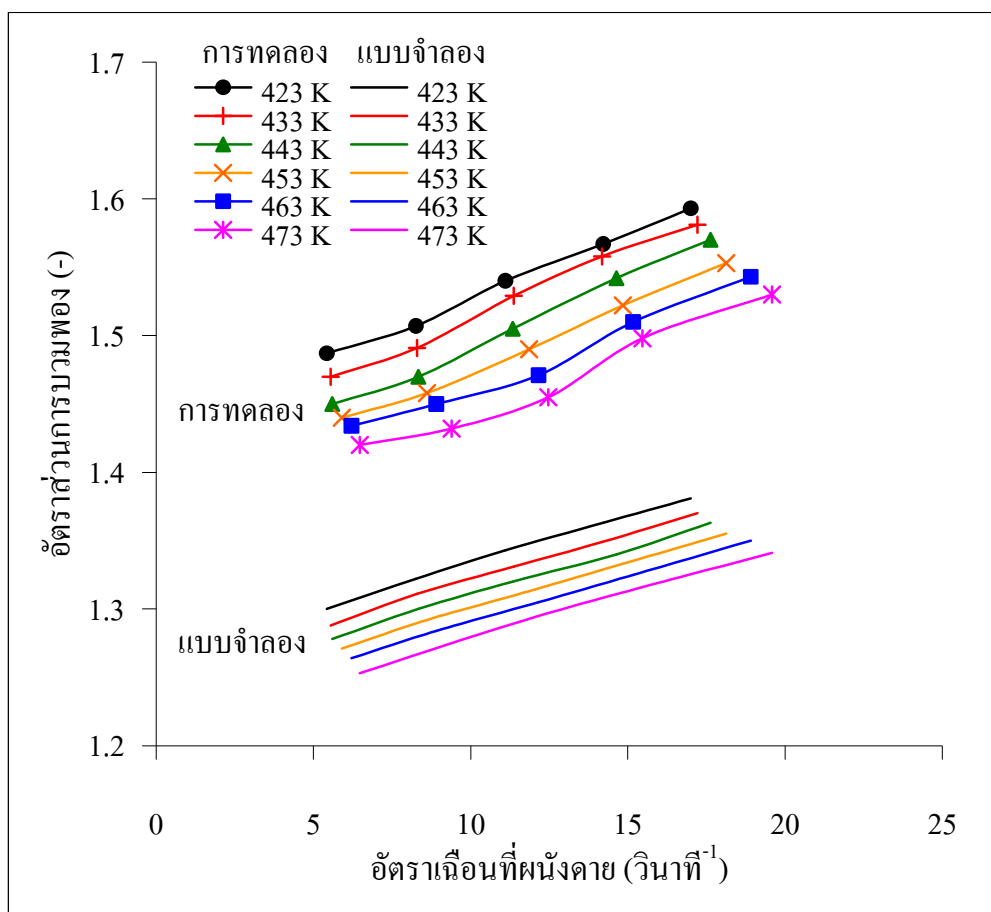
การนำค่าอัตราส่วนการบวมพองของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวที่ได้จากการทดลอง และการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จาก โปรแกรม POLYFLOW แสดงดังตาราง ภาคผนวกที่ 1-6 มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการบวมพองกับอัตราเฉือนที่ผนังคาย ณ อุณหภูมิ 423 433 443 453 463 และ 473 เคลวิน ใช้ความหนาคายแผ่น 0.6 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดังภาพที่ 48-50



ภาพที่ 48 การเปรียบเทียบอัตราส่วนการบวมพองของ HDPE ที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลอง จาก โปรแกรม POLYFLOW ที่อุณหภูมิต่างๆ (423-473 เคลวิน) ณ อัตราเฉือนที่ผนังคายต่างๆ และความหนาคายแผ่น 0.6 มิลลิเมตร



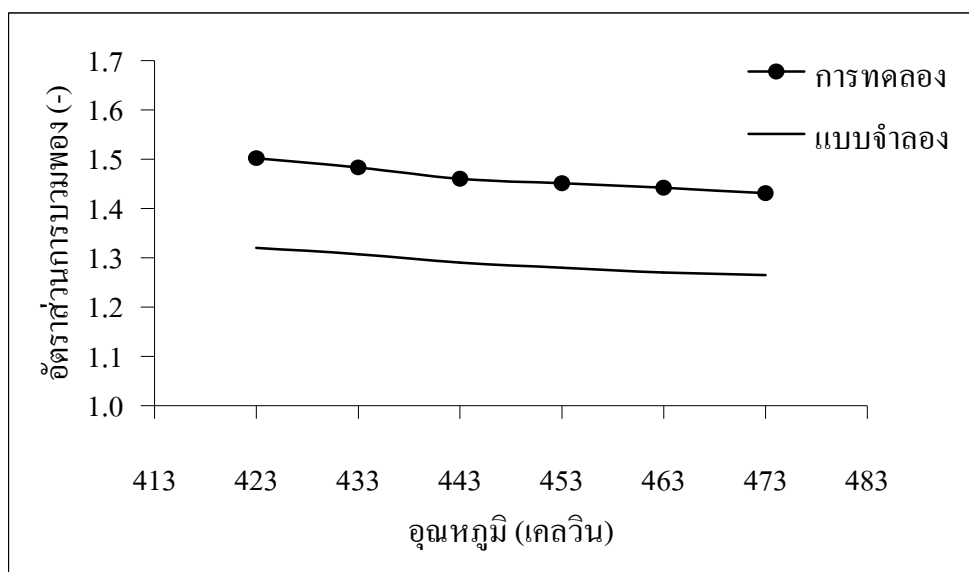
ภาพที่ 49 การเปรียบเทียบอัตราส่วนการบวมพองของ HDPE ที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลอง จากโปรแกรม POLYFLOW ที่อุณหภูมิต่างๆ (423-473 เคลวิน) ณ อัตราเนื้อที่ผนังคายต่างๆ และความหนาตายแผ่น 0.8 มิลลิเมตร



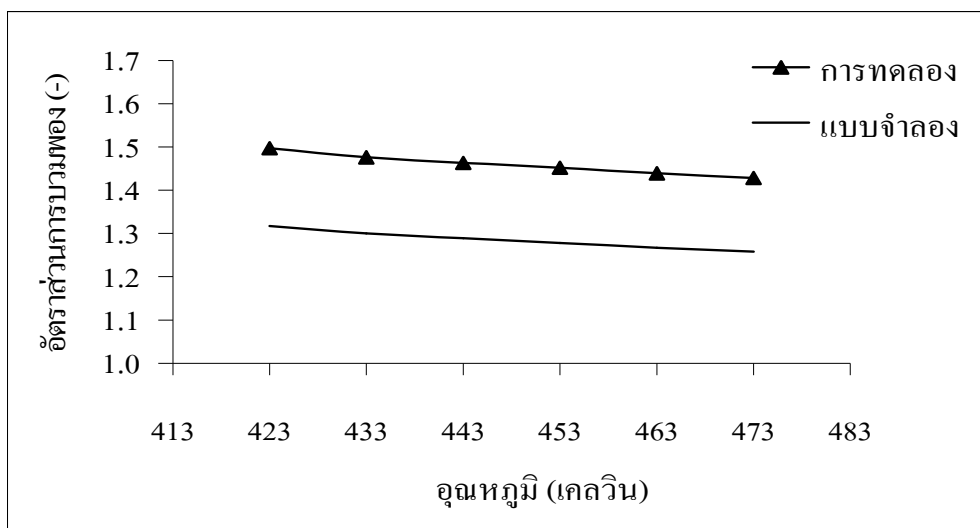
ภาพที่ 50 การเปรียบเทียบอัตราส่วนการบวมพองของ HDPE ที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลอง จากโปรแกรม POLYFLOW ที่อุณหภูมิต่างๆ (423-473 เคลวิน) ณ อัตราการขึ้นคายต่างๆ และความหนาตายแผ่น 1.0 มิลลิเมตร

ภาพที่ 48 49 และ 50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนการบวมพองกับอัตราการขึ้นคายที่ขึ้นคายต่างๆ เมื่อพิจารณา ณ อุณหภูมิคงที่ พบว่า เมื่ออัตราการขึ้นคายเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนการบวมพองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก เมื่ออัตราการขึ้นคายเพิ่มขึ้น พอลิเมอร์ถูกกระทำด้วยแรงเพิ่มขึ้น ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์ได้รับพลังงานการผิครูปเนื้อเพิ่มขึ้น และพอลิเมอร์หลอมมีระยะเวลาในการคลายตัวของความเค้นลดลง ส่งผลให้อัตราส่วนการบวมพองของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของอัตราส่วนการบวมพองที่ได้จากแบบจำลองจาก โปรแกรม POLYFLOW และการทดลอง พบว่า ค่าอัตราส่วนการบวมพองที่ได้จากทั้ง 2 วิธี มีแนวโน้มสอดคล้องกัน คือ เมื่ออัตราการขึ้นคายเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนการบวมพองมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าอัตราส่วนการบวมพองที่ได้จากแบบจำลองมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดลองประมาณ 13%

