

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุเชิงประกอบ พอลิพรอพิลีน และจี้ลีโอไม

2.1.1 วัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials)

วัสดุเชิงประกอบ หมายถึง วัสดุประกอบด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วนหรือมากกว่า ซึ่งอาจผสมกันหรือสร้างพันธะต่อกัน วัสดุเชิงประกอบนี้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้เป็นวัสดุระบบใหม่ที่มีคุณสมบัติดีขึ้น ซึ่งมีสมบัติอยู่ระหว่างสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นองค์ประกอบ โดยทั่วไปแบ่งองค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบออกเป็น 2 ส่วน คือเมทริกซ์ (Matrix) และสารเสริมแรง (Reinforcement) โดยเมทริกซ์เป็นองค์ประกอบหลักล้อมรอบและป้องกันส่วนเสริมแรงจากการเสียดสีเนื่องจากสภาพแวดล้อม และทำหน้าที่ในการคงรูปร่างของวัสดุ วัสดุที่ใช้เป็นเมทริกซ์ในวัสดุเชิงประกอบอาจเป็นพอลิเมอร์ โลหะ หรือเซรามิกส์ ขึ้นอยู่กับการใช้งานของเมทริกซ์นั้น ส่วนสารเสริมแรงเป็นโครงสร้างที่ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุเชิงประกอบ ส่วนใหญ่มีความแข็งแรงมากกว่าเมทริกซ์ ซึ่งผลของสารเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบขึ้นอยู่กับเมทริกซ์ที่ใช้ เช่น ถ้าเมทริกซ์เป็นพอลิเมอร์ซึ่งมีค่ามอดูลัสและความแข็งแรงต่ำมากเมื่อเทียบกับเส้นใยเสริมแรง เส้นใยมีการกระจายตัวในเมทริกซ์และช่วยเพิ่มค่ามอดูลัสและความแข็งแรงให้พอลิเมอร์เมทริกซ์ ตัวอย่างของระบบวัสดุเชิงประกอบที่รู้จักกันดี คือ คอนกรีต (Concrete) ซึ่งมีส่วนของเมทริกซ์เป็นซีเมนต์ (Cement) และสารเสริมแรงเป็นก้อนหินหรือก้อนกรวด [2]

วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ คือวัสดุเชิงประกอบที่เป็นอนุพันธ์ของผลิตภัณฑ์จากไม้ ซึ่งอาจเป็นเศษไม้ ผงไม้ หรือเส้นใยมาผสมรวมกับพลาสติกที่มีน้ำหนักเบา ความแข็งแรงสูง ไม่ย่อยสลายตัวหรือเน่าเปื่อยตามธรรมชาติได้ง่าย จึงไม่ต้องการการดูแลรักษามากนักและไม่ทำลายสิ่งแวดล้อมอีกด้วย โดยไม้ที่นำมาใช้ผลิตเป็นวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ จากวัสดุประเภทจี้ลีโอไมหรือพวกเส้นใยเซลลูโลส เช่น ถั่ว ใผ่ ฟางข้าว เป็นต้น ส่วนพลาสติกที่ใช้ อาจเป็นเทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) หรือเป็นเทอร์โมเซต เช่น อีพอกซีเรซิน (Epoxy Resin) ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic Resin) เป็นต้น ทั้งส่วนของเส้นใยไม้และพลาสติกถูกผสมแล้วนำมาผ่านกระบวนการขึ้นรูปออกมาเป็นชิ้นงานที่ต้องการ วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้สามารถขึ้นรูปเป็นของแข็งหรือลักษณะที่มีรูพรุนภายในได้ สำหรับวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้

ที่มีปริมาณเซลลูโลสถึง 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับไม้จริงและสามารถใช้กับเครื่องมือต่างๆ ของไม้ได้เช่นเดียวกัน [3]

2.1.2 พอลิพรอพิลีน

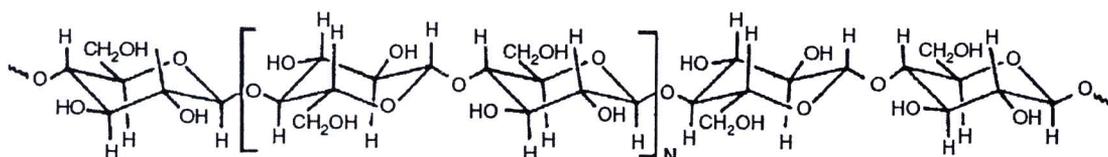
พอลิพรอพิลีนเป็นของแข็ง ไม่มีสี มีทั้งโปร่งใสและโปร่งแสง ผิวเป็นมันเงา สมบัติโดยทั่วไปของผลิตภัณฑ์ทนต่อการแปรรูปด้วยความร้อน ทนต่อแรงดึง แรงกระแทก ทรงรูปดี ผิวแข็งไม่มีแนวโน้มของการสึกกร่อน ไม่ดูดซึมน้ำ และเปราะที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส ด้านสมบัติทางเคมีนั้นทนกรดอ่อน ด่างอ่อน ทนต่อแอลกอฮอล์ เอสเทอร์ คีโตน อีเทอร์ น้ำมันเครื่องและไขมัน ได้จำกัด ไม่ทนต่อกรดแก่ ด่างแก่ คลอรีน เททไฮโดรคาร์บอน เบนซอลและเบนซีน ใช้งานที่อุณหภูมิสูงถึง 120-130 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพอลิพรอพิลีน ได้แก่ ก่อสร้างบรรจุอาหาร ของเล่นเด็ก โคมไฟเทียม เครื่องใช้ในบ้าน (เช่น ถัง กระจาด อ่าง ตะกร้า เป็นต้น) ชิ้นส่วนทางไฟฟ้า ถูบปุย หมวกกันน็อก สันรองเท้าสตรี พรหมและแผ่นรองพรหม ผ้าใบกันน้ำ เชือก สายรัดบรรจุภัณฑ์ [4] ในส่วนของการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์นั้น สมบัติการไหลของพอลิพรอพิลีนเป็นส่วนช่วยสำคัญในการตัดสินใจเลือกใช้พอลิพรอพิลีนให้เหมาะสมกับกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ โดยค่า Melt Flow Index (MFI) เป็นข้อมูลที่กำหนดกระบวนการขึ้นรูปขึ้นงาน เช่นการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดเข้าแม่พิมพ์ (Injection Molding) ควรใช้พอลิเมอร์ที่ไหลได้ง่าย เพราะทำให้พอลิเมอร์ไหลเข้าเต็มแม่พิมพ์ได้ง่าย และไม่ต้องใช้ความดันสูงในการฉีด (ค่า Melt Flow Index อยู่ในช่วง 10-20 กรัมต่อ 10 นาที ตามมาตรฐาน ASTM D 1238 ที่ 2.16 กิโลกรัม /230 องศาเซลเซียส) หรือการขึ้นรูปเป็นถุงพลาสติกหรือแผ่นฟิล์มต่าง ๆ นั้น ต้องการพอลิเมอร์ที่มีความเหนียว (Film grade) เพราะถ้าเหลวเกินไปจะไม่สามารถเป่าขึ้นรูปได้ [4] ตัวอย่างพอลิพรอพิลีนเกรดการค้าจากบริษัท IRPC Public Co., Ltd. (Thailand) แบ่งเป็นเกรดต่างๆ ตามลักษณะการใช้งานได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างพอลิพรอพิลีนเกรดการค้าแบ่งตามลักษณะการใช้งาน

เกรด	ลักษณะการใช้งาน	Melt Flow Index (g/10 min)
1102H	Extrusion Blow Molding	2
1140H	Extrusion Sheet	2
1100NK	Injection Molding	11
1125NA	Cast Film	11
1100RC	Injection Blow Molding For Thin Wall Part	20

2.1.3 จี้เลื่อยไม้ (Wood Sawdust)

จี้เลื่อยไม้เป็นสารตัวเติม (Filler) หรือสารเสริมแรงประเภทสารอินทรีย์ หาได้ง่ายจากธรรมชาติ มีปริมาณมาก และมีราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์ จึงมีการนำจี้เลื่อยไม้ไปใช้เป็นสารเสริมแรงหรือใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อลดต้นทุน เป็นการปรับปรุงความสามารถการขึ้นรูปและสมบัติของผลิตภัณฑ์เพื่อการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติก โดยทำหน้าที่เสริมแรงให้แก่ผลิตภัณฑ์ ซึ่งสมบัติของผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของเส้นใยที่นำมาใช้ รวมถึงองค์ประกอบอื่นๆ เช่น ความชื้น องค์ประกอบหลักของเส้นใยธรรมชาติเป็นเซลลูโลส ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharides) มีอยู่ประมาณ 40-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไม้แห้ง โมเลกุลของเซลลูโลสมีลักษณะเป็นพอลิเมอร์แบบเส้นตรง โครงสร้างประกอบด้วย Anhydroglucopyranose เป็นหน่วยของโครงสร้าง เชื่อมต่อกันด้วย Glycosidic Bond จัดเรียงต่อกันเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 2.1 ส่วนองค์ประกอบอื่นๆ ได้แก่ เฮมิเซลลูโลส (ประมาณ 20-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ลิกนิน (ประมาณ 20-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และสารประกอบอื่นๆ โดยเส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิดมีอัตราส่วนผสมระหว่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ที่แตกต่างกันและสามารถเปลี่ยนแปลงไปได้ตามอายุ สถานที่เพาะปลูก สภาพอากาศ และสภาพดิน [5-8] สมบัติสำคัญของเส้นใยธรรมชาติมี 3 ด้าน ดังแสดงรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเซลลูโลส [7]

- สมบัติทางกายภาพของเส้นใยธรรมชาติ

โดยทั่วไปไม้มีความหนาแน่นของเนื้อไม้อยู่ที่ประมาณ 1.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความหนาแน่นของไม้มีผลต่อสมบัติเชิงกล เช่น การคดงอ ความแข็งแรงต่อการกระแทก ความแข็ง เป็นต้น ซึ่งปกติแล้วไม้ที่มีเนื้อแน่นหรือความหนาแน่นมากมีความแข็งแรงมากกว่าไม้ที่มีความหนาแน่นต่ำ ไม้แห้งโดยทั่วไปประกอบด้วยส่วนของเนื้อไม้และช่องว่างภายในโครงสร้างไม้ ประมาณ 33.4 และ 66.6 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตามลำดับ เนื่องจากไม้เป็นวัสดุที่ชอบน้ำ ดังนั้นจึงสามารถดูดซับน้ำได้ ปริมาณของน้ำที่ดูดซับไว้ขึ้นกับปริมาณของส่วนที่ไม่ใช่ผลึกในไม้ และปริมาณช่องว่างในเส้นใย นอกจากนี้ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิก็เป็นปัจจัยที่มีส่วนสำคัญต่อปริมาณความชื้นในไม้ [5-7]

