

วารสารปริทัศน์

แป้งมันสำปะหลัง

แป้งมันสำปะหลังผลิตได้จากรากที่มีลักษณะคล้ายหัวของต้นมันสำปะหลัง มีชื่อเรียกทางวิทยาศาสตร์ว่า Manihot utilisima ในภาษาอังกฤษจะเรียกแป้งมันสำปะหลังว่า Tapioca starch, Cassava starch หรือ Manioc starch (Swinkels, 1990)

1. โครงสร้างของโมเลกุลแป้งมันสำปะหลัง

โดยทั่วไปแป้งประกอบด้วยโมเลกุลโพลีแซคคาไรด์ 2 ชนิด คือ อะไมโลส และ อะไมโลเพกติน ซึ่งทั้งอะไมโลสและอะไมโลเพกตินนี้เป็นโฮโมโกลแคนของดี-กลูโคส ต่างกันที่โมเลกุลของอะไมโลสเป็นสายตรง กลูโคสแต่ละหน่วยในอะไมโลสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -(1-4)-glucosidic linkage ส่วนโมเลกุลของอะไมโลเพกตินมีลักษณะเป็นกิ่งก้านสาขา บริเวณที่แตกสาขาเกิดจากการเชื่อมต่อกันของหน่วยกลูโคสด้วยพันธะ α -(1-6)-glucosidic linkage (Fennema, 1976) ในโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังจะมีอะไมโลสและอะไมโลเพกตินประกอบอยู่ในอัตราส่วน 17 ต่อ 83 Degree of Polymerization (D.P.) โดยเฉลี่ยของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินเท่ากับ 3000 และ 2×10^6 ตามลำดับ (Swinkels, 1990)

2. สมบัติทางกายภาพและเคมีของแป้งมันสำปะหลัง

2.1 โครงสร้างของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

เม็ดแป้งมันสำปะหลังมีลักษณะคล้ายรูปถ้วย (Fennema, 1976) มีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 ถึง 35 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยจำนวน (Number average diameter) เท่ากับ 20 ไมครอน (Swinkels, 1976) เมื่อตรวจดูเม็ดแป้งด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์จะเห็นลักษณะกากบาทสีดำ เรียกว่า Birefringence

ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วยอะไมโลสและอะไมโลเพกติน ซึ่งมีการเรียง

ตัวต่างกัน แบ่งได้เป็น 2 แบบ แบบแรก สายโพลีเมอร์ของอะไมโลสเรียงตัวขนานกันอย่างเป็นระเบียบ มีอะไมโลสบางส่วนเรียงขนานกับส่วนที่เป็นสายตรงส่วนนอกของอะไมโลเพกติน และยึดติดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้โมเลกุลบริเวณนี้จับกันอย่างหนาแน่น และมีแรงยึดเหนี่ยวสูง บริเวณนี้เรียกว่า Crystalline regions หรือ Micelles เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดลักษณะ Birefringence ของเม็ดแป้ง Crystalline regions นี้ มีความสามารถในการดูดน้ำ และพองตัวต่ำมาก ส่วนแบบที่สอง โมเลกุลเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ แรงดึงดูดระหว่างสายโพลีเมอร์ของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินต่ำกว่าแบบแรก บริเวณที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบนี้เรียกว่า Amorphous regions เป็นส่วนที่ดูดน้ำได้ดี และพองตัวได้ง่าย (Fennema, 1976)

2.2 องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลัง (Swinkels, 1990)

แป้งมันสำปะหลังมีไขมันต่ำกว่าแป้งจากธัญพืชโดยทั่วไป ส่วนองค์ประกอบอื่นนั้น มีในปริมาณใกล้เคียงกันกับแป้งชนิดอื่น องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังโดยทั่วไป แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2: องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังโดยทั่วไป

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
ความชื้น	13.0
แป้ง	87.0
ไขมัน	0.1
โปรตีน	0.1
เถ้า	0.2
ฟอสฟอรัส	0.01
สารที่ให้กลิ่นรส	(ต่ำมาก)

2.3 ลักษณะเฉพาะของการเกิดเจลลิตินเซชันของแป้งมันสำปะหลัง

ในโมเลกุลแป้งโดยทั่วไปจะมีกลุ่มที่ชอบน้ำ (Hydrophilic group) ใน Amorphous regions ซึ่งสามารถจับน้ำจากสิ่งแวดล้อมได้ ด้วยเหตุนี้ แป้งโดยทั่วไปจึงมีความชื้นอยู่ร้อยละ 12 ถึง 14 และถ้าผสมน้ำเย็นลงในแป้ง อาจทำให้แป้งมีความชื้นได้ถึงร้อยละ 30 โดยที่ไม่ปรากฏลักษณะแยกชั้นของน้ำกับแป้ง การผสมน้ำในปริมาณที่มากกว่านี้โดยไม่มีการคนตลอดเวลาจะทำให้แป้งตกตะกอน ถ้ามีการให้ความร้อนพร้อมทั้งคนตลอดเวลา เม็ดแป้งจะเริ่มพองตัวจนเมื่อถึงอุณหภูมิของการเกิดเจลลิตินเซชัน แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลภายในเม็ดแป้งจะถูกทำลาย เม็ดแป้งจะพองตัวมากกว่าเดิม และสูญเสียลักษณะ Birefringence เรียกว่าเกิดเจลลิตินเซชันของแป้ง อุณหภูมิของการเกิดเจลลิตินเซชันของแป้งมันสำปะหลังจะอยู่ในช่วง 65 ถึง 70 องศาเซลเซียส และความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ของน้ำแป้งมันสำปะหลังที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 อยู่ในช่วง 500 ถึง 1,500 Brabender units ส่วน Swelling power และ Solubility ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 71 และร้อยละ 48 ตามลำดับ (Swinkels, 1990)

มอลโตเดกซ์ทริน

1. คำจำกัดความ

มอลโตเดกซ์ทริน คือ ผลิตภัณฑ์แป้งตัดแปรชนิดที่ได้จากการไฮโดรไลซ์แป้งด้วยกรดและ/หรือเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส มีค่า Dextrose Equivalent (D.E.) ต่ำกว่า 20 (Reichelt, 1983) ประกอบด้วยส่วนที่เหลือจากการย่อยอะไมโลสและอะไมโลเพกทิน มีขนาดอยู่ในช่วง Oligomers จนถึง Macromolecules (Mora-Gutierrez and Baianu, 1990) มอลโตเดกซ์ทรินอาจผลิตในรูปของเหลวที่มีลักษณะคล้ายน้ำเชื่อม หรือผงแห้งที่ละลายน้ำได้ง่าย และไม่มีรสหวาน

2. ชนิดของมอลโตเดกซ์ทริน

จากรายงานของ Van Beynum และ Roels (1985) ได้แบ่งมอลโตเดกซ์ทรินออกเป็นสองกลุ่มคือ

- กลุ่มที่ 1 มอลโตเดกซ์ทรินที่มีค่า D.E. 10 ถึง 14 ใช้ในอาหารเหลวเพื่อให้เกิดเนื้อสัมผัสที่ดี
- กลุ่มที่ 2 มอลโตเดกซ์ทรินที่มีค่า D.E. 15 ถึง 19 ใช้ในอาหารแห้ง สำหรับ

เป็นสารเพิ่มปริมาณ และช่วยในการทำงานแบบพ่นแห้ง นอกจากนี้ยังใช้ในการเคลือบผิวลูกกวาด เพื่อลดการดูดความชื้น

ต่อมา Pszczola (1991) รายงานถึงชนิดของมอลโตเดกซ์ทรินที่ใช้เป็นสารทดแทนไขมัน เป็นมอลโตเดกซ์ทรินชนิดที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้าโดยใช้เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส มีการนำมอลโตเดกซ์ทรินชนิดนี้ไปใช้ในการประกอบอาหารหลายประเภท เช่น ไอศกรีม ผลิตภัณฑ์ขนมอบ ไซ้กรอก และน้ำสลัด เป็นต้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

- กลุ่มที่ 1 มีค่า D.E. เท่ากับ 3 หรือต่ำกว่า มีลักษณะเป็นผงสีขาว มอลโตเดกซ์ทรินประเภทนี้จะไม่มีการสกัดโปรตีน วิตามิน หรือเกลือแร่อื่นๆ ออก เมื่อละลายในน้ำเย็นด้วยความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 20 โดยไม่ต้องให้ความร้อน จะเกิดเป็นเจลที่มีลักษณะคล้ายไขมัน

- กลุ่มที่ 2 มีค่า D.E. 10 และ 18 มีลักษณะเป็นผงสีขาว ละลายน้ำได้ง่ายแต่ไม่เกิดเป็นเจลที่มีลักษณะคล้ายไขมัน แต่ยังคงสามารถนำมาใช้เป็นสารทดแทนไขมันในอาหารได้ เพราะทำให้เกิดลักษณะเนื้อสัมผัสที่แน่น และทำให้อาหารมีลักษณะที่ดูชุ่มน้ำ

นอกจากนี้ ยังมีรายงานของ Rapaille (1991) กล่าวถึงมอลโตเดกซ์ทรินที่ผลิตจากแป้งมันฝรั่ง (D.E. มากกว่า 3 เล็กน้อย) ลักษณะการนำไปใช้เหมือนกับมอลโตเดกซ์ทรินที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้า (D.E. ต่ำกว่า 3) กล่าวคือ เจลของมอลโตเดกซ์ทรินที่เตรียมได้มีลักษณะคล้ายไขมัน แต่วิธีการเตรียมเจลของมอลโตเดกซ์ทรินชนิดที่ผลิตจากแป้งมันฝรั่งนี้ จะต้องให้ความร้อนแก่สารละลายมอลโตเดกซ์ทรินที่มีความเข้มข้นร้อยละ 15 ถึง 30 ก่อน จากนั้นนำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสในระยะเวลาหนึ่ง จึงจะได้เจลของมอลโตเดกซ์ทรินที่มีลักษณะคล้ายไขมัน

3. สมบัติทางเคมีและกายภาพของมอลโตเดกซ์ทริน (AVEBE, 1989; AVEBE, 1990)