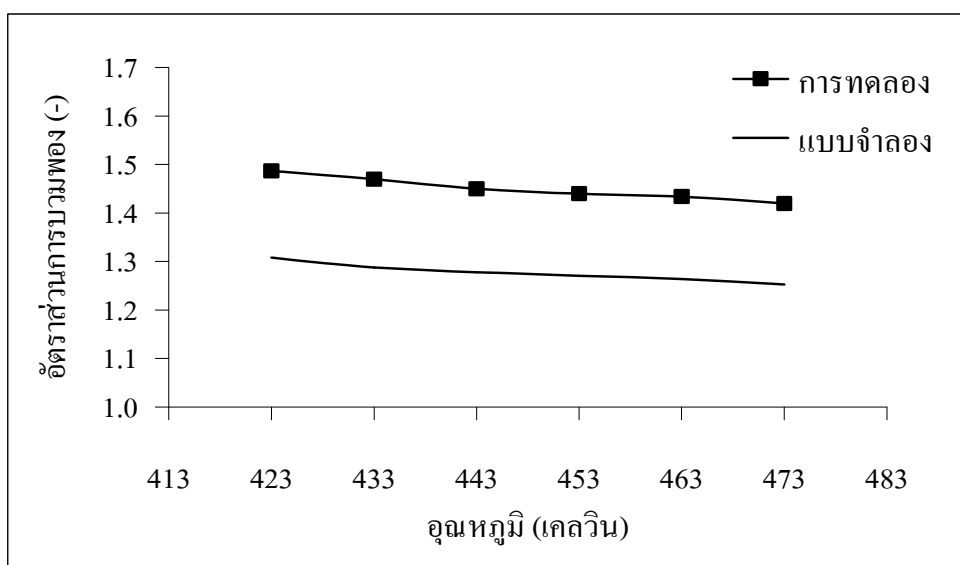
เมื่อนำอัตราส่วนการบวมพองของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลองจากโปรแกรม POLYFLOW มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการบวมพองกับอุณหภูมิ ที่ความหนาตาแผ่น 0.6 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 51 52 และ 53 ตามลำดับ



**ภาพที่ 51** การเปรียบเทียบอัตราส่วนการบวมพองของ HDPE ที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลอง จากโปรแกรม POLYFLOW ที่อุณหภูมิต่างๆ (423-473 เคลวิน) ความหนาตาแผ่น 0.6 มิลลิเมตร ณ ความเร็วรอบของสกรูคงที่เท่ากับ 6 รอบต่อนาที (อัตราเฉือนที่ผนังดาวย 13.5-14.50 วินาที<sup>-1</sup>)



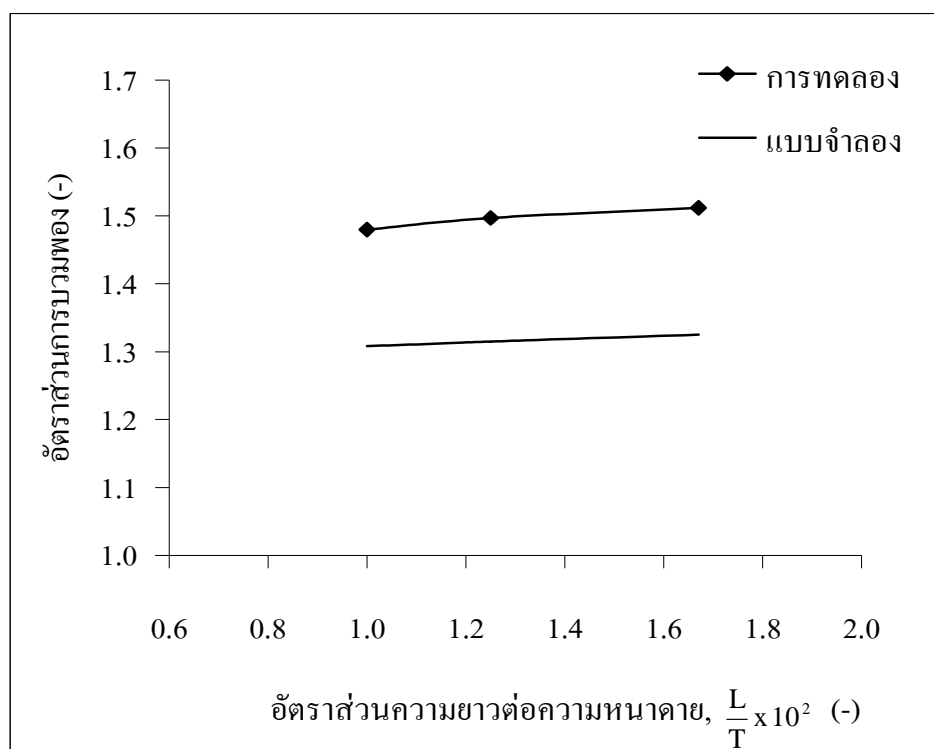
ภาพที่ 52 การเปรียบเทียบอัตราส่วนการบวมพองของ HDPE ที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลอง จากโปรแกรม POLYFLOW ที่อุณหภูมิต่างๆ (423-473 เคลวิน) ความหนาตายแผ่น 0.8 มิลลิเมตร ณ ความเร็วรอบของสกรูคงที่เท่ากับ 6 รอบต่อนาที (อัตราเฉือนที่ผนังตาย 8.20-8.71 วินาที<sup>-1</sup>)



ภาพที่ 53 การเปรียบเทียบอัตราส่วนการบวมพองของ HDPE ที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลอง จากโปรแกรม POLYFLOW ที่อุณหภูมิต่างๆ (423-473 เคลวิน) ความหนาตายแผ่น 0.8 มิลลิเมตร ณ ความเร็วรอบของสกรูคงที่เท่ากับ 6 รอบต่อนาที (อัตราเฉือนที่ผนังตาย 5.86-6.47 วินาที<sup>-1</sup>)

ภาพที่ 51 52 และ 53 เมื่อพิจารณา ณ อัตราเดือนที่ผนังคายนกที่ พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนการบวมพองมีค่าลดลง เนื่องจาก การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่โพลิเมอร์เพิ่มขึ้น และสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมดีขึ้น ทำให้ต้องการระยะเวลาในการคลายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นในการไหลของพอลิเมอร์หลอมภายในคายนกลดลง นำไปสู่การลดลงของความเครียดเหนือนำกลับได้ของพอลิเมอร์หลอมเมื่อไหลออกจากคายนก ดังนั้น อัตราส่วนการบวมพองของพอลิเมอร์หลอมจึงลดลง เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จาก โปรแกรม POLYFLOW กับผลการทดลอง พบว่า ผลที่ได้จากทั้ง 2 วิธี มีความสอดคล้องกัน คือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนการบวมพองมีค่าลดลง

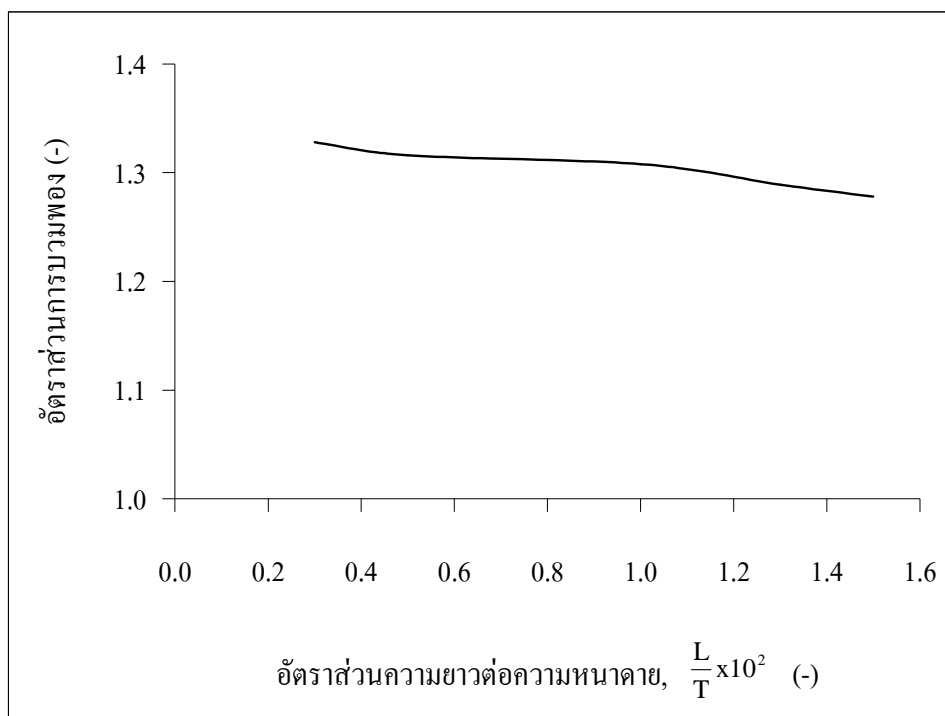
จากการนำค่าอัตราส่วนการบวมพองของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมที่ได้จากการทดลอง และ โปรแกรม POLYFLOW มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนการบวมพองกับอัตราส่วนความยาวต่อความหนาตาย แสดงดังภาพที่ 54



ภาพที่ 54 การเปรียบเทียบอัตราส่วนการบวมพองของ HDPE ที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลอง จากโปรแกรม POLYFLOW ณ อัตราส่วนความยาวต่อความหนาตายต่างๆ ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน และความเร็วรอบของสกรูครั้งที่ 6 รอบต่อนาที

จากภาพที่ 54 เมื่อพิจารณา ณ อุณหภูมิและอัตราเลื่อนคองที่ พบว่า ค่าอัตราส่วนการบวมพองมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนความยาวต่อความหนาตายเพิ่มขึ้น เนื่องจาก การใช้คายที่มีความหนาตายเล็กกลง โดยความเร็วรอบของสกรูคองที่ จะทำให้พอลิเมอร์หลอมไหลเร็วขึ้นและมีระยะเวลาในการคลายตัวของความเค้นลดลง และพอลิเมอร์หลอมมีระยะเวลาในการไหลภายในคายน้อยลง ฉะนั้น อัตราส่วนการบวมพองของพอลิเมอร์หลอมจึงเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของอัตราส่วนการบวมพองที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลองจากโปรแกรม POLYFLOW พบว่า ค่าอัตราส่วนการบวมพองที่ได้จากทั้ง 2 วิธี มีแนวโน้มสอดคล้องกัน คือ เมื่ออัตราส่วนความยาวต่อความหนาตายเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนการบวมพองมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าอัตราส่วนการบวมพองที่ได้จากแบบจำลองมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง เนื่องจาก พฤติกรรมการบวมพองของพอลิเมอร์หลอมไม่สามารถพิจารณาได้จากพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์ที่เป็นแบบนอนนิวโตเนียน โดยใช้กฎสมการ Carreau-Yasuda ในการอธิบายเพียงอย่างเดียวได้ ฉะนั้น จึงเป็นเพียงการประเมินสมบัติการไหลเบื้องต้นเท่านั้น โดยยังไม่ได้รวมสมบัติการยืดหยุ่นเข้าไว้ด้วย แต่พอลิเมอร์หลอมมีสมบัติความเป็นวิสโคอีลาสติก ซึ่งรวมสมบัติการยืดหยุ่นและเนื้อหนืดเข้าไว้ด้วยกัน โดยที่ทั้งสองสมบัติส่งผลให้เกิดการบวมพอง ดังนั้น ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จึงจำเป็นที่จะรวมสมบัติความเป็นวิสโคอีลาสติกของพอลิเมอร์หลอมด้วย ซึ่งในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม POLYFLOW ในงานวิจัยนี้ เป็นการสร้างแบบจำลองอย่างง่าย แบบ 2 มิติ และนำเอากฎสมการ Carreau-Yasuda มาอธิบายสมบัติการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลว ซึ่งค่าอัตราส่วนการบวมพองที่ได้จากแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง 13%