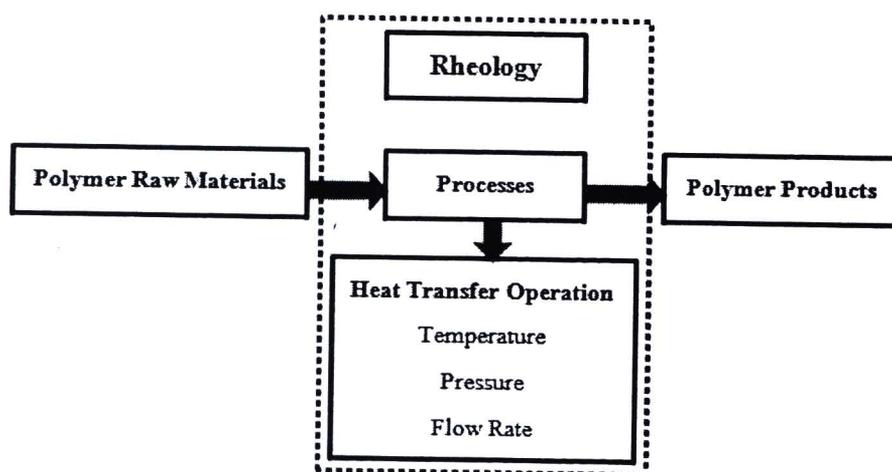
- สมบัติทางความร้อนของเส้นใยธรรมชาติ

โครงสร้างทางเคมีของไม้เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งมีผลกระทบต่อการใช้งาน การเปลี่ยนแปลงทางเคมีขึ้นอยู่กับระดับความร้อนและระยะเวลาการได้รับความร้อน การเปลี่ยนแปลงทางเคมีในที่นี้คือการสลายตัวของไม้ เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมากเมื่อไม้ได้รับอุณหภูมิมากกว่า 200 องศาเซลเซียส การสลายตัวของเซลลูโลสประกอบด้วยปฏิกิริยาต่างๆ เช่น ปฏิกิริยาการระเหยออกของน้ำ (Dehydration reaction) ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis reaction) เป็นต้น การสลายตัวของเซลลูโลสที่ถูกเร่งให้เกิดเร็วขึ้นเมื่อมีน้ำกรด และออกซิเจน ในส่วนการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินนั้นเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วง 200-260 องศาเซลเซียส และ 225 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยไม้เกิดการสลายตัวเป็นสารที่สามารถระเหยได้อย่างสมบูรณ์เมื่อได้รับความร้อนมากกว่า 450 องศาเซลเซียส และเถ้าที่สามารถถูกกระตุ้นให้เกิดการออกซิไดส์เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และไอน้ำ [5-9]

- สมบัติทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ

ไม้เป็นวัสดุที่มีความต้านทานต่อการออกซิไดส์ เช่นกรดไนตริก และสารละลายอัลคาไลน์ต่ำ แต่มีสมบัติทนต่อการอินทรีย์ที่ดีเยี่ยมเหนือกว่าเหล็ก คอนกรีต ยางและพลาสติกบางชนิด กรดอินทรีย์ชนิดอ่อน เช่น กรดอะซิติก มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของไม้้น้อยมาก ด้วยเหตุนี้ไม้จึงถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในงานโครงสร้างของอุตสาหกรรมเคมี ซึ่งโดยทั่วไปไม้เนื้ออ่อนมีสมบัติความทนต่อการมากกว่าไม้เนื้อแข็ง ทั้งนี้เนื่องจากไม้เนื้ออ่อนมีปริมาณลิกนินมากกว่า [9]

2.2. การศึกษาสมบัติการไหล (Rheology)



รูปที่ 2.2 กระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์ (Polymer processing) [10]

การศึกษาสมบัติการไหล คือการศึกษาการเปลี่ยนรูป (Deformation) และการไหล (Flow) ของวัสดุที่อยู่ในสถานะไหลได้ [11] วัสดุที่สามารถไหลได้เมื่อถูกแรงกระทำหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามภาวะที่ใส่เรียกว่าของไหล (Fluid) เช่น พอลิเมอร์หลอมเหลว (Polymer melts) ตัวอย่างการศึกษาสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ขณะหลอมเหลวพบว่า ในการขึ้นรูปที่ใช้พอลิเมอร์ชนิดเดียวกัน โดยกำหนดสภาวะการผลิต ดังนี้ อุณหภูมิ ความดันและความเร็วในการผลิตเท่ากัน แต่ใช้กระบวนการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติแตกต่างกัน จึงเป็นไปได้ว่าพฤติกรรมกรไหลมีผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์สุดท้าย (Final products)

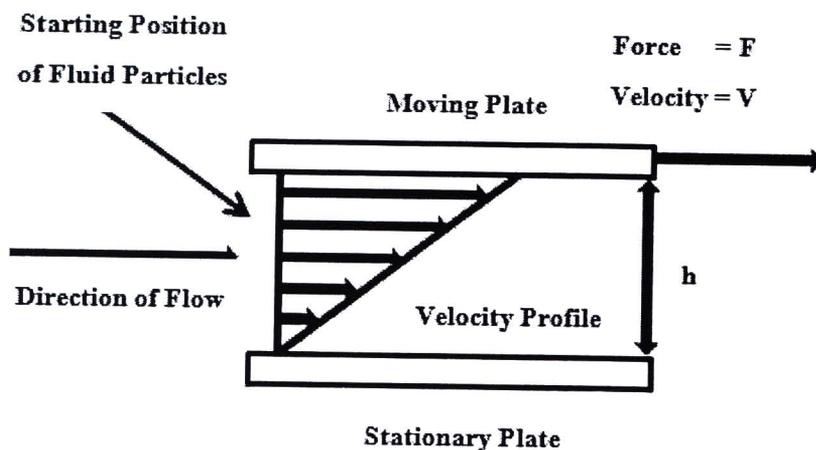
การศึกษาสมบัติการไหลเป็นการศึกษากระบวนการผลิต (Processes) หรือการศึกษาขณะที่พอลิเมอร์อยู่ในสถานะหลอมเหลว [12] ซึ่งกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน ได้แก่ วัตถุดิบพอลิเมอร์ (Polymer raw materials) กระบวนการผลิต และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิต (Polymer products) แสดงดังรูปที่ 2.2 สิ่งสำคัญของกระบวนการผลิต โดยทำให้วัตถุดิบในรูปของแข็งหรือเม็ดพลาสติกเกิดการหลอมด้วยกระบวนการทางความร้อน (Heat transfer operation) เช่น กระบวนการอัดรีดขึ้นรูป กระบวนการฉีดขึ้นรูป หรือกระบวนการอื่นๆ ที่สามารถให้ความร้อนและหลอมเม็ดพลาสติกได้ โดยตั้งสภาวะการผลิตที่มีอิทธิพลต่อสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน และอัตราการไหล (Flow rate)

2.2.1 รูปแบบการไหล

การให้ความร้อนจะทำให้พอลิเมอร์เกิดการหลอมเหลวและส่งผลให้เกิดการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวขึ้นในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป โดยทั่วไปพอลิเมอร์มีลักษณะรูปแบบการไหลตามการเสียดรูป 2 แบบ คือการไหลแบบเฉือน (Shear flow) และการไหลแบบยืดดึง (Elongation flow)

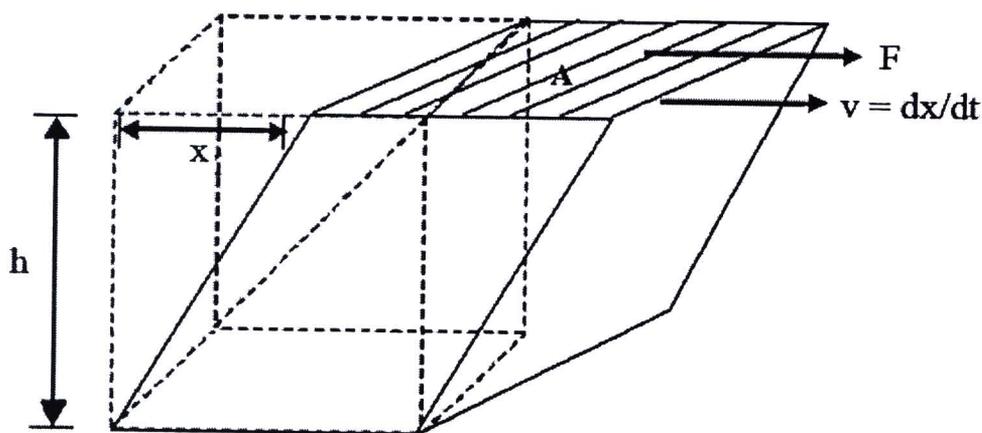
2.2.1.1 การไหลแบบเฉือน

การไหลแบบเฉือน คือการไหลของของไหลในรูปแบบที่เกิดจากแรงเฉือน โดยมีผนังหรือผิวการไหล (Plate หรือ Surface) เข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือการไหลที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแผ่นประกบคู่ด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน (Drag flow) แผ่นประกบคู่ที่มีพอลิเมอร์หลอมเหลวอยู่ระหว่างกลางมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน ทำให้พอลิเมอร์ที่ไหลอยู่ระหว่างแผ่นประกบมีความเร็วที่แตกต่างกัน โดยความเร็วสูงสุดของพอลิเมอร์อยู่ติดกับแผ่นเคลื่อนที่ (Moving plate) และความเร็วลดลงเมื่อเข้าไปใกล้แผ่นที่อยู่กับที่ (Fixed plate) แสดงดังรูปที่ 2.3 ตัวอย่างของการไหลรูปแบบนี้ได้แก่ การไหลของพอลิเมอร์ในช่วงเกลียวหอนของเครื่องอัดรีด



รูปที่ 2.3 การไหลที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแผ่นประกบคู่ด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน [13]

ตัวแปรสำคัญของการไหลรูปแบบนี้ คือ ค่าความเค้นเฉือน (Shear stress, τ) ที่เกิดขึ้นตลอดทั้งระนาบของแผ่นประกบมีค่าเท่ากัน โดยไม่ขึ้นกับระยะห่าง (h) ซึ่งการคำนวณค่าความเค้นเฉือนของการไหลรูปแบบนี้ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.4 ที่แสดงการเสียรูปของวัสดุเนื่องจากแรงเฉือน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1 ส่วนค่าความเครียดเฉือน (Shear strain, γ_s) และอัตราการเปลี่ยนความเครียดเฉือน (Shear strain rate, $\dot{\gamma}_s$) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ



รูปที่ 2.4 การเสียรูปของวัสดุเนื่องมาจากแรงเฉือน [13]

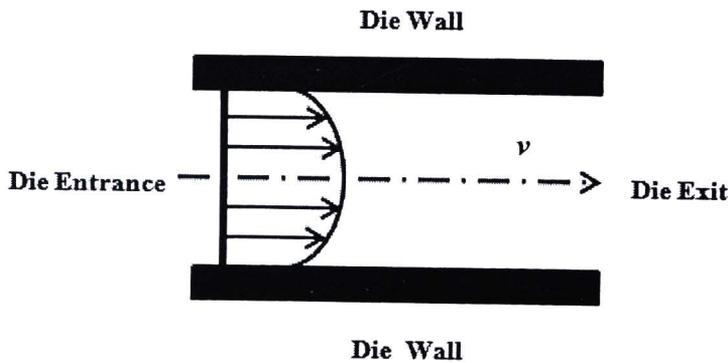
$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

$$\dot{\gamma}_s = \frac{x}{h} \quad (2.2)$$

$$\dot{\gamma}_r = \frac{1}{h} \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{v}{h} \tag{2.3}$$

- เมื่อ F = แรงที่กระทำบนระนาบพื้นที่หน้าตัด (A) ในเวลา (t) (นิวตัน)
- h = ระยะห่างระหว่างแผ่นประกบคู่ (เมตร)
- x = ระยะเคลื่อนที่ของวัสดุตามแนวแรง (เมตร)

นอกจากนี้ยังมีรูปแบบการไหลแบบเฉือนอีกแบบหนึ่ง คือการไหลในท่อที่มีความแตกต่างของความดัน (Pressure flow) โดยพอลิเมอร์ไหลออกจากด้านที่มีความดันสูงไปยังด้านที่มีความดันต่ำกว่า ซึ่งแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมีค่าสูงสุดที่บริเวณผนังท่อ และต่ำสุดที่กลางท่อ ส่วนความเร็วมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งกลางท่อและต่ำสุดที่ตำแหน่งติดกับผนังท่อดังรูปที่ 2.5 ตัวอย่างของการไหลรูปแบบนี้ได้แก่ การไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวในแม่พิมพ์ การไหลในหัวฉีดรูป เป็นต้น