การจำแนกประเภทของมอลโตเดกซ์ทรินโดยทั่วไปมักพิจารณาที่ค่า D.E. เป็นหลัก ค่า D.E. ที่แตกต่างกันทำให้มอลโตเดกซ์ทรินมีสมบัติทางกายภาพที่ต่างกัน นอกจากการใช้ค่า D.E. ซึ่งแสดงถึงปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลิตภัณฑ์เป็นดัชนีในการบ่งชี้สมบัติของมอลโตเดกซ์ทรินแล้ว การวัดปริมาณของคาร์โบไฮเดรตที่มีค่า Degree of Polymerization (D.P.) ต่ำชนิดต่างๆ เป็นการใช้วิธีหนึ่ง ที่ใช้ในการจำแนกประเภทของมอลโตเดกซ์ทริน เนื่องจากสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของมอลโตเดกซ์ทรินนั้น ขึ้นกับสัดส่วนของคาร์โบไฮเดรตชนิดต่างๆ ด้วยเช่นกัน โดยทั่วไปเมื่อค่า D.E. ของมอลโตเดกซ์ทรินสูงขึ้น สัดส่วนของคาร์โบไฮเดรตที่มีค่า D.P. ต่ำๆ จะสูงขึ้น ทำให้การละลายของมอลโตเดกซ์ทรินดีขึ้น (Brooks and Griffin, 1987) การวัดปริมาณคาร์โบไฮเดรตชนิดต่างๆ นั้น ปัจจุบันนิยมใช้เทคนิค High Performance Liquid Chromatography (HPLC)

ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่า D.E. และสัดส่วนของคาร์โบไฮเดรตชนิดต่างๆ ในมอลโตเดกซ์ทรินที่ผลิตจากแป้งมันฝรั่ง แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3: ปริมาณคาร์โบไฮเดรตชนิดต่างๆ ในมอลโตเดกซ์ทริน

ชนิดของคาร์โบไฮเดรต	ปริมาณคาร์โบไฮเดรตชนิดต่างๆ ในมอลโตเดกซ์ทริน (mg/g)				
	DE 2.8	DE 6	DE 10	DE 14	DE 20
Glucose	-	-	-	5	15
Maltose	1	5	15	25	40
Maltotriose	2	15	35	40	75
Higher saccharides	997	980	950	930	870

อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ จะไม่สามารถวัดค่า D.E. หรือวัดสัดส่วนของคาร์โบไฮเดรตชนิดต่างๆ ได้โดยตรงในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์ เนื่องจากมีแป้งบางส่วนไม่ถูกไฮโดรไลซ์ ต้องมีขั้นตอนการแยกแป้งส่วนที่ไม่ถูกไฮโดรไลซ์ออกจากลิเคอเฟสตา์ช ซึ่งคือแป้งที่ถูกไฮโดรไลซ์แล้วและสามารถละลายน้ำได้ จากนั้น จึงนำลิเคอเฟสตา์ชไปวัดสมบัติต่างๆ ถ้าลิเคอเฟสตา์ชมีค่า D.E. ไม่เกิน 20 จะจัดเป็นมอลโตเดกซ์ทริน

ในด้านสมบัติทางกายภาพนั้น มอลโตเดกซ์ทรินที่อยู่ในรูปผงแห้งจะมีสีขาวคล้ายแป้ง สามารถละลายได้ในน้ำร้อนและน้ำเย็น ส่วนมอลโตเดกซ์ทรินที่อยู่ในรูปของเหลว มีลักษณะเป็นสารละลายใส ไม่มีตะกอน สารละลายของมอลโตเดกซ์ทรินมีความหนืดต่ำเมื่อเทียบกับสารละลายแป้งที่มีความเข้มข้นเท่ากัน ทั้งนี้ ความหนืดของสารละลายมอลโตเดกซ์ทรินจะแปรผกผันกับค่า D.E. ตัวอย่าง เช่น มอลโตเดกซ์ทรินที่ผลิตจากแป้งมันฝรั่งที่มีค่า D.E. เท่ากับ 10 และ 14 เมื่อละลายน้ำให้ความเข้มข้นร้อยละ 55 แล้ววัดความหนืดที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสด้วย Brookfield viscosimeter (ชนิด LVF ใช้เข็มเบอร์ 3 หรือ 4 ความเร็วในการหมุนเข็มเท่ากับ 6 รอบต่อนาที) จะมีค่าความหนืดเท่ากับ 2,000 และ 1,200 mPa.s ตามลำดับ (AVEBE, 1989)

การผลิตมอลโตเดกซ์ทรินโดยวิธีกรรมคา

(Production of Maltodextrins by Conventional Batch Process)

กระบวนการเจลาติไนเซชันและลิเคอแฟคชันเป็นขั้นตอนหลักในการแปรสภาพแป้งดิบให้เป็นมอลโตเดกซ์ทริน กลูโคสไซรัป และไซรัปชนิดที่มีลักษณะพิเศษอื่นๆ (Reichelt, 1983)

1. กระบวนการเจลาติไนเซชัน

เริ่มจากการเตรียมแป้งที่มีความเข้มข้นร้อยละ 25 ถึง 40 จากนั้นให้ความร้อนแก่น้ำแป้งพร้อมทั้งคนอย่างสม่ำเสมอ เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส พันธะไฮโดรเจนที่ยึดโครงสร้างในเม็ดแป้งถูกไฮโดรไลซ์ เมื่อแรงยึดเหนี่ยวภายในถูกทำลาย เม็ดแป้งจึงพองตัวและแตกออก ทำให้แป้งละลายในน้ำได้ดีขึ้น ความใสและความหนืดของน้ำแป้งจะสูงขึ้นเช่นกัน ในระหว่างกระบวนการเจลาติไนเซชันนี้ นอกจากจะเกิดการแตกตัวของเม็ดแป้งแล้ว สารประเภทโปรตีนที่มีอยู่ในแป้งก็จะถูกทำให้เสียสภาพและตกตะกอนออกมาเช่นกัน อุณหภูมิในการทำให้เกิดเจลาติไนเซชันอย่างสมบูรณ์นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง สำหรับแป้งมันสำปะหลังจะมีอุณหภูมิของการเกิดเจลาติไนเซชันในช่วง 65 ถึง 70 องศาเซลเซียส (Reichelt, 1983) กระบวนการเจลาติไนเซชันนี้ เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในการปรับสภาพแป้งให้เหมาะแก่การทำงานของเอนไซม์ เนื่องจาก เอนไซม์ชนิดใดก็ตามจะไม่สามารถย่อยเม็ดแป้งที่อยู่ในสภาพสมบูรณ์ได้ เอนไซม์จะย่อยเฉพาะเม็ดแป้งที่เสียสภาพแล้วเท่านั้น (Kennedy, 1987)

2. กระบวนการลิเคอแฟคชัน

ลิเคอแฟคชันเป็นกระบวนการแปรสภาพแป้งที่ถูกเจลาติไนซ์ โดยใช้กรดและ/หรือเอนไซม์ในการไฮโดรไลซ์แป้ง เพื่อให้แป้งมีความหนืดลดลง โดยทั่วไปการไฮโดรไลซ์หรือการย่อยสลายแป้งที่ถูกเจลาติไนซ์จะใช้กรด เช่น กรดไฮโดรคลอริก เริ่มโดยการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำแป้งให้อยู่ในช่วง 1.5 ถึง 2.0 จากนั้นให้ความร้อนจนถึง 140 ถึง 155 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ถึง 10 นาที หลังจากได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติตามที่ต้องการแล้ว จึงปรับค่า pH ของน้ำแป้งด้วยด่าง เพื่อให้มีค่าเป็นกลาง กระบวนการนี้ทำให้แป้งถูกไฮโดรไลซ์ได้อย่างสมบูรณ์ แต่มีผลเสียคือ จะเกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นที่ต้องการ เช่น เกิดจากปฏิกิริยาการสะเทินของกรดและด่างในการปรับค่า pH นอกจากนี้ ยังเกิดสีเนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Maillard reaction) จึงมีการพัฒนาการใช้กรดร่วมกับเอนไซม์ ในการไฮโดรไลซ์แป้งในเวลาต่อมา และท้ายที่สุดได้ปรับปรุงกระบวนการผลิตให้ใช้เอนไซม์ในการย่อยสลายแป้ง ซึ่งใน

ปัจจุบันนิยมกระบวนการหมักขึ้นเอนไซม์ที่ใช้คือ เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ได้จากแบคทีเรีย การ
ใช้เอนไซม์มีข้อดีคือ ลดปัญหาการเกิดเกลือและสีดั่งที่กล่าวไว้ข้างต้น กระบวนการไฮโดรไลซ์แป้ง
ด้วยเอนไซม์ในระดับอุตสาหกรรมมี 3 แบบ ดังนี้ (Reichelt, 1983)

2.1 Two Stage Addition Batch Process

กระบวนการผลิตแบบนี้เป็นแบบกะ ขึ้นแรกให้เตรียมน้ำแป้งเข้มข้นร้อยละ
25 ถึง 40 จากนั้นเติมเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสจากแบคทีเรีย ในระยะแรกที่พัฒนากระบวนการ
ผลิตแบบนี้ ยังไม่มีการค้นพบแบคทีเรียที่ให้เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสชนิดที่ทนความร้อน ดังนั้น จึง
ต้องมีการย่อยสลายแป้ง 2 ขั้นตอน ตัวอย่างเช่น ใช้เอนไซม์ Optiamyl[®] หรือ Tenase[®]
ปริมาณ 0.2 ถึง 0.4 ลิตรต่อแป้งแห้ง 1,000 กิโลกรัม โดยปรับสภาวะให้เหมาะสมต่อการ
ทำงานของเอนไซม์ด้วยการเติมแคลเซียมออกไซด์ 200 ถึง 400 ส่วนในล้านส่วน ปรับ pH ให้อยู่
ในช่วง 6.8 ถึง 7.0 และเติมโซเดียมออกไซด์ 300 ถึง 450 ส่วนในล้านส่วน ให้ความร้อนแก่
น้ำแป้งใน Jet cooker ให้มีอุณหภูมิ 85 ถึง 90 องศาเซลเซียส ประมาณ 20 นาที ติดตาม
ด้วยการให้ความร้อนที่ 140 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะที่มีความดันสูง เป็นเวลา 5 นาที ทำ
ให้น้ำแป้งเย็นลงจนถึงอุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ต่อมา จะเป็นการเติมเอนไซม์ครั้งที่ 2
เอนไซม์ที่เติมจะเป็นชนิดเดิม แต่เพิ่มปริมาณเป็น 1.0 ถึง 1.8 ลิตรต่อแป้งแห้ง 1,000 กิโลกรัม
ขั้นตอนนี้เรียกว่าลิเคอแฟคชันครั้งที่ 2 หรือเดกซ์ทริไนเซชัน น้ำแป้งจะถูกทำให้ร้อนที่ 85 องศา
เซลเซียส จนกระทั่งได้ค่า D.E. ตามต้องการ จึงยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โดยให้ความร้อน
ที่ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 ถึง 15 นาที (Reichelt, 1983)