จากการนำค่าอัตราส่วนการบวมพองของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมที่ได้จากแบบจำลองใน โปรแกรม POLYFLOW มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนการบวมพองกับอัตราส่วนความยาวต่อความหนาตาย โดยทำการปรับเปลี่ยนความยาวคาย ใช้ความหนาตายแผ่นคองที่ 1.0 มิลลิเมตร ณ อุณหภูมิคองที่ 423 เคลวิน และความเร็วรอบของสกรูคองที่ 6 รอบต่อนาที แสดงดังภาพที่ 55



ภาพที่ 55 อัตราส่วนการบวมพองของ HDPE ที่ได้จากแบบจำลองจากโปรแกรม POLYFLOW ณ อัตราส่วนความยาวต่อความหนาตายต่างๆ โดยทำการปรับเปลี่ยนความยาวตาย ใช้ความหนาตาย 1.0 มิลลิเมตร ณ อุณหภูมิ 423 เคลวิน และความเร็วรอบของสกรูคงที่ 6 รอบต่อนาที

จากภาพที่ 55 เมื่อพิจารณา ณ อุณหภูมิและอัตราเงื่อนไขที่ พบว่า ค่าอัตราส่วนการบวมพองมีค่าลดลง เมื่ออัตราส่วนความยาวต่อความหนาตายเพิ่มขึ้น เนื่องจาก การใช้ตายที่มีความยาวตายเพิ่มขึ้น โดยความเร็วรอบของสกรูคงที่ จะทำให้พอลิเมอร์หลอมไหลได้ช้าลงและมีระยะเวลาในการคลายตัวของความเค้นเพิ่มขึ้น และพอลิเมอร์หลอมมีระยะเวลาในการไหลภายในตายเพิ่มขึ้น ฉะนั้น อัตราส่วนการบวมพองของพอลิเมอร์หลอมจึงลดลง

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

1. จากการทดลองหาค่าคุณสมบัติการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอม โดยกระบวนการอัดรีด จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวประกอบคานารูเล็ก พบว่า เมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น ความหนืดมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอม มีพฤติกรรมการไหลที่เรียกว่า พฤติกรรมการกวนเหลว (shear thinning behavior)
2. ลักษณะของความเร็วการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมภายในคานา ในกระบวนการอัดรีด มีลักษณะเป็นเส้นโค้งคล้ายพาราโบลา โดยที่บริเวณกึ่งกลางคานามีความเร็วการไหลมากที่สุด ซึ่งค่าความเร็วจะค่อยๆ ลดลง เมื่อเข้าไปใกล้บริเวณผนังคานา และมีค่าความเร็วการไหลเป็นศูนย์ที่ผนังคานา
3. ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราส่วนการบวมพองของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลว ที่ได้ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ อัตราเฉือน อัตราส่วนความยาวต่อความหนาแคบ และอุณหภูมิ ซึ่ง พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราเฉือนและอัตราส่วนความยาวต่อความหนาแคบ อัตราส่วนการบวมพองจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ อัตราส่วนการบวมพองจะลดลง
4. การนำโปรแกรม POLYFLOW และระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อแก้สมการเชิงอนุพันธ์ มาประยุกต์ใช้เพื่อการวิเคราะห์หาอัตราส่วนการบวมพอง และการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวผ่านคานาแผ่น ทำให้สามารถอธิบายลักษณะการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมได้ และเมื่อนำอัตราส่วนการบวมพองที่ได้จากแบบจำลองจากโปรแกรม POLYFLOW มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 423-473 เคลวิน และใช้ความหนาแคบแผ่นเป็น 0.6 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร พบว่า อัตราส่วนการบวมพองที่ได้คลาดเคลื่อนจากการทดลอง 13%

### ข้อเสนอแนะ

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์การบวมพองของพอลิเมอร์สามารถพิจารณาโดยอธิบายจากพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเป็นแบบนอนนิวโตเนียนเพียงอย่างเดียวจะมีความคลาดเคลื่อน 13% ดังนั้น ควรพิจารณาใช้สมบัติของพอลิเมอร์หลอมที่มีสมบัติการยืดหยุ่นรวมอยู่ด้วย เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำขึ้น ซึ่งพอลิเมอร์หลอมเหล่านี้แสดงสมบัติความเป็นวิสโคอีลาสติก คือ รวมสมบัติเนื้อหนืดและยืดหยุ่นเข้าไว้ด้วยกัน โดยที่ทั้งสองสมบัติส่งผลต่อการเกิดการบวมพอง

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กิตติมา อนุกุลธนากร. 2549. โมเดลคำนวณกระบวนการอัดรีดแผ่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จิตติภาพร บัวแก้ว. 2545. ลักษณะการไหลของพอลิพรอพิลีนหลอมผ่านตายในกระบวนการเอกซ์ทรูด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ปวีณา ไบมุขอ. 2548. การบวมพองของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในกระบวนการเอกซ์ทรูด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วีระพล ศรีสุวรรณนิเวศ. 2547. โมเดลคณิตศาสตร์อธิบายการบวมพองของพอลิเอทิลีนหลอมที่ไหลผ่านตาย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Arthur, W.B., B. Haworth and J. Batchelor. 1992. **Physics of Plastics**. Hanser Publisher, New York.
- Barrera, M.A., J.F. Vega, M. Aguilar and J. Martinez-Salazar. 2006. Melt Flow Index on High Molecular Weight Polyethylene: A Comparative Study of Experiments and Simulation. **Journal of Materials Processing Technology**. 174: 171-177.
- Bing, Y and L.J. Lee. 1987. Effect of Die Temperature on the Flow of Polymer Melts Part II: Extrudate Swell. **Polymer Engineering and Science**. 27: 1088-1094.
- Bird, R.B., W.E. Stewart and E.N. Lightfoot. 2002. **Transport Phenomena**. 3 nd ed. John Wiley and Sons, New York.
- Brydson, J.A. 1981. **Flow properties of Polymer Melt**. 2 nd ed. George Godwin, London.

- Chhabra, R.P and J.F. Richardson. 1999. **Non-Newtonian Flow in the Process Industries: Fundamentals and Engineering Applications.** Butterwert-Heinemann
- Christodoulou, K.J, A.K Wood and N. Sombatsompop. 1998. Novel Techniques for Measurement of Die Swell of Polymer Melts. **SPE ANTEC Tech.** 44: 915-919.
- Cogwell, F.N. 1994. **Polymer Melt Rheology.** Woodhead Publishing Ltd, England.
- Dangtungee, R., S.S. Desai, S. Tantayanon and P. Supaphol. 2006. Melt Rheology and Extrudate Swell of Low-Density Polyethylene/Ethylene-Octane Copolymer blends. **Polymer testing.** 25: 888-895.
- Dazhu, C., Y. Haiyang, H. Pingsheng and Z. Weian. 2005. Rheological and Extrusion Behavior of Intercalated High-Impact Polystyrene/Organomontmorillonite Nanocomposites. **Composites Science and Technology.** 65: 1593-1600.
- Freakley, P.K and C. Sirisinha. 1997. Influence of Some Lubricating Agents on Extrudate Swell of Carbon Black Filled Styrene/Butadiene Rubber Compound. **Plast. Rubb. Compos. Process. Applic.** 26: 113-117.
- Ganvir, V., A. Lele, R. Thaokar and B.P Gautham. 2008. Prediction on Extrudate Swell in Polymer Melt Extrusion Using on Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) Based Finite Element Method. **Journal of Non-Newtonian Fluid.** 156: 21-28.
- Han, C.D. 1976. **Rheology in Polymer Processing.** Academic Press, New York.
- Hiemenz, P.C and P.L. Timothy. 2007. **Polymer Chemistry.** 2 nd ed. CRC Press, Boca Raton.
- Jame, E.M. 1999. **Polymer Data Handbook.** Oxford University Press, New York.

- Jay, P., J.M. Piau, E.L. Kissi and J. Cizeron. 1998. The Reduction of Viscous Extrusion Stress and Extrudate Swell Computation Using Slippery exit Surfaces. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**. 79: 599-617.
- Liang, J.Z. 2002. Characteristics of Melt Shear Viscosity During Extrusion of Polymers. **Polymer Testing**. 21: 307-311.
- Liang, J.Z. 2008. Effects of Extrusion Conditions on Die-Swell Behavior of Polypropylene/diatomite Composite Melts. **Polymer Testing**. 27: 936-940.
- Mitsoulis, E. 1998. Three-Dimensional Non-Newtonian Computations of Extrudate Swell with the Finite Element Method. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**. 180: 333-344.
- Musameh, S and S. Jodeh. 2002. The effect of Shear Rate and Capillary Length-to-Diameter Ratio on Isothermal Extrudate Swell of Polymer Melts. **An-Najah Research Journal**. 16: 23-37.
- Rodriguez, F., C. Claude, K.O. Christopher and A.A Lynden. 2003. **Principle of Polymer Systems**. 5 th ed. Taylor & Francis, New York.
- Ruifeng, L. 2007. Processing Flow Behavior and Modeling of Polyethylene Melts. **Journal of Central South University of Technology**. 14: 178-182.
- Shenoy, A.V and D.R. Sain. 1996. **Thermoplastic Melt Rheology and Processing**. Marcel Dekker, New York.
- Sombatsompop, N and R. Dangtungee. 2001. Flow Visualisation and Extrudate swell of Natural Rubber in a Capillary Rheometer: Effect of Die/Barrel System. **Journal of Applied Polymer Science**. 82: 2525-2533.