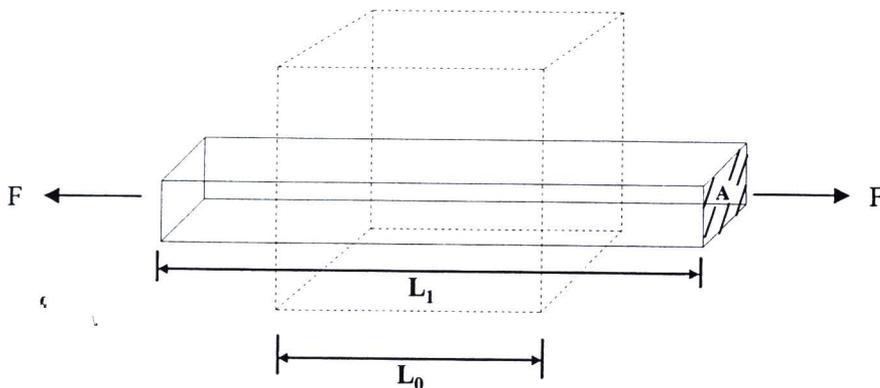


รูปที่ 2.5 การไหลที่เกิดจากความแตกต่างของความดันภายในท่อ [13]

2.2.1.2 การไหลแบบยืดดึง

การไหลแบบยืดดึงเป็นการไหลที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับแรง และมีแรงมากระทำกับพอลิเมอร์ทำให้เกิดการไหลยืดออกจากกัน แรงที่เกิดขึ้นเป็นแรงดึงที่ทำให้พื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนไป ซึ่งการเสีรูปร่างของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลแสดงดังรูปที่ 2.6 การไหลแบบยืดดึงนี้เรียกว่าการไหลด้วยผิวอิสระ (Free surface flow) เนื่องจากไม่ต้องอาศัยผนังระหว่างเกิดการไหล ในกระบวนการผลิตพอลิเมอร์หลอมเหลวที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของเส้นกราฟการไหล ลักษณะการเสีรูปร่างแบบยืดดึงมีความสำคัญมากเนื่องจากอาจเกิดการเปลี่ยนทิศทางการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว (เช่น การไหลขวางที่เกิดขึ้นในการไหลในแม่พิมพ์) หรือการเปลี่ยนแปลงขนาดช่องทางการไหลจากขนาดใหญ่ไปช่องทางการไหลขนาดเล็ก (เช่น การไหลของพอลิเมอร์ หลอมเหลวจาก

ห้องหลอมเหลวสู่หัวขึ้นรูปในกระบวนการอัดรีด และการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวบริเวณหัวฉีดในกระบวนการขึ้นรูปแบบฉีด) ลักษณะการเสียรูปแบบยืดดึงของพอลิเมอร์เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตพอลิเมอร์หลายๆ ประเภท เช่น การผลิตฟิล์มโดยกระบวนการเป่า เป็นต้น



รูปที่ 2.6 ลักษณะการเสียรูปพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลแบบยืดดึง [13]

2.2.2 ประเภทของของไหล

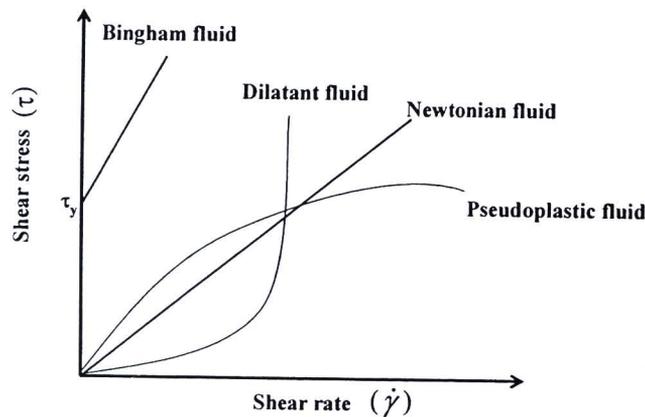
เมื่อพิจารณาของไหลที่มีรูปแบบของการไหลแบบเฉือน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ

2.2.2.1 ของไหลที่ขึ้นกับเวลา (Time Dependent Fluid) คือของไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นเฉือนของของไหล เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างขณะไหลหรือการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลพอลิเมอร์เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป ณ อัตราเฉือนหนึ่งๆ เช่น ของไหลที่มีสารแขวนลอยเป็นอนุภาคของของแข็ง ของไหลในกลุ่มนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ของไหลไทโซโทรปิก (Thixotropic fluid) และของไหลรีโอเพคติก (Rheopectic fluid) โดยของไหลไทโซโทรปิกจะมีค่าความเค้นเฉือนลดลงเมื่อเวลาเปลี่ยนไปที่อัตราเฉือนและอุณหภูมิคงที่ ตัวอย่างเช่นการกวนน้ำสลัดด้วยอัตราเร็วคงที่ เมื่อเวลาผ่านไปทำให้น้ำสลัดหนืดลดลง (ไหลง่ายขึ้น) ของไหลในกลุ่มนี้ได้แก่ โยเกิร์ต มายองเนส และน้ำสลัด เป็นต้น ในส่วนของของไหลรีโอเพคติกมีสมบัติตรงข้ามกับของไหลประเภทไทโซโทรปิก คือที่อัตราเฉือนและอุณหภูมิคงที่ของไหลจำพวกนี้มีค่าแรงเฉือนเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเปลี่ยนไป ตัวอย่างเช่นการกวนโคลนด้วยอัตราเร็วคงที่ เมื่อเวลาผ่านไปทำให้น้ำโคลนเหนียวมากขึ้นหรือข้นขึ้น (ไหลยากขึ้น) ของไหลในกลุ่มนี้ ได้แก่ น้ำแป้งและโคลน เป็นต้น

2.2.2.2 ของไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลา (Time Independent Fluid) คือของไหลที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นเฉือนของของไหลไปตามเวลา ของไหลประเภทนี้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของของไหลตามค่าอัตราเฉือน โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

ของไหลนิวโตเนียน (Newtonian Fluid)

ของไหลนิวโตเนียนเป็นของไหลที่มีความหนืดคงที่ และไม่เปลี่ยนแปลงตามอัตราเฉือน (Shear rate, $\dot{\gamma}$) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนและอัตราเฉือนเป็นเส้นตรงแสดงในรูปที่ 2.7 พฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียนเกิดขึ้นกับของไหลที่มีน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) ต่ำ เช่น น้ำ และน้ำมัน เป็นต้น



รูปที่ 2.7 พฤติกรรมการไหลของของไหลนิวโตเนียนและนอนนิวโตเนียน (ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress กับ Shear rate) [13]

ของไหลนอนนิวโตเนียน (Non-Newtonian Fluid)

ของไหลนอนนิวโตเนียนเป็นของไหลที่มีความหนืดขึ้นกับอัตราเฉือน แต่ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนไม่เป็นเส้นตรงตามรูปที่ 2.8 โดยมีการแบ่งประเภทของของไหลนอนนิวโตเนียนออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

ของไหลบิงแฮม (Bingham Fluid) เป็นของไหลที่มีพฤติกรรมคล้ายกับของไหลนิวโตเนียนแต่ไม่เกิดการไหลเมื่อเริ่มเกิดความเค้นเฉือน หลังจากให้ความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้นจนถึงความเค้นเฉือนคราก (Yield stress, τ_y) ของไหลเริ่มเกิดการไหล ค่าความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนและอัตราเฉือนเป็นเส้นตรงตามรูปที่ 2.7 ตัวอย่างของไหลที่มีพฤติกรรมแบบนี้ได้แก่ สี ยาสีฟัน ซอสมะเขือเทศ ช็อคโกแลต เป็นต้น

ของไหลซูโดพลาสติก (Pseudoplastic Fluid) เป็นของไหลที่ค่าความหนืดจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราครีดยืด และความสัมพันธ์ความเค้นเฉือนกับอัตราครีดยืดที่ไม่เป็นเส้นตรงตามรูปที่ 2.8 ตัวอย่างของไหลได้แก่ หมึกพิมพ์ เลือด พอลิเมอร์หลอมเหลว เป็นต้น สาเหตุที่ค่าความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวลดลงเมื่อเพิ่มอัตราครีดยืด เนื่องจากการเพิ่มอัตราครีดยืดทำให้การเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุลเกิดการคลายตัวและถูกยืดออกทำให้เกิดการไหลได้ดีขึ้น ส่งผลให้ความหนืดลดลง [12] ความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนและอัตราครีดยืดของของไหลซูโดพลาสติกเป็นไปตามสมการยกกำลัง (Power law equation) ดังนี้

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (2.4)$$

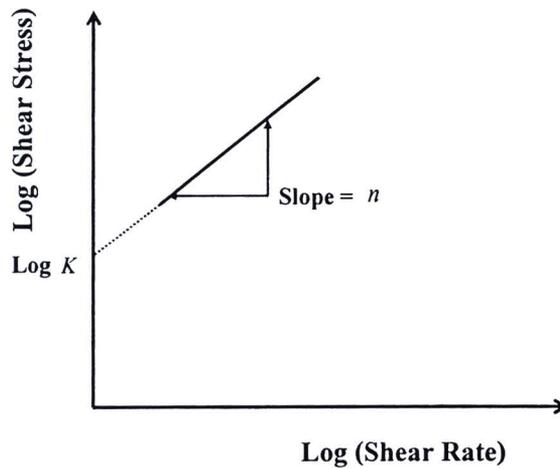
เมื่อ K = ค่าคงที่การไหล (Power law consistency)
 n = ค่าดัชนีการไหล (Power law index)

ค่า K บ่งบอกถึงความหนืดของพอลิเมอร์ การเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุล ณ ขณะที่ยังไม่มีการไหล ส่วนค่า n บ่งบอกถึงลักษณะพฤติกรรมการไหลเปรียบเทียบกับกรไหลของของไหลนิวโตเนียน พอลิเมอร์หลอมเหลวที่แสดงคุณสมบัติเป็นซูโดพลาสติกมี n น้อยกว่า 1 เสมอ ค่า K และค่า n สามารถหาได้จากการ Take log ในสมการที่ 2.4 ดังนี้

$$\log \tau = \log K + n \log \dot{\gamma} \quad (2.5)$$

นำความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.5 มาสร้างกราฟหาความสัมพันธ์ของ $\log \tau$ และ $\log \dot{\gamma}$ ที่จุดตัดแกน Y หรือแกน $\log \tau$ ได้ค่า $\log K$ ความชันที่ได้เป็นค่า n ตามรูปที่ 2.8





รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของ Log (Shear stress) และ Log (Shear rate) [13]

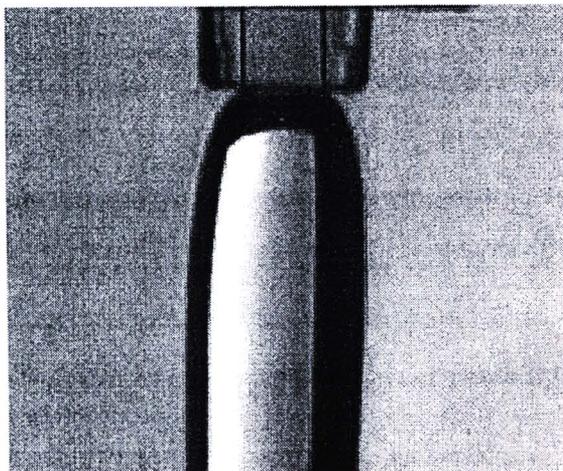
ของไหลไดลาแทนต์ (Dilatant Fluid) เป็นของไหลที่มีพฤติกรรมตรงกันข้ามกับซูโดพลาสติก กล่าวคือค่าความหนืดเพิ่มขึ้นตามอัตราเฉือน ตัวอย่างของของไหลที่มีพฤติกรรมแบบนี้ได้แก่ ทราบเปียก และน้ำแป้งมันสำปะหลัง เป็นต้น

2.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสมบัติทางอีลาสติกของพอลิเมอร์หลอมเหลว

