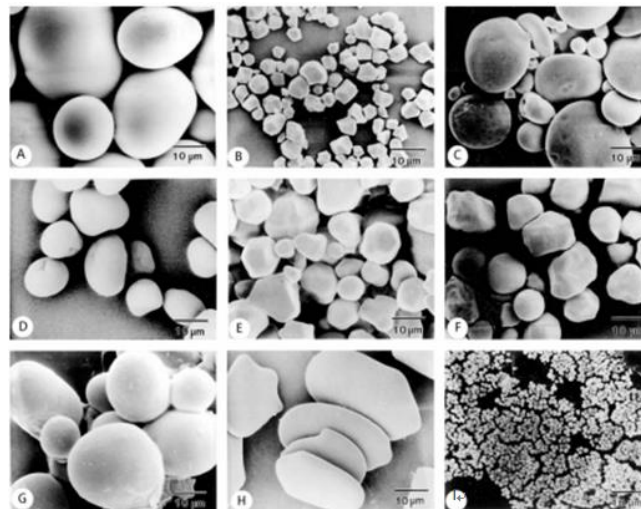


บทที่ 17 รายละเอียดข้อมูลพลาสติกชีวภาพประเภท เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch)

1. ข้อมูลทั่วไป ^[1]

สตาร์ชเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ซึ่งมีแหล่งกำเนิดมาจากธรรมชาติและเป็นวัสดุที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตพลาสติกชีวฐานหลายชนิด เช่น เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และพอลิแลคติกแอซิด นอกจากนี้สตาร์ชยังถูกใช้เป็นสารเติมแต่งสำหรับพลาสติก เพื่อเพิ่มเนื้อพลาสติกหรือลดต้นทุนการผลิตพลาสติก และปรับปรุงสมบัติการแตกสลายได้ทางชีวภาพของพลาสติกชีวภาพบางชนิดด้วย

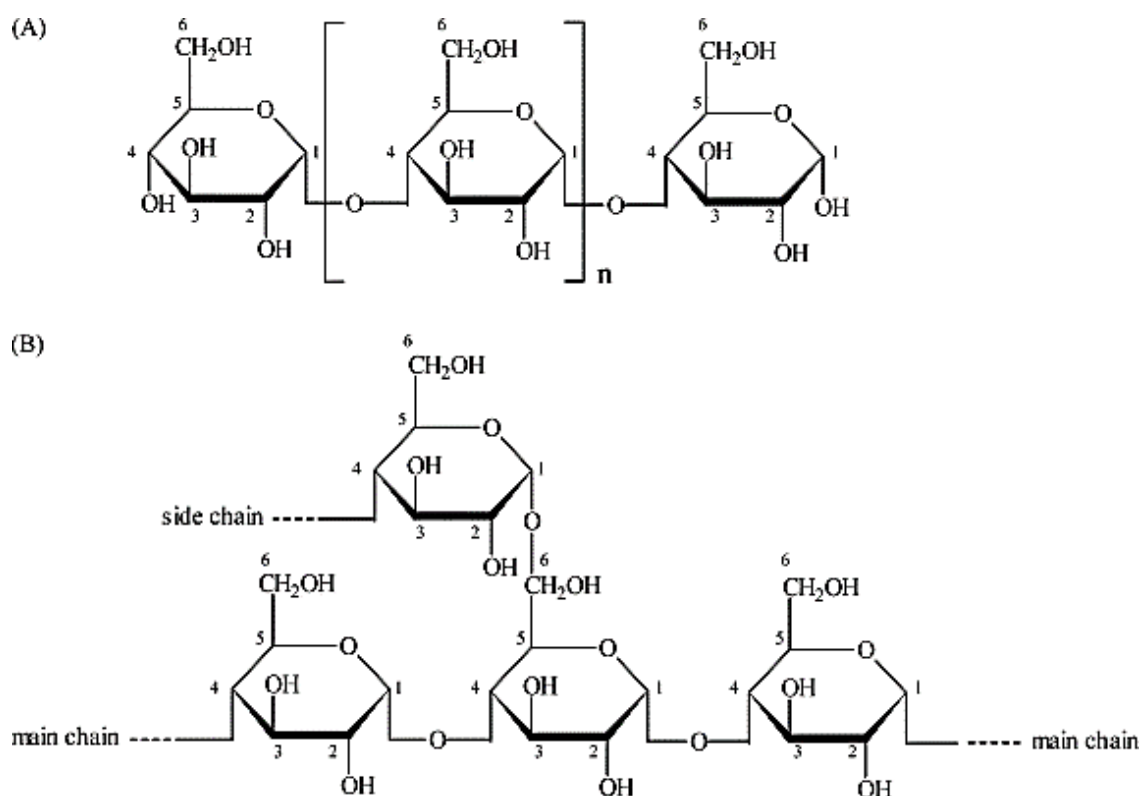
สตาร์ชเป็นวัตถุดิบที่มีปริมาณในธรรมชาติ พบได้ในธัญพืช (เช่น ข้าวสาลี ข้าวโพด ข้าว) พืชหัว (เช่น มันฝรั่ง) และพืชตระกูลถั่ว (เช่น ถั่วเขียว ถั่วแดง ถั่วลันเตา) โดยทั่วไปสตาร์ชที่พบในธรรมชาติอยู่ในรูปแกรนูล (Granular form) แกรนูลสตาร์ชเป็นแหล่งสะสมพลังงานสำหรับพืชสีเขียว โครงสร้างแกรนูลได้ถูกศึกษาด้วยเทคนิคและเครื่องมือที่หลากหลาย เช่น เอ็กซเรย์ (X-ray) กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscopy: AFM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy: SEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งผ่าน (Transmission electron microscopy: TEM) เป็นต้น แกรนูลสตาร์ชมีรูปร่างและขนาดแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสปีชีส์ของพืช ดังภาพที่ 1 ขนาดของแกรนูลสตาร์ชส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 1-100 ไมโครเมตร ^[2,3]



ภาพที่ 1 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,500 เท่า ของแกรนูลสตาร์ชจากพืชสปีชีส์ต่างๆ (A) มันฝรั่ง (B) ข้าว (C) ข้าวสาลี (D) ถั่วเขียว (E) ข้าวโพด (F) ข้าวโพดข้าวเหนียว (G) มันสำปะหลัง (H) โขติ (I) แป้งในใบพืช ^[3]

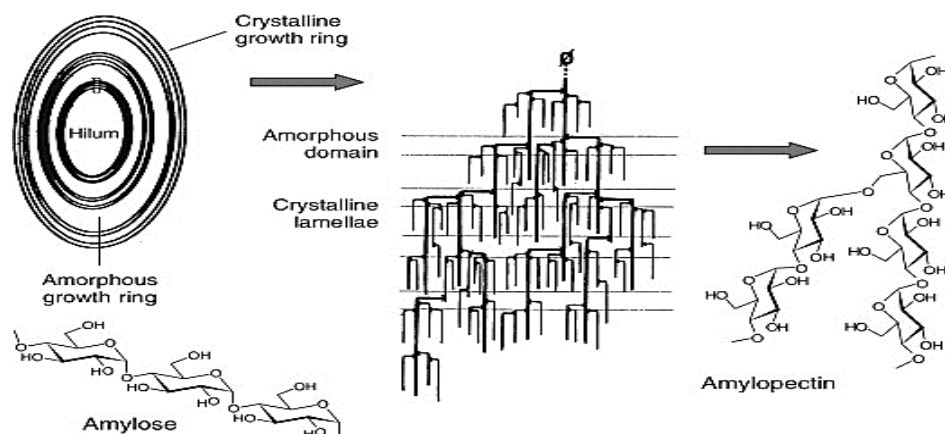
แกรนูลสตาร์ชประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตซึ่งเป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ประกอบด้วยไขมัน โปรตีน ฟอสฟอรัสและน้ำอีกด้วย สตาร์ชแต่ละชนิดประกอบด้วยไขมัน โปรตีน และฟอสฟอรัสในปริมาณที่แตกต่างกัน และมีความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content) อยู่ในช่วง 10-13 เปอร์เซ็นต์ สตาร์ชเป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ (Macromolecule) ประกอบด้วยพอลิเมอร์ซึ่งมีหน่วยซ้ำของแอลฟา-ดี-กลูโคส (α -D-glucose units) จำนวน 2 ชนิด คือ แอมิโลส (Amylose) และแอมิโลเพคติน (Amylopectin) แอมิโลสเป็น