2.2 Continuous Enzyme Starch Liquefaction

การพัฒนาเอนไซม์ที่สามารถทนความร้อนได้สูง เช่น เอนไซม์จากแบคทีเรีย
Bacillus licheniformis ซึ่งสามารถทำงานในสภาวะที่มีความร้อนสูงกว่า 95 องศา
เซลเซียสได้เป็นเวลานาน และสามารถทนต่อความร้อนที่ 105 ถึง 110 องศาเซลเซียสได้ระยะ
เวลาหนึ่ง ทำให้สามารถพัฒนากระบวนการลิเคอแฟคชันให้เป็นแบบที่มีการเติมเอนไซม์เพียงครั้ง
เดียว และดำเนินการผลิตแบบต่อเนื่องได้ เอนไซม์ที่ทนความร้อนได้สูงดังกล่าวนี้เป็น Calcium
metallo-enzyme กล่าวคือ มีแคลเซียมติดอยู่ในโครงสร้างของเอนไซม์ ทำให้สามารถทำงาน
ได้ดีแม้ในสภาวะที่มีแคลเซียมออกไซด์เพียง 75 ถึง 100 ส่วนในล้านส่วน นอกจากนี้ Protease
activity ในเอนไซม์ยังมีค่าต่ำมาก เป็นการลดการเกิดไฮโดรไลซิสของโปรตีนในกระบวนการ
ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดสารที่ให้อิ

ระบบการผลิตแบบที่สองนี้จะทำใน Jet cooker เช่นเดียวกับแบบแรก
แต่จะมีการเติมเอนไซม์ครั้งเดียวเท่านั้น ตัวอย่างการเติมเอนไซม์เช่น ใช้ Optitherm[®] หรือ

Takatherm[®] 1.8 ลิตรต่อแป้งแห้ง 1,000 กิโลกรัม ให้ความร้อนแก่น้ำแป้งที่ 105 ถึง 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ถึง 10 นาที แล้วทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วจนมีอุณหภูมิ 95 ถึง 100 องศาเซลเซียส และควบคุมอุณหภูมิให้คงที่เป็นเวลา 1 ถึง 2 ชั่วโมงจนได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่า D.E. ตามต้องการ ยับยั้งเอนไซม์โดยการปรับ pH ของน้ำแป้งให้มีค่า 3.8 ถึง 4.5 และเพิ่มความร้อนจนอุณหภูมิสูงกว่า 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ถึง 15 นาที กระบวนการแบบที่สองนี้ จะทำให้กระบวนการเจลาติไนเซชันและลิเคอแฟคชันเกิดอย่างสมบูรณ์เฉพาะในแป้งมันฝรั่งและแป้งจากธัญพืชบางชนิดเท่านั้น ถ้าเป็นแป้งชนิดอื่น โดยเฉพาะแป้งที่มีปริมาณไขมันสูง ไขมันจะจับกับอะไมโลสเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสกับไขมัน ซึ่งทนความร้อนได้สูงและตกตะกอนง่าย ทำให้ลิเคอแฟคชันเกิดไม่สมบูรณ์ ผลิตภัณฑ์จะเกิดความขุ่นเมื่อเก็บไว้ระยะหนึ่ง (Retrogradation of starch) (Reichelt, 1983)

2.3 Dual Enzyme Addition Jet Cooking Process

กระบวนการนี้พัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาการเกิดเจลาติไนเซชันไม่สมบูรณ์ และผลิตภัณฑ์เกิดความขุ่นเมื่อเก็บไว้ เนื่องจากในปัจจุบันมีการใช้แป้งข้าวโพดและแป้งสาลีเป็นวัตถุดิบในการผลิตมอลโตเดกซ์ทรินและกลูโคสไซรัปกันมาก การเติมเอนไซม์ประกอบกับการให้ความร้อนแก่น้ำแป้งดังในแบบที่สองนั้น ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดเจลาติไนเซชันอย่างสมบูรณ์ จะต้องให้ความร้อนในระดับที่สูงกว่านั้น เพื่อทำลายสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสกับไขมัน

ในกระบวนการนี้ น้ำแป้งเข้มข้นร้อยละ 35 ถึง 40 ที่ปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 6.0 ถึง 6.5 และเติมแคลเซียมคลอไรด์ 100 ส่วนในล้านส่วนแล้วจะถูกนำมาเติมเอนไซม์ Optitherm[®] L210 0.15 ถึง 0.30 ลิตรต่อแป้งแห้ง 1,000 กิโลกรัม จากนั้น ผ่านส่วนผสมนี้เข้าสู่ Jet cooker ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ถึง 30 วินาที ซึ่งการให้ความร้อนที่สูงจะมีผลให้เกิดเจลาติไนเซชันของแป้งได้ดียิ่งขึ้น จากนั้นทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วจนถึง 100 องศาเซลเซียส ขึ้นต่อมา เติมเอนไซม์ชนิดเดิมในปริมาณ 0.7 ถึง 1.0 ลิตรต่อแป้งแห้ง 1,000 กิโลกรัม รักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่ที่ 98 ถึง 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที แล้วทำให้เย็นลงจนถึง 85 ถึง 90 องศาเซลเซียส รอจนกระทั่งได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่า D.E. ตามต้องการ ยับยั้งเอนไซม์ด้วยวิธีเดียวกับที่ใช้ในหัวข้อ 2.2 (Reichelt, 1983)

3. ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตมอลโตเดกซ์ทริน โดยใช้เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ทนความร้อนในกระบวนการผลิตแบบกะ

3.1 ความเข้มข้นของน้ำแป้ง

การดำเนินการผลิตโดยใช้ Jet cooker มักจะใช้แป้งที่มีความเข้มข้น

ร้อยละ 25 ถึง 40 (Reichelt, 1983) การใช้ น้ำแข็งที่มีความเข้มข้นสูงนั้น นอกจาก ทำให้เกิดความหนืดสูงจนเกิดปัญหาในการผสมและการไหลของน้ำแข็งแล้ว ยังทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของเอนไซม์ต่ำลง เนื่องจากโมเลกุลของแป้งจัดเรียงตัวจนเกิดเป็นโครงสร้าง ทำให้เอนไซม์สัมผัสกับแป้งไม่ทั่วถึง อัตราการย่อยสลายแป้งโดยเอนไซม์จึงต่ำลง (Komolprasert and Ofoli, 1991)

3.2 ความเข้มข้นของเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส

ปริมาณเอนไซม์ที่ใช้ต้องมีความพอดีกับความเข้มข้นของน้ำแข็ง ถ้าความเข้มข้นของเอนไซม์ต่ำในขณะที่ความเข้มข้นของน้ำแข็งสูง อัตราการย่อยจะต่ำ ทำให้เสียเวลาในการย่อยนาน และการย่อยแป้งอาจไม่สมบูรณ์และทั่วถึง แต่ถ้าความเข้มข้นของเอนไซม์สูงเกินไป จะเป็นการสิ้นเปลืองเอนไซม์ และอาจมีกลิ่นของเอนไซม์ตกค้างอยู่ในผลิตภัณฑ์ ในสภาวะการผลิตโดยทั่วไปเมื่อความเข้มข้นของน้ำแข็งอยู่ในช่วงร้อยละ 20 ถึง 40 มักใช้เอนไซม์เข้มข้นร้อยละ 0.03 ถึง 0.1 (Yankov et al., 1986) มีรายงานเกี่ยวกับการใช้เอนไซม์ที่ความเข้มข้นต่ำกว่าร้อยละ 0.03 โดย Griffin และ Brooks (1989) ศึกษาการผลิตมอลโตเดกซ์ทรินด้วยวิธีเติมเอนไซม์ครั้งเดียว โดยใช้ น้ำแข็งเข้มข้นร้อยละ 30 เป็นสารตั้งต้น ความเข้มข้นของเอนไซม์เท่ากับร้อยละ 0.01 อุณหภูมิ 70 ถึง 97 องศาเซลเซียส เวลา 15 ถึง 75 นาที พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่มีค่า D.E. สูงสุด 11.04 ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 70 นาที

3.3 เวลาในการให้ความร้อน

จากการทดลองของ Yankov และคณะ (1986) เมื่อความเข้มข้นของน้ำแข็งเท่ากับร้อยละ 30 ความเข้มข้นของเอนไซม์ร้อยละ 0.1 และอุณหภูมิ 95 ถึง 100 องศาเซลเซียส ที่เวลา 40 และ 120 นาที จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่า D.E. เท่ากับ 10 และ 20 ตามลำดับ

3.4 ความร้อนที่ให้แก่น้ำแข็งในกระบวนการผลิต

อุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส Termamyl 120L^R มากที่สุด คือ 80 ถึง 90 องศาเซลเซียส ในช่วงอุณหภูมินี้ เอนไซม์จะมีค่า relative activity สูงกว่าร้อยละ 80 และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 90 องศาเซลเซียส ค่า relative activity ของเอนไซม์จะลดลง (Novo Nordisk, 1993)