Sombatsompop, N and R. Dangtungee. 2002. Effect of Actual Diameter Ratios of Barrels and Dies on the Elastic Swell and Entrance Pressure Drop of Natural Rubber in Capillary Die Flow. **Journal of Applied Polymer Science.** 86: 1762-1772.

Syriac, J.P and A.A. Ragabah. 2000. Metallocene Catalysts for Ethylene Polymerization. **Kingdom of Saudi Arabia.**

White, J., C.Y Ma and F.C. Weissert. 1985. Flow Patterns in Elastomers and Their Carbon Black Compounds During Extrusion Through Dies. **Rubber Chemistry and Technology.** 58: 815-823.

Wong, A.C-Y. 1998. Factors Affecting Extrudate Swell and Melt Flow Rate. **Journal of Materials Processing Technology.** 79: 163-169.

ภาคผนวก

**ภาคผนวก ก**

ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลที่ได้จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวประกอบดาวยูเล็ก

**ตารางผนวกที่ ก1** ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว  
ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางตาย 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 10

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	น้ำหนักของ Extrudate (กรัม)	อัตราเดือน ปรากฏ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเดือน ปรากฏ (กิโลปาสกาล)	ความหนืดเดือน ปรากฏ (ปาสกาล.วินาที)
1	6.01	0.627	412.45	198.07	480.23
2	6.57	1.513	510.22	201.94	395.79
3	7.26	1.721	570.38	197.20	345.74
4	8.07	1.801	664.29	215.75	324.79
5	8.95	2.062	765.08	239.13	312.56
6	9.89	2.348	858.73	256.35	298.52
7	11.00	2.513	969.33	259.29	267.49
8	12.20	2.901	1140.21	278.07	243.88
9	13.50	3.114	1370.35	283.06	206.56
10	15.00	3.570	1523.45	290.05	190.67

**ตารางผนวกที่ ก2** ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว  
ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางตาย 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 20

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	น้ำหนักของ Extrudate (กรัม)	อัตราเดือน ปรากฏ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเดือน ปรากฏ (กิโลปาสกาล)	ความหนืดเดือน ปรากฏ (ปาสกาล.วินาที)
1	6.01	0.566	383.99	172.31	448.75
2	6.57	1.354	479.06	177.47	370.38
3	7.26	1.504	536.87	175.99	327.81
4	8.07	1.675	602.17	191.93	318.73
5	8.95	1.907	692.33	203.16	293.45
6	9.95	2.149	793.28	207.31	287.26
7	11.00	2.344	931.48	236.95	254.38

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	น้ำหนักของ Extrudate (กรัม)	อัตราเดือน ปรากฏ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเดือน ปรากฏ (กิโลปาสคาล)	ความหนืดเดือน ปรากฏ (ปาสคาล.วินาที)
8	12.10	2.657	1116.38	253.84	227.38
9	13.50	2.856	1324.56	258.80	195.39
10	15.00	3.233	1474.02	265.82	180.34

ตารางผนวกที่ ก3 ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว  
ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางดาวย 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 30

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	น้ำหนักของ Extrudate (กรัม)	อัตราเดือน ปรากฏ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเดือน ปรากฏ (กิโลปาสคาล)	ความหนืดเดือน ปรากฏ (ปาสคาล.วินาที)
1	6.01	0.430	302.66	117.84	389.34
2	6.57	0.995	447.62	143.41	320.38
3	7.26	1.183	502.34	147.25	293.13
4	8.14	1.318	565.39	159.64	282.36
5	8.95	1.531	624.27	168.41	269.78
6	9.82	1.648	730.28	179.99	246.47
7	11.00	1.791	891.47	205.69	230.73
8	12.10	1.924	958.01	208.20	217.33
9	13.50	2.259	1124.45	210.66	187.35
10	15.00	2.513	1384.29	234.43	169.35

ตารางผนวกที่ ก4 ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว  
ที่อุณหภูมิ 433 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางตาย 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 10

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	น้ำหนักของ Extrudate (กรัม)	อัตราเนื่อง ปรากฏ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเนื่อง ปรากฏ (กิโลปาสคาล)	ความหนืดเนื่อง ปรากฏ (ปาสคาล.วินาที)
1	6.01	0.671	407.28	188.36	462.48
2	6.57	1.574	502.56	193.27	384.57
3	7.26	1.761	561.05	185.84	331.25
4	8.07	1.963	653.92	199.60	305.24
5	9.01	2.167	754.32	222.44	294.89
6	9.89	2.438	842.31	241.03	286.15
7	11.00	2.703	957.39	248.36	259.41
8	12.10	2.987	1123.85	263.37	234.35
9	13.50	3.345	1343.58	267.29	198.94
10	15.00	3.704	1495.32	272.79	182.43

ตารางผนวกที่ ก5 ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว  
ที่อุณหภูมิ 433 เคลวิน ใช้เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร และ L/D 20

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	น้ำหนักของ Extrudate (กรัม)	อัตราเนื่อง ปรากฏ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเนื่อง ปรากฏ (กิโลปาสคาล)	ความหนืดเนื่อง ปรากฏ (ปาสคาล.วินาที)
1	6.01	0.53	386.490	169.390	438.29
2	6.57	1.29	468.230	171.090	373.41
3	7.26	1.41	525.180	168.760	325.67
4	8.07	1.58	596.370	178.580	299.45
5	8.95	1.83	687.340	186.830	287.49
6	9.89	2.09	783.410	193.400	274.57
7	11.00	2.21	922.850	209.240	243.63

ตารางผนวกที่ ก5 (ต่อ)

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	น้ำหนักของ Extrudate (กรัม)	อัตราเนียน ปรากฏ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเนียน ปรากฏ (กิโลปาสคาล)	ความหนืดเนียน ปรากฏ (ปาสคาล.วินาที)
8	12.10	2.524	1097.38	229.80	224.79
9	13.50	2.729	1272.32	238.38	187.36
10	15.00	3.147	1466.54	244.60	174.57

ตารางผนวกที่ ก6 ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว  
ที่อุณหภูมิ 433 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางดาวย 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 30

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	น้ำหนักของ Extrudate (กรัม)	อัตราเนียน ปรากฏ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเนียน ปรากฏ (กิโลปาสคาล)	ความหนืดเนียน ปรากฏ (ปาสคาล.วินาที)
1	6.01	0.381	296.49	113.53	382.93
2	6.57	0.951	438.24	137.93	314.74
3	7.26	1.093	493.56	141.84	287.38
4	8.07	1.242	557.49	155.18	278.36
5	9.01	1.437	617.38	163.45	264.75
6	9.89	1.529	726.84	175.87	241.96
7	11.00	1.736	880.02	197.63	224.58
8	12.10	1.897	950.17	199.93	210.42
9	13.50	2.205	1109.84	201.18	181.27
10	15.00	2.461	1377.37	229.18	166.39

ตารางผนวกที่ ก7 ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว  
ที่อุณหภูมิ 443 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 10

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	น้ำหนักของ Extrudate (กรัม)	อัตราเนื่อง ปรากฏ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเนื่อง ปรากฏ (กิโลปาสคาล)	ความหนืดเนื่อง ปรากฏ (ปาสคาล.วินาที)
1	6.01	0.712	397.28	181.89	457.83
2	6.57	1.560	496.39	187.28	377.29
3	7.26	1.716	553.17	179.75	324.95
4	8.07	1.929	647.34	194.48	300.43
5	8.95	2.145	746.86	215.30	288.28
6	9.89	2.389	833.29	230.96	277.17
7	11	2.623	948.16	238.23	251.26
8	12.1	3.093	1096.37	259.51	228.49
9	13.5	3.380	1334.25	257.83	193.24
10	15	3.931	1478.59	263.76	178.39

ตารางผนวกที่ ก8 ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว  
ที่อุณหภูมิ 443 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร และ L/D 20

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	น้ำหนักของ Extrudate (กรัม)	อัตราเนื่อง ปรากฏ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเนื่อง ปรากฏ (กิโลปาสคาล)	ความหนืดเนื่อง ปรากฏ (ปาสคาล.วินาที)
1	6.01	0.475	381.27	164.42	431.25
2	6.63	1.291	462.38	169.87	367.39
3	7.26	1.403	518.19	164.64	317.73
4	8.14	1.512	588.26	172.40	293.07
5	8.89	1.738	680.29	191.79	281.92
6	9.89	1.940	776.41	208.34	268.34
7	11.00	2.127	914.05	217.95	238.45

ตารางผนวกที่ ก8 (ต่อ)

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	น้ำหนักของ Extrudate (กรัม)	อัตราเนื้อ ปรากฏ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเนื้อ ปรากฏ (กิโลปาสคาล)	ความหนืดเนื้อ ปรากฏ (ปาสคาล.วินาที)
8	12.10	2.414	1082.59	232.10	214.39
9	13.50	2.671	1298.42	234.91	180.92
10	15.00	3.070	1459.34	245.81	168.44

ตารางผนวกที่ ก9 ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว  
ที่อุณหภูมิ 443 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางดาวย 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 30