ในกระบวนการอัดรีด เมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวได้รับแรงกระทำเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทั้งแบบไม่สามารถคืนกลับรูปร่างเดิมได้ (Plastic deformation) และ สามารถคืนกลับสู่รูปเดิมได้ (Elastic deformation) ซึ่งลักษณะการเสียรูปแบบอีลาสติกนี้สามารถสะสมไว้ในรูปของพลังงาน โดยพลังงานที่สะสมบางส่วนนี้สามารถปลดปล่อยออกมาได้ โดยการเสียรูปแบบอีลาสติกขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายประการ เช่น ปริมาณและอัตราของแรงที่กระทำ ระยะเวลาที่พอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ชนิดและโครงสร้างของพอลิเมอร์หลอมเหลวนั้นๆ รวมทั้งอุณหภูมิ สำหรับพลังงานที่สะสมนั้น เรียกว่าพลังงานสะสมแบบอีลาสติก (Storage elastic energy) ซึ่งเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญในการกำหนดรูปร่างและลักษณะของพอลิเมอร์ขณะที่ไหลออกมานอกหัวขึ้นรูปตามพฤติกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องได้แก่ การบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Die swell) ความแตกต่างค่าความเค้นเฉือน (Normal stress differences) การเกิดรอยฟิมฉลามบนผิวของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Shark skin) และการเสียรูปทรงของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Melt fracture หรือ Melt distortion) ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวมีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตในแง่ของการกำหนดขนาดและรูปร่างของผลิตภัณฑ์ และตัวกำหนดอัตราและกำลังการผลิตด้วย

2.3.1 การบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลว

เมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวถูกอัดรีดออกมาที่บริเวณทางออกของหัวขึ้นรูป (Die exit) ขนาดของพื้นที่หน้าตัดของพอลิเมอร์มีขนาดใหญ่กว่าขนาดพื้นที่หน้าตัดของหัวขึ้นรูป ซึ่งเรียกพฤติกรรมนี้ว่าการบวมตัว (Extrudate swell) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ในส่วนของการศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์มีประโยชน์ต่อกระบวนการผลิต โดยเฉพาะกระบวนการอัดรีดพอลิเมอร์อย่างมาก ดังนั้นการออกแบบหัวขึ้นรูปต้องคำนึงถึงพฤติกรรมและอัตราการบวมตัวเพื่อที่สามารถได้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดและรูปร่างตรงตามความต้องการ ซึ่งการคำนวณอัตราการบวมตัว (Extrudate swell ratio, B) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.6



รูปที่ 2.9 พฤติกรรมบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวเมื่อไหลออกจากหัวขึ้นรูป [14]

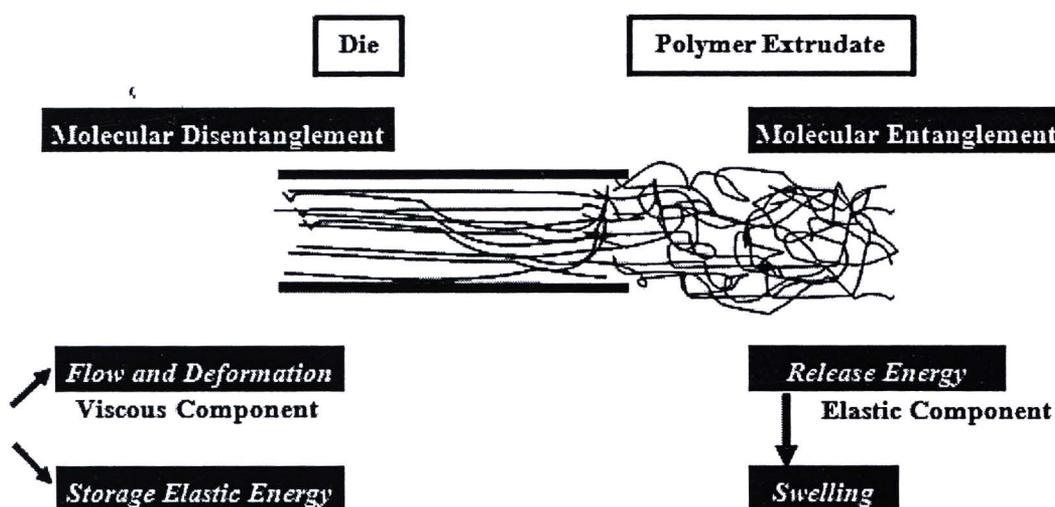
$$B = \frac{D_{exit}}{D_d} \quad (2.6)$$

เมื่อ	D_d	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของหัวขึ้นรูป (มิลลิเมตร)
	D_{exit}	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่บริเวณทางออกของหัวขึ้นรูป (มิลลิเมตร)

พฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวนี้ มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเกิดการบวมตัวของพอลิเมอร์ ดังนี้

- **ความเป็นอีลาสติกของพอลิเมอร์ (Elastic Effect)**

ในขณะที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลอยู่ภายในหัวขึ้นรูปถูกแรงเฉือนที่เกิดจากการไหล ส่งผลให้เกิดการคลายตัวของสายโซ่โมเลกุลที่เกี่ยวข้องพันกัน (Molecular disentanglement) และมีการสะสมพลังงานบางส่วนไว้ ซึ่งพลังงานส่วนนี้ถูกปลดปล่อยออกเมื่อพอลิเมอร์ไหลออกมา บริเวณทางออกหัวขึ้นรูปเพื่อใช้ในการคืนสภาพของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Recoiling) กลับเข้าสู่สถานะที่โมเลกุลของพอลิเมอร์มีวนพันกัน (Molecular entanglement) ดั้งเดิม และส่งผลให้เกิดการบวมตัวในที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ทฤษฎีการบวมตัวเนื่องด้วยความเป็นความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ [10]

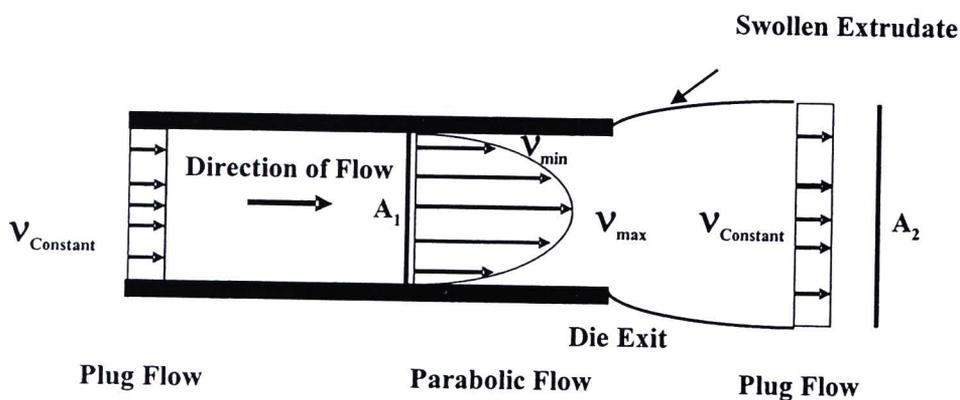
- **ความทรงจำของพอลิเมอร์ (Memory Effect)**

เมื่ออัดรีดพอลิเมอร์ สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์หลอมเหลวมีการขดพันกันขณะที่ไหลในกระบอกหลอมเหลว แต่เมื่อผ่านเข้าสู่หัวขึ้นรูป สายโซ่โมเลกุลมีการคลายตัว (Uncoiling) และเกิดการจัดเรียงตัว (Molecular orientation) แต่เมื่อไหลออกจากหัวขึ้นรูปสายโซ่โมเลกุลยังคงจดจำรูปแบบการขดพันกัน ดังนั้นโมเลกุลพอลิเมอร์หลอมเหลวจึงคืนสภาพของสายโซ่โมเลกุล ทำให้เกิดการบวมตัวเกิดขึ้นเมื่อไหลออกมาจากหัวขึ้นรูป ทั้งนี้เนื่องจากระยะเวลาในการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวในหัวขึ้นรูป (Processing time, t_p) ก็ระยะเวลาที่พอลิเมอร์ใช้ในการคลายตัว (Relaxation time, t_r) ซึ่ง $t_r = \frac{\eta}{E}$ โดยที่ η = ความหนืด และ E = ยั่งมอดูลัส (Young's modulus) ถ้า $t_r < t_p$ แสดงถึงการเกิดการบวมตัวที่น้อย แต่ถ้า $t_r > t_p$ มีการเกิดการบวมตัวที่มาก เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการคลายตัวของสายโซ่โมเลกุล

ต้องการเวลาที่ยาวนาน ดังนั้นความสามารถของความทรงจำในรูปแบบการหดตัวหรือระยะเวลาในการคลายตัวของพอลิเมอร์มีน้อยลงทำให้เกิดการบวมตัวที่มากขึ้น

- การเปลี่ยนแปลงรูปร่างการไหลของพอลิเมอร์ (Velocity Profile)

การอธิบายการเกิดปรากฏการณ์บวมตัวในแง่ของการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลภายในหัวขึ้นรูป เทียบกับรูปแบบการไหลที่บริเวณทางออกหัวขึ้นรูป โดยรูปแบบการไหลภายในหัวขึ้นรูปเป็นแบบพาราโบลา ในขณะที่รูปแบบการไหลที่ปากหัวขึ้นรูปมีลักษณะเป็นแบบปลั๊ก ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลระหว่างสองรูปแบบนี้ ทำให้เกิดความเค้นเฉือนสะสมมากขึ้น โดยเฉพาะบริเวณใกล้ผนังหัวขึ้นรูป (ทั้งนี้เนื่องจากความเร็วของการไหลบริเวณนี้จากระบบการไหลแบบพาราโบลา มีค่าต่ำกว่าความเร็วของการไหลบริเวณตรงกลางหัวขึ้นรูป ดังนั้นเพื่อสร้างรูปแบบการไหลแบบปลั๊ก ของไหลบริเวณผนังต้องเร่งความเร็วการไหลมากกว่าของไหลบริเวณกึ่งกลางหัวขึ้นรูป จึงทำให้เกิดความเค้นเฉือนสูงขึ้น) และความเค้นเฉือนสะสมส่งผลให้เกิดการบวมตัวของพอลิเมอร์ เมื่อไหลออกมาที่บริเวณทางออกของหัวขึ้นรูป

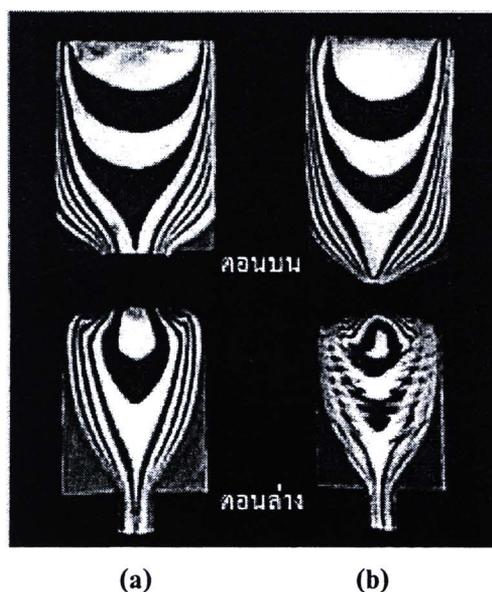


รูปที่ 2.11 ทฤษฎีการบวมตัวของพอลิเมอร์เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างการไหลของพอลิเมอร์ [13]

ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวประกอบไปด้วย ระยะเวลาการไหล (Residence time) ความยาวของหัวขึ้นรูป (Die length) อัตราครีดยืดเฉือน อุณหภูมิของหัวขึ้นรูป (Die temperature) สัดส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูป (Contraction ratio, L/D) ประเภทของหัวขึ้นรูป (Die profile) และรูปแบบการไหล (Flow pattern)

โดยการศึกษาการไหลในกระบวนการอัดรีด เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวกับปริมาณการบวมตัว ซึ่งพบว่าทั้งสองตัวแปรมีความสัมพันธ์กัน สามารถ