3.5 ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่า pH มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส เนื่องจาก เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสจัดเป็นโปรตีนประเภทหนึ่ง ซึ่งถูกยับยั้งการทำงานได้ถ้ามีสภาวะความเป็นกรดสูง สำหรับค่า pH ที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสคือ 5.0 ถึง 8.0 (Fogarty, 1983)

3.6 ปริมาณแคลเซียมออกซอน

เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสจัดเป็น Calcium metallo-enzyme คือ ถ้ามีแคลเซียมออกซอนในระบบแม้ในปริมาณต่ำมากเพียง 1 ส่วนในล้านส่วน เอนไซม์จะมีเสถียรภาพและมีประสิทธิภาพในการทำงานดีขึ้นมาก (Kennedy, 1987; Fogarty, 1983) สำหรับเอนไซม์ Termamyl 120L[®] ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แม้ไม่เติมแคลเซียมออกซอนในระบบการผลิตเลย ก็ยังคงมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง เนื่องจากเอนไซม์ชนิดนี้ เป็นเอนไซม์ที่มีความคงทนสูง สามารถทำงานได้ดีแม้อยู่ในสภาวะที่ไม่เหมาะสม และมีความต้องการแคลเซียมออกซอนในปริมาณที่ต่ำมาก (Novo Nordisk, 1993)

การผลิตมอลโตเดกซ์ทรินโดย Twin-Screw Extrusion Cooking Process

1. กระบวนการผลิตแบบเอกซ์ทรูชัน

1.1 คำนำ

กระบวนการผลิตแบบเอกซ์ทรูชัน คือ กระบวนการแบบต่อเนื่องที่มีการหมุนผลึกพาวัตถุคิบให้ไหลผ่านช่อง (Channel) ภายในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ภายใต้สภาวะควบคุมต่างๆ จากนั้น วัตถุคิบจะถูกขับผ่านรูหน้าแปลน (Die) ให้มีรูปร่างตามต้องการ กระบวนการผลิตแบบเอกซ์ทรูชันมีความสำคัญในอุตสาหกรรมอาหาร สามารถนำไปใช้งานได้หลายลักษณะ เช่น ใช้ในการผสม การขึ้นรูปอาหาร การทำให้สุก การทำให้พอง หรือการทำแห้ง ทั้งนี้ ขึ้นกับการออกแบบเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์และสภาวะในระหว่างกระบวนการผลิต (Dziejak, 1988) ในกระบวนการผลิตแบบทำให้สุก วัตถุคิบที่ปรับความชื้นแล้ว จะได้รับความร้อนในเอกซ์ทรูเดอร์ ความร้อนภายในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์นี้มีแหล่งกำเนิด 2 ทางคือ ความร้อนที่ได้จากบาร์เรล และความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของวัตถุคิบเอง หรือความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของวัตถุคิบกับผนังบาร์เรล ในขณะที่เคลื่อนที่ไปตามสกรู ความร้อนนี้จะทำให้เกิดการเจลของแป้งคิบ การเสียดสภาพของโปรตีน และการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์บางชนิด เป็นต้น (Harper, 1979)

1.2 ชนิดของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบ่งตามลักษณะและสภาวะในการทำงาน

การจำแนกประเภทของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ในหัวข้อนี้ ทำได้หลายวิธี เช่น แบ่งตามคุณลักษณะหน้าที่ที่ใช้ในการผลิต (Functional characteristics) แบ่งตามลักษณะจลนพลศาสตร์ (Thermodynamic characteristics) และแบ่งตามปริมาณความชื้นของวัตถุคิบ (Moisture characteristics) ซึ่งการจำแนกประเภทของเอกซ์ทรูเดอร์ โดยวิธีต่างๆ เหล่านี้

ได้สรุปไว้อย่างย่อๆโดย Rossen และ Miller, 1973 (ประชา บุญศิริกุล, 1994) ดังนี้

1.2.1 แบ่งตามลักษณะหน้าที่ที่ใช้ในการผลิต

(Functional Characteristics)

- Pasta Extruder เป็นเอกซ์ทรูเดอร์ที่ใช้ในการทำผลิตภัณฑ์จากแป้งสาลี เช่น มักกะโรนี เอกซ์ทรูเดอร์พวกนี้จะมีร่องเกลียวสกรูลึก ผนังด้านในบาร์เรลเรียบ และความเร็วของสกรูที่หมุนจะช้า สกรูเกลียวที่หมุนนี้ทำหน้าที่ผลิตพาสต้าเซโมไลนา (Semolina) ที่ชื้นและนุ่ม ให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้า แล้วอัดผ่านรูบนหน้าแปลนออกมา ซึ่งอาจทำให้เซโมไลนาสุกเพียงเล็กน้อยหรือไม่สุกเลยก็ได้ ใน Pasta extruder นั้น พลังงานที่ใช้จะน้อยมาก และแรงเฉือน (Shear) เกิดขึ้นต่ำมากเช่นกัน จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่ถึงกับสุกพอง จำเป็นต้องใช้ขั้นตอนอย่างอื่นมาช่วยในการทำให้ผลิตภัณฑ์นั้นสุกพร้อมที่จะนำไปรับประทานได้

- High-Pressure Forming Extruder เริ่มแรกที่พัฒนาหรือประยุกต์นำเอาเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้เข้ามาในอุตสาหกรรมอาหารก็เพื่อใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์อาหารให้มีรูปร่างตามต้องการเท่านั้น วัตถุดิบที่ใช้เป็นพวกแป้งที่ผ่านการทำให้เกิดเจลบางส่วน (Pregelatinized starch) อัดผ่านรูเปิดบนหน้าแปลนแล้วตัดให้เป็นชิ้นที่มีขนาดตามต้องการ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิตแบบนี้จะไม่สุกพอง ต้องนำไปผ่านขั้นตอนการอบแห้ง แล้วนำไปทำให้สุกโดยการทอดในน้ำมัน หรือคั่วเสียก่อนจึงจะรับประทานได้ ในเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้ จะออกแบบให้ผนังบาร์เรลด้านในเป็นร่อง เพื่อป้องกันการลื่นไถลของวัตถุดิบที่ผนัง และสกรูก็ถูกออกแบบให้เป็นชนิดที่ทำให้เกิดแรงอัดสูง ผลก็คือ เกิดแรงดันสูงที่บริเวณด้านหลังหน้าแปลน นอกจากนี้ยังเกิดความร้อนจากแรงเสียดทานร่วมด้วย จากความร้อนนี้เอง ที่อาจทำให้เกิดการสุกพองของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ ความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานนี้ต้องกำจัดออกโดยการใช้น้ำหล่อเย็นรอบผนังของบาร์เรล หรือภายในโพรงสกรู (Screw hollow)

- Low-Shear Cooking Extruder เป็นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่ทำให้สุกแบบต่อเนื่อง (Continuous cooker) ใช้กับวัตถุดิบที่ชื้น หรือมีความชื้นสูง รูปแบบของเครื่องจะเป็นเอกซ์ทรูเดอร์ที่ผนังบาร์เรลด้านในเป็นร่อง มีแรงเฉือนปานกลาง มีการอัดสูงเพื่อช่วยให้เกิดการผสมรวมกันระหว่างอนุภาคของวัตถุดิบได้ดียิ่งขึ้น ร่องที่ผนังบาร์เรลช่วยป้องกันการลื่นไถลของวัตถุดิบที่ผนัง ความร้อนที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทานในขณะที่วัตถุดิบอาหารที่มีความหนืดถูกอัดผ่านเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ จะถูกส่งผ่านทางผนังบาร์เรลหรือสกรูเข้าสู่ตัวผลิตภัณฑ์โดยการนำความร้อน ความร้อนนี้จะทำให้วัตถุดิบอาหารเกิดการสุก

- Collet Extruder เป็นเอกซ์ทรูเดอร์แบบเรียบง่าย เล็กกระทัดรัด และสะดวกต่อการใช้งาน เอกซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้มีความยาวของตัวสกรูต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องน้อยมาก ประมาณ 3:1 ($L/D = 3:1$) เท่านั้น ใน Collet extruder จะ

ให้แรงเฉือนสูงมากในระหว่างการทำงาน เนื่องมาจากมีสกรูที่มีร่องเกลียวตื้น และผนังด้านในบาร์เรลถูกออกแบบให้เป็นร่องเช่นเดียวกัน ร่องเกลียวที่ตื้นจะป้องกันการลื่นไถลของวัตถุดิบอาหาร วัตถุดิบที่ใช้ส่วนใหญ่มีความชื้นต่ำ เช่น คอร์นกรีต และข้าวท่อน ความร้อนเกือบทั้งหมดหรือทั้งหมดจะมาจากการเสียดสีระหว่างอนุภาควัตถุดิบเอง หรือระหว่างอนุภาควัตถุดิบกับผนังบาร์เรล ความร้อนที่เกิดขึ้นอาจสูงถึง 175 องศาเซลเซียส ทำให้วัตถุดิบอาหารเกิดการสุก ถ้าเป็นแป้งจะเกิดเป็นเจล หรือเป็นเดกซ์ทรินบางส่วน วัตถุดิบอาหารที่สุกแล้วนี้เรียกว่าเอกซ์ทรูเดท เอกซ์ทรูเดทจะถูกอัดให้ออกมาทางรูเปิดบนหน้าแปลน ด้วยการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็วจากภายในเครื่องที่มีความดันสูงมากมาสู่ความดันบรรยากาศ ไอน้ำในเอกซ์ทรูเดทจะระเหยออกไปอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการพองและกรอบ

- High-Shear Cooking Extruder การทำงานของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้คล้ายกับการทำงานของ Collet extruder ต่างกันที่ระยะเวลาที่วัตถุดิบอาหารอยู่ในเครื่อง (Residence time) ของ High-shear cooking extruder จะมากกว่า เนื่องจากมีความยาวของสกรูต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่อง (L/D) ถึง 15-20:1 และได้มีการออกแบบให้ระบบระบายความร้อนที่ผนังบาร์เรล ทำให้เอกซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้มีความยืดหยุ่นในการใช้งานมากกว่า วัตถุดิบที่จะนำมาใช้ก็จะมีหลากหลายได้มากกว่า สามารถใช้ได้ทั้งวัตถุดิบที่มีความชื้นต่ำมากจนถึงวัตถุดิบที่มีความชื้นสูงนอกจากนี้ ยังมีการให้แรงเฉือนที่สูง เมื่อประกอบกับระยะเวลาที่อยู่ในเครื่องนาน ทำให้วัตถุดิบเกิดการผสมอย่างทั่วถึง