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	น้ำหนักของ Extrudate (กรัม)	อัตราเนื้อ ปรากฏ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเนื้อ ปรากฏ (กิโลปาสคาล)	ความหนืดเนื้อ ปรากฏ (ปาสคาล.วินาที)
1	6.01	0.376	292.45	109.55	374.59
2	6.51	0.942	431.28	132.12	306.34
3	7.26	1.056	486.14	137.02	281.85
4	8.07	1.179	550.34	150.66	273.76
5	9.01	1.323	608.31	157.19	258.41
6	9.89	1.520	715.39	170.22	237.94
7	11.00	1.683	872.32	189.37	217.09
8	12.20	1.889	942.17	191.69	203.46
9	13.50	2.174	1093.42	193.94	177.37
10	15.00	2.419	1369.36	221.04	161.42

ตารางผนวกที่ ก10 ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว  
ที่อุณหภูมิ 453 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 10

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	น้ำหนักของ Extrudate (กรัม)	อัตราเฉือน ปรากฏ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเฉือน ปรากฏ (กิโลปาสคาล)	ความหนืดเฉือน ปรากฏ (ปาสคาล.วินาที)
1	6.01	0.726	386.94	167.11	431.87
2	6.57	1.561	489.06	175.22	358.29
3	7.26	1.697	527.87	159.51	302.18
4	8.14	1.925	593.86	174.27	293.45
5	8.95	2.188	689.72	189.94	275.39
6	9.95	2.381	775.39	202.56	261.24
7	11.00	2.690	895.46	218.36	243.85
8	12.20	2.979	1067.81	229.00	214.46
9	13.50	3.365	1251.43	239.94	191.34
10	15.00	3.641	1369.36	244.16	178.30

ตารางผนวกที่ ก11 ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว  
ที่อุณหภูมิ 453 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร และ L/D 20

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	น้ำหนักของ Extrudate (กรัม)	อัตราเฉือน ปรากฏ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเฉือน ปรากฏ (กิโลปาสคาล)	ความหนืดเฉือน ปรากฏ (ปาสคาล.วินาที)
1	6.01	0.472	331.48	134.34	405.28
2	6.57	1.204	438.39	137.96	314.69
3	7.26	1.321	477.24	134.30	281.42
4	8.07	1.490	543.81	142.14	261.38
5	8.95	1.710	620.36	148.06	238.67
6	9.89	1.828	700.40	149.78	213.85
7	11.00	2.104	887.26	181.32	204.36

ตารางผนวกที่ ก11 (ต่อ)

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	น้ำหนักของ Extrudate (กรัม)	อัตราเนียน ปรากฏ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเนียน ปรากฏ (กิโลปาสคาล)	ความหนืดเนียน ปรากฏ (ปาสคาล.วินาที)
8	12.10	2.303	986.84	191.78	194.34
9	13.50	2.672	1174.05	193.60	164.90
10	15.00	3.046	1243.59	197.06	158.46

ตารางผนวกที่ ก12 ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว  
ที่อุณหภูมิ 453 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางดาวย 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 30

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	น้ำหนักของ Extrudate (กรัม)	อัตราเนียน ปรากฏ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเนียน ปรากฏ (กิโลปาสคาล)	ความหนืดเนียน ปรากฏ (ปาสคาล.วินาที)
1	6.01	0.349	281.69	102.58	364.15
2	6.57	0.913	408.34	120.61	295.38
3	7.26	1.054	452.58	123.31	272.47
4	8.07	1.180	535.03	131.42	245.63
5	9.01	1.281	587.24	132.83	226.19
6	9.95	1.425	673.89	137.86	204.57
7	11.00	1.664	803.41	158.38	197.13
8	12.20	1.859	887.36	165.42	186.42
9	13.50	2.071	1014.6	167.76	165.35
10	15.00	2.343	1164.9	173.67	149.08

**ตารางผนวกที่ ก13** ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว  
ที่อุณหภูมิ 463 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางตาย 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 10

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	น้ำหนักของ Extrudate (กรัม)	อัตราเนื่อง ปรากฏ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเนื่อง ปรากฏ (กิโลปาสคาล)	ความหนืดเนื่อง ปรากฏ (ปาสคาล.วินาที)
1	6.01	0.734	367.39	144.47	393.24
2	6.57	1.478	476.42	160.54	336.97
3	7.32	1.665	503.75	147.34	292.48
4	8.07	1.944	576.39	157.71	273.62
5	8.95	2.169	649.01	167.38	257.90
6	9.89	2.357	713.82	165.11	231.30
7	11.00	2.713	867.37	191.21	220.45
8	12.10	3.006	928.46	193.79	208.72
9	13.50	3.317	1160.97	216.04	186.09
10	15.00	3.775	1297.82	222.37	171.34

**ตารางผนวกที่ ก14** ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว  
ที่อุณหภูมิ 463 เคลวิน เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร และ L/D 20

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	น้ำหนักของ Extrudate (กรัม)	อัตราเนื่อง ปรากฏ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเนื่อง ปรากฏ (กิโลปาสคาล)	ความหนืดเนื่อง ปรากฏ (ปาสคาล.วินาที)
1	6.01	0.483	302.59	110.73	365.94
2	6.57	1.147	413.86	125.16	302.42
3	7.26	1.295	462.34	127.59	275.96
4	8.07	1.523	518.67	128.82	248.37
5	8.95	1.613	614.56	133.68	217.53
6	9.89	1.780	683.28	139.72	204.48
7	11.00	2.049	841.34	160.87	191.21

ตารางผนวกที่ ก14 (ต่อ)

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	น้ำหนักของ Extrudate (กรัม)	อัตราเนียน ปรากฏ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเนียน ปรากฏ (กิโลปาสคาล)	ความหนืดเนียน ปรากฏ (ปาสคาล.วินาที)
8	12.20	2.568	896.51	163.46	182.33
9	13.50	2.856	1028.43	165.12	160.56
10	15.00	3.041	1189.89	175.69	147.66

ตารางผนวกที่ ก15 ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว  
ที่อุณหภูมิ 463 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางดาวย 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 30

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	น้ำหนักของ Extrudate (กรัม)	อัตราเนียน ปรากฏ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเนียน ปรากฏ (กิโลปาสคาล)	ความหนืดเนียน ปรากฏ (ปาสคาล.วินาที)
1	6.01	0.336	273.47	95.68	349.88
2	6.57	0.886	387.29	111.46	287.80
3	7.26	0.991	435.05	113.45	260.77
4	8.89	1.224	501.41	114.79	228.93
5	9.95	1.403	558.38	116.23	208.16
6	11.00	1.619	634.96	124.95	196.78
7	12.20	1.746	786.47	145.52	185.03
8	13.50	1.976	837.43	148.57	177.41
9	15.00	2.283	976.71	153.01	156.66
10	15.00	2.351	1097.4	155.99	142.14

**ตารางผนวกที่ ก16** ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว  
ที่อุณหภูมิ 473 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางตาย 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 10

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	น้ำหนักของ Extrudate (กรัม)	อัตราเนื่อง ปรากฏ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเนื่อง ปรากฏ (กิโลปาสคาล)	ความหนืดเนื่อง ปรากฏ (ปาสคาล.วินาที)
1	6.01	0.716	346.81	126.86	365.78
2	6.57	1.462	449.35	137.65	306.34
3	7.26	1.654	482.49	139.15	288.4
4	8.14	1.825	549.34	142.46	259.33
5	8.95	2.056	628.52	151.6	241.21
6	9.95	2.312	794.38	170.04	214.06
7	11.00	2.618	843.85	175.15	207.56
8	12.10	2.811	896.93	177.85	198.29
9	13.50	3.205	1029.47	183.71	178.45
10	15.00	3.726	1235.08	201.52	163.16

**ตารางผนวกที่ ก17** ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว  
ที่อุณหภูมิ 473 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร และ L/D 20

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	น้ำหนักของ Extrudate (กรัม)	อัตราเนื่อง ปรากฏ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเนื่อง ปรากฏ (กิโลปาสคาล)	ความหนืดเนื่อง ปรากฏ (ปาสคาล.วินาที)
1	6.01	0.454	291.04	93.62	321.67
2	6.57	1.090	381.26	111.34	292.04
3	7.26	1.212	438.49	115.96	264.45
4	8.07	1.438	499.34	117.76	235.83
5	8.95	1.603	596.85	124.57	208.71
6	9.89	1.719	652.81	128.89	197.44
7	11.00	1.926	808.32	145.78	180.35

ตารางผนวกที่ ก17 (ต่อ)

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	น้ำหนักของ Extrudate (กรัม)	อัตราเนียน ปรากฏ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเนียน ปรากฏ (กิโลปาสคาล)	ความหนืดเนียน ปรากฏ (ปาสคาล.วินาที)
8	12.20	2.200	847.78	147.93	174.49
9	13.50	2.502	986.99	150.13	152.11
10	15.00	2.905	1093.71	153.09	139.98

ตารางผนวกที่ ก18 ผลการทดลองหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว  
ที่อุณหภูมิ 473 เคลวิน ใช้เส้นผ่าศูนย์กลางดาวย 1.5 มิลลิเมตร และ L/D = 30

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	น้ำหนักของ Extrudate (กรัม)	อัตราเนียน ปรากฏ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเนียน ปรากฏ (กิโลปาสคาล)	ความหนืดเนียน ปรากฏ (ปาสคาล.วินาที)
1	6.01	0.342	254.67	79.53	312.31
2	6.57	0.832	358.93	95.64	266.45
3	7.26	0.961	405.09	100.62	248.40
4	8.07	1.073	486.49	101.86	209.37
5	8.95	1.210	522.35	103.40	197.96
6	9.95	1.415	612.63	110.89	181.02
7	11.00	1.534	742.38	125.80	169.46
8	12.10	1.743	808.50	127.67	157.91
9	13.50	1.922	893.38	131.09	146.74
10	15.00	2.210	1024.50	141.95	138.56