อธิบายได้ในเชิงปริมาณของความเป็นอีลาสติคดังรูปที่ 2.12 ซึ่งแสดงรูปแบบการไหลของยางธรรมชาติในเครื่องคาปิลารีรีโอมิเตอร์แบบสองตอน โดยตอนล่างใช้หัวขึ้นรูปแบบกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ทั้ง (a) และ (b) ส่วนตอนบนใช้หัวขึ้นรูปแบบกากบาท (Crossed) สำหรับ (a) และหัวขึ้นรูปแบบเทเปอร์กลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร สำหรับ (b) และวัดการบวมตัวของพอลิเมอร์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบที่มีรูปแบบการไหลแบบซับซ้อนมากกว่า (b) (เกิดจากการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดการไหลที่สัมพันธ์กับความเร็วการไหลในหัวขึ้นรูปตอนบน เมื่อเข้าสู่หัวขึ้นรูปตอนล่าง) มีแนวโน้มทำให้ปริมาณการบวมตัวน้อยกว่าการไหลในระบบที่มีรูปแบบการไหลธรรมดา โดยที่ (a) มีการบวมตัวเท่ากับ 29% และ (b) มีการบวมตัวเท่ากับ 40% ซึ่งการไหลในรูปแบบที่ซับซ้อนส่งผลให้พอลิเมอร์มีแนวโน้มที่ไหลอยู่ในกระบอกหลอดนานกว่า หรืออีกนัยหนึ่งพอลิเมอร์หลอมเหลวมีระยะเวลาในการไหลที่ยาวนานกว่า ทำให้ปริมาณความเป็นอีลาสติกลดน้อยลงและสัดส่วนการบวมตัวลดลงด้วย

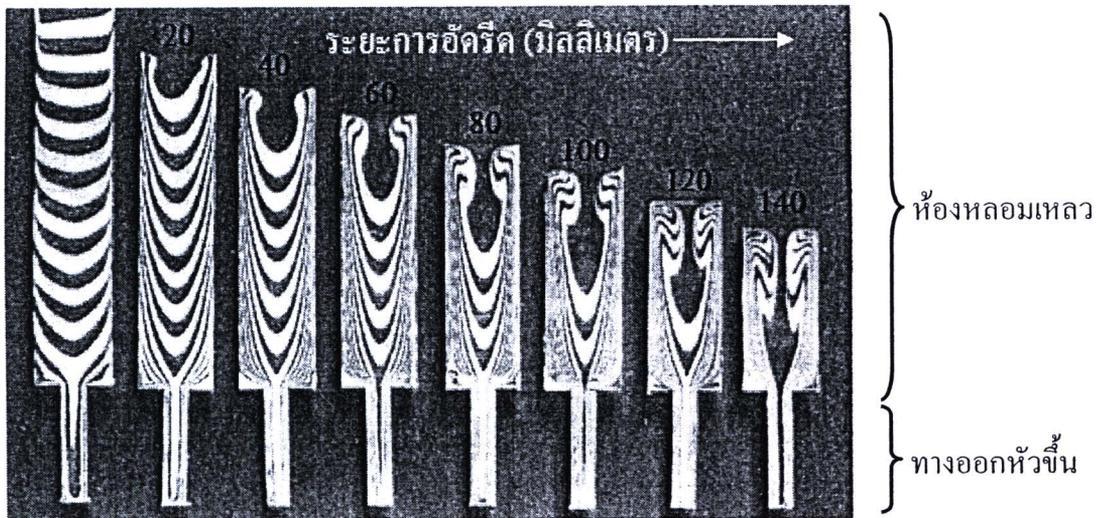


รูปที่ 2.12 รูปแบบการไหลของยางธรรมชาติขณะไหลในเครื่องคาปิลารีรีโอมิเตอร์

(a) รูปแบบการไหลธรรมดา (b) รูปแบบการไหลซับซ้อน [15]

โดยทั่วไปแล้วรูปแบบการไหลที่น่ามาวิเคราะห์เชื่อมโยงกับสมบัติการไหลถูกสมมุติให้มีความสมบูรณ์และมีรูปร่างคงที่ตลอดระยะทางการไหล (Constant flow pattern) ตั้งแต่ทางเข้าจนถึงทางออก หัวขึ้นรูปซึ่งรูปแบบการไหลที่สมบูรณ์เกิดจากการฟอร์มตัวของเส้นทางการไหล (Flow path) แต่ละเส้นทาง หรือที่เรียกว่าบาวนด์ลารี (Boundary layers) ซึ่งเชื่อว่ารูปแบบการไหลที่สมบูรณ์เกิดขึ้นเมื่อความหนาบาวนด์ลารีมีค่าสูงสุด คือไม่เกินระยะของรัศมีของท่อการไหล และสามารถเกิดขึ้นในระยะทางสั้นๆ ของการไหล ผลการวิจัยได้ศึกษาารูปแบบการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวชนิดต่างๆ

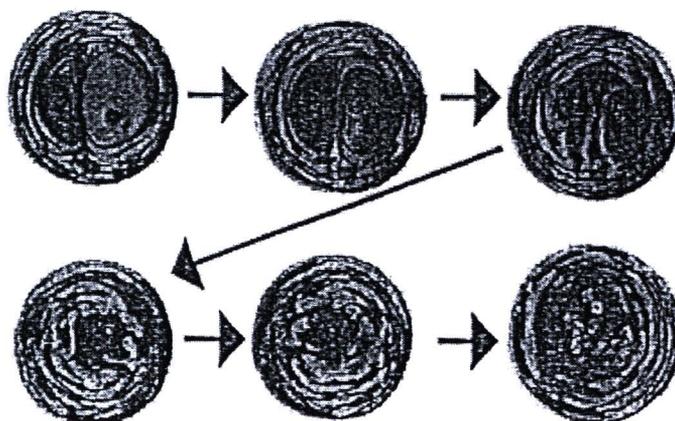
เช่น ขวางธรรมชาติ และเทอร์โมพลาสติก ดังรูปที่ 2.13 เป็นการศึกษารูปแบบการไหลของขวางธรรมชาติตามแนวยาวในห้องหลอมเหลวทรงกระบอกของเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์ ณ ระยะทาง (หรือ เวลา) ในการไหลที่แตกต่างกัน ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการไหลของขวางธรรมชาติเปลี่ยนแปลงไปตามระยะของการอัดรีดหรือเวลาการอัดรีด และไม่มีรูปแบบคงที่สม่ำเสมอ และพบว่า ณ ระยะ หรือเวลาในการอัดรีดหนึ่งๆ รูปแบบการไหลของพอลิเมอร์ในตำแหน่งต่างๆ ตลอดความยาวของห้องหลอมเหลวไม่เหมือนกันอีกด้วย การไหลของพอลิเมอร์เริ่มเปลี่ยนทิศทางในบริเวณตอนบนของห้องหลอมเหลว โดยพอลิเมอร์ในบริเวณนี้ไหลขนานกับหน้าตัดของแท่งจับเคลื่อนและไหลเข้าสู่ศูนย์กลางท่อ



รูปที่ 2.13 รูปแบบการไหลของขวางธรรมชาติในเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์ในระยะการอัดรีดต่างๆ ของแท่งจับเคลื่อน [16]

สำหรับรูปที่ 2.14 สนับสนุนผลการวิจัยในรูปที่ 2.13 โดยแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการไหลของพอลิพรอพิลีนหลอมเหลวที่เกิดขึ้นในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหอนอก (Twin screw extruder) ตลอดความยาวของหัวขึ้นรูป โดยผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าภาพการไหลของพอลิเมอร์ในแต่ละตำแหน่งตลอดความยาวของหัวขึ้นรูป (ภาพหน้าตัดขวางของพอลิพรอพิลีนที่ไหลในหัวขึ้นรูป) ไม่เหมือนกัน จากตัวอย่างผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า สมมุติฐานที่ว่ารูปแบบการไหลของพอลิเมอร์มีความสมบูรณ์ และคงที่ตลอดระยะทางการไหลนั้นไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมการณ์การไหลจริงในทางปฏิบัติ

ทางเข้าหัวขึ้นรูป

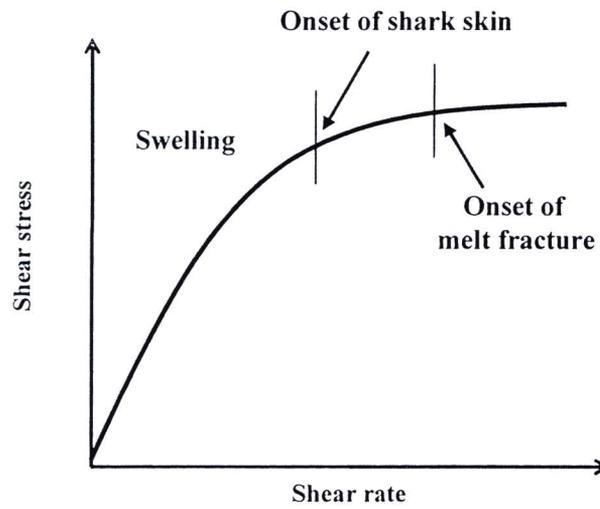


ใกล้ทางออกหัวขึ้นรูป

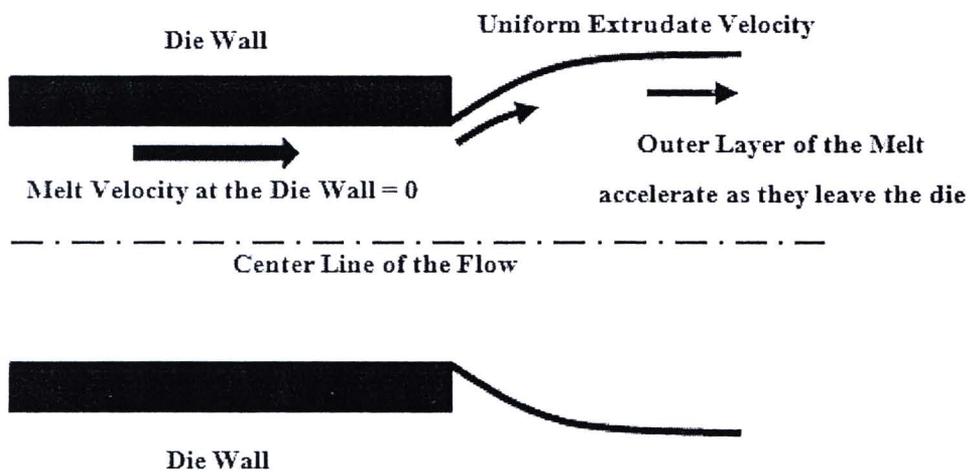
รูปที่ 2.14 รูปแบบการไหลของพอลิเมอร์ที่ติดต่อกันตลอดความยาวของหัวขึ้นรูปในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ [17]