1.2.2 แบ่งตามลักษณะจลนพลศาสตร์

(Thermodynamic Characteristics)

- Autogenous Extruder ความร้อนทั้งหมดที่เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ได้รับนั้น มาจากแรงเสียดทาน (Friction force) เพียงอย่างเดียว ปริมาณความร้อนที่ได้รับ หรือระบายออกโดยการนำผ่านทางบาร์เรลจะมีเพียงเล็กน้อย หรือแทบจะไม่มีเลย Collet extruder หรือ High-shear cooking extruder บางชนิดจะจัดอยู่ในพวก Auto genous extruder เนื่องจาก อุณหภูมิภายในเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้จะสูงหรือต่ำนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าไป และการจัดรูปแบบของสกรู การควบคุมความร้อนของเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้ทำได้ยาก ไม่เหมาะแก่การนำมาใช้ในการผลิตอาหาร

- Isothermal Extruder เป็นเอกซ์ทรูเดอร์ที่มีระบบควบคุมอุณหภูมิให้คงที่เท่ากับตลอดความยาวของบาร์เรล Forming extruder จัดอยู่ในประเภทนี้ การควบคุมความร้อนให้คงที่นี้ ทำโดยการให้และระบายความร้อนผ่านทางช่องว่างระหว่างผนังของบาร์เรลชั้นนอกและชั้นในที่เรียกว่า Jacket

- Polytropic Extruder เป็นเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดที่ให้ความร้อนแก่วัตถุดิบด้วยแหล่งความร้อน 2 แหล่ง คือ ความร้อนจากพลังงานกล (ความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทาน) และความร้อนที่ได้มาจากแหล่งความร้อนภายนอก (ความร้อนจาก jacket ที่อยู่รอบบาร์เรล) ในความเป็นจริงแล้วเอกซ์ทรูเดอร์เกือบทุกชนิดจัดเป็น Polytropic extruder

1.2.3 แบ่งตามปริมาณความชื้นของวัตถุดิบ

(Moisture Characteristics)

- Low Moisture วัตถุดิบที่ใช้จะมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 20 พลังงานความร้อนส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทานของวัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความแห้งมาก และมีลักษณะที่พองมาก ทำให้กำหนดรูปร่างของผลิตภัณฑ์ได้ยาก

- Intermediate Moisture วัตถุดิบที่ใช้มีความชื้นในช่วงร้อยละ 20 ถึง 28 พลังงานความร้อนครึ่งหนึ่งได้จากแรงเสียดทาน ที่เหลือได้จากการให้ความร้อนจากแหล่งภายนอก เช่นจาก Steam jacket ผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นพอควร ต้องผ่านการอบแห้งอีกครั้งเพื่อให้ได้ความชื้นเท่าที่ต้องการ การพองของผลิตภัณฑ์เกิดเพียงเล็กน้อย ทำให้ง่ายต่อการขึ้นรูปร่างของผลิตภัณฑ์

- High Moisture วัตถุดิบที่ใช้มีความชื้นได้มากกว่าร้อยละ 28 ขึ้นไป พลังงานความร้อนจากแรงเสียดทานในแบบนี้จะน้อยมาก ส่วนใหญ่ต้องมีการให้ความร้อนจากแหล่งภายนอก ผลิตภัณฑ์ที่ได้มักจะไม่พอง ทำให้ขึ้นรูปร่างได้หลายแบบ แต่ผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูง ต้องผ่านการอบแห้งก่อนที่จะไปผ่านกระบวนการอื่นๆ

1.3 ชนิดของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบ่งตามลักษณะและองค์ประกอบของเครื่อง (Dziezak, 1988)

สามารถแบ่งเอกซ์ทรูเดอร์ได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1.3.1 Piston Extruder เป็นเอกซ์ทรูเดอร์ที่ถูกลูกสูบแบบให้มีการทำงานง่ายๆไม่ซับซ้อน ประกอบด้วยลูกสูบ (Piston) เพียงอันเดียวหรือเป็นชุดของลูกสูบ ส่วนใหญ่มักใช้เอกซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ประเภท Confectionery

1.3.2 Roller Extruder ประกอบด้วยลูกกลิ้ง 2 อันที่หมุนในทิศทางสวนทางกัน ส่วนใหญ่นำมาใช้ประโยชน์ในการขึ้นรูปเช่นเดียวกับ Piston extruder แต่การขึ้นรูปโดยใช้ Roller extruder นี้จะทำได้หลากหลายรูปแบบกว่า

1.3.3 Screw Extruder

ประกอบด้วยสกรูหนึ่งอัน (Single screw) สองอัน (Twin screws) หรือมากกว่า 2 อัน (Multiple screws) วางอยู่ภายในช่อง (Channel) ในระหว่าง

การทำงานสกรูจะหมุนเพื่อผลักดันวัตถุดิบให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้า และผ่านออกมาทางหน้าแปลน(Die) ที่ออกแบบเป็นพิเศษให้ผลิตภัณฑ์มีรูปร่างตามต้องการ

เอกซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้ มีตัวแปรที่ต้องควบคุมในระหว่างการทำงาน มากกว่าสองชนิดแรก ตัวอย่างของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง เช่น รูปแบบของสกรู ความเร็วในการหมุนของสกรู และอุณหภูมิของบาร์เรลในโซนต่างๆ ซึ่งการควบคุมหรือการแปรตัวแปรต่างๆดังกล่าวจะมีผลต่อค่าแรงเฉือน ความดัน และ Residence time ด้วยเหตุนี้ การนำเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้มาใช้งานในอุตสาหกรรมอาหารในปัจจุบัน นอกจากจะใช้ในการขึ้นรูปอาหารแล้วยังใช้ในการทำให้สุก การผสม การทำให้พอง หรือแม้แต่การใช้เป็นเครื่องปฏิกรณ์ ทั้งในกระบวนการทางเคมี และกระบวนการทางชีวภาพ เนื่องจากความหลากหลายในการทำงานนี้เอง ทำให้เอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในทางอุตสาหกรรมอาหาร และมีแนวโน้มของการใช้งานเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

1.4 ชนิดของ Screw extruder ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร (Harper, 1990; Dziezak, 1988)

1.4.1 Single-Screw Extruder

Single-screw extruder มีสกรู 1 อันวางอยู่ในช่อง (Channel) ในระหว่างการทำงานสกรูจะหมุนด้วยความเร็วสูง ทำให้เกิดแรงเฉือน ความดัน และความร้อนใช้ในการทำให้อาหารสุกพร้อมกับการทำให้พองและการขึ้นรูปร่าง หรืออาจใช้ในการขึ้นรูปอาหารขณะเย็น เช่น การขึ้นรูปมิกกะโรน และหมากฝรั่ง เป็นต้น

เนื่องจากมีสกรูเพียง 1 อัน ประสิทธิภาพในการผสมวัตถุดิบที่อยู่ภายในช่องจึงค่อนข้างต่ำ ซึ่งมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนจากผนังบาร์เรลมาสู่วัตถุดิบต่ำด้วยเช่นกัน

1.4.2 Twin-Screw Extruder

ประกอบด้วยสกรู 2 อันวางชิดกันแบบที่เรียกว่า Intermeshing screw สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทได้ตามลักษณะการหมุนของสกรูคือ Co-rotating สกรู 2 อันที่วางอยู่ในช่องจะหมุนไปในทิศทางเดียวกัน และ Counter-rotating สกรู 2 อันที่วางอยู่ในช่องจะหมุนในทิศทางที่สวนกัน การหมุนของสกรูแบบสวนทางกันนี้ มีผลทำให้ความดันภายใน channel สูงกว่าแบบแรก

สำหรับ Twin-screw extruder นี้กำลังเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหารมากกว่า Single-screw extruder เนื่องจากด้วยเหตุผลหลายประการ ดังต่อไปนี้

ผ่านเครื่องฯ ได้ดี

เป็นผงมีความหนาแน่นต่ำ

- a) มีประสิทธิภาพในการผสมวัตถุดิบ และพาวัตถุดิบให้เคลื่อนที่
- b) สามารถใช้กับวัตถุดิบที่มีความชื้นต่ำจนถึงความชื้นสูงได้
- c) สามารถใช้กับวัตถุดิบที่มีลักษณะพิเศษต่างๆ เช่น วัตถุดิบที่
หรือวัตถุดิบที่มีลักษณะเหนียวได้ เป็นต้น
- d) การถ่ายเทความร้อนจากผนังบาร์เรลไปยังวัตถุดิบสูง

ตารางที่ 4: ข้อเปรียบเทียบระหว่าง single- และ twin-screw extruder

	single-screw	co-rotating twin-screw
1.relative capital cost/unit capacity		
- extruder	1.0	1.5 - 2.0
- system	1.0	0.9 - 1.3
2.relative maintenance		
	1.0	1.0 - 2.0
3.energy		
- with preconditioner	half from steam	not used
- without preconditioner	mechanical energy	mix of mechanical energy and heat exchange with barrel
4.screw		
- conveying angle	>> 10°	>> 30°
- self-cleaning/wiping	no	yes
- variable flight height	yes	no
- screw length/diameter	4-25	10-25
- mixing	poor	good
5.drive		
- relative torque/pressure	5.0	1.0
- gear reducer	simple	complex
6.heat transfer		
	poor	better in filled sections
7.operations		
- moisture	12-35	6 to very high
- ingredients	flowing granular materials	wide range
- flexibility	narrow operating	greater operating