ตารางผนวกที่ ก19 ผลการทดลองจากการทำ Bagley's Correction เพื่อหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว โดยใช้โปรแกรม Polylab Polycab ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	อัตราเนียน ปรับแก้ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเนียน ปรับแก้ (กิโลปาสกาล)	ความหนืดเนียน ปรับแก้ (ปาสกาล.วินาที)
1	6.01	332.12	149.53	450.23
2	6.57	495.24	178.35	360.14
3	7.26	565.27	187.81	332.25
4	8.07	640.71	198.81	310.31
5	8.95	755.87	217.82	288.18
6	9.89	845.15	228.75	270.67
7	11.00	930.11	237.3	255.38
8	12.20	1104.35	249.46	225.89
9	13.50	1259.83	254.52	202.03
10	15.00	1458.82	262.79	180.14

ตารางผนวกที่ ก20 ผลการทดลองจากการทำ Bagley's Correction เพื่อหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว โดยใช้โปรแกรม Polylab Polycab ที่อุณหภูมิ 433 เคลวิน

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	อัตราเนียน ปรับแก้ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเนียน ปรับแก้ (กิโลปาสกาล)	ความหนืดเนียน ปรับแก้ (ปาสกาล.วินาที)
1	6.01	318.22	133.790	420.450
2	6.57	472.13	160.160	339.240
3	7.26	552.56	171.480	310.340
4	8.07	632.78	184.170	291.060
5	9.01	727.44	198.750	273.220

ตารางผนวกที่ ก20 (ต่อ)

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	อัตราเนื่อง ปรับแก้ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเนื่อง ปรับแก้ (กิโลปาสคาล)	ความหนืดเนื่อง ปรับแก้ (ปาสคาล.วินาที)
6	9.89	827.89	209.83	253.46
7	11.00	912.89	215.28	235.82
8	12.10	1020.78	221.26	216.76
9	13.50	1188.50	230.95	194.32
10	15.00	1397.33	242.25	173.37

ตารางผนวกที่ ก21 ผลการทดลองจากการทำ Bagley's Correction เพื่อหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว โดยใช้โปรแกรม Polylab Polycab ที่อุณหภูมิ 443 เคลวิน

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	อัตราเนื่อง ปรับแก้ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเนื่อง ปรับแก้ (กิโลปาสคาล)	ความหนืดเนื่อง ปรับแก้ (ปาสคาล.วินาที)
1	6.01	310.48	125.19	403.24
2	6.51	467.39	149.45	319.76
3	7.26	530.44	159.28	300.28
4	8.07	591.11	171.20	289.63
5	9.01	680.67	185.04	271.86
6	9.89	769.33	195.02	253.50
7	11.00	856.22	201.25	235.04
8	12.20	965.56	205.82	213.17
9	13.50	1099.26	210.90	191.86
10	15.00	1307.58	219.21	167.64

ตารางผนวกที่ ก22 ผลการทดลองจากการทำ Bagley's Correction เพื่อหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว โดยใช้โปรแกรม Polylab Polycab ที่อุณหภูมิ 453 เคลวิน

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	อัตราเนียน ปรับแก้ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเนียน ปรับแก้ (กิโลปาสกาล)	ความหนืดเนียน ปรับแก้ (ปาสกาล.วินาที)
1	6.01	312.42	118.09	378.01
2	6.57	449.11	136.45	303.83
3	7.26	499.11	142.64	285.79
4	8.07	568.89	154.09	270.88
5	9.01	648.56	167.54	258.34
6	9.95	710.67	174.11	245.12
7	11.00	819.67	183.82	224.27
8	12.20	910.78	188.34	206.80
9	13.50	1036.56	196.43	189.51
10	15.00	1230.54	203.17	165.11

ตารางผนวกที่ ก23 ผลการทดลองจากการทำ Bagley's Correction เพื่อหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว โดยใช้โปรแกรม Polylab Polycab ที่อุณหภูมิ 463 เคลวิน

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	อัตราเนียน ปรับแก้ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเนียน ปรับแก้ (กิโลปาสกาล)	ความหนืดเนียน ปรับแก้ (ปาสกาล.วินาที)
1	6.01	298.21	108.37	363.42
2	6.57	430.00	124.84	290.34
3	7.26	480.21	131.73	274.33
4	8.89	548.56	137.87	251.34
5	9.95	628.98	151.23	240.45

ตารางผนวกที่ ก23 (ต่อ)

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	อัตราเนื่อง ปรับแก้ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเนื่อง ปรับแก้ (กิโลปาสคาล)	ความหนืดเนื่อง ปรับแก้ (ปาสคาล.วินาที)
6	11.00	671.25	154.46	230.11
7	12.20	800.38	168.88	211.00
8	13.50	870.21	173.41	199.28
9	15.00	988.25	180.52	182.67
10	15.00	1180.23	189.12	160.24

ตารางผนวกที่ ก24 ผลการทดลองจากการทำ Bagley's Correction เพื่อหาค่าสมบัติการไหลของ HDPE จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว โดยใช้โปรแกรม Polylab Polycab ที่อุณหภูมิ 473 เคลวิน

ครั้งที่	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	อัตราเนื่อง ปรับแก้ (วินาที <sup>-1</sup> )	ความเค้นเนื่อง ปรับแก้ (กิโลปาสคาล)	ความหนืดเนื่อง ปรับแก้ (ปาสคาล.วินาที)
1	6.01	285.11	98.43	345.27
2	6.57	419.38	114.81	273.78
3	7.26	465.35	121.13	260.32
4	8.07	534.93	127.82	238.96
5	8.95	610.14	134.41	220.31
6	9.95	660.32	138.89	210.34
7	11.00	774.21	147.27	190.22
8	12.10	843.22	152.85	181.27
9	13.50	904.21	153.95	170.26
10	15.00	1128.33	166.22	147.32

**ภาคผนวก ข**

ผลการทดลองวัดค่าอัตราส่วนการบวมพอง โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวประกอบคายนแผ่น

**ตารางผนวกที่ ข1** ค่าอัตราส่วนการบวมพองของ HDPE น้ำหนักของผลิตภัณฑ์อัดรีด (extrudate) ใช้ความเร็วรอบของสกรูต่างๆ และอัตราเงื่อนไขที่ผนังคายต่างๆ จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ณ อุณหภูมิ 423 เคลวิน ใช้ความหนาคายแผ่นเป็น 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร

ความหนาคาย (มิลลิเมตร)	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	อัตราเงื่อนไข ที่ผนังคาย (วินาที <sup>-1</sup> )	น้ำหนักของ Extrudate (กรัม)	อัตราส่วน การบวมพอง (-)
0.6	6	13.51	5.431	1.502
	7	21.10	8.302	1.524
	8	29.10	11.227	1.562
	9	36.60	14.085	1.582
	10	44.70	17.140	1.607
0.8	6	8.20	5.593	1.497
	7	12.30	8.425	1.510
	8	16.70	11.435	1.542
	9	21.10	14.204	1.574
	10	25.80	17.276	1.603
1.0	6	5.43	5.969	1.487
	7	8.26	8.561	1.507
	8	11.11	11.591	1.540
	9	14.22	14.403	1.567
	10	17.00	17.480	1.593

**ตารางผนวกที่ ข2** ค่าอัตราส่วนการบวมพองของ HDPE น้ำหนักของผลิตภัณฑ์อัดรีด (extrudate) ใช้ความเร็วรอบของสกรูต่างๆ และอัตราเฉือนที่ผนังคายต่างๆ จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ณ อุณหภูมิ 433 เคลวิน ใช้ความหนาคายแผ่นเป็น 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร

ความหนาคาย (มิลลิเมตร)	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	อัตราเฉือน ที่ผนังคาย (วินาที <sup>-1</sup> )	น้ำหนักของ Extrudate (กรัม)	อัตราส่วน การบวมพอง (-)
0.6	6	13.80	5.491	1.483
	7	21.30	8.364	1.510
	8	29.10	11.275	1.547
	9	37.00	14.132	1.571
	10	45.31	17.227	1.593
0.8	6	8.30	5.626	1.476
	7	12.50	8.478	1.498
	8	17.07	11.455	1.520
	9	21.27	14.234	1.565
	10	25.98	17.324	1.587
1.0	6	5.55	5.741	1.470
	7	8.30	8.589	1.491
	8	11.37	11.636	1.529
	9	14.18	14.443	1.558
	10	17.22	17.515	1.581

**ตารางผนวกที่ ข3** ค่าอัตราส่วนการบวมพองของ HDPE น้ำหนักของผลิตผลอัดรีด (extrudate) ใช้ความเร็วรอบของสกรูต่างๆ และอัตราเฉือนที่ผนังคายต่างๆ จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ณ อุณหภูมิ 443 เคลวิน ใช้ความหนาคายแผ่นเป็น 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร

ความหนาคาย (มิลลิเมตร)	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	อัตราเฉือน ที่ผนังคาย (วินาที <sup>-1</sup> )	น้ำหนักของ Extrudate (กรัม)	อัตราส่วน การบวมพอง (-)
0.6	6	14.01	5.508	1.460
	7	21.53	8.381	1.490
	8	29.23	11.302	1.530
	9	37.10	14.150	1.558
	10	45.98	17.241	1.587
0.8	6	8.40	5.655	1.463
	7	12.81	8.506	1.478
	8	17.37	11.502	1.512
	9	21.62	14.294	1.548
	10	26.38	17.398	1.574
1.0	6	5.60	5.803	1.450
	7	8.34	8.631	1.470
	8	11.34	11.707	1.505
	9	14.64	14.493	1.542
	10	17.63	17.608	1.570

**ตารางผนวกที่ ข4** ค่าอัตราส่วนการบวมพองของ HDPE น้ำหนักของผลิตภัณฑ์อัดรีด (extrudate) ใช้ความเร็วรอบของสกรูต่างๆ และอัตราเฉือนที่ผนังคายต่างๆ จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ณ อุณหภูมิ 453 เคลวิน ใช้ความหนาคายแผ่นเป็น 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร

ความหนาคาย (มิลลิเมตร)	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	อัตราเฉือน ที่ผนังคาย (วินาที <sup>-1</sup> )	น้ำหนักของ Extrudate (กรัม)	อัตราส่วน การบวมพอง (-)
0.6	6	14.21	5.537	1.451
	7	21.62	8.401	1.475
	8	29.34	11.330	1.505
	9	37.21	14.185	1.540
	10	46.40	17.324	1.573
0.8	6	8.44	5.683	1.452
	7	13.30	8.545	1.465
	8	17.60	11.547	1.493
	9	21.90	14.337	1.533
	10	26.73	17.461	1.565
1.0	6	5.91	5.833	1.440
	7	8.61	8.688	1.458
	8	11.86	11.753	1.490
	9	14.84	14.528	1.522
	10	18.13	17.704	1.553

**ตารางผนวกที่ ข5** ค่าอัตราส่วนการบวมพองของ HDPE น้ำหนักของผลิตภัณฑ์อัดรีด (extrudate) ใช้ความเร็วรอบของสกรูต่างๆ และอัตราเฉือนที่ผนังคายต่างๆ จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ณ อุณหภูมิ 463 เคลวิน ใช้ความหนาคายแผ่นเป็น 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร

ความหนาคาย (มิลลิเมตร)	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	อัตราเฉือน ที่ผนังคาย (วินาที <sup>-1</sup> )	น้ำหนักของ Extrudate (กรัม)	อัตราส่วน การบวมพอง (-)
0.6	6	14.37	5.541	1.442
	7	21.74	8.414	1.463
	8	29.45	11.352	1.489
	9	37.45	14.208	1.528
	10	46.84	17.354	1.560
0.8	6	8.53	5.703	1.439
	7	13.25	8.568	1.453
	8	17.78	11.564	1.484
	9	22.44	14.371	1.520
	10	26.94	17.539	1.545
1.0	6	6.21	5.853	1.434
	7	8.91	8.695	1.450
	8	12.16	11.775	1.471
	9	15.17	14.568	1.510
	10	18.91	17.813	1.543

**ตารางผนวกที่ ข6** ค่าอัตราส่วนการบวมพองของ HDPE น้ำหนักของผลิตภัณฑ์อัดรีด (extrudate) ใช้ความเร็วรอบของสกรูต่างๆ และอัตราเลื่อนที่ผนังคายต่างๆ จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ณ อุณหภูมิ 473 เคลวิน ใช้ความหนาคายแผ่นเป็น 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร

ความหนาคาย (มิลลิเมตร)	ความเร็วรอบ ของสกรู (รอบต่อนาที)	อัตราเลื่อน ที่ผนังคาย (วินาที <sup>-1</sup> )	น้ำหนักของ Extrudate (กรัม)	อัตราส่วน การบวมพอง (-)
0.6	6	14.50	5.562	1.431
	7	21.86	8.435	1.450
	8	29.75	11.368	1.474
	9	38.19	14.238	1.519
	10	47.40	17.444	1.542
0.8	6	8.71	5.721	1.428
	7	13.55	8.587	1.440
	8	18.22	11.588	1.463
	9	22.75	14.403	1.509
	10	27.22	17.615	1.530
1.0	6	6.47	5.878	1.420
	7	9.40	8.733	1.432
	8	12.47	11.804	1.455
	9	15.46	14.586	1.498
	10	19.58	17.911	1.530

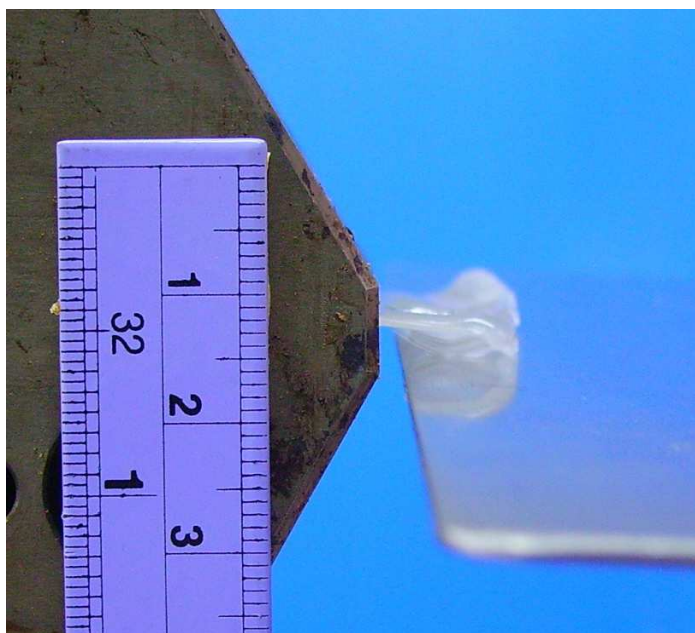
ภาคผนวก ค  
วิธีการคำนวณ

### 1. วิธีการคำนวณค่าอัตราส่วนการบวมพอง

การหาค่าอัตราส่วนการบวมพองของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวในงานวิจัยนี้ คำนวณจากค่าอัตราส่วนระหว่างขนาดความหนาของแผ่นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงต่อขนาดความหนาของรูเปิดคายแผ่น โดยที่การวัดค่าอัตราส่วนการบวมพองจะเริ่มต้นจากการถ่ายภาพการบวมพองทางด้านความหนาของแผ่นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง แสดงดังภาพผนวกที่ 1 และวัดความหนาของแผ่นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงจากภาพถ่ายโดยใช้โปรแกรม SemAfore 4 แล้วนำมาคำนวณหาค่าอัตราส่วนการบวมพอง แสดงดังสมการที่ 46

$$B = \frac{T_1}{T_2} \quad (46)$$

เมื่อ B คือ อัตราส่วนการบวมพอง (-)  
 $T_1$  คือ ความหนาของแผ่นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (mm)  
 $T_2$  คือ ความหนาของคายแผ่น (mm)



ภาพผนวกที่ ๑1 ภาพถ่ายการบวมพองของแผ่นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

## 2. การคำนวณค่าความเร็วการไหลเข้าคาย

จากการทดลองอครีตพอลิเอทีลีนความหนาแน่นสูงหลอม โดยใช้เครื่องอครีตแบบ สกรูเดี่ยวประกอบคายแผ่น ณ อุณหภูมิ 423 เคลวิน ความเร็วรอบของสกรู 6 รอบต่อนาที และ ใช้ความหนาดายแผ่น 0.6 มิลลิเมตร เป็นเวลา 1 นาที ได้แผ่นพอลิเอทีลีนความหนาแน่นสูง น้ำหนัก 5.43 กรัม สามารถนำมาคำนวณหาอัตราการไหลบริเวณทางเข้าได้ ดังสมการที่ 47

$$Q = \frac{W_{\text{exit}}}{\rho} \quad (47)$$

เมื่อ	Q	คือ อัตราการไหลบริเวณทางเข้า (m <sup>3</sup> /s)
	W <sub>exit</sub>	คือ น้ำหนักของพอลิเมอร์ที่ไหลออกจากคาย (g)
	ρ	คือ ความหนาแน่น (g/m <sup>3</sup> )

แทนค่าลงในสมการ จะได้

$$Q = 5.43 \frac{\text{g}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \times \frac{1}{9.61 \times 10^5} \frac{\text{m}^3}{\text{g}}$$

$$Q = 9.42 \times 10^{-8} \text{ m}^3 / \text{s}$$

จากนั้นนำค่าอัตราการไหลบริเวณทางเข้ามาคำนวณหาค่าความเร็วการไหลเข้าของพอลิเอทีลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลว จากกระบวนการอครีต โดยใช้เครื่องอครีตแบบสกรูเดี่ยว ประกอบคายแผ่นที่ความยาว 10 เซนติเมตร และความหนาดายแผ่น 0.6 มิลลิเมตร ดังสมการที่ 48

$$V_{\text{in}} = \frac{Q}{L \times T_2} \quad (48)$$

เมื่อ	V <sub>in</sub>	คือ ความเร็วการไหลเข้าคาย (m/s)
	Q	คือ อัตราการไหลบริเวณทางเข้า (m <sup>3</sup> /s)
	L	คือ ความยาวคายแผ่น (m)
	T <sub>2</sub>	คือ ความหนาของคายแผ่น (m)

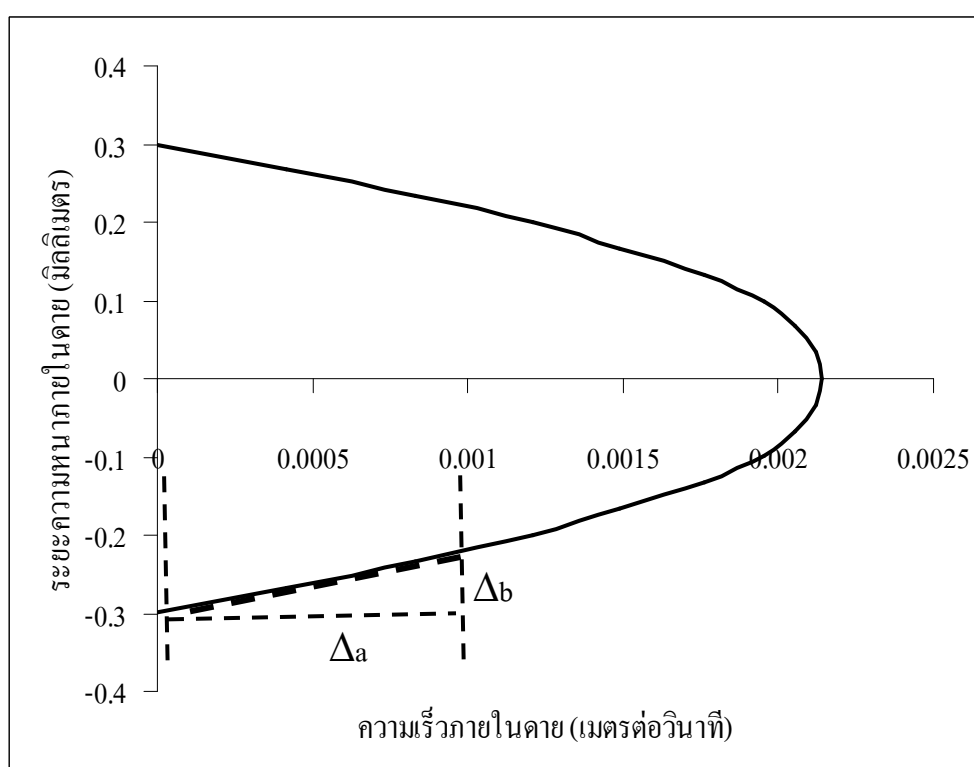
แทนค่าลงในสมการ จะได้

$$V_{in} = 9.42 \times 10^{-8} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times \frac{1}{0.1 \text{ m}} \times \frac{1}{0.0006 \text{ m}}$$

$$V_{in} = 1.57 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$

### 3. การคำนวณหาค่าอัตราเฉือนที่ผนังคาย

การคำนวณหาค่าอัตราเฉือนที่ผนังคาย สามารถคำนวณได้จากความชันของเส้นสัมผัส จากกราฟรูปแบบความเร็วการไหล ตัวอย่างเช่น การหาอัตราเฉือนที่ผนังคายของการอัดรีด พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ณ อุณหภูมิ 423 เคลวิน ความเร็วรอบของสกรู 6 รอบต่อวินาที และความหนาคายแผ่น 0.6 มิลลิเมตร แสดงดังสมการที่ 49 และภาพผนวกที่ 2