2.3.2 พฤติกรรมการเกิดรอยฟั่นฉลามบนผิวของพอลิเมอร์หลอมเหลว

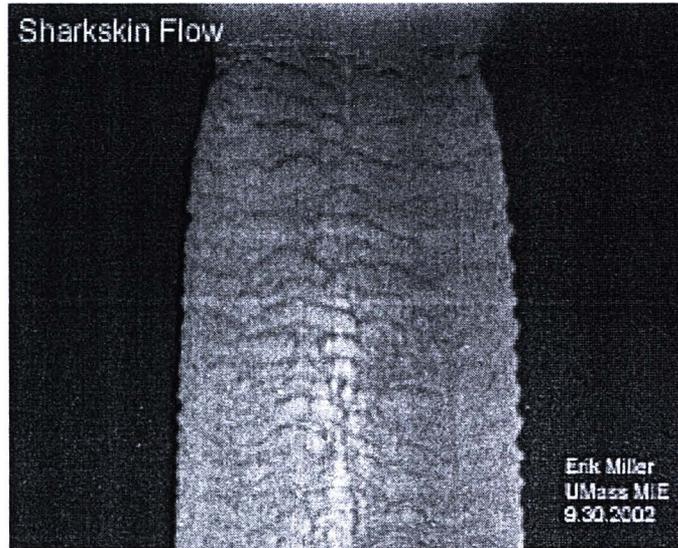
พฤติกรรมการเกิดรอยฟั่นฉลามบนผิวของพอลิเมอร์ หมายถึงการเกิดเป็นรอยริ้วคล้ายฟั่นฉลามบนผิวของพอลิเมอร์ที่ไหลออกมาจากทางออกของหัวขึ้นรูป โดยริ้วรอยที่เกิดขึ้นดังกล่าวมีทิศทางการเกิดตั้งฉากกับทิศทางการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว หากพิจารณารูปที่ 2.15 พบว่าการเกิดริ้วรอยแบบฟั่นฉลามเกิดในสถานะที่มีการบวมตัวค่อนข้างสูง หรือเกิดในตำแหน่งที่มีค่าความเค้นเฉือนและอัตราเครียดเฉือนที่สูงกว่าการเกิดการบวมตัวปกติ ลักษณะและรูปร่างของพอลิเมอร์หลอมเหลวเริ่มไม่ปฏิบัติตามรูปแบบของลักษณะหน้าตัดหัวขึ้นรูป สาเหตุของการเกิดริ้วรอยแบบฟั่นฉลามเกิดจากการพัฒนารูปแบบการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวระหว่างไหลในหัวขึ้นรูป จากการไหลในรูปแบบพาราโบลาขึ้นมาเป็นแบบปลั๊ก รูปที่ 2.16 แสดงภาพการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวในหัวขึ้นรูปและออกจากหัวขึ้นรูปขณะที่พอลิเมอร์กำลังไหลอยู่ในหัวขึ้นรูป ความเร็วในการไหลของพอลิเมอร์บริเวณใกล้ผนังหัวขึ้นรูปซึ่งมีค่าน้อยมาก ต้องเร่งความเร็วในการไหลเพื่อทำให้ไหลในความเร็วเท่ากับความเร็วในการไหลของพอลิเมอร์บริเวณศูนย์กลาง เพื่อจัดรูปแบบการไหลเป็นแบบปลั๊ก การเร่งความเร็วของพอลิเมอร์นี้ส่งผลทำให้เกิดการเสียดสีของสายโซ่โมเลกุลขณะไหล และทำให้เกิดเป็นความเค้นสะสมมากขึ้นบริเวณผนังหัวขึ้นรูป หากความเค้นสะสมเกินจากความต้านทานในการรับแรงดึงของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Melt tensile strength) ทำให้ผิวของพอลิเมอร์เกิดการฉีกขาดขณะสัมผัสการทางออกหัวขึ้นรูป และเกิดเป็นรอยฟั่นฉลามบนผลิตภัณฑ์เมื่อไหลออกมานอกหัวขึ้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 2.17



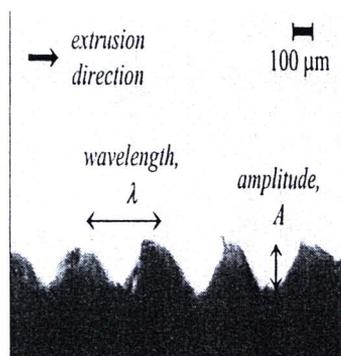
รูปที่ 2.15 การไหลกับพฤติกรรมการบวมตัว การเกิดรอยฟิ้นฉลอมและการเสียรูปทรงของพอลิเมอร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Shear Rate [13]



รูปที่ 2.16 กลไกการเกิดรอยฟิ้นฉลอมบนผิวของพอลิเมอร์ [13]



รูปที่ 2.17 การเกิดรอยฟันฉลามบนผิวของพอลิเมอร์เมื่อไหลออกมาจากหัวขึ้นรูป [18]



รูปที่ 2.18 แอมพลิจูด (Amplitude) และช่วงเวลา (Period or wave length) ของการเกิดรอยฟันฉลามของพอลิเอทิลีน [19]

- เวลาที่พอลิเมอร์ใช้ในการคลายตัว (Relaxation time) [20]

จากรูปที่ 2.18 แสดงความหยابผิวชิ้นงานที่ผ่านการอัดรีดสามารถวัดออกมาในรูปของแอมพลิจูด (W_z , A) และช่วงเวลา (W_s) ซึ่งสามารถวัดในเชิงปริมาณจากผิวชิ้นงานพอลิเมอร์ที่เกิดรอยฟันฉลาม กำหนดหาเวลาที่พอลิเมอร์ใช้ในการคลายตัว (Relaxation time, θ) จากสมการที่ 2.7

$$\theta = \frac{W_z}{\bar{v}} \quad (2.7)$$

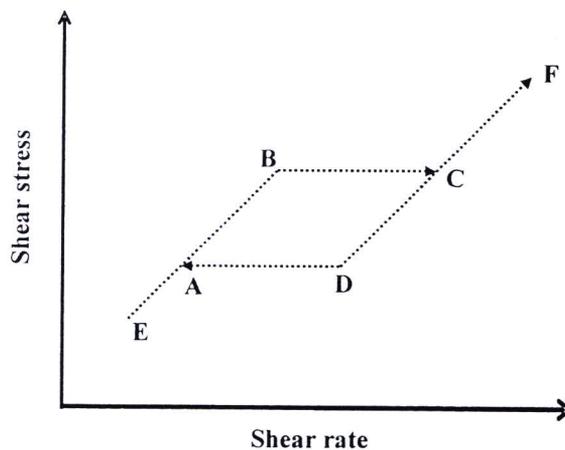
เมื่อ W_z = แอมพลิจูดของความหยابผิวชิ้นงาน
 \bar{v} = ความเร็วเฉลี่ยของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ไหลออกจากหัวขึ้นรูป

2.3.3 การเกิดการเสียวรูป

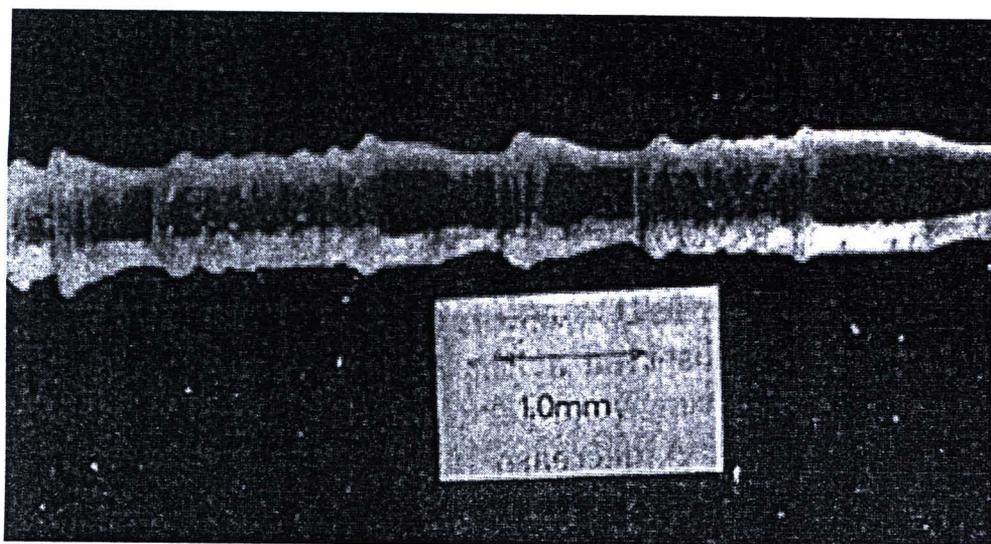
การเกิดการเสียวรูปของพอลิเมอร์หลอมเหลวเป็นปรากฏการณ์การเสียวรูปร่างอย่างไม่มีรูปแบบตามรูปทรงของหัวขึ้นรูปของพอลิเมอร์ที่ถูกอัดรีด การเกิดการเสียวรูปสามารถเกิดขึ้นได้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการผลิต ซึ่งได้รับผลกระทบมาจากความเค้นเฉือน อัตราครีดยเฉือน อุณหภูมิ ลักษณะของหัวขึ้นรูป วัสดุที่ใช้ทำหัวขึ้นรูป โครงสร้างและน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ โดยสาเหตุของการเกิดการเสียวรูปยังไม่เป็นที่แน่ชัดแต่ก็มีผลการทดลองและสรุปสาเหตุออกมาดังนี้

- การลื่นไหลของพอลิเมอร์ที่ผนังของหัวขึ้นรูป (Wall Slip)

ทำให้เกิดการเสียวรูป เช่น ในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงพบความไม่ต่อเนื่องของกราฟการไหลเกิดขึ้นจากรูปที่ 2.19 โดยเริ่มจากอัตราการไหลเพิ่มขึ้นจากจุด E ผ่าน E-A-B ตามลำดับ จนกระทั่งถึงจุดวิกฤตที่จุด B ค่าความเค้นเฉือนคงที่ ในขณะที่อัตราการไหลเพิ่มมาที่จุด C ทันที เรียกช่วงนี้ว่าการลื่นไหล (Slip) จากนั้นค่าความเค้นเฉือนลดลงมาที่จุด D และเกิดการลดลงของทั้งอัตราการครีดยเฉือน เรียกช่วงนี้ว่าการชะงักไหล (Stick) จนกว่าค่าความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้นมาถึงจุด A อีกครั้งและเริ่มขึ้นไปถึงจุด B ใหม่แล้ววนกลับไปตามเส้นการไหล E-A-B ซ้ำๆ กันเช่นนี้ตลอดการอัดรีด ลักษณะการเสียวรูปแบบลื่นไหลเห็นการเสียวรูปลักษณะคล้ายคลื่นกันตลอดทั้งชิ้นงาน สมมุติฐานนี้เป็นที่ยอมรับมาจนถึงปัจจุบัน ลักษณะของพอลิเมอร์ที่เกิดการเสียวรูปหลังออกจากปากหัวขึ้นรูปแสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.19 การไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ณ จุดที่เกิดการเสียวรูป (ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress กับ Shear rate) [13]



รูปที่ 2.20 ลักษณะของพอลิเมอร์ที่เกิดการเสีรูปร่างหลังจากหัวขึ้นรูป [21]

- การไหลปั่นป่วนที่ไม่มีรูปแบบ (Turbulent Flow Effect)

การไหลในลักษณะที่ปั่นป่วนแบบนี้ทำให้เกิดการเสีรูปร่างของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ไหลออกจากปากทางหัวขึ้นรูป

- ความแข็งแรงของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Melt Strength)

เป็นการอธิบายการเกิดการเสีรูปร่างโดยมีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราครีดยืดและ ความเค้นเฉือน เมื่อความเค้นเฉือนสูงเกินความแข็งแรงของพอลิเมอร์หลอมเหลว ขณะที่ไหลออกมาจากหัวขึ้นรูปจึงทำให้เกิดการเสีรูปร่าง

2.4 เครื่องมือวัดสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว

2.4.1 เครื่องคาปีลารีรีโอมิเตอร์

การศึกษาสมบัติทางการไหลของพอลิเมอร์ที่นำไปใช้ในกระบวนการผลิตนั้นเป็นสิ่งจำเป็น เพราะ ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสมบัติทางการไหลของวัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้ (เช่น เส้นกราฟการไหล) นั้นมีประโยชน์มากต่อกระบวนการผลิต เช่น แสดงถึงความเป็นไปได้ในการใช้วัสดุพอลิเมอร์ในกระบวนการผลิตต่างๆ บ่งบอกถึงสภาวะการผลิตที่เหมาะสม ใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดคุณภาพภายนอกของผลิตภัณฑ์ ใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต เป็นต้น

โดยทั่วไปเรียกอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ใช้วัดสมบัติการไหลว่ารีโอมิเตอร์ หรือวิสโคมิเตอร์ (Viscometers) เป็นเครื่องมือที่ใช้หาสมบัติการไหลในรูปแบบที่เกิดจากแรงเฉือน เครื่องรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราเฉือน (Rate-controlled rheometer) เป็นเครื่องรีโอมิเตอร์กลุ่มที่นิยมมากในการศึกษาสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว โดยหลักการของเครื่องรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราเฉือนนี้จะตรงข้ามกับแบบเครื่องรีโอมิเตอร์แบบควบคุมความเค้นเฉือน นั่นคือ จะควบคุมอัตราเฉือน จากอัตราการเคลื่อนที่ของแท่งอัด ส่วนค่าของความเค้นเฉือนจะคำนวณหาจากค่าของความดันตกคร่อมที่วัด ณ ตำแหน่งก่อนเข้าหัวขึ้นรูป และด้วยเหตุผลนี้ทำให้ข้อผิดพลาดที่เกิดจากการเสียดทาน (Friction) และความดันตกคร่อมในกระบอกสูบจะไม่เกิดขึ้น [13]

ถ้าพิจารณาการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวในหัวขึ้นรูปแบบหน้าตัดกลม จะพบว่ามีการไหลที่เกิดจากแรงเฉือนที่เป็นแบบการขับเคลื่อนของความดัน (Pressure-driven flow) หมายถึงการไหลที่เกิดขึ้นของพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลจากทางเข้าของหัวขึ้นรูปแบบหน้าตัดกลมไปยังทางออกของหัวขึ้นรูปแบบหน้าตัดกลม เนื่องจากความดันที่ตำแหน่งทางเข้าหัวขึ้นรูปมีค่าสูงกว่าที่ตำแหน่งทางออกของหัวขึ้นรูปมาก โดยเรียกความแตกต่างของความดันระหว่างความดันที่ตำแหน่งทางเข้ากับทางออกของหัวขึ้นรูปว่า ความดันตกคร่อมหรือย่อด้วยสัญลักษณ์ ΔP ในการวัดสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวโดยการใช้เครื่องรีโอมิเตอร์แบบหัวขึ้นรูปแบบหน้าตัดกลมคำนวณค่าของความเค้นเฉือนปรากฏ (Apparent shear stress, τ_a) (นิวตันต่อตารางเมตร) อัตราเฉือนปรากฏ (Apparent shear rate, γ_a) (ต่อวินาที) และความหนืดเฉือนปรากฏ (Apparent shear viscosity, η_a) (นิวตันวินาทีต่อตารางเมตร) แสดงดังสมการที่ 2.8 ถึงสมการที่ 2.10

$$\tau_a = \frac{\Delta P R}{2L} \quad (2.8)$$

$$\gamma_a = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (2.9)$$

$$\eta_a = \frac{\tau_a}{\gamma_a} \quad (2.10)$$

เมื่อ

R = รัศมีของหัวขึ้นรูป (เมตร)

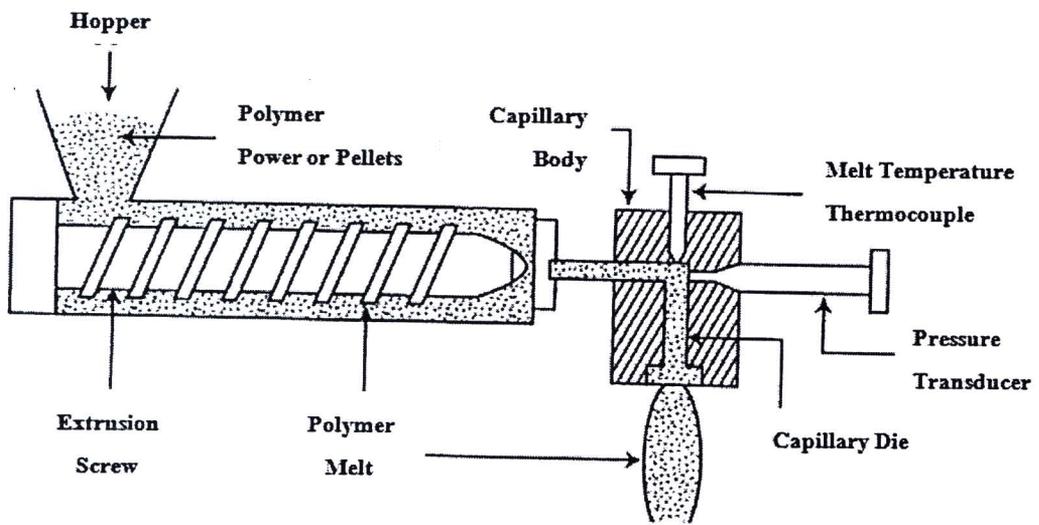
L = ความยาวหัวขึ้นรูป (เมตร)

Q = อัตราการไหลเชิงปริมาตร (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

ซึ่งการศึกษาสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวในเครื่องคาปิลารีรีโอมิเตอร์แบบหัวขึ้นรูปแบบหน้าตัดกลมสำหรับพอลิเมอร์ที่มีสมมติฐานว่ารูปแบบการไหลมีความคงที่ตลอดระยะเวลาการไหล จะได้สมการที่ 2.7, 2.8 และ 2.9 ซึ่งสามารถใช้คำนวณได้ในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว เช่นเดียวกัน

2.4.2 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบเกลียวหนอนอัดรีด

หลักการวัดสมบัติการไหลจากเครื่องมือแบบนี้คล้ายคลึงกับหลักการที่วัดจากเครื่องคาปิลารีรีโอมิเตอร์ประเภทที่ใช้แท่งอัด (Piston หรือ Ram) เป็นตัวอัดของไหลให้ไหลเข้าไปในหัวขึ้นรูปแบบหน้าตัดกลม (รูปเครื่องมือวัดความหนืดรีโอมิเตอร์แบบเกลียวหนอนอัดรีดแสดงดังรูปที่ 2.20) แต่สิ่งที่ต่างกัน คือวิธีการที่ทำให้ของไหลไหลเข้าไปในหัวขึ้นรูป ในกรณีเครื่องรีโอมิเตอร์เกลียวหนอนอัดรีด จะใช้เกลียวหนอน (Screw) ทำหน้าที่ตั้งแต่หลอมพอลิเมอร์และทำให้พอลิเมอร์ หลอมเหลวไหลเข้าไปยังหัวขึ้นรูปซึ่งเป็นสภาวะที่ใกล้เคียงกับกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ในทางปฏิบัติมากกว่า เครื่องมือในแบบอื่นๆ และสามารถควบคุมอัตราความเร็วรอบการหมุนเกลียวหนอน (Screw speed) ที่ใช้ ส่วนค่าของความเค้นเฉือนก็คำนวณจากความดันตกคร่อมที่วัดได้หน้าทางเข้าหัวขึ้นรูป ข้อได้เปรียบของเครื่องมือประเภทเกลียวหนอนอัดรีดอีกประการได้แก่ ข้อมูลที่วัดได้นั้นเป็นข้อมูลที่บอกลังพลังงานที่ใช้ในการหลอมของไหล และอัดของไหลให้ไหลเข้าไปในหัวขึ้นรูปตลอดจนอุณหภูมิที่เกิดขึ้น เนื่องจากการเสียดสีของสายโซ่พอลิเมอร์ (หรือที่เรียกว่า Shear heating) ขณะที่เกลียวหนอนหมุน ส่วนข้อเสียหลักของเครื่องมือนี้ มีราคาค่อนข้างสูง และต้องใช้ปริมาณของไหลตัวอย่างที่มากกว่าเครื่องรีโอมิเตอร์แบบที่ใช้แท่งอัด



รูปที่ 2.21 เครื่องวัดความหนืดรีโอมิเตอร์แบบเกลียวหนอนอัดรีด [13]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2003 Rana และคณะ [22] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิพรอพิลีน เสริมแรงด้วยเส้นใยปอกระเจา โดยศึกษาเปรียบเทียบปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล ได้แก่ ปริมาณเส้นใย ปริมาณสารเสริมสภาพเข้ากันได้ ปริมาณสารปรับปรุงความทนแรงกระแทก และชนิดของสารปรับปรุงความทนแรงกระแทก เช่น Exellor VA 1803, Exellor PO 1015 และ RoyalTuf 465 พบว่า สารเสริมสภาพเข้ากันได้ MAH-g-PP ปริมาณ 0 ถึง 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถเพิ่มสมบัติความทนแรงกระแทก และความทนการดึงยึด ในวัสดุเชิงประกอบพอลิพรอพิลีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอกระเจา 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและใช้สารปรับปรุงแรงกระแทก Exellor VA 1803 ปริมาณ 4, 9 และ 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่ที่ปริมาณสารเสริมสภาพเข้ากันได้ 1 ถึง 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญในมอดูลัสคดงอ (Flexural modulus) เนื่องจากเกิดการเกี่ยวพันกันเอง (Self-entanglement) ของสารเสริมสภาพเข้ากันได้ ในส่วนของสารปรับปรุงความทนแรงกระแทกที่ใช้ในอัตราส่วน 4 9 และ 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าสมบัติความทนแรงกระแทกที่ดีขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารปรับปรุงความทนแรงกระแทก แต่มีสมบัติทางการดึงยึดและการคดงอที่แย่ลง และในงานวิจัยเดียวกันนี้ พบว่าสารปรับปรุงความทนแรงกระแทกประเภท โอลิฟิน (Olefinic impact modifier) ในที่นี้คือ Excellor PO 1050 มีพันธะที่แข็งแรงกับเส้นใยมากกว่ากลุ่มอีลาสโตเมอร์ (Elastomer) นั่นก็คือ Excellor VA 1803 และ Royal Tuf 465 ส่งผลให้มีความทนการดึงยึดที่ดีกว่า ส่วนสมบัติการคดงอและการดึงยึดเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเส้นใยจนถึงปริมาณเส้นใยที่ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

สมบัติการไหลเป็นการกำหนดกระบวนการผลิตวัสดุเชิงประกอบที่เหมาะสม มีงานวิจัยที่ศึกษาสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งเส้นใยที่เติมลงไปในเทอร์โมพลาสติก ส่งผลให้ความหนืดของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มสูงขึ้นดังงานวิจัยของ George และคณะ [23] ที่ศึกษาปริมาณเส้นใย ความยาวเส้นใย การปรับผิวเส้นใย และอุณหภูมิที่มีต่อพฤติกรรมการไหลของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรด โดยทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 125 ถึง 140 องศาเซลเซียส และอัตราความเร็วเฉือนอยู่ในช่วง 16.4 ถึง 5468 วินาที⁻¹ พบว่าความหนืดของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์หลอมเหลวมีพฤติกรรมแบบซูโดพลาสติก นั่นคือ ความหนืดลดลงเมื่อเพิ่มอัตราความเร็วเฉือน ในส่วนอิทธิพลของการเติมเส้นใย พบว่า ความหนืดของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากเส้นใยที่เติมลงไปขัดขวางการเคลื่อนตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ และความหนืดเพิ่มขึ้นตามความยาวของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นจาก 2 จนถึง 10 มิลลิเมตร โดยเส้นใยยาวมีการกระจายตัวที่ไม่ดีทำให้การจัดเรียงตัวตามทิศทางการไหลเกิดได้ยาก ส่งผลให้ความหนืดของระบบวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้การปรับผิวเส้น

ใยทางเคมีด้วย TMPPIC และไซเลน (Silane) ทำให้ความหนืดของระบบเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงยึดเกาะที่สูงระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ ส่วนอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ความหนืดของระบบวัสดุเชิงประกอบลดลง

การศึกษาสมบัติการไหลของวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ โดยมีการปรับเปลี่ยนชนิดเส้นใยและชนิดของเทอร์โมพลาสติก ในปี 2000 Nair และคณะ [24] ได้ศึกษาพฤติกรรมกการไหลของวัสดุเชิงประกอบพอลิสไตรีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอ (Sisal fiber) ด้วยเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์ โดยศึกษาตัวแปรของความยาวเส้นใย 2 4 และ 6 มิลลิเมตร ปริมาณเส้นใย 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ โดยนำหน้า พบว่าสมบัติการไหลเป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ George และคณะ กล่าวคือความหนืดของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณเส้นใยและความยาวของเส้นใย นอกจากนี้ Kumar และคณะ [25] ได้ศึกษาพฤติกรรมกการไหลและโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบยางสไตรีนบิวตะไดอิน (SBR) เสริมแรงด้วยเส้นใยปอ โดยเปรียบเทียบความแตกต่างของสมบัติการไหลเมื่อมีส่วนผสมเส้นใยปอ (5 10 15 และ 20 ส่วนต่อร้อยส่วนของยาง) และความยาวเส้นใยปอ (2 6 และ 10 มิลลิเมตร) แตกต่างกันด้วยเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส พบว่าวัสดุเชิงประกอบมีพฤติกรรมแบบซูโดพลาสติก ที่แสดงถึงการลดลงของความหนืดเมื่อเพิ่มอัตราครีดยืดเนื่องการเติมเส้นใยส่งผลให้ความหนืดของระบบเพิ่มขึ้นเนื่องจากเส้นใยที่เติมเข้าไปขัดขวางการเคลื่อนไหวยของโมเลกุลพอลิเมอร์ และพบว่าที่อัตราครีดยืดต่ำ ส่วนความยาวเส้นใยที่เพิ่มขึ้นจาก 2 จนถึง 10 มิลลิเมตร ส่งผลให้ความหนืดของระบบวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้น เนื่องจากการจัดเรียงตัวตามทิศทางการไหลและกระจายตัวได้ยาก

นอกจากการศึกษาสมบัติการไหลในวัสดุพอลิเมอร์ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติแล้ว มีงานวิจัยอีกหลายงานที่ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติการไหลของวัสดุพอลิเมอร์ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสังเคราะห์หรือวัสดุนาโน เช่น การงานวิจัยของ Teng และคณะ [26] ในปี ค.ศ. 2008 และงานวิจัยของ Prashantha และคณะ [27] ในปี ค.ศ. 2009 ที่ได้ศึกษาพฤติกรรมกการไหลของวัสดุเชิงประกอบพอลิพรอพิลีนกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิว (MWCNT) พบว่าความหนืดของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นตามปริมาณ MWCNT ทั้งนี้เพราะ MWCNT เกิดการเชื่อมต่อกันภายใน (Interconnect) แล้วไปบังการเคลื่อนตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ และมีการเปลี่ยนแปลงจากของไหลไปแสดงพฤติกรรมแบบคล้ายของแข็ง (Solid-Like) เนื่องจากการแพร่กระจายของโครงร่างตาข่ายของ MWCNT ทำให้ความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบสูงขึ้น ส่วนการศึกษาสมบัติการไหลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วนั้น ในปี ค.ศ. 2005 Thomasset และคณะ [28] ได้ศึกษาสมบัติการไหลของวัสดุเชิงประกอบพอลิพรอพิลีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วยาวที่เตรียมด้วยกระบวนการพัลทรูชัน (Pultrusion) โดยเปรียบเทียบในด้านของปริมาณเส้นใย 20 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยนำหน้า และความยาวของเส้นใย 10 15 และ 20 มิลลิเมตร พบว่า

ความหนืดของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณและความยาวของเส้นใยแก้วที่อัตราครีดยืดเหนียว (10^2 วินาที⁻¹) และใกล้เคียงกับพอลิพรอพิลีนบริสุทธิ์ที่อัตราครีดยืดเหนียวสูง (10^5 วินาที⁻¹) ส่วนค่าความหนืดยังคงเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยแก้วและความยาวของเส้นใยแก้วที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาภายในระหว่างเส้นใย (Fiber-fiber interaction) โดยความหนืดยังคงของวัสดุเชิงประกอบพอลิพรอพิลีนที่มีเส้นใยแก้ว 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่ามากกว่าพอลิพรอพิลีนบริสุทธิ์ถึง 4.6 เท่า

ในปี ค.ศ. 2002 Liang [29] ได้ศึกษาปริมาณสารตัวเติมและอัตราการอัดรีดที่มีต่อพฤติกรรมการบวมตัวของวัสดุเชิงประกอบพอลิพรอพิลีนที่มีการเติมเม็ดแก้วแบบเส้น ที่สภาวะการทดสอบด้วยอัตราครีดยืดเหนียวในช่วง 50 ถึง 10^4 วินาที⁻¹ และอุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส โดยสัดส่วนของเม็ดแก้วที่ใช้เป็น 0, 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าอัตราการบวมตัวเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นเหนียวและอัตราครีดยืดเหนียวที่ผนังเพิ่มขึ้น อันเป็นผลมาจากพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปที่มาจาก การเฉือนสะสมในพอลิเมอร์หลอมเหลวเพิ่มขึ้น ในขณะที่สัดส่วนปริมาตรที่เพิ่มขึ้นของสารตัวเติมทำให้อัตราการบวมตัวลดลงเมื่อให้อัตราครีดยืดเหนียวคงที่ เนื่องจากอนุภาคสารตัวเติมไปขัดขวางการเคลื่อนของสายโซ่โพลิเมอร์

และในปี ค.ศ. 2008 Liang [29] ได้ศึกษาสภาวะการอัดรีดที่มีผลต่อพฤติกรรมการบวมตัวของวัสดุเชิงประกอบพอลิพรอพิลีนกับไดอะโทไมท์ที่สัดส่วน 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าอัตราการบวมตัวของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเค้นเหนียวและอัตราครีดยืดเหนียว ที่อุณหภูมิทดสอบ 210 องศาเซลเซียส เนื่องจากพลังงานอีลาสติกสะสมในระบบวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดการเสียรูปจากการยืดและการเสียรูปจากแรงเฉือน ส่วนอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการบวมตัวของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ โดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจาก 180 องศาเซลเซียส จนถึง 220 องศาเซลเซียส ทำให้อัตราการบวมตัวลดลงที่อัตราการอัดรีดคงที่ นอกจากนี้ได้ศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการบวมตัวของวัสดุเชิงประกอบ พบว่าอัตราการบวมตัวเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวขึ้นรูป แต่ลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหัวขึ้นรูป (L/D Ratio) เนื่องจากปริมาตรของไหลเพิ่มขึ้นเมื่อใช้หัวขึ้นรูปขนาดใหญ่ทำให้วัสดุมีเวลาในการคลายตัวน้อยจึงเกิดการบวมตัวมาก นอกจากนี้ Muksing และคณะ [30] ได้ศึกษาอัตราการบวมตัวของวัสดุเชิงประกอบพอลิพรอพิลีนที่เติมออร์กาโนเบนโทไนท์ (Organobentonite) โดยใช้เครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์ในช่วงอัตราครีดยืดเหนียวตั้งแต่ 50 ถึง 8,000 วินาที⁻¹ และอุณหภูมิในช่วง 190 ถึง 210 องศาเซลเซียส พบว่าวัสดุเชิงประกอบมีอัตราการบวมตัวเพิ่มขึ้นตามอัตราครีดยืดเหนียว โดยที่อัตราครีดยืดเหนียวสูง (400 ถึง 8,000 วินาที⁻¹) พลังงานอีลาสติกสะสมของวัสดุเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้เกิดการบวมตัวมากยิ่งขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการบวมตัวของวัสดุลดลงซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ Liang

เนื่องจากสายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น ทำให้เวลาในการคลายตัวสั้นลงพลังงานอีลาสติกสะสมของวัสดุหลอมเหลวลดลง ในส่วนของอิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมออร์กาโนเบนโทไนนั่น พบว่า อัตราการบวมตัวค่อยๆ ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณออร์กาโนเบนโทไนท์ โดยเฉพาะที่อัตราเครียดเฉือนสูงๆ พบการลดลงของอัตราการบวมตัวเนื่องจากอิทธิพลของสารตัวเติมมากยิ่งขึ้น เนื่องจากออร์กาโนเบนโทไนท์มีการกระจายตัวและเกิดการจัดเรียงตัวกันเป็นชั้นซิติเกต จำกัดการคลายตัวของสายโซ่โมเลกุลจึงนำไปสู่การบวมตัวที่น้อยลงในที่สุด

การหมุนหัวขึ้นรูปเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อพฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์ โดย นเรศ อินตะวงศ์ และคณะ [1] ได้ออกแบบและจัดสร้างระบบหัวขึ้นรูปแบบหมุนเพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวสมบัติการไหล และรูปแบบการไหลของยางธรรมชาติขณะอัดรีดด้วยความเร็วในการหมุนหัวขึ้นรูปและอัตราเฉือนต่างๆ กันที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส พบว่ายางธรรมชาติมีพฤติกรรมแบบซูโดพลาสติกนอนนิวโตเนียน ส่วนการหมุนของหัวขึ้นรูปมีผลให้ปริมาณการอัดรีดและความเค้นเฉือนที่ผนัง (Wall shear stress) เพิ่มขึ้นที่อัตราเฉือนต่างๆ เนื่องจากมีการเพิ่มขึ้นของความดันตกคร่อม และรูปแบบการไหลไม่สม่ำเสมอ และพบว่าอัตราการบวมตัวของยางธรรมชาติลดลง เมื่อมีการเพิ่มความเร็วยรอบการหมุนของหัวขึ้นรูป

Burghilea และคณะ [31] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการเกิดรอยฟั่นฉลามของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำสายโซ่ตรงโดยใช้หัวขึ้นรูปหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยม (Slit Die) โดยใช้เครื่องมือ Laser Doppler Velocimetry (LDV) พบว่าการเกิดรอยฟั่นฉลามเนื่องมาจากความเค้นดึงรอบๆบริเวณทางออกหัวขึ้นรูปมีค่ามากกว่าแข็งแรง ของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Melt strength)

Carreras และคณะ [32] ได้ศึกษาการเกิดรอยฟั่นฉลามของ polystyrene-block-poly(ethylene-co-butylene)-block-polystyrene (SEBS) ในกระบวนการอัดรีดโดยใช้กล้องวิดีโอบันทึกภาพ พบว่าการเกิดรอยฟั่นฉลามเกิดขึ้นที่อัตราเครียดเฉือนต่ำเกิดขึ้นบริเวณทางออกของหัวขึ้นรูปและลักษณะการเกิดรอยฟั่นฉลามเริ่มจากการแตก (Crack) ของผิวชิ้นงานพอลิเมอร์ และมีการแผ่ขยาย (Propagated) และผิวของชิ้นงานแตกมากยิ่งขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราความเครียดเฉือน

Allal และคณะ [20] พบว่าการพัฒนาการเกิดรอยฟั่นฉลามที่ผิวของพอลิเมอร์สายโซ่ตรง (Linear polymer) โดยวิธรรอยฟั่นฉลามที่เกิดขึ้นตั้งฉากกับทิศทางการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวและแอมพลิจูด (Amplitude) และช่วงเวลา (Period) ของการเกิดรอยฟั่นฉลามมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว

Wu และคณะ [33] พบว่าอุณหภูมิของหัวขึ้นรูปมีผลต่อการเกิดรอยฟຶนฉลลลมโดยการเพิ่มอุณหภูมิของหัวขึ้นรูปสามารถลดการเกิดรอยฟຶนฉลลลม และทำให้เวลาที่พอลิเมอร์ใช้ในการคลายตัวลดลงและลดพลังงานที่ถูกใช้คืนสภาพของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Elastic recovery) ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิของหัวขึ้นรูปยังส่งผลต่อการลดความเค้นที่บริเวณทางออกของหัวขึ้นรูป ระดับการบวมตัวและการเกิดรอยฟຶนฉลลลม [34-35]