พอลิเมอร์เชิงเส้นของกลูโคสซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟาที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 และ 4 (α -1,4-linked D-glucose) มีกึ่งก้านปริมาณน้อย โดยทั่วไปแอมิโลสประกอบด้วยหน่วยซ้ำของกลูโคสประมาณ 200-20,000 หน่วยและมีน้ำหนักโมเลกุลในช่วง 1×10^5 - 2×10^6 ดาลตัน โมเลกุลของแอมิโลสพอร์มเกลียวเดี่ยว (Single helix) และพบแอมิโลเพคตินในแกรนูลสตาร์ช โดยแอมิโลเพคตินเป็นพอลิเมอร์โซ่กิ่งซึ่งประกอบด้วยโซ่หลักที่มีกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟาที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 และ 4 และโซ่กิ่งที่เชื่อมต่อกับโซ่หลักด้วยพันธะแอลฟาที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 และ 6 (α -1,6-linked D-glucose) โดยทั่วไปโซ่กิ่งจะแตกออกมาทุกๆ หน่วยซ้ำของกลูโคสจำนวน 22-70 หน่วย แอมิโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 4×10^7 - 4×10^8 ดาลตัน และประกอบด้วยหน่วยซ้ำของกลูโคสมากถึง 200,000 หน่วย



ภาพที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของ (A) แอมิโลส และ (B) แอมิโลเพคติน [4]

แอมิโลสและแอมิโลเพคตินจะสร้างโครงสร้างวงแบบจำเพาะ (Specific ring structure) ดังแสดงในภาพที่ 3 วงอสัณฐาน (Amorphous ring) และวงที่เป็นโครงสร้างผลึกบางส่วน (Partially crystalline ring) เริ่มก่อจากศูนย์กลางของแกรนูลซึ่งเรียกว่าไฮลัม (Hilum) และก่อสลับกันไป โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่เหล่านี้ถูกจัดเรียงในทิศทางรัศมี (Radical direction) แอมิโลสเป็นโมเลกุลที่อยู่ในวงอสัณฐาน (Amorphous ring) ของแกรนูลสตาร์ช ในขณะที่แอมิโลเพคตินอยู่ในวงผลึกบางส่วน (Partially crystalline ring) ของแกรนูล ซึ่งประกอบด้วยด้วยอสัณฐานที่จากโซ่กิ่งของโมเลกุลแอมิโลเพคตินและส่วนผลึกที่เกิดจากการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของโซ่เกลียวคู่ของแอมิโลเพคติน



ภาพที่ 3 โครงสร้างของแกรนูลสตาร์ช^[5]

สัดส่วนของแอมิโลเพคตินต่อแอมิโลสและความเป็นผลึกของสตาร์ชขึ้นอยู่กับสปีชีส์ของพืช ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการขึ้นรูป (Processability) และสมบัติของผลิตภัณฑ์สตาร์ชที่ได้ ตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าสตาร์ชจากพืชส่วนใหญ่มีปริมาณแอมิโลสอยู่ในช่วง 20-30 เปอร์เซ็นต์ยกเว้นสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวซึ่งมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นอะไมโลเพคติน ความเป็นผลึกของสตาร์ชผันแปรในช่วง 15-45 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาและความชุ่มชื้น (Hydration) ของสตาร์ช รวมทั้งเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ สตาร์ชข้าวโพดมีแอมิโลสสูงมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกต่ำที่สุดเนื่องจากมีแอมิโลสเป็นองค์ประกอบปริมาณมาก

พลาสติกไซเซชันของสตาร์ช

สตาร์ชที่อยู่ในรูปแกรนูลไม่สามารถแปรรูปได้โดยเทคโนโลยีทั่วไปที่ใช้สำหรับพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก เนื่องจากอุณหภูมิหลอม (Melting temperature, T_m) ของสตาร์ช (220-240 °C) สูงกว่าอุณหภูมิการเสื่อมสลายหรือมีลักษณะใหม่ก่อนที่จะหลอมเหลว การเติมสตาร์ชลงไปในพอลิเมอร์ชนิดอื่น โดยสตาร์ชไม่ได้ถูกใช้เป็นสารเติม (Filler) นั้น โครงสร้างแกรนูลสตาร์ชควรแตกออกหรือพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงซึ่งยึดระหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์ในแกรนูลสตาร์ชควรถูกทำลาย

สตาร์ชเจลาติไนซ์ไม่สามารถแปรรูปโดยใช้เทคโนโลยีพอลิเมอร์ที่รู้จักกันทั่วไปได้ เนื่องจากประกอบด้วยน้ำปริมาณมาก การทำลายพันธะระหว่างไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลสตาร์ชที่อุณหภูมิสูงด้วยพลังงานกล เช่น การกดอัด (Compression) การเฉือน (Shearing) เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ทำให้ได้วัสดุหลอมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch : TPS) ที่มีลักษณะคุณสมบัติและเป็นเนื้อเดียวกัน สตาร์ชที่ใช้อุตสาหกรรมอาหารส่วนใหญ่ประกอบด้วยน้ำปริมาณมาก แต่ระดับการทำลายโครงสร้างต่ำ ในทางตรงกันข้ามสตาร์ชที่ประกอบด้วยน้ำปริมาณน้อยส่วนใหญ่ใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมหนัก โดยเฉพาะอุตสาหกรรมพลาสติก โดยสตาร์ชที่ประกอบด้วยน้ำปริมาณน้อยและมีระดับการทำลายโครงสร้างสูงจะเรียกว่าสตาร์ชพลาสติกไซซ์ ซึ่งจะแสดงพฤติกรรมเหมือนเทอร์โมพลาสติกทั่วไป เช่น การหลอมไหลได้ รวมทั้งสามารถขึ้นรูปได้โดยใช้เทคโนโลยีเครื่องมือและเครื่องจักรเดียวกันกับพลาสติกทั่วไป สตาร์ชพลาสติกไซซ์บางครั้งถูกเรียกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch)

ตารางที่ 1 ชื่อทางการค้าของ TPS ตามบริษัทผู้ผลิต^[6]

Company	Trade name
Biop	Biopar
Biotec	BIOPLAST

Company	Trade name
Cardia Bioplastic	Cardia Biohybrid™
Cerestech	Cereloy™
ENSO Plastics	ENSO RENEW RTP™
Franplast	Chemiton®
Futuramat	Bioceres®
Glycan Biotechnology	Cellulose (Glycan)
Grabio	Grabio
Green Dot	Terratek®
Heppe Biomaterial	SARAH
Inter Aneka Lestari Kimia	ENVIPLAST®
Japan Corn Starch	Cornpole
Kingfa	Ecopond
Nexus Resin	Nexus
Parsa Polymer Sharif	ParsaBio
Resirene	Biorene®
SHOWA DENKO	Bionelle Starcla™
Teknor Apex	Terraloy™

2. กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์^[1]

TPS สามารถขึ้นรูปด้วยเทคนิคการขึ้นรูปตามทีนิยมใช้กับพลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเลียม เช่น การหลอมอัดรีด (Extrusion molding) การขึ้นรูปแบบฉีดเข้าแม่พิมพ์ (Injection molding) และการหล่อฟิล์ม (Film casting) เป็นต้น แต่การขึ้นรูป TPS จะมีความซับซ้อนและควบคุมได้ยากกว่าการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ทั่วไป เนื่องจากสสารขมีการเปลี่ยนแปลงเฟสที่จำเพาะ มีความหนืดสูง มีการระเหยของน้ำในระหว่างการขึ้นรูปและเกิดรีโทรเกรเดชันอย่างรวดเร็ว^[7] ดังนั้นจึงได้มีแนวทางปรับปรุงแก้ไขการขึ้นรูปของ TPS ได้แก่ การเติมพลาสติกไซเซอร์ การเติมสารหล่อลื่น การใช้สสารขที่ผ่านการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันโดยหมู่ไฮดรอกซิลถูกแทนที่ด้วยหมู่เอสเทอร์และอีเทอร์ การผสมสสารขกับพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ (เช่น พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid: PLA), พอลิคาโพรแลคโตน (Polycaprolactone: PCL) หรือเซลลูโลส) การใช้โคพอลิเมอร์ของสสารขกราฟท์พอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ และการผสมสสารขกับเคลย์นาโนเพื่อฟอร์มวัสดุเชิงประกอบนาโนสสารข^[7]

การอัดรีด (Extrusion) เป็นเทคนิคที่ใช้กันมากที่สุดสำหรับการขึ้นรูป TPS เนื่องจากใช้ได้ดีกับพอลิเมอร์ที่มีความหนืดสูง ในสภาวะที่ไม่มีตัวทำละลาย สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปโดยการอัดสามารถปรับเปลี่ยนได้ในช่วงกว้าง เช่น 0-500 atm และ 70-500 องศาเซลเซียส นอกจากนี้เวลาอยู่ในเครื่องและระดับการผสมของวัสดุในกระบวนการอัดฉีดสามารถควบคุมได้ตามต้องการและสามารถฉีดวัสดุซ้ำได้หลายครั้ง (Multiple-injection)^[8] นอกจากนี้กระบวนการอัดรีดยังสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่นๆ ได้แก่ การฉีดเข้าแม่พิมพ์ การเป่าฟิล์ม โดยเทคนิคที่ใช้ในการขึ้นรูป TPS มีดังนี้

2.1 กระบวนการฉีดเข้าแม่พิมพ์ (Injection molding) ^[1]

TPS สามารถขึ้นรูปได้ด้วยเทคนิคการฉีดขึ้นรูป ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปทรงสามมิติและซับซ้อน แต่เทคนิคนี้มีความซับซ้อนในการปรับพารามิเตอร์ให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของกรู (Screw speed) อุณหภูมิของบาร์เรล ความดันในการฉีด (Injection pressure) ระยะเวลาและความดันย่ำ (Holding pressure) เวลาในการทำให้เย็นตัว (Cooling time) อุณหภูมิแม่พิมพ์ รูปแบบระบบหล่อเย็นแม่พิมพ์ (Mold cooling line layout) และโครงสร้างของแม่พิมพ์ (รูปแบบทางวิ่งของพลาสติก (Runner layout)) ชนิดและตำแหน่งของทางเข้าของพลาสติกหลอม (Gate) โครงสร้างที่พอร์มได้ในระหว่างการขึ้นรูป ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของกระบวนการฉีดเข้าแม่พิมพ์และเป็นตัวกำหนดสมบัติสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ด้วย เช่น สมบัติเชิงกล แอนไอโซทรอปี การดูดซับความชื้น การหดตัว เป็นต้น^[9]

ความสวยงามของรูปร่างและฟังก์ชันการใช้งานของผลิตภัณฑ์เป็นสิ่งที่ต้องการในการขึ้นรูป โดยผลิตภัณฑ์ไม่ควรจมตัว (Sink) หดตัว (Shrinkage) หรือองตัว (Warpage) เนื่องจากมีผลต่อสมบัติและการใช้งาน การจมตัว หดตัว หรือองตัวของผลิตภัณฑ์อาจแก้ไขได้โดยการออกแบบแม่พิมพ์และปรับพารามิเตอร์ในการขึ้นรูปให้เหมาะสม

ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจาก TPS จะดูดซับหรือสูญเสียน้ำขึ้นอยู่กับความชื้นในอากาศ ดังนั้นหากเราต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดแน่นอน การขึ้นรูปแบบฉีดเข้าแม่พิมพ์ควรทำที่ปริมาณความชื้นสมดุลของพลาสติกไซเซอร์ ซึ่งต้องปรับสภาวะตัวอย่างก่อนนำไปฉีดขึ้นรูป เมื่อขึ้นรูป TPS ที่มีความชื้นมากจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์งอและจมตัว เนื่องจากเกิดการระเหยของน้ำในระหว่างการขึ้นรูป ในทางตรงกันข้ามถ้าปริมาณความชื้นต่ำจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เสื่อมสภาพทางความร้อนในระหว่างการขึ้นรูปและบวมตัวเนื่องจากการดูดน้ำเพื่อเข้าสู่ปริมาณความชื้นสมดุล

ตารางที่ 2 ตัวอย่างสภาวะที่ใช้ในการฉีดเข้าแม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูป TPS ^[10]

Processing parameters	Value	Unit
Injection molding parameters		
Injection volume	44	cm ³
Injection pressure	1400	bar
Switch over point	12	cm ³
Injection rate	50	cm ³ /s
Holding pressure	VARIED (600-1000)	bar
Holding pressure	20	s
Cooling time	15	s
Zone temperatures		
1. Zone	110	°C
2. Zone	115	°C
3. Zone	120	°C
4. Zone	125	°C
5. Zone	130	°C
Mould temperature	25	°C

2.2 กระบวนการเป่าขึ้นรูป (Blow molding) ^[1]

การเป่าฟิล์มสามารถทำได้โดยการต่อเครื่องอัดรีดกับตายเป่าฟิล์มที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ และหอคอยเป่าฟิล์ม (Film-blowing tower) ที่มีลูกกลิ้งหนีบริดและลูกกลิ้งม้วนเก็บ ความเร็วของลูกกลิ้งม้วนเก็บและความดันในฟิล์มการเป่าถูกปรับเพื่อให้กระบวนการขึ้นรูปมีความเสถียร^[11] ซึ่งอัตราส่วนในการเป่าขยาย (Blow-up ratio) มากกว่า 2 และได้ผลิตภัณฑ์ฟิล์มที่มีคุณภาพตามต้องการ วัสดุที่นำมาเป่าเป็นฟิล์มต้องมีความหนืดสูงพอที่จะพองพลาสติกให้พองออกเมื่อออกมาจากตายตอนเริ่มต้นในกระบวนการอัดรีด^[12] จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเมื่อความหนืดสูงกว่าค่าวิกฤติ เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์จะมีลักษณะแข็งเกินไปที่จะขยายตัวในระหว่างการเป่าและวัสดุมีลักษณะเปราะที่บริเวณลูกกลิ้งหนีบริด นอกจากนี้ความหนืดสูงยังส่งผลต่อทอร์คในเครื่องอัดรีดและทำให้ความดันตายเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทำให้กระบวนการเป่าฟิล์มทำได้ยากในทางตรงกันข้ามถ้าความหนืดต่ำเกินไป พื้นผิวของวัสดุที่ถูกอัดรีดจะมีลักษณะเหนียวติด (Sticky) ส่งผลให้ฟิล์มติดกันเป็นสองชั้น (Double-walled film) และแยกออกจากกันยากเมื่อผ่านลูกกลิ้งหนีบริด การเป่าฟิล์มที่อุณหภูมิสูงจากวัสดุที่มีความหนืดต่ำและประกอบด้วยพลาสติกไซเซอร์ปริมาณมากอาจทำให้เกิดการพองพองอากาศในวัสดุหลอมและวัสดุขาดในระหว่างการดึงยืด