2. กระบวนการผลิตแบบเอกซ์ทรูชันกับการเจลาติไนเซชันและลิเคอแฟคชัน

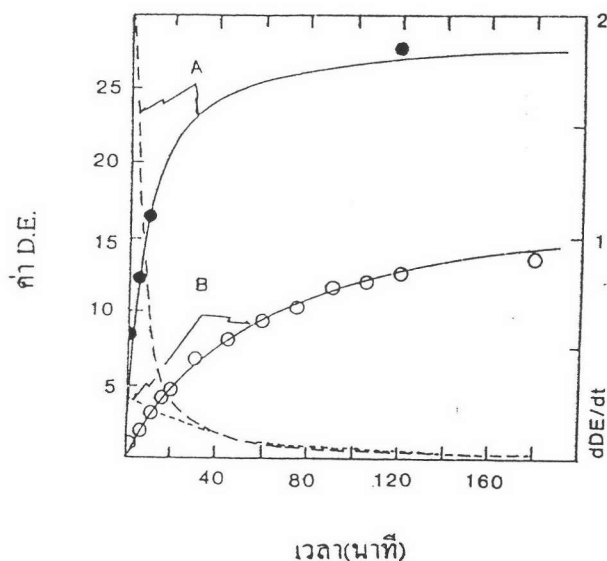
กระบวนการเอกซ์ทรูชันนี้ ปกติจะมีลักษณะของการผลิตเป็นแบบความร้อนสูง เวลาต่ำ (High Temperature Short Time-HTST) คือ มีอุณหภูมิในกระบวนการผลิตสูง 80 ถึง 250 องศาเซลเซียส ในขณะที่ระยะเวลาที่สารอยู่ในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สั้น น้อยกว่า 10 วินาที จนถึง 180 วินาที) นอกจากนี้ การผลิตแบบเอกซ์ทรูชันยังทำให้เกิดแรงเฉือนและความดันสูง กระบวนการผลิตแบบนี้ มีการสูญเสียสารอาหารและคุณค่าทางโภชนาการต่ำมาก (Linko et al., 1980b) ภาสไตส์ภาวะเช่นนี้แป้งดิบจะเกิดเจลาติไนเซชันได้อย่างสมบูรณ์ และเกิดลิเคอแฟคชันได้บางส่วนจากแรงทางกล (Suzuki, 1970) จากการตรวจสอบการทำลายโครงสร้างแป้งที่ผ่านการเอกซ์ทรูดโดยเทคนิค X-Ray diffraction พบว่า การลดความชื้นของแป้งที่จะเอกซ์ทรูดและการเพิ่มอุณหภูมิในการเอกซ์ทรูด มีผลให้โครงสร้างของแป้งถูกทำลายมากขึ้น (Linko, Linko, and Olkku, 1982)

ในระยะแรก การเจลาติไนซ์แป้งโดยวิธีเอกซ์ทรูชันนี้จะทำเป็นขั้นตอนเริ่มต้นในการเตรียมแป้ง (Pretreatment) สำหรับผลิตผลิตภัณฑ์แป้งตัดแปรชนิดต่างๆ เท่านั้น เจลาติไนเซชันของแป้งเกิดจากความร้อนที่ได้รับจากเอกซ์ทรูเดอร์ หลังจากการเจลาติไนเซชันในเอกซ์ทรูเดอร์แล้ว เอกซ์ทรูเดจะถูกนำไปไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์ในขั้นต่อไปด้วยเทคโนโลยีการผลิตแบบกะ (Conventional batch technology) โดยใช้เอนไซม์กลูโคอะมิเลสที่ละลายได้ (Soluble glucoamylase) หรืออาจนำไปผ่านกระบวนการไฮโดรไลซ์แบบต่อเนื่องด้วยเอนไซม์ตรึงรูปที่อยู่ในรูปของ Packed-bed reactor เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีค่า Dextrose Equivalent ได้สูงถึง 98 อย่างไรก็ตาม วิธีการผลิตแบบนี้ยังไม่ใช่วิธีการผลิตที่ดีที่สุด เนื่องจาก เอกซ์ทรูเดที่ได้จากการเตรียมในขั้นแรกก่อนที่จะนำมาไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์นั้น มีความหนืดสูง ทำให้มีปัญหาในการผลิตในขั้นต่อไป (Linko et al., 1980b)

ต่อมา มีผู้พัฒนาการผลิตแบบขั้นตอนรวม (Integrated process) ขึ้น โดยอาศัยความร้อนในระหว่างการเอกซ์ทรูดทำให้แป้งเสียสภาพ เมื่อแป้งเสียสภาพแล้วเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ทนความร้อนสูง (Thermostable α -amylase) ที่ผสมลงไปกับส่วนผสมของแป้งตั้งแต่แรก จะเข้าไปไฮโดรไลซ์แป้งได้ทันที มีผลทำให้ความหนืดขณะเย็น (Cold paste viscosity) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้ง่ายต่อการดำเนินการในขั้นต่อไป ในกรณีที่ต้องการแซ็คคาริไฟด้วยเอนไซม์ (Enzymic saccharification) ต่อเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่า D.E. สูงๆ อย่างไรก็ตาม ต้องมีการควบคุมสภาวะในการผลิตให้เหมาะสม เพื่อที่จะทำให้เกิดเจลาติไนเซชันของแป้งได้อย่างเพียงพอโดยที่เอนไซม์ถูกยับยั้งน้อยที่สุด ประโยชน์ที่ได้จากการเจลาติไนซ์ด้วยเอกซ์ทรูเดอร์โดยมีการเติมเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ทนความร้อนนี้ นอกจากจะ

ทำเพื่อลดความหนืดของเอกซ์ทรูเดทที่จะนำไปไฮโดรไลซ์ต่อแล้ว ยังสามารถนำวิธีนี้มาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีค่า D.E. ต่ำๆ เช่น มอลโตเดกซ์ทรินได้ ในการนี้จะไม่นำเอกซ์ทรูเดทไปแช่คาร์ไฟต์ด้วยเอนไซม์ แต่จะปล่อยให้เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ยังทำงานได้และเหลืออยู่ในเอกซ์ทรูเดทไฮโดรไลซ์แป็งต่อ Buffa และ Holliger (1976) ได้ประยุกต์ใช้หลักการนี้ในการผลิตอาหารเสริมสำหรับเด็กอ่อนที่ทำจากธัญพืช โดยได้ทำการเอกซ์ทรูดส่วนผสมของแป้งที่มีความชื้นร้อยละ 30 ถึง 50 อุณหภูมิ 65-115 องศาเซลเซียส เวลาที่ส่วนผสมอยู่ในเครื่องนาน 1-3 นาที หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการเอกซ์ทรูดแล้ว จะปล่อยให้เอนไซม์ในเอกซ์ทรูเดทไฮโดรไลซ์แป็งต่อไปอีก 40-90 นาที โดยควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 55-90 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 97 พบว่า ในผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้น แป้งร้อยละ 25 ถูกเปลี่ยนเป็นเดกซ์ทริน และอีกร้อยละ 15 ถูกเปลี่ยนเป็นน้ำตาลโมเลกุลเล็ก

Linko, Linko และ Olkku (1982) รายงานถึงการเอกซ์ทรูดแป้งบาร์เลย์พร้อมกับเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ทนความร้อน เอนไซม์ดังกล่าวที่ใช้ในกระบวนการผลิตแบบนี้มีชื่อทางการค้าว่า Termamyl 60L^R เป็นเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ได้จากแบคทีเรีย Bacillus licheniformis เอนไซม์ชนิดนี้ จัดเป็น Calcium metallo-enzyme และมีความคงทนต่อความร้อนมากกว่าเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสชนิดอื่นๆ (Kennedy, 1987; Norman, 1980) โดยใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ และปรับความชื้นของวัตถุดิบให้อยู่ในช่วงร้อยละ 40 ถึง 65 อุณหภูมิของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ 105 ถึง 160 องศาเซลเซียส (อัตราการป้อนวัตถุดิบ 200 กรัมต่อนาที ความเร็วสกรู 50 ถึง 150 รอบต่อนาที) พบว่าค่า D.E. ของน้ำแป้ง จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นในระหว่างการเอกซ์ทรูด อย่างไรก็ตาม หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการเจลาติไนซ์แป้งในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แล้ว เอนไซม์สามารถเคลือบแป้งในเอกซ์ทรูเดทได้ดีขึ้น พิจารณาภาพที่ 1 จะเห็นได้ว่า ค่า D.E. จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในเอกซ์ทรูเดทที่ร้อน



รูปที่ 1 : การไฮโดรไลซิสในเอกซ์ทรูเดทของแป้งจากข้าวสาลีที่อุณหภูมิ 80 °C หลังผ่านการเอกซ์ทรูดพร้อมกับเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส Novo Termamyl 60L[®] ภายใต้สภาวะต่าง ๆ

_____ ; เส้นแสดงสมการ $y = \frac{t}{a+bt}$ โดย y คือ ค่า D.E. และ t คือ เวลา

----- ; อัตราการไฮโดรไลซิสในเอกซ์ทรูเดทที่ 80 °C

A ; ความชื้นร้อยละ 55 อุณหภูมิ 137 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนวัตถุดิบ 200 กรัมต่อนาที ความเร็วสกรู 75 รอบต่อนาที ปริมาณ Termamyl 30 มิลลิลิตรต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง Creusot-Loire BC-45 extruder ประกอบด้วยหัวไอดีที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตรและ 50 mm.reverse-pitch screw element next to die

B ; ความชื้นร้อยละ 50 อุณหภูมิ 112 องศาเซลเซียส ความเร็วสกรู 150 รอบต่อนาที ปริมาณ Termamyl 3 มิลลิลิตรต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง (ส่วนสภาวะอื่น ๆ เหมือนกับใน A)