ภาพผนวกที่ ค2 รูปแบบความเร็วการไหลภายในคายของ HDPE ณ อุณหภูมิ 423 เคลวิน ที่ความเร็วรอบของสกรู 6 รอบต่อวินาที และความหนาคาย 0.6 มิลลิเมตร

$$\text{อัตราเลื่อนที่ผนังคาย} = \frac{\Delta a}{\Delta b} \quad (49)$$

แทนค่าลงในสมการ จะได้

$$\text{อัตราเลื่อนที่ผนังคาย} = 0.001 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \frac{1}{(0.3 - 0.226) \text{mm}} \times \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}}$$

$$\text{อัตราเลื่อนที่ผนังคาย} = 13.5 \text{ s}^{-1}$$

### ภาคผนวก ง

การเปรียบเทียบผลของอัตราส่วนการบวมพองที่ได้จากการทดลอง และ โปรแกรม POLYFLOW

ตารางผนวกที่ ง1 ค่าอัตราส่วนการบวมพองของ HDPE ความเร็วรอบของสกรูต่างๆ และอัตรา  
 เนื่อนที่ผนังคายต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง และ โปรแกรม POLYYFLOW  
 ณ อุณหภูมิ 423 เคลวิน ใช้ความหนาคายแผ่น 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร

ความหนาคาย (มิลลิเมตร)	ความเร็วรอบของสกรู (รอบต่อนาที)	อัตราเนื่อน (วินาที <sup>-1</sup> )	อัตราส่วนการบวมพอง	
			การทดลอง	โปรแกรม
0.6	6	13.51	1.502	1.320
	7	21.10	1.524	1.341
	8	29.10	1.562	1.362
	9	36.60	1.582	1.383
	10	44.70	1.607	1.408
0.8	6	8.20	1.497	1.317
	7	12.30	1.510	1.332
	8	16.70	1.542	1.354
	9	21.10	1.574	1.371
	10	25.80	1.603	1.396
1.0	6	5.43	1.487	1.308
	7	8.26	1.507	1.327
	8	11.11	1.540	1.343
	9	14.22	1.567	1.363
	10	17.00	1.593	1.381

ตารางผนวกที่ ๒ ค่าอัตราส่วนการบวมพองของ HDPE ความเร็วรอบของสกรูต่างๆ และอัตรา  
 เนื่อนที่ผ่นต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง และ โปรแกรม POLYYFLOW  
 ณ อุณหภูมิ 433 เคลวิน ใช้ความหนาตาแผ่น 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร

ความหนาตา (มิลลิเมตร)	ความเร็วรอบของสกรู (รอบต่อนาที)	อัตราเนื่อน (วินาที <sup>-1</sup> )	อัตราส่วนการบวมพอง	
			การทดลอง	โปรแกรม
0.6	6	13.80	1.483	1.307
	7	21.30	1.510	1.328
	8	29.10	1.547	1.350
	9	37.00	1.571	1.373
	10	45.31	1.593	1.393
0.8	6	8.30	1.476	1.297
	7	12.50	1.498	1.320
	8	17.07	1.520	1.340
	9	21.27	1.565	1.360
	10	25.98	1.587	1.382
1.0	6	5.55	1.470	1.288
	7	8.30	1.491	1.311
	8	11.37	1.529	1.331
	9	14.18	1.558	1.349
	10	17.22	1.581	1.370

ตารางผนวกที่ 3 ค่าอัตราส่วนการบวมพองของ HDPE ความเร็วรอบของสกรูต่างๆ และอัตรา  
 เนื่อนที่ผ่นต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง และ โปรแกรม POLYYFLOW  
 ณ อุณหภูมิ 443 เคลวิน ใช้ความหนาตาแผ่น 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร

ความหนาตา (มิลลิเมตร)	ความเร็วรอบของสกรู (รอบต่อนาที)	อัตราเนื่อน (วินาที <sup>-1</sup> )	อัตราส่วนการบวมพอง	
			การทดลอง	โปรแกรม
0.6	6	14.01	1.460	1.290
	7	21.53	1.490	1.316
	8	29.23	1.530	1.339
	9	37.10	1.558	1.361
	10	45.98	1.587	1.384
0.8	6	8.40	1.463	1.289
	7	12.81	1.478	1.308
	8	17.37	1.512	1.330
	9	21.62	1.548	1.348
	10	26.38	1.574	1.372
1.0	6	5.60	1.450	1.278
	7	8.34	1.470	1.300
	8	11.34	1.505	1.320
	9	14.64	1.542	1.340
	10	17.63	1.570	1.363

ตารางผนวกที่ 4 ค่าอัตราส่วนการบวมพองของ HDPE ความเร็วรอบของสกรูต่างๆ และอัตรา  
 เหนือที่ผนังคายต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง และ โปรแกรม POLYYFLOW  
 ณ อุณหภูมิ 453 เคลวิน ใช้ความหนาคายแผ่น 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร

ความหนาคาย (มิลลิเมตร)	ความเร็วรอบของสกรู (รอบต่อนาที)	อัตราเหนือ (วินาที <sup>-1</sup> )	อัตราส่วนการบวมพอง	
			การทดลอง	โปรแกรม
0.6	6	14.21	1.451	1.280
	7	21.62	1.475	1.306
	8	29.34	1.505	1.331
	9	37.21	1.540	1.355
	10	46.40	1.573	1.372
0.8	6	8.44	1.452	1.278
	7	13.30	1.465	1.300
	8	17.60	1.493	1.322
	9	21.90	1.533	1.342
	10	26.73	1.565	1.364
1.0	6	5.91	1.440	1.271
	7	8.61	1.458	1.292
	8	11.86	1.490	1.313
	9	14.84	1.522	1.333
	10	18.13	1.553	1.355

ตารางผนวกที่ 5 ค่าอัตราส่วนการบวมพองของ HDPE ความเร็วรอบของสกรูต่างๆ และอัตรา  
 เนื่อนที่ผ่นต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง และ โปรแกรม POLYYFLOW  
 ณ อุณหภูมิ 463 เคลวิน ใช้ความหนาตาแผ่น 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร

ความหนาตา (มิลลิเมตร)	ความเร็วรอบของสกรู (รอบต่อนาที)	อัตราเนื่อน (วินาที <sup>-1</sup> )	อัตราส่วนการบวมพอง	
			การทดลอง	โปรแกรม
0.6	6	14.37	1.442	1.270
	7	21.74	1.463	1.295
	8	29.45	1.489	1.321
	9	37.45	1.528	1.345
	10	46.84	1.560	1.368
0.8	6	8.53	1.439	1.267
	7	13.25	1.453	1.290
	8	17.78	1.484	1.311
	9	22.44	1.520	1.338
	10	26.94	1.545	1.358
1.0	6	6.21	1.434	1.264
	7	8.91	1.450	1.284
	8	12.16	1.471	1.305
	9	15.17	1.510	1.325
	10	18.91	1.543	1.350

ตารางผนวกที่ 6 ค่าอัตราส่วนการบวมพองของ HDPE ความเร็วรอบของสกรูต่างๆ และอัตรา  
 เหนือที่ผนังคายต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง และ โปรแกรม POLYYFLOW  
 ณ อุณหภูมิ 473 เคลวิน ใช้ความหนาคายแผ่น 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร

ความหนาคาย (มิลลิเมตร)	ความเร็วรอบของสกรู (รอบต่อนาที)	อัตราเหนือ (วินาที <sup>-1</sup> )	อัตราส่วนการบวมพอง	
			การทดลอง	โปรแกรม
0.6	6	14.50	1.431	1.265
	7	21.86	1.450	1.283
	8	29.75	1.474	1.312
	9	38.19	1.519	1.340
	10	47.40	1.542	1.363
0.8	6	8.71	1.428	1.258
	7	13.55	1.440	1.279
	8	18.22	1.463	1.305
	9	22.75	1.509	1.331
	10	27.22	1.530	1.352
1.0	6	6.47	1.420	1.253
	7	9.40	1.432	1.275
	8	12.47	1.455	1.297
	9	15.46	1.498	1.316
	10	19.58	1.530	1.341

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวจิตติมา ทองประดิษฐ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 23 พฤศจิกายน 2526
สถานที่เกิด	จังหวัดนครศรีธรรมราช
ประวัติการศึกษา	ระดับอุดมศึกษา วท.บ. (เคมีอุตสาหกรรม) ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (พ.ศ.2549)
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ภายใต้ศูนย์ ความเป็นเลิศด้านปิโตรเคมีปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง (NEC-PPAM)