การเป่าฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่พลาสติกไซเซอร์กลีเซอรอลปริมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ สามารถทำได้สำเร็จ อย่างไรก็ตามฟิล์มที่ได้มีลักษณะเหนียวติดกันเมื่อผ่านลูกกลิ้งหนีบริดและไม่สามารถแยกชั้นออกจากกันได้ ดังจะเห็นได้จากภาพถ่ายกล้อง SEM สมบัติของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์สามารถปรับปรุงได้โดยการเติมโคโตรซาน ความต้านทานแรงดึง และมอดูลัสของยัง ของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์เพิ่มขึ้นในช่วง 8-97 เปอร์เซ็นต์ และ 40-154 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเติมโคโตรซานปริมาณ 0.37-1.45 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เป็นผลจากการพองพองไฮโดเจนระหว่างโมเลกุลสตาเร็กซ์และโคโตรซาน

นอกจากนี้การเติมโคโตรซานยังช่วยปรับปรุงความเสถียรของกระบวนการเป่าฟิล์มและทำให้ได้ฟิล์มที่มีความหนาลดลง และดูดซับน้ำลดลงด้วย ซึ่งการเติมโคโตรซานจะทำให้แผ่นฟิล์มมีสมบัติทึบแสง^[13] การจัดเรียงตัวเป็นกระบวนการที่สำคัญเช่นกันในระหว่างการเป่าฟิล์ม คณะวิจัยของ Fishman (2006) พบว่าการดึงใน 2 ทิศทางที่เกิดขึ้นพร้อมกัน (การจัดเรียงตัวใน 2 ทิศทาง) ในระหว่างการเป่าฟิล์มทำให้ได้ฟิล์มที่มีสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกันทั้ง 2 ทิศทาง แตกต่างจากกระบวนการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียว ซึ่งมีสมบัติในทิศทางการดึงและทิศทางขวางเครื่องจักรแตกต่างกันมาก คณะวิจัยของ Halley (2006) และ McGlashan และ Halley (2003)^[14] ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มเป่าจากวัสดุเชิงประกอบสตาเร็กซ์/พอลิเอสเตอร์/นาโนเคลย์ ที่มีสมรรถนะสูงด้วยกระบวนการอัดรีดและการเป่าฟิล์มที่ใช้ทั่วไป คณะวิจัยพบว่าการเติมเคลย์มอนท์มอริโรไนต์ดัดแปรด้วยสารอิทธิพลไปในวัสดุผสมสตาเร็กซ์/พอลิเอสเตอร์ช่วยให้การแปรรูปสามารถทำได้ง่ายขึ้น ใช้พลังงานลดลง และกระบวนการมีความเสถียรมากขึ้น วัสดุเชิงประกอบนาโนไม่เกิดโฟมเมื่อใช้อุณหภูมิตายสูงถึง 150 °C การเพิ่มอุณหภูมิในการขึ้นรูปให้สูงขึ้นจะช่วยลดความหนืดของวัสดุนาโนสตาเร็กซ์ทำให้สามารถแปรรูปได้ง่ายขึ้น ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบนาโนที่ผลิตได้มีลักษณะใสและเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้จากผลของการจับ (Trap) พลาสติกไซเซอร์ที่สามารถระเหยได้เอาไว้ในโครงสร้างของเคลย์และการหน่วงการโตของผลึกในเฟสการทำให้เย็นตัว

ตารางที่ 3 ตัวอย่างสภาวะที่ใช้ในกระบวนการเป่าขึ้นรูป TPS ^[13]

Processing parameters	Value	Unit
Single screw speed extruder		
L/D ratio	30	-

Processing parameters	Value	Unit
Screw diameter	25	mm
Zone temperatures in barrel		
1. Zone	130	°C
2. Zone	140	°C
3. Zone	140	°C
4. Zone	140	°C
Die temperature	150	°C
Film-blowing		
Screw speed	35-45	rpm
Nip roll speed	3	rpm

2.3 กระบวนการหลอมอัดรีดชีท/ฟิล์ม (Sheet/Film Extrusion) ^[1]

การผลิตชีทและฟิล์มโดยการอัดรีดเป็นเทคนิคที่ง่ายและใช้งานกันอย่างกว้างขวาง การขึ้นรูปทำได้โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่มีหัวตาย พร้อมติดตั้งอุปกรณ์ม้วนเก็บสำหรับการเก็บวัสดุและปรับปรุงการจัดเรียงตัวของโมเลกุลพอลิเมอร์ ในการอัดรีดแบบขั้นตอนเดียวสสารที่มีสมบัติวิสโคอิลาสติกจะถูกอัดผ่านตายเพื่อฟอร์มผลิตภัณฑ์ชีทหรือฟิล์มเทคนิคการอัดรีดชีท/ฟิล์มแบบ 2 ขั้นตอนมีขั้นตอนดังนี้ ในขั้นตอนแรกวัสดุผสมสสารจะถูกอัดรีดในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่เพื่อขึ้นเส้นพลาสติก จากนั้นเส้นพลาสติกที่ได้ถูกทำให้แข็งตัวและแห้ง ก่อนบดให้เป็นผง แล้วนำไปรีดเป็นชีท/ฟิล์มโดยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวที่ต่อกับหัวตาย ข้อเสียของการขึ้นรูปด้วยการอัดรีดแบบสองขั้นตอนอาจใช้เวลานานในการขึ้นรูป แต่มีข้อดีคือสามารถทำได้ง่ายและมีความเสถียรมากกว่า เนื่องจากความสามารถในการผลิตมีความดันภายในเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวสูงซึ่งใช้ได้กับวัสดุแบบสสารซึ่งมีความหนืดสูงและมีความสามารถในการแปรรูปต่ำ ความหนาของวัสดุสามารถควบคุมได้โดยการปรับทางออกของหัวตาย ดังนั้นจึงสามารถกำหนดผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้ว่าเป็นชีทหรือฟิล์ม

กระบวนการอัดรีดชีทหรือฟิล์มของวัสดุฐานสสารสามารถทำได้โดยการผสมวัตถุดิบสสารกับสารเติมแต่งและพลาสติกไซเซอร์อื่นๆ เพื่อเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปและปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ พลาสติกไซเซอร์ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ น้ำและกลีเซอรอล (นอกจากนี้ได้มีการนำพลาสติกไซเซอร์ชนิดอื่นมาใช้เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถใช้งานได้หลากหลายขึ้น คณะวิจัยของ Thuwall (2006)^[11] ได้ใช้สารหล่อลื่นฟลูออโรอีลาสโตรเมอร์เพื่อลดความเหนียวติดของวัสดุกับตายเพื่อลดปัญหาการเกิดการอุดตันบริเวณหัวตาย นอกจากนี้ได้มีการใช้เด็กซ์ทรินเพื่อลดความหนืดของสสาร เนื่องจากเด็กซ์ทรินมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ สเตียริกแอซิดและพอลิเอทิลีนไกลคอลได้ถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงพฤติกรรมการไหลของสสารเช่นกัน

การอัดรีดร่วมหลายชั้น (Multilayer co-extrusion) เป็นอีกเทคนิคที่ใช้ในการเตรียมชีทหรือฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสสารสามารถถูกกลาเมตกับพอลิเมอร์ที่แตกสลายได้ทางชีวภาพ เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล การทนน้ำ การป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนของผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปได้ ผลิตภัณฑ์เหล่านี้เหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารและผลิตภัณฑ์ที่ใช้ครั้งเดียวทิ้ง การอัดรีดร่วมแบบสามชั้นถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรม กระบวนการอัดรีดร่วมประกอบไปด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวจำนวน 2 ตัว ตัวแรกสำหรับการอัดรีดชั้นสสารซึ่งอยู่ด้านในและอีกตัวสำหรับการอัดรีดชั้นพอลิเมอร์ด้านนอก พอลิเอสเทอร์แตกสลายได้ทางชีวภาพ เช่น PCL, PLA พอลิเอสเทอร์เอไมด์ PBSA^[15] นิยมนำมาใช้เป็นฟิล์มชั้นนอก ความแตกต่างของ

ความหนืดอาจทำให้เกิดความไม่เสถียรของการไหลของพอลิเมอร์และความไม่เสถียรระหว่างพื้นผิว ทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียรูปมีลักษณะคล้ายคลื่นระหว่างพื้นผิวของพอลิเมอร์ 2 ชนิด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเค้นเฉือนที่บริเวณพื้นผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์ 2 ชนิด

การจัดเรียงตัวของวัสดุพอลิเมอร์มีความสำคัญในการกำหนดคุณสมบัติของฟิล์มหรือซีทซึ่งจำเป็นต่อการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยงานวิจัยของ Yu และ Cristie (2005)^[16] ได้ศึกษาผลของการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวต่อโครงสร้างในระดับไมโครและสมบัติเชิงกลของสตาร์ชข้าวโพดพลาสติกไซซ์ที่มีอัตราส่วนแอมิโลสแอมิโลเพคตินแตกต่างกัน นอกจากนี้พันธะไฮโดรเจนและโครงสร้างในระดับไมโครที่มีโซ่กิ่งปริมาณมากของแอมิโลแพคตินขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังพบว่าการจัดเรียงตัวช่วยเพิ่มทั้งมอดูลัสและความเครียด ณ จุดคราก ในทิศทางตามแนวตั้ง แต่ลดระยะยืดของวัสดุโดยเฉพาะอย่างยิ่งระยะยืดในทิศทางขวางเครื่องจักรลดลงอย่างชัดเจน

ตารางที่ 4 ตัวอย่างสภาวะที่ใช้ในกระบวนการหลอมอัดรีดซีท/ฟิล์ม TPS ^[17]

Processing parameters	Value	Unit
Twin screw extruder with a calender		
Screw diameter	20	mm
L/D	35	
Screw speed	100	rpm
Feed speed	30	rpm
Zone temperatures		
1. Zone	100	°C
2. Zone	170	°C
3. Zone	170	°C
4. Zone	170	°C
5. Zone	175	°C
Distance between the calendar roll	0.8	mm

2.4 การอัดรีดโฟม (Foaming extrusion) ^[1]

การอัดรีดโฟมถูกใช้มากในการผลิตวัสดุทางการบรรจุภัณฑ์กระแทก หลักการผลิตโฟมโดยวิธีนี้คล้ายคลึงกับการผลิตขบเคี้ยวประเภทฟองกรอบ การอัดรีดโฟมสามารถทำได้โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว แต่การอัดรีดโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่เป็นที่นิยมมากกว่า เนื่องจากป้อนวัตถุดิบและควบคุมอุณหภูมิได้ง่ายกว่า นอกจากนี้เวลาคงอยู่ในเครื่องนานกว่าและแรงเฉือนมากกว่า เส้นพลาสติกจะถูกผลิตผ่านหัวฉีดตาย (Die nozzle) จากนั้นถูกตัดให้มีควมยาวตามต้องการโดยใช้เครื่องตัดแบบหมุนที่ติดบนหน้าตายของเครื่องอัดรีด

โดยทั่วไปวัสดุกันกระแทกเตรียมจากสตาร์ชข้าวโพดบริสุทธิ์ ด้วยวิธีการอัดรีดภายใต้สภาวะจำเพาะ (แรงเฉือนสูงหรืออุณหภูมิบาร์เรลสูง) แต่สมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพที่ได้ยังไม่เป็นที่พอใจ โดยเฉพาะสตาร์ชแอซิเตตซึ่งเป็นสตาร์ชเอสเทอร์ที่ไม่ชอบน้ำจึงถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตวัสดุกันกระแทกที่เตรียมโดยการอัดรีดเพื่อลดความสามารถในการละลายน้ำ

การทรีทภายหลังการอัดรีด (Post extrusion treatments) สามารถปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้ เช่น การใช้เครื่อง Atmospheric pressure cooker ในการให้ไอน้ำกับโพลีสตาร์ซแอซิเตด-เส้นใยที่เตรียมได้จากการอัดรีด ในกระบวนการนี้เส้นพลาสติกถูกวางไว้บนตะแกรงไม่ได้สัมผัสกับน้ำโดยตรง จากนั้นทิ้งที่ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 2 นาที และลดอุณหภูมิลงถึงอุณหภูมิห้องปล่อยไว้เป็นเวลา 1 นาที แล้วทิ้งต่อไปอีก 2 นาที โพลีสตาร์ซแอซิเตด-เส้นใยธรรมชาติที่ได้มีโครงสร้างเซลล์คล้ายรูปทรงหกเหลี่ยม ซึ่งมีการคั่นตัวสูงและแสดงสมบัติเชิงกลดีขึ้นภายหลังการนี้ นอกจากนี้การกระจายตัวของเซลล์มีความสม่ำเสมอมากกว่าโพลีกันกระแทกที่ผลิตจากสตาร์ชด้วยวิธีดั้งเดิมอีกด้วย

อุณหภูมิในการแปรรูปส่งผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์กันกระแทก อุณหภูมิการแปรรูปที่ต่ำเกินไปไม่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มขนาดของเซลล์ ในขณะที่อุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้เกิดการสูญเสียความชื้นมากในระหว่างการขยายตัว ทั้งสองสถานการณ์นี้ให้อัตราส่วนการขยายตัว (Expansion ratio, ER) ต่ำ และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติแห้งและเปราะ อย่างไรก็ตามช่วงอุณหภูมิในการแปรรูปที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับสูตรและสภาวะการอัดรีด คณะวิจัยของ Nabar (2006)^[18] พบว่าอัตราส่วนการขยายตัวสูงสุดของสตาร์ชข้าวโพดชนิดไฮดรอกซีโพรพิเลตที่มีแอมิโลสปริมาณสูงเกิดขึ้นที่อุณหภูมิการลอมช่วง 100-110 °C ในขณะที่ Cha และคณะ (2001)^[19] พบว่าอัตราส่วนการขยายตัวสูงสุดสำหรับสตาร์ชข้าวสาลีชนิดไฮดรอกซีโพรพิเลตเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 140 °C นอกจากนี้การอัดรีดโพลียังต้องการรูปแบบของสกรูที่มีการออกแบบให้มีแรงเฉือนสูง เนื่องจากพลาสติกไซเซอร์ชั้นของสตาร์ชต้องใช้พลังงานความร้อนและพลังงานกล (ในรูปของแรงเฉือน) เพื่อฟอร์มวัสดุหลอมเทอร์โมพลาสติก ซึ่งแตกต่างจากพลาสติกทั่วไปที่ต้องการเพียงอุณหภูมิเพื่อหลอมวัสดุเท่านั้น

ตารางที่ 5 ตัวอย่างสภาวะที่ใช้ในกระบวนการอัดรีดโพลี TPS^[20]

Processing parameters	Value	Unit
Foam extrusion by twin screw extruder		
L/D	32 : 1	
Diameter of single die	2	mm
Screw speed	500	rpm
Zone temperatures		
1. Zone	27	°C
2. Zone	27	°C
3. Zone	50	°C
4. Zone	70	°C
5. Zone	80	°C
6. Zone	90	°C
7. Zone	130	°C
8. Zone	130	°C
DI water injected with a triple piston pump	0.58	Kg/h
Moisture content	13.2-15.1	%

2.5 กระบวนการกดอัดด้วยความร้อน (Compression molding) ^[1]

การขึ้นรูปโดยใช้กระบวนการกดอัดด้วยความร้อนได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางในการนำมาใช้เป็นเทคนิคการขึ้นรูป TPS โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการนำไปใช้เป็นภาชนะบรรจุประเภทโฟม ซึ่งโดยทั่วไปเกี่ยวข้องกับเจลาตินในเซชันของสตาร์ช การขยายตัวและการทำแห้ง ส่วนผสมในสูตรนอกจากจะประกอบด้วยสารช่วยการเกิดเจลาตินในเซชันแล้ว ยังจำเป็นต้องมีสารช่วยปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ (Mold release) เช่น แมกนีเซียมสเตียเรต หรือสเตียริกแอซิดอีกด้วย เพื่อป้องกันการติดของสตาร์ชกับแม่พิมพ์

การทำให้พองโดยการระเบิด (Explosion puffing) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการผลิตโฟมสตาร์ชกันมายาวนานโดยผลิตจากวัตถุดิบสตาร์ชที่มีความชื้นต่ำ ตัวอย่างของกระบวนการนี้ คือการทำป๊อปคอร์น การระเบิดเมล็ดข้าวโพดเกิดขึ้นโดยธรรมชาติที่มีอุณหภูมิประมาณ 177 °C ในสภาวะที่มีความชื้นเพียง 10-15 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้มีปริมาตรมากที่สุด (Hosney et al., 1983) การทำให้พองโดยการระเบิดสามารถผลิตโฟมสตาร์ชที่มีความหนาแน่นต่ำภายในช่วงเวลาหลายวินาที อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของโฟมที่ได้ยังไม่เป็นที่น่าพอใจ

วิธีที่ง่ายและไม่ซับซ้อนอีกวิธีหนึ่งสำหรับการผลิตบรรจุภัณฑ์ประเภทโฟมสตาร์ชคือเทคนิคการอบ (Baking technique) ซึ่งคล้ายกับเทคนิคที่ใช้สำหรับการทำคุกกี้เวเฟอร์ วัสดุคล้ายแป้งที่มีความชื้นประมาณ 70-80 เปอร์เซ็นต์และมีปริมาตรแน่นนอนนำไปวางในแม่พิมพ์ที่ถูกให้ความร้อน จากนั้นไอน้ำที่ถูกสร้างขึ้นโดยความชื้นที่มีในโดทำหน้าที่เป็นสารฟู (Blowing agent) เพื่อสร้างโฟม ปริมาณความชื้นสูงของโดทำให้ต้องใช้เวลาในการขึ้นรูปนานขึ้น (ประมาณ 1-2 นาที) เมื่อเปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้สำหรับการผลิตภาชนะบรรจุประเภทโฟมจากพอลิเมอร์ทั่วไป อย่างไรก็ตามปริมาณไอน้ำที่มากเกินไปในตัวอย่างทำให้เกิดช่องว่างตลอดทั่วทั้งเมทริกซ์ของโฟม สมบัติของผลิตภัณฑ์สตาร์ชที่ผลิตโดยวิธีการอบนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น ชนิดของสตาร์ชและสารเติมแต่งที่ใช้ในสูตร²¹

นอกจากนี้ได้มีการเตรียมสตาร์ชโดยใช้กระบวนการอัดด้วยความดัน-การระเบิด (Compression-explosion process) วัตถุดิบสตาร์ชถูกกดอัดในแม่พิมพ์ที่ถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 230 °C ภายใต้แรงบีบอัดแม่พิมพ์ (Clamping force) 3.5 MPa เป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นแรงถูกปลดปล่อยทำให้วัสดุขยายตัวเป็นโฟม ซึ่งอาจเติมช่องว่างบางส่วนของแม่พิมพ์เต็มพอดี หรือเกินช่องว่างของแม่พิมพ์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นของวัตถุดิบ ข้อดีของวิธีการนี้คือ สามารถผลิตโฟมสตาร์ชที่มีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับบรรจุภัณฑ์อาหารที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ทั่วไป

ตารางที่ 6 ตัวอย่างสภาวะที่ใช้ในกระบวนการกดอัดด้วยความร้อนของ TPS ^[21]

Processing parameters	Value	Unit
Temperature	160	°C
Pressure	40	tonness

2.6 การอัดรีดแบบรีแอกทีฟ (Reactive extrusion : REX)^[1]

การอัดรีดแบบรีแอกทีฟ เป็นกระบวนการเกิดปฏิกิริยาและกระบวนการขึ้นรูปที่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน ซึ่งแตกต่างจากเทคนิคอื่นๆ เทคโนโลยีได้ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกในช่วงทศวรรษที่ 1980 โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อตัดแปรรพอลิเมอร์สังเคราะห์ แม้ REX เป็นเทคนิคที่ค่อนข้างใหม่สำหรับการตัดแปรรสตาร์ช แต่ได้รับความสนใจในการนำไปใช้งาน เนื่องจากมีข้อดี คือ สตาร์ชตัดแปรรทางเคมีที่ได้จากกระบวนการ REX มีสมบัติดีขึ้นและเหมาะกับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่ไม่ใช่อาหารและมีบทบาทมากขึ้นในอุตสาหกรรม เนื่องจากองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่สามารถแตกสลายได้ทางชีวภาพและการมองหาวิธีการผลิต

ผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพสูงและต้นทุนต่ำ ในอดีตเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวถูกใช้มากในการอัดรีดสตาร์ช อย่างไรก็ตามในปัจจุบันเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่นิยมใช้มากที่สุดสำหรับการดัดแปรสตาร์ชในระบบ REX ระบบ REX โดยทั่วไปประกอบไปด้วย (1) ส่วนป้อนสตาร์ช ที่ต้องออกแบบเป็นสกรูคู่เพื่อให้สามารถพาสตาร์ชลงไป ในเครื่องอัดรีดได้เอง (2) ป้อนส่งตัวแรกทำหน้าที่ป้อนสารเคมีสำหรับการดัดแปรสตาร์ช (3) ป้อนส่งตัวที่สองทำหน้าที่นำส่งสารเคมีเพื่อให้ระบบรีแอกทีฟเป็นกลาง น้ำ/ความชื้นจะถูกเปลี่ยนเป็นไอน้ำในบาร์เรลปิดและเดินทางผ่านช่องสกรูไปยังช่องเปิดระบายอากาศ สตาร์ชและอนุพันธ์ของสตาร์ชสามารถละลายน้ำได้ ดังนั้นเส้นพลาสติกที่ถูกอัดรีดออกมาจึงถูกทำให้แห้งโดยการเป่า^[22]

ระบบส่วนใหญ่ที่ขึ้นรูปสตาร์ชด้วยเทคนิค REX จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพสูงและมีสมบัติที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับกระบวนการดั้งเดิม งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบกราฟท์ของอะครีโลไนไตรด์บนสตาร์ชข้าวโพดสามารถเกิดขึ้นได้ภายในระยะเวลาหลายนาที่ ผ่านกระบวนการอัดรีดแบบสกรูคู่แบบต่อเนื่อง และใช้สารละลายเซริกแอมโมเนียมไนเตรท (Ceric ammonium nitrate) เป็นสารเริ่มปฏิกิริยาประเภทฟรีเรดิคัล (Free radical initiator) การขึ้นรูปสตาร์ชด้วยเทคนิคนี้เร็วกว่ากระบวนการแบบทั่วไปซึ่งใช้เวลานานถึง 2 ชั่วโมง

REX เป็นเทคนิคที่มีความเป็นไปได้สูงมีประสิทธิภาพในการดัดแปรสตาร์ชและสามารถผลิตผลิตภัณฑ์สตาร์ชที่มีสมบัติดีขึ้น อย่างไรก็ตาม REX มีข้อเสียคือสารที่ไม่ทำปฏิกิริยายังตกค้างในพลาสติกหลอม การกำจัดสารที่มากเกินไปดังกล่าวต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูง

ตารางที่ 7 ตัวอย่างสภาวะที่ใช้ในกระบวนการอัดรีดแบบรีแอกทีฟของ TPS ^[23]

Processing parameters	Value	Unit
Twin screw co-rotating		
L/D	42	
Screw diameter	30	mm
A cylindrical filament die	2.7	mm
Screw speed	120	rpm
Zone temperatures		
1. Zone	15	°C
2. Zone	95	°C
3. Zone	125	°C
4. Zone	145	°C
5. Zone	160	°C
6. Zone	165	°C
7. Zone	165	°C
8. Zone	165	°C
9. Zone	150	°C
10. Zone	145	°C
Melt temperature	153	°C

3. บริษัทผู้ผลิตและจัดจำหน่าย

3.1 บริษัทผู้ผลิต TPS

3.1.1 ภายในประเทศไทย ไม่พบผู้ผลิต TPS ภายในประเทศ

3.1.2 ต่างประเทศ แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 รายชื่อบริษัทผู้ผลิต TPS ในต่างประเทศ

Manufacturers	Address	Contact	Country	Website
Biop	EPFL-SV-PTech-Biop Station 15 CH-1015 Lausanne	+41 (0) 21 693 96 18	Switzerland	http://biop.epfl.ch/
Biotec	BIOTEC GmbH & Co. KG Werner- Heisenberg-Straße 32 D-46446 Emmerich am Rhein	+49 2822 92510	Germany	http://www.biotec.de/bioplast
Cardia Bioplastic	Unit 6, 205-211 Forster Road Mount Waverley, Victoria 3149	+86 25 5272 8473	Australia	http://www.cardiabiooplastics.com/
Cerestech	Pavillion J.A. Bombardier, 5155 Decelles Avenue, Montréal, QC H3T 2B1	+1-514- 893-2089	Canada	http://cerestech.ca/
ENSO Plastics	4710 E. Falcon Dr. Suite 220 Mesa, AZ 85215	866-936- 3676 602-639- 4228	USA	http://www.ensoplastics.com/

3.2 บริษัทผู้จัดจำหน่าย TPS

3.2.1 ภายในประเทศไทย ไม่พบผู้จัดจำหน่าย TPS ภายในประเทศไทย

3.2.2 ต่างประเทศ แสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 รายชื่อบริษัทผู้จัดจำหน่าย TPS ต่างประเทศ

Manufacturers	Address	Contact	Country	Website
Cardia Bioplastic	Unit 6, 205-211 Forster Road Mount Waverley, Victoria 3149	+86 25 5272 8473	Australia	http://www.cardiabiooplastics.com/

Manufacturers	Address	Contact	Country	Website
Biotec	BIOTEC GmbH & Co. KG Werner- Heisenberg-Straße 32 D-46446 Emmerich am Rhein	+49 2822 92510	Germany	http://www.biotec.de/bioplast
Cerestech	Pavillion J.A. Bombardier, 5155 Decelles Avenue, Montréal, QC H3T 2B1	+1-514- 893-2089	Canada	http://cerestech.ca/
Biop	EPFL-SV-PTECH-BIOP Station 15 CH-1015 Lausanne	+41 (0) 21 693 96 18	Switzerland	http://biop.epfl.ch/
ENSO Plastics	4710 E. Falcon Dr. Suite 220 Mesa, AZ 85215	866-936- 3676 602-639- 4228	USA	http://www.ensoplastics.com/

4. การนำไปประยุกต์ใช้ TPS ในอุตสาหกรรม

TPS ได้ถูกนำไปใช้งานในเชิงอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากเป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ทางธรรมชาติ โดยงานที่นำไปประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่เป็นบรรจุภัณฑ์ เช่น แผ่นฟิล์ม หรือ แผ่นซีท ซึ่งสามารถนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิง (Thermoforming) ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างตามที่ต้องการ TPS เหมาะกับการนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตภัณฑ์ที่แห้ง เนื่องจากจะเกิดการแลกเปลี่ยนความชื้นระหว่างบรรจุภัณฑ์กับผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ TPS ได้ถูกนำมาผลิตเป็นโฟมเพื่อลดแรงกระแทกและป้องกันไม่ให้ผลิตภัณฑ์ภายในเกิดการแตกหักได้ TPS สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับทำบรรจุภัณฑ์เนื่องจากสามารถย่อยสลายได้ทางธรรมชาติและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

4.1 อุตสาหกรรมการเกษตร

เนื่องจาก TPS มีสมบัติที่ดูดความชื้นและย่อยสลายได้ทางธรรมชาติ จึงได้มีการนำ TPS ไปผลิตเป็นถุงใส่ปุ๋ย กระถางใส่ต้นไม้ (Plant pots) ฟิล์มคลุมหญ้า (Biodegradable mulch film) เสาลัก (Stakes) ส้อมพรวน



ภาพที่ 4 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่ผลิตจากTPS [24,25]

ถุงใส่ปุ๋ย	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Blow film extrusion
กระถางใส่ต้นไม้	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Injection molding
ฟิล์มคลุมหญ้า	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Sheet extrusion
เสาหลัก	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Extrusion
ส้อมพรวน	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Injection molding

ตารางที่ 10 แสดงตัวอย่างสมบัติชิ้นงาน TPS (Cardia Compostable B-F)

Properties	Test method	Value	Unit
Melt Flow Index	ASTM D -1238	2	g/ 10 min (150 °C / 5 kg)
Density	ASTM D-792	1.2	g/cm ³
Melting Temperature Range	ASTM D-3418	90 - 130	deg. C
Moisture Content	Internal	0.45	%
Tensile strength at yield	ASTM D-882	> 20	MPa
Tensile strength at break	ASTM D-882	> 15	MPa
Elongation at break	ASTM D-882	> 500	% at low strain rates
Impact Resistance-Dart Test	ASTM D-1709	0.25	kg
Tear propagation	ASTM D-1922	2.9	Newton
Oxygen Transmission Rate	ASTM F-1927	1175	(cc/m ² /day)
Water Vapour Transmission Rate	ASTM F-1927	550	(g/m ² /day)

4.2 อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์

TPS ส่วนใหญ่ได้ถูกนำมาใช้ผลิตภัณฑ์ซึ่งได้แก่ ถาด ขวด ถ้วย จาน ช้อน ส้อม ถุง

ภาพที่ 5 ตัวอย่างบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจาก TPS ^[26,27,28]

ช้อน ส้อม	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Injection molding
ถาด	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Thermoforming
ขวด	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Blow molding
จาน	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	thermoforming
ถุง	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Sheet extrusion
ถ้วย	ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ	Injection molding

ตารางที่ 11 แสดงตัวอย่างสมบัติชิ้นงาน TPS (Cardia Biohybrid™ BL-F)

Properties	Test method	Value	Unit
Melt flow index	ASTM D-1238	1.2	g /10 min (2.16 kg/ 190°C)
Density	ASTM D-792	1.18	g/cm ³
Melting Temperature Range	ASTM D-3418	90-100	°C
Moisture Content	Internal	<0.6	%
Tensile strength at yield	ASTM D883	> 25	MPa
Tensile strength at break	ASTM D883	> 20	MPa
Elongation at break	ASTM D883	> 330	%
Impact Resistance-Dart Test	ASTM D1709	200	g
Tear Resistance	ASTM D1922	130	N

5. ความรู้และข่าวสารใหม่ๆ

งานวิจัยในปัจจุบันให้ความสนใจในวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อลดปริมาณการใช้วัสดุที่ผลิตจากปิโตรเลียมและวัสดุที่นำสนใจนั้นคือ Strach ซึ่งมีข้อดีคือเป็นวัสดุที่สามารถหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้ ย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างสมบูรณ์ และมีราคาถูก แต่ TPS มีสมบัติเชิงกลที่ต่ำ เช่น Tensile strength และง่ายต่อการเสีรสป่งผลให้เกิดข้อจำกัดในการนำไปประยุกต์ใช้งานเพื่อเป็นบรรจุภัณฑ์หรือฟิล์ม นอกจากนี้ TPS มีความสามารถในการดูดความชื้นได้เป็นอย่างดีเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการเติมสารเสริมแรง (Reinforcing agents) ลงใน TPS เช่น เส้นใยเซลลูโลส (Cellulosic fibers) และเส้นใยนาโน (Nanofiber) ^[29]

นอกจากจะมีการปรับปรุง TPS ให้มีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมต่อการใช้งานกระบวนการขึ้นรูปเป็นหนึ่ง ในปัจจัยสำคัญที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่คุณภาพที่ตรงต่อความต้องการในการนำไปใช้งานการปรับปรุงเทคนิคการขึ้นรูปโดยการออกแบบวัสดุ (เช่น การออกแบบแบบเกลียวลอน อัตราในการป้อน การปล่อยไอน้ำ การเติมพลาสติกไซเซอร์) เพื่อให้เหมาะสมต่อปริมาณน้ำที่อยู่ในโครงสร้างของ TPS โดยโครงสร้างของพลาสติกไซเซอร์จะขึ้นอยู่กับสมบัติจำเพาะของ Starch และ Starch-filler composite ดังนั้นการควบคุมความชื้นในระหว่างการขึ้นรูปจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องควบคุมบางครั้งการเติมพลาสติกไซเซอร์ลงไปอาจไม่ช่วยให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของ TPS มีขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกไซเซอร์ทำให้เข้ากันได้ไม่ดี ข้อจำกัดหลักๆของ TPS คือความชื้นที่แตกต่างและการคืนตัวของสตาร์ช (Retrogradation) ส่งผลให้โครงสร้างของ TPS เกิดความเปราะ (Embrittlement) ในระหว่างการกักเก็บซึ่งเป็นสมบัติที่ไม่เหมาะสมต่อวัสดุที่จะนำไปทำบรรจุภัณฑ์ นอกจากนี้ Biopolymer ที่ได้จากแหล่งธรรมชาติจะมีสมบัติที่เปลี่ยนไปเมื่อเปลี่ยนแหล่งที่มา ฤดูกาลผลิต หรือความหลากหลายของพืช ซึ่งสามารถควบคุมได้ยากกว่าวัสดุที่ได้มาจากปิโตรเลียม ^[30]

เอกสารอ้างอิง

- [1] รังรอง ยกถ่าน. (2557). พลาสติกชีวฐาน : โครงสร้าง สมบัติ การแปรรูป และการใช้ประโยชน์. กรุงเทพมหานคร: บริษัท Asia Digital การพิมพ์ จำกัด.
- [2] Buléon, A., et al. "Starch granules: structure and biosynthesis." *International journal of biological macromolecules* 23.2 (1998): 85-112

- [3] <http://www.fnbnews.com/Top-News/potato-as-a-source-of-starch-indian-scenario-1-37989>
- [4] Herrero-Martínez, José Manuel, Peter J. Schoenmakers, and Wim Th Kok. "Determination of the amylose-amylopectin ratio of starches by iodine-affinity capillary electrophoresis." *Journal of Chromatography A* 1053.1 (2004): 227-234.
- [5] Mischnick, Petra, and Dane Momcilovic. "Chemical structure analysis of starch and cellulose derivatives." *Advances in carbohydrate chemistry and biochemistry* 64 (2010): 117-210.
- [6] <http://omnexus.specialchem.com/selectors/c-thermoplastics-tps-thermoplastic-starch>
- [7] Liu, Hongsheng, et al. "Thermal processing of starch-based polymers." *Progress in Polymer Science* 34.12 (2009): 1348-1368.
- [8] Van Duin, Martin, Ana Vera Machado, and Jose Covas. "A look inside the extruder: Evolution of chemistry, morphology and rheology along the extruder axis during reactive processing and blending." *Macromolecular Symposia*. Vol. 170. No. 1. WILEY-VCH Verlag GmbH, 2001.
- [9] Ramkumar, D., et al. "Properties of injection moulded starch/synthetic polymer blends—I. Effect of processing parameters on physical properties." *European polymer journal* 32.8 (1996): 999-1010.
- [10] Tábi, T., and J. G. Kovács. "Examination of injection moulded thermoplastic maize starch." *Express Polymer Letters* 1.12 (2007): 804-809.
- [11] Thunwall, Mats, et al. "Film blowing of thermoplastic starch." *Carbohydrate polymers* 71.4 (2008): 583-590.
- [12] Zullo, R., and S. Iannace. "The effects of different starch sources and plasticizers on film blowing of thermoplastic starch: Correlation among process, elongational properties and macromolecular structure." *Carbohydrate Polymers* 77.2 (2009): 376-383
- [13] Dang, Khanh Minh, and Rangrong Yoksan. "Development of thermoplastic starch blown film by incorporating plasticized chitosan." *Carbohydrate polymers* 115 (2015): 575-581.
- [14] McGlashan, Stewart A., and Peter J. Halley. "Preparation and characterisation of biodegradable starch-based nanocomposite materials." *Polymer International* 52.11 (2003): 1767-1773.
- [15] Martin, O., and L. Averous. "Poly (lactic acid): plasticization and properties of biodegradable multiphase systems." *Polymer* 42.14 (2001): 6209-6219.
- [16] Yu, Long, and G. Christie. "Microstructure and mechanical properties of orientated thermoplastic starches." *Journal of materials science* 40.1 (2005): 111-116.
- [17] Shirai, Marianne Ayumi, et al. "Poly (lactic acid)/thermoplastic starch sheets: effect of adipate esters on the morphological, mechanical and barrier properties." *Polímeros AHEAD* (2016): 0-0.

- [18] Nabar, Yogaraj, Ramani Narayan, and Melvin Schindler. "Twin-screw extrusion production and characterization of starch foam products for use in cushioning and insulation applications." *Polymer Engineering & Science* 46.4 (2006): 438-451.
- [19] Cha, J. Y., et al. "Physical properties of starch-based foams as affected by extrusion temperature and moisture content." *Industrial Crops and Products* 14.1 (2001): 23-30.
- [20] Willett, J. L., and R. L. Shogren. "Processing and properties of extruded starch/polymer foams." *Polymer* 43.22 (2002): 5935-5947.
- [21] Van Soest, J. J. G., and D. B. Borger. "Structure and properties of compression-molded thermoplastic starch materials from normal and high-amylose maize starches." *Journal of applied polymer science* 64.4 (1997): 631-644.
- [22] Xie, Fengwei, et al. "Starch modification using reactive extrusion." *Starch -Stärke* 58.3-4 (2006): 131-139.
- [23] Raquez, Jean-Marie, et al. "Maleated thermoplastic starch by reactive extrusion." *Carbohydrate Polymers* 74.2 (2008): 159-169.
- [24] <https://msu.edu/~narayan/researchareas.htm>
- [25] <http://www.cardiabioplastics.com/our-business/faq>
- [26] <http://www.cardiabioplastics.com/our-business/faq>
- [27] <https://www.kbjapan.co.jp/eng/products/05.html>
- [28] <https://msu.edu/~narayan/researchareas.htm>
- [29] Pérez-Pacheco, E., Canto-Pinto, J. C., Moo-Huchin, V. M., Estrada-Mota, I. A., Estrada-León, R. J., & Chel-Guerrero, L. (2016). Thermoplastic Starch (TPS)-Cellulosic Fibers Composites: Mechanical Properties and Water Vapor Barrier: A Review. In *Composites from Renewable and Sustainable Materials*. InTech.
- [30] Shanks, Robert, and Ing Kong. "Thermoplastic elastomers." (2012): 137-154.