จากรูปที่ 1 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ของเอกซ์ทรูเดท A ซึ่งได้รับความร้อนสูงถึง 137 องศาเซลเซียสในระหว่างการเอกซ์ทรูด จะมีค่า D.E. เพิ่มจาก 5 เป็น 22 ได้ภายในเวลา 20 นาที หลังจากการเอกซ์ทรูด ในขณะที่เอกซ์ทรูเดท B ซึ่งได้รับความร้อนที่ 112 องศาเซลเซียสในระหว่างการเอกซ์ทรูด จะมีค่า D.E. เพิ่มจาก 0 เป็น 5 ในสภาวะเดียวกันกับเอกซ์ทรูเดท A หลังจากการเอกซ์ทรูด จากการทดลองนี้ ผู้ทดลองค้นพบว่าถ้าความชื้นในส่วนผสมแป้งดิบต่ำกว่าร้อยละ 25 เอนไซม์จะถูกยับยั้งอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ การเสียสภาพของแป้งในสภาวะเช่นนี้จะเกิดจากการเสียสภาพด้วยความร้อนและแรงเฉือนเป็นส่วนใหญ่

3. ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตมอลโตเดกซ์ทริน โดยใช้อเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ทนความร้อนในกระบวนการเอกซ์ทรูดขึ้นแบบสกรูคู่

3.1 ปัจจัยด้านวัตถุดิบ

3.1.1 ความชื้นของวัตถุดิบ

ความชื้นของวัตถุดิบมีความสำคัญต่อการทำงานของเอนไซม์ ดังในการทดลองของ Linko และคณะ (1980b) เมื่อไฮโดรไลซ์แป้งบาร์เลย์ให้มีค่า D.E. ไม่เกิน 23 โดยใช้อเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส Termamyl 60L[®] ในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ Creusot-Loire BC 45[®] อัตราการป้อนวัตถุดิบ 154-175 กรัมต่อนาที อัตราการหมุนของสกรู 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิบาร์เรล 130 องศาเซลเซียส พบว่า ถ้าความชื้นของวัตถุดิบต่ำกว่าร้อยละ 30 เอนไซม์จะถูกยับยั้งการทำงานอย่างสมบูรณ์ ในขณะที่อัตราการไฮโดรไลซ์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วถ้าความชื้นสูงกว่าร้อยละ 40 แต่ในการทดลองทำนองเดียวกันของ Lee และ Kim (1990) โดยใช้อเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ Pfleider ZSK 30[®] กล่าวว่า ถ้าความชื้นมากกว่าร้อยละ 50 วัตถุดิบจะมีลักษณะที่แฉะเกินไป ทำให้เครื่องทำงานได้ไม่ดี

3.1.2 ความเข้มข้นของเอนไซม์

ค่า D.E. ของเอกซ์ทรูเดทจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์ ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิบาร์เรลและความชื้นของแป้งด้วย เพราะเอนไซม์จะถูกทำลายได้ง่ายขึ้น ในระหว่างการดำเนินการผลิตในเอกซ์ทรูเดอร์ ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นและ/หรือความชื้นลดลง จากการทดลองของ Lee และ Kim (1990) ในการผลิตมอลโตเดกซ์ทรินโดยใช้อเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ทนความร้อนไฮโดรไลซ์แป้งข้าวโพดในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ อัตราการป้อนวัตถุดิบ 10 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการหมุนของสกรู 180 รอบต่อนาที อุณหภูมิบาร์เรล 120 องศาเซลเซียส และความชื้นของแป้งร้อยละ 50 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของเอนไซม์ร้อยละ 1 2 และ 3 จะได้มอลโตเดกซ์ทรินที่มีค่า D.E. 8.0 10.2 และ 10.2 ตามลำดับ

3.1.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่า pH มีผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส เนื่องจากเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสจัดเป็นโปรตีนประเภทหนึ่ง ซึ่งถูกยับยั้งการทำงานได้ถ้ามีสภาวะเป็นกรดสูง สำหรับค่า pH ที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส คือ 5.0-8.0 (Fogarty, 1983)

3.1.4 ปริมาณแคลเซียมไอออน

เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสจัดเป็น Calcium metallo-enzyme คือ ถ้ามีแคลเซียมไอออนในระบบแม้ในปริมาณต่ำมากเพียง 1 ส่วนในล้านส่วน เอนไซม์จะมีเสถียรภาพ และมีประสิทธิภาพในการทำงานดีขึ้นมาก (Kennedy, 1987; Fogarty, 1983) สำหรับเอนไซม์ Termamyl 120L[®] ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แม้ไม่เติมแคลเซียมไอออนในระบบการผลิตเลย ก็ยังคงมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง เนื่องจากเอนไซม์ชนิดนี้ เป็นเอนไซม์ที่มีความคงทนสูง สามารถทำงานได้ดีแม้อยู่ในสภาวะที่ไม่เหมาะสม และมีความต้องการแคลเซียมไอออนในปริมาณที่ต่ำมาก (Novo Nordisk, 1993)

3.1.5 ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ

ถ้าขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 14 mesh จะถูกเจลาติไนซ์ในระหว่างการเอ็กซ์ทรูดได้ยาก ซึ่งเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสไม่สามารถไฮโดรไลซ์แป้งที่ไม่ถูกเจลาติไนซ์ได้ (Anderson et al., 1969) สำหรับการทดลองนี้ใช้แป้งมันสำปะหลังที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 40-120 mesh ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กพอที่จะถูกเจลาติไนซ์ได้ง่าย

3.2 ปัจจัยด้านเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

3.2.1 อัตราการป้อนวัตถุดิบและอัตราการหมุนของสกรู

ปัจจัยทั้งสองนี้มีความสำคัญต่อค่า Residence time โดยอัตราการหมุนของสกรูจะมีความสำคัญมากกว่า กล่าวคือ ถ้าอัตราการหมุนของสกรูต่ำ ค่า Residence time จะสูง ในทางกลับกัน ถ้าเพิ่มอัตราการหมุนของสกรูค่า Residence time จะลดลง ส่วนอัตราการป้อนวัตถุดิบเป็นเพียงปัจจัยที่ต้องแปรตามอัตราการหมุนของสกรู เพื่อให้เกิดความสอดคล้องกันในลักษณะ Starve-fed mode คือ อัตราการป้อนวัตถุดิบจะต้องน้อยกว่าอัตราการหมุนของสกรู เพื่อไม่ให้เกิดการคั่งค้างของวัตถุดิบในบริเวณส่วนต้นของสกรู (Dziezak, 1988)

3.2.2 อุณหภูมิของโด (Dough temperature)

อุณหภูมิของโดขึ้นกับความร้อนที่ให้จากบาร์เรล ความร้อนจากการฉีดพ่นไอน้ำเข้าไปโดยตรง และความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดสีระหว่างอนุภาคของวัตถุดิบ ถ้าโดมีความชื้นสูงและมีความหนืดต่ำ อุณหภูมิของโดจะเท่ากับหรือต่ำกว่าความร้อนที่ให้จากบาร์เรล

เนื่องจาก ความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีระหว่างอนุภาคของวัตถุเกิดน้อยและน้ำในโด้ยังช่วยระบายความร้อนออกไปได้บางส่วน แต่ถ้าโด้มีความชื้นต่ำและมีความหนืดสูง อุณหภูมิของโด้จะสูงกว่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ที่บาร์เรล เนื่องจาก อนุภาคในวัตถุคิบจะเสียดสีกันเอง และเสียดสีกับผนังบาร์เรลทำให้เกิดความร้อนขึ้น ประกอบกับการที่โด้มีความชื้นต่ำ การระบายความร้อนเกิดได้น้อย จึงเกิดการสะสมความร้อนในโด้

อุณหภูมิของโด้มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ จากรายงานของ Linko และคณะ (1982) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 115 องศาเซลเซียส การเกิดเจลาคิโนเซชันของแป้งจะต่ำเกินไป จนกระทั่งเอนไซม์ไม่สามารถเข้าไปย่อยสลายแป้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ถ้าอุณหภูมิของโด้สูงขึ้นถึง 160 องศาเซลเซียส เอนไซม์จะถูกยับยั้งการทำงานโดยสมบูรณ์

เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส (Fogarty, 1983)

1. แหล่งกำเนิดและลักษณะการทำงาน

เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสหรือ α -1,4-D-Glucan glucanohydrolase เป็นเอนไซม์ที่ผลิตโดยจุลินทรีย์ จัดอยู่ในกลุ่มเอนโดเอนไซม์ คือ จะไฮโดรไลซ์พันธะ α -1,4-Glucosidic bond ได้ทุกตำแหน่งในอะไมโลส อะไมโลเพกทิน และไกลโคเจน แต่ไม่สามารถไฮโดรไลซ์พันธะ α -1,6-Glucosidic bond ได้ สำหรับรายละเอียดของกลไกการเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสจะขึ้นกับแหล่งที่มาของเอนไซม์นั้น แบคทีเรียในจินัสบาซิลลัสเป็นจุลินทรีย์ชนิดสำคัญที่ผลิตเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส ในทางการค้าเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ผลิตจาก Bacillus amyloliquefaciens และ Bacillus licheniformis จะเป็นที่ยอมรับมากที่สุด เนื่องจากสามารถทนความร้อนได้สูง

2. ลักษณะเฉพาะของเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส

เอนไซม์ชนิดนี้มีเสถียรภาพดีเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีค่า pH อยู่ในช่วง 5.5 ถึง 8.0 และมีแคลเซียมอิออนในสัดส่วนที่พอเหมาะ ทั้งนี้เพราะเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสเป็น Calcium metallo-enzyme ในทุกๆโมเลกุลของเอนไซม์จะมีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบอยู่อย่างน้อย 1 โมล ถ้าเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสชนิดใดที่มีแคลเซียมอิออนเป็นองค์ประกอบอยู่มากกว่า 1 โมล ก็จะมีทนต่อความร้อน กรด และด่างได้มากแม้จะไม่เติมแคลเซียมอิออนลงในระบบอีกเลยก็ตาม การเติมอิออนของโลหะหนัก เช่นทองแดง ปรอท เงิน และตะกั่ว จะเป็นการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์

3. เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสชนิดทนความร้อนที่ใช้ในกระบวนการลิเคอแฟคชัน เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ได้จาก Bacillus amyloliquefaciens เป็นเอนไซม์ชนิดแรกที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการลิเคอแฟคชันในระดับอุตสาหกรรม แต่ในปัจจุบัน เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสจาก Bacillus licheniformis เป็นที่นิยมนำมาใช้มากขึ้นในอุตสาหกรรมการผลิตแป้งตัดแปร เนื่องจากมีความคงทนต่อความร้อนสูงกว่า ส่วนสมบัติอื่นๆของเอนไซม์ทั้ง 2 ชนิดแสดงอยู่ในตารางที่ 5

ตารางที่ 5: เปรียบเทียบสมบัติของเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ได้จาก Bacillus amyloliquefaciens และ Bacillus licheniformis

	<u>B. amyloliquefaciens</u>	<u>B. licheniformis</u>
pH ที่เหมาะสม	5.9	7.0-9.0
อุณหภูมิที่เหมาะสม (องศาเซลเซียส)	70	90
ผลิตภัณฑ์สุดท้าย	มอลโตเฮกซะโอส	มอลโตส มอลโตไตรโอส มอลโตเพนตะโอส
Residual activity(%) หลังจากอยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส แคลเซียมไอออน 5 ส่วนในล้านส่วน และไม่มีสารตั้งต้น	0	100
น้ำหนักโมเลกุล	49,000	62,000
Isoelectric point	pH 5.2	pH 5.2
K_m (starch)	6.9 มก./มล.	0.8 มก./มล.

เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ใช้ในการทดลองนี้คือ Termamyl 120L[®] เป็นเอนไซม์จาก Bacillus licheniformis เอนไซม์ชนิดนี้มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 50,000 และมีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบอยู่ 2 โมล ทำให้มีความคงทนต่อความร้อนสูงแม้ไม่เติมแคลเซียมลงในระบบอีกเลยก็ตาม อุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การทำงานของเอนไซม์อยู่ในช่วง 80 ถึง 90 องศาเซลเซียส และสามารถใช้ในกระบวนการที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียสได้ pH ที่เหมาะสม

แก่การทำงานของเอนไซม์ชนิดนี้ประมาณ 6.5 (Reilly, 1985)

Response-Surface Methodology

1. Response-Surface Methodology (RSM) คือ การวางแผนและวิเคราะห์ผลการทดลอง หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ศึกษากับค่าตอบสนอง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองที่มีหลายตัวแปรมักใช้วิธี Multiple Regression Analysis เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและค่าตอบสนองในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งอาจเป็นสมการกำลังหนึ่ง (First order model) หรือสมการกำลังสอง (Second order model) ที่มีหลายเทอม (Polynomials) และจากสมการที่สร้างขึ้นนี้ สามารถนำมาสร้างภาพกราฟ 3 มิติที่เรียกว่า Response surface plot ซึ่งแสดงระดับของตัวแปรในแนวระนาบ และแสดงค่าตอบสนองในแนวแกนตั้ง หรือสร้างกราฟ 2 มิติที่เรียกว่า Contour plot ซึ่งแสดงค่าตอบสนองในรูปเส้นกราฟหลายเส้น กราฟทั้งสองประเภทนี้ มีประโยชน์ในการอธิบาย

- 1) ผลของตัวแปรที่ศึกษาต่อค่าตอบสนอง
- 2) ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ศึกษา
- 3) ผลรวมของตัวแปรที่ศึกษาต่อค่าตอบสนอง

นอกจากนี้ ในกรณีที่มีตัวแปรที่ต้องการศึกษามากกว่า 2 ตัวแปร หรือมีค่าตอบสนองที่ต้องการศึกษามากกว่า 1 ค่า อาจใช้เทคนิคการซ้อนภาพกราฟ Contour plot ช่วยในการพิจารณาเลือกสภาวะการผลิตที่เหมาะสมได้ (Henika, 1982; Mason, Gunst, and Hess, 1989)

2. ขั้นตอนการวางแผนการทดลองโดย RSM

2.1 กำหนดตัวแปรอิสระ (Independent variable) ช่วงของตัวแปรอิสระ และผลตอบสนอง (Response)

ตัวแปรอิสระที่ถูกกำหนดขึ้นจะต้องมีความสำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ หรือต่อกระบวนการผลิต ตัวแปรอิสระอาจเป็นส่วนผสม เช่น ปริมาณเกลือ ปริมาณน้ำตาล หรือสภาวะที่ใช้ในการผลิต เช่น ระดับอุณหภูมิ เวลา เป็นต้น โดยต้องกำหนดช่วงของตัวแปรให้เหมาะสม หากช่วงของตัวแปรกว้างเกินไป บางครั้งไม่สามารถระบุสภาวะของตัวแปรที่ทำให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมได้อย่างชัดเจน จะต้องวางแผนการทดลองใหม่ โดยกำหนดช่วงของตัวแปรให้แคบลง นอกจากนี้ จะต้องกำหนดค่าตอบสนองที่ต้องการวัด ซึ่งมีความสัมพันธ์กับตัวแปรต่างๆที่ศึกษา เช่น ในการผลิตแฮมให้มีคุณภาพเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค โดยกำหนดตัวแปรอิสระ คือ ปริมาณ

เกลือ และปริมาณน้ำตาล ซึ่งเป็นส่วนผสมในการผลิตแอสม์ ค่าตอบสนองที่ต้องการวัด คือ คะแนนความชอบในผลิตภัณฑ์แอสม์ โดยมีวัตถุประสงค์ในการเลือกสภาวะของตัวแปร คือ ปริมาณเกลือและปริมาณน้ำตาลที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคะแนนความชอบรวมสูงที่สุด (Henika, 1982; Mason, Gunst, and Hess, 1989)

2.2 กำหนดแบบแผนการทดลองที่เหมาะสม

แบบแผนการทดลองสำหรับวิธี RSM สามารถใช้แผนการทดลองแบบ Completely factorial design และ Fractional factorial design ได้ แต่ในการใช้ Factorial design นี้มีข้อจำกัด คือ ถ้าเป็นการทดลองแบบ Two-level factorial design ผลการทดลองจะนำมาสร้างสมการได้เฉพาะสมการกำลังหนึ่งเท่านั้น จะไม่มีเทอมที่เป็นผลร่วมระหว่างตัวแปรใดๆ และถ้าเป็นการทดลองแบบ Three-level factorial design โดยที่มีตัวแปรในการทดลองมากกว่า 2 ตัวแปร จะไม่เหมาะสมในการนำไปปฏิบัติจริง เนื่องจากมีจำนวนการทดลองที่มากเกินไป เช่น ในการศึกษาผลของตัวแปร 4 ตัวแปร แต่ละตัวแปร มี 3 ระดับ จำนวนการทดลองทั้งหมดจะเท่ากับ 108 การทดลอง นอกจากนี้การใช้ RSM จะไม่ได้ผลที่ดี เนื่องจากไม่มีการทดลองที่จุดกลางในจำนวนซ้ำที่มากพอ แบบแผนการทดลองที่เหมาะสมกับ RSM มี 2 แบบ คือ Box-Behnken design และ Central composite design ซึ่งเป็นแบบการทดลองที่สามารถใช้ใน RSM เพื่อทำนายผลการทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีการทดลองจำนวนไม่มากนัก เช่น การศึกษา 3 ตัวแปร แต่ละตัวแปร มี 3 ระดับ จะมีการทดลองทั้งหมด 15 การทดลองสำหรับ Box-Behnken design และ 17 การทดลองสำหรับ Central composite design ดังนั้น การเลือกแบบใดแบบหนึ่งมาใช้ในการออกแบบการทดลองจะเป็นการลดเวลา และประหยัดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการทดลองได้เป็นอย่างดี (Henika, 1982; Mason, Gunst, and Hess, 1989)

2.3 วิเคราะห์ข้อมูลโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

นำข้อมูลของค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลองด้วยแบบแผนการทดลองที่เหมาะสม มาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระที่ศึกษา โดยวิธี Multiple regression ในรูปของสมการกำลังสอง รูปแบบของสมการที่นิยมใช้ส่วนใหญ่ คือ สมการโพลีโนเมียลกำลังสองซึ่งมีรูปแบบโดยทั่วไป ดังนี้

$$Y = B_0 + \sum_{i=1}^k B_i X_i + \sum_{i=1}^k B_{i,i} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k B_{i,j} X_i X_j$$

เมื่อ Y คือ ค่าตอบสนองที่เกิดจากการแปรค่าตัวแปร X_i
 B_0 คือ ค่าคงที่

$$\sum_{i=1}^k B_{i1} X_i$$

คือ เทอมที่แสดงถึงอิทธิพลของตัวแปรอิสระ X_i

$$\sum_{i=1}^k B_{i1} X_i^2$$

คือ เทอมที่แสดงถึงอิทธิพลของกำลังสองของตัวแปรอิสระ

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k B_{ij} X_i X_j$$

คือ เทอมที่แสดงถึงอิทธิพลร่วมของตัวแปรอิสระ 2 ตัวแปร

k คือ จำนวนตัวแปรอิสระ

เนื่องจาก สามารถอธิบายผลของตัวแปรอิสระที่มีต่อค่าตอบสนอง (Linear effect) ผลของความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระที่มีต่อค่าตอบสนอง (Interaction effect) และผลร่วมของตัวแปรอิสระที่มีต่อค่าตอบสนองได้ จากสมการดังกล่าว เมื่อได้ตัวแปรที่มีผลต่อค่าตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญแล้ว จะสามารถสร้างกราฟ Contour plot โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปได้ กราฟ Contour plot จะมีลักษณะเป็นอนุกรมของเส้นตรงหรือเส้นโค้ง ซึ่งแสดงสภาวะตัวแปรซึ่งให้ค่าตอบสนองคงที่ มีหลายรูปแบบ ขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรอิสระกับค่าตอบสนอง ดังนั้น จาก Contour plot ที่ได้ ทำให้สามารถเลือกสภาวะของตัวแปรที่ให้ค่าตอบสนองที่เหมาะสม (Optimum point) ตามที่ต้องการได้ โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ STATGRAPHICS Version 5.0 ของ Graphic Software Systems, Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา