บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

ข้าวโพดมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า Zea Mays แต่ละพันธุ์จะมีชื่อของ Subspecies ต่างกันไป เช่นข้าวโพดพันธุ์หัวบุบ (Dent corn) มีชื่อเรียกว่า Zea Mays indentata sturt., ข้าวโพดพันธุ์หวาน (Sweet corn) มีชื่อเรียกว่า Zea Mays saccharata sturt เป็นต้น (28)

2.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของเมล็ดข้าวโพด (19,44)

โครงสร้างและส่วนประกอบของเมล็ดข้าวโพดจะแตกต่างกันไปตามชนิดและพันธุ์ของเมล็ดข้าวโพด ซึ่งมีหลายพันธุ์ เช่น ข้าวโพดหัวบุบ (Dent corn), ข้าวโพดหัวแข็ง (Flint corn), ข้าวโพดหวาน (Sweet corn), ข้าวโพดคั่ว (Pop corn), และข้าวโพดข้าวเหนียว (Waxy corn)

โครงสร้างของเมล็ดข้าวโพดที่เจริญเต็มที่แล้วประกอบด้วย 4 ส่วนคือ ส่วนเปลือก (Hull), ต้นอ่อน (Germ), แป้ง (Endosperm), ปลายขั้ว (Tip cap) ส่วนของเมล็ดข้าวโพดที่สำคัญดังแสดงในรูปที่ 2.1 และส่วนประกอบต่าง ๆ ของเมล็ดข้าวโพดดังแสดงในตารางที่ 2.1

2.1.1 ส่วนปลายขั้ว (Tip cap)

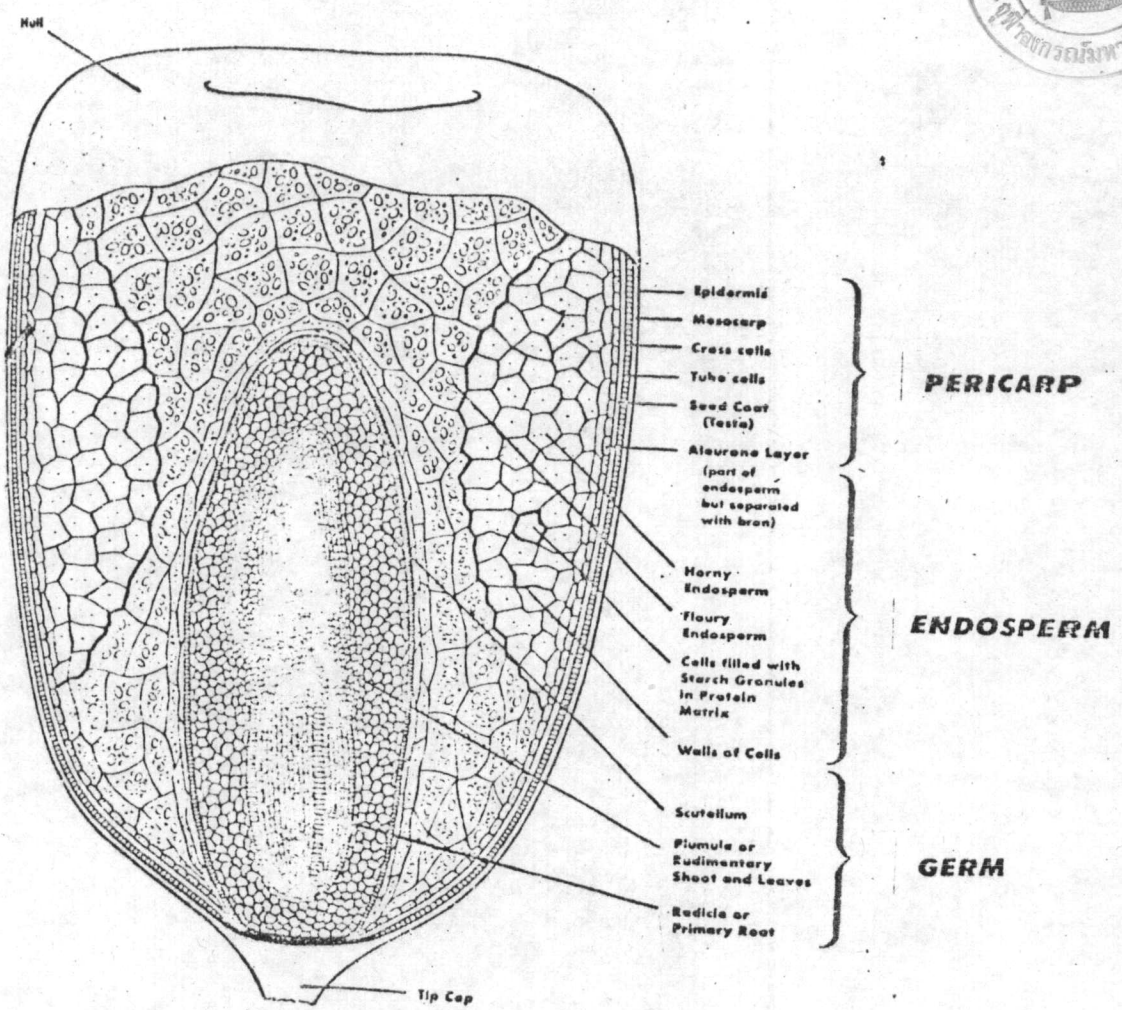
เป็นเนื้อเยื่อที่เชื่อมระหว่างเมล็ดข้าวโพดกับฝักข้าวโพด เนื้อเยื่อบริเวณนี้จะอ่อนนุ่มสามารถดูดซึมน้ำได้อย่างรวดเร็ว มีประมาณ 0.8% ของเมล็ดทั้งหมด

2.1.2 ส่วนเปลือก (Hull)

เป็นชั้นที่อยู่นอกสุดของเมล็ด ลักษณะของเซลเป็นแท่งยาวอัดกันแน่น ชั้นที่ถัดเข้ามาข้างในจะเป็นชั้นของ Aleurone ซึ่งจัดอยู่ในส่วนแป้ง (Endosperm) ส่วนเปลือกนี้มีประมาณ 5.3% ของเมล็ดทั้งหมด

2.1.3 ส่วนต้นอ่อน (Germ)

ส่วนต้นอ่อนมีประมาณ 11.5% ของเมล็ดทั้งหมด ถ้าเป็นข้าวโพดที่มีน้ำมันมากจะ



รูปที่ 2.1 ส่วนสำคัญต่าง ๆ ของเมล็ดข้าวโพด (35)

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเมล็ดข้าวโพดทั้งเมล็ดและปริมาณต่าง ๆ ที่กระจายในแต่ละส่วน (% ต่อน้ำหนักแห้ง) (19)

Fraction	Kernel %	Starch %	Protein %	Lipid %	Sugar %	Ash %
Whole grain	-	71.5	10.3	4.8	2.0	1.4
Endosperm	82.3	86.4	9.4	0.8	0.6	0.3
Germ	11.5	8.2	18.8	34.5	10.8	10.1
Bran	5.3	7.3	3.7	1.0	0.3	0.8
Tip cap	0.8	5.3	9.1	3.8	1.6	1.6

มีปริมาณต้นอ่อนมากกว่านี้ ในส่วนต้นอ่อนจะประกอบไปด้วยส่วน Scutellum ซึ่งเก็บสะสมอาหารไว้ใช้ในการงอกของเมล็ด ส่วน Scutellum นี้จะติดแน่นกับส่วนของแป้ง ซึ่งเป็นปัญหาในการแยกส่วนของต้นอ่อนจากเมล็ดข้าวโพด ดังนั้นจึงต้องใช้อุณหภูมิและเวลาในการแช่เมล็ดข้าวโพดเพียงพอ เพื่อที่จะให้การแยกต้นอ่อนออกได้ง่ายขึ้น

2.1.4 ส่วนแป้ง (Endosperm) (19,44)

ส่วนแป้งประกอบด้วยส่วนแป้งแข็ง (Horny Endosperm) และส่วนแป้งอ่อน (Floury Endosperm) ส่วนแป้งอ่อนจะเป็นส่วนที่มีเซลใหญ่ ลักษณะของเม็ดแป้งเป็นแบบเม็ดใหญ่ ซึ่งมีรูปร่างไม่แน่นอน (Irregular shape) และมีปริมาณโปรตีนแมททริก (Protein matrix) แทรกอยู่น้อย ส่วนแป้งอ่อนจะมีโปรตีนแมททริกแทรกอยู่มากกว่า เม็ดแป้งในส่วนนี้จะอัดกันแน่น ทำให้มีผิวเรียบและเม็ดเล็ก บริเวณชั้นถัดจากชั้น aluerone เข้ามา จะมีโปรตีนอยู่จำนวนมาก และเม็ดแป้งบริเวณนี้จะถูกล้อมรอบเกาะติดแน่นด้วยโปรตีน ซึ่งเป็นสาเหตุให้การแยกแป้งให้บริสุทธิ์ในขบวนการ Wet milling ยากขึ้น แป้งที่อยู่ในส่วนแป้งอ่อนจะแยกออกได้โดยการบดข้าวโพดที่แช่ด้วยน้ำธรรมดา แต่แป้งที่อยู่ในส่วนแป้งแข็งต้องใช้สารเคมีช่วยในการแช่ เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์จึงจะแยกแป้งออกได้มาก

ส่วนประกอบต่าง ๆ ในเมล็ดข้าวโพดมี แป้ง, โปรตีน และไขมัน ที่มีอยู่ในปริมาณที่มาก ส่วนที่มีปริมาณน้อย เช่น เส้นใย, น้ำตาล, แร่ธาตุ และสารอินทรีย์อื่น ๆ ส่วนประกอบต่าง ๆ ของข้าวโพดหัวบุบ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลวิเคราะห์ส่วนประกอบต่าง ๆ ของข้าวโพดพันธุ์หัวบุบ (Dent corn) (% ต่อน้ำหนักแห้ง)(39)

Component	Mean (%)
Dry matter	89
Starch	72
Protein	10
Lipid	4.4
Crude fiber	2.2
Ash	1.2

2.1.5 แป้ง (Starch) (19)

แป้งข้าวโพดประกอบด้วยโมเลกุล 2 ชนิด คือ อมิโลส (Amylose) และอมิโลเพคติน (Amylopectin) อัตราส่วนของโมเลกุล 2 ชนิดนี้ คือ 27% และ 73% โมเลกุลทั้ง 2 ชนิดนี้เป็นโพลีเมอร์ของกลูโคส อมิโลสมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 140,000 มีโมเลกุลเป็นเส้นตรง (Linear molecule) ซึ่งกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วย α-1,4 linkage ส่วนอมิโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 4×10^6 โมเลกุลเป็นกิ่งก้านสาขา (Branched molecule) ซึ่งกลูโคสจะเชื่อมต่อกันด้วย α-1,4 linkage และ α-1,6 linkage ความยาวของส่วนเส้นตรง (Linear α -1,4 linkage) ในโมเลกุลประกอบด้วยกลูโคส 25 หน่วย ข้าวโพดที่ประกอบด้วยอมิโลเพคตินทั้งหมดเรียกว่า Waxy corn

2.1.6 โปรตีน (Protein) (19,44)

โปรตีนมีประมาณ 10% ของเมล็ดทั้งหมด ชนิดของโปรตีนในเมล็ดข้าวโพดที่ละลายในสารละลายต่าง ๆ กัน คือ กลูบูลิน (Glubulins) ละลายได้ในเกลือหรือกรด, โพลามินหรือเซอิน (Porlamins or Zein) ละลายได้ในแอลกอฮอล์, กลูเตลิน (Glutelins) ละลายได้ในด่าง และ สคลีโรโปรตีน (Scleroprotein) ไม่ละลายในสารละลายต่าง ๆ ปริมาณของโปรตีนแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ปริมาณโปรตีนชนิดต่าง ๆ ที่กระจายในส่วนต่าง ๆ ของเมล็ดข้าวโพด (43)

Part	Distribution of Protein(% dry basis)			
	Glubulin	Zein	Glutein	Insoluble
Whole grain	25	48	25	2
Germ	37	5	51	7
Endosperm	20	52	17	11
Hull	-	-	-	-

2.1.7 ไขมัน (Lipid) (19)

ไขมันส่วนใหญ่จะอยู่ในส่วนต้นอ่อนซึ่งเป็นส่วนที่สกัดแยกน้ำมันออกมา ส่วนประกอบของน้ำมันที่บริสุทธิ์ประกอบด้วยกรดไขมันพวก ลิโนลีอิค (Linoleic) 59%, โอลีอิค (Oleic) 27%, พาลมีติค (Palmetric) 12%, สเตียริค (Stearic) 2%, ลินโนลีนิค (Linolenic) 0.8% และ อแรคชิติค (Arachidic) 0.2%

ในส่วนของเอ็นโดสเปิร์ม (Endosperm) มีไขมันในปริมาณเล็กน้อย คือ พวกแคโรทีนอยด์ (Carotenoid) ซึ่งเป็นกลุ่มของเม็ดสีเหลืองที่ทำให้เกิดสีในเมล็ดข้าวโพด เม็ดสีเหล่านี้จะรวมกับโปรตีน ดังนั้น เม็ดสีเหล่านี้จึงมีอยู่มากในส่วนของแป้งแข็ง

2.1.8 น้ำตาลและเส้นใย (Sugar and Fiber) (19,44)

น้ำตาลมีอยู่ในเมล็ดข้าวโพดในปริมาณ 1.0-3.0% มีน้ำตาลซูโคสเป็นส่วนใหญ่ คือปริมาณน้ำตาลซูโคส 0.9-1.9% ของเมล็ดข้าวโพดทั้งหมด น้ำตาลซูโคสจะอยู่ในส่วนต้นอ่อน $\frac{3}{4}$ ส่วนและอยู่ในส่วนแป้งเพียง $\frac{1}{4}$ ส่วนของทั้งหมด นอกจากนั้นมีน้ำตาลอื่น ๆ เช่น กลูโคสมีประมาณ 0.2-0.5% และ ฟรุคโทส มีประมาณ 0.1-0.4% ของเมล็ดทั้งหมด น้ำตาลแรฟฟิโนส (Raffinose) มีอยู่ในปริมาณที่น้อย โดยอยู่ในส่วนของต้นอ่อนทั้งหมด และจะหายไปหมดเมื่อเมล็ดงอกได้เพียง 2 วัน

เมล็ดข้าวโพดประกอบด้วยเส้นใยประมาณ 2.1-2.3% ส่วนเปลือกของเมล็ดข้าวโพดประกอบด้วย เซลลูโลซ (Cellulose) 40% และ เพนโตไกลแคน (Pentoglycan) 40% โครงสร้างของเพนโตไคลแคนเป็นแบบมีกิ่งก้านสาขา ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากประกอบด้วย ไซโลซ (Xylose) 65%, อาราบิโนส (Arabinose) 35%, กาแลคโตส (Galactose) 8%, กลูโคส (Glucose) 8% และ กลูโครานิคแอซิด (Glucoranic acid) 7%

2.1.9 แร่ธาตุ (Minerals) (19,44)

เมล็ดข้าวโพดประกอบด้วยแร่ธาตุที่จำเป็นที่ใช้ในการเจริญเติบโต Phytin (Hexaphosphoinositol) มีอยู่ในส่วนของต้นอ่อนประมาณ 1.7% เป็นสารที่สะสมไว้ในรูปของฟอสฟอรัส แต่บางครั้งจะรวมกับเกลือของโปรตัสเซียม, แมกนีเซียม และจะถูกนำมาใช้อย่างรวดเร็วในระหว่างการงอกส่วนประกอบของแร่ธาตุในเมล็ดข้าวโพด แสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ปริมาณของแร่ธาตุต่าง ๆ ในเมล็ดข้าวโพด (% ต่อน้ำหนักแห้ง)(19)

Minerals	%
Calcium	0.03
Phosphorus	0.32
Potassium	0.35
Magnesium	0.17
Iron	0.003
Sodium	0.01
Sulphur	0.12

2.2 ประโยชน์ของข้าวโพดเมล็ด (19,35)

ข้าวโพดสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายทาง อาจจะนำมาใช้ทั้ง เมล็ดเพื่อทำเป็นอาหาร, เครื่องดื่ม และเป็นอาหารสัตว์ นอกจากนั้นยังสามารถนำมาแปรรูปให้เป็นผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ได้อีกเช่น แป้ง, น้ำตาล และน้ำมัน

2.2.1 อุตสาหกรรมอาหารสัตว์

ข้าวโพดเป็นธัญพืชที่สำคัญในการทำเป็นอาหารสัตว์ ซึ่งมีคาร์โบไฮเดรตเป็นแหล่งพลังงานสำคัญ ข้าวโพดที่นิยมทำเป็นอาหารสัตว์เป็นประเภทข้าวโพดที่มีสีเหลือง ซึ่งมีไวตามินเอและแคโรทีนมาก

2.2.2 ประโยชน์ของข้าวโพดสดในด้านอาหาร

อาจจะใช้ประโยชน์ในรูปของข้าวโพดสดทั้งฝัก โดยการนำมาต้มหรือย่างทั้งฝัก หรืออาจจะนำข้าวโพดสดมาแกะเมล็ดออกจากฝักแล้วนำไปผ่านขบวนการ เพื่อถนอมรักษาข้าวโพดเมล็ดไว้นาน ๆ เช่น โดยการบรรจุใส่กระป๋อง (Canning) หรือการแช่แข็ง (Freezing)

2.2.3 ประโยชน์จากการหมักเป็นเครื่องดื่ม

ในประเทศอเมริกาใช้ข้าวโพดเป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตเพื่อทำเป็นเครื่องดื่มประเภทแอลกอฮอล์ โดยการหมักหลังจากที่ใช้กรดหรือเอ็นไซม์ย่อยจนเป็นน้ำตาลแล้ว ตัวอย่าง เช่น เบียร์, วิสกี้ เป็นต้น

2.2.4 ประโยชน์จากการแปรรูป

ข้าวโพดสามารถนำมาแปรรูปให้เป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ออกไปได้ เช่น แป้ง, น้ำตาล และน้ำมัน นอกจากนั้นข้าวโพดที่ทำให้อยู่ในรูปของ Corn meal, corn grits ยังสามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ได้ เช่น Corn flake, snack food

2.3 การแยกแป้งจากเมล็ดข้าวโพดโดยขบวนการ Wet milling

การแยกแป้งจากเมล็ดข้าวโพดอาจจะใช้ขบวนการ Wet milling หรือ Dry milling

นิยมใช้ขบวนการ Wet milling เพราะในขบวนการ Wet milling มีการแช่เมล็ดข้าวโพดให้อ่อนนุ่มก่อนจึงให้ผลผลิตของแป้งมากกว่า และได้แป้งที่มีคุณภาพดีกว่า นอกจากนั้นในขบวนการ Dry milling จะไม่ทำให้ เม็ดแป้งแยกออกจากโปรตีนที่ยึดติดแน่นกันไว้ ขบวนการแยกแป้งโดยวิธี Wet milling ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 2.2 และ 2.3 และส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 2.5

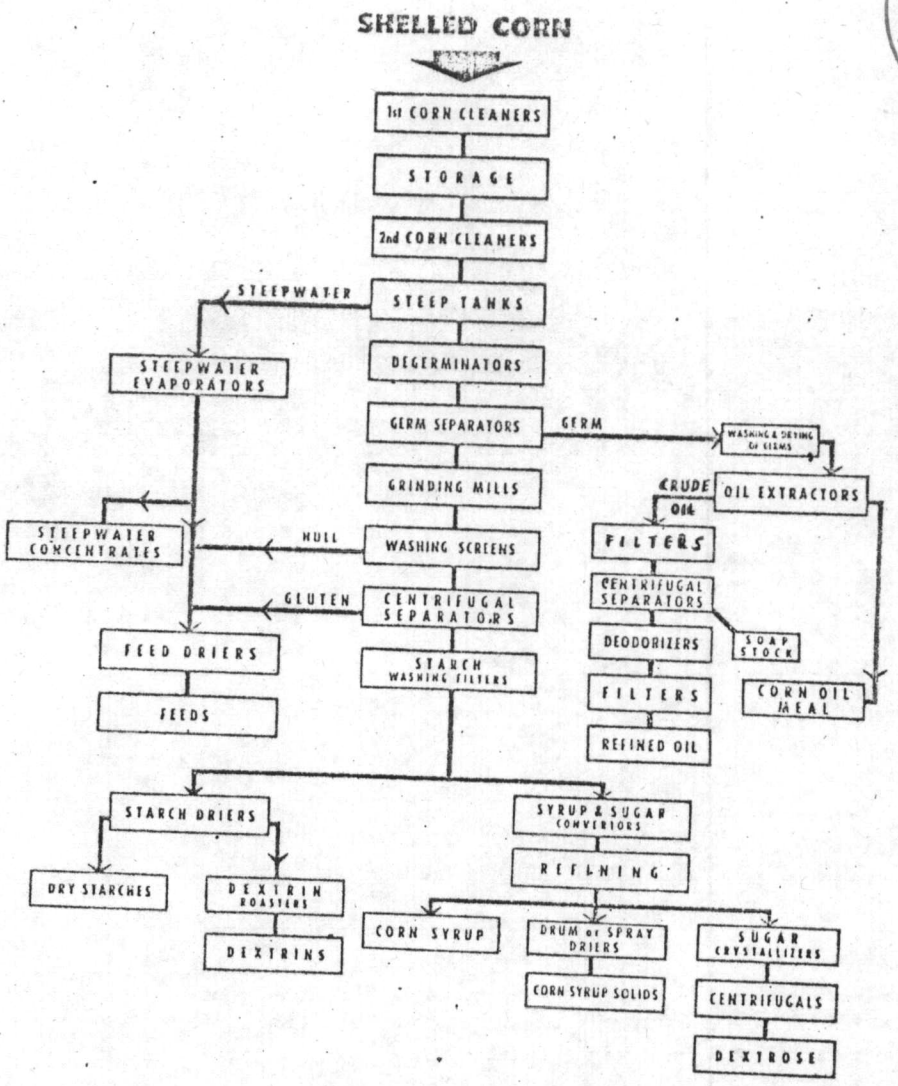
2.3.1 วัตถุดิบ (1,44)

เมล็ดข้าวโพดเป็นแหล่งวัตถุดิบที่ใช้ผลิตเป็นแป้งข้าวโพด สำหรับประเทศไทยข้าวโพดพันธุ์หัวบุบเหมาะในการนำมาทำเพราะนิยมปลูกมาก ซึ่งใช้ชื่อพันธุ์ว่า พันธุ์สุวรรณ 1 และ 2 ในการทดลองใช้พันธุ์สุวรรณ 1 ซึ่งให้ผลผลิตต่อไร่สูง และเป็นที่นิยมปลูกกันมาก ข้าวโพดที่เก็บจากไร่แล้วต้องทำให้ข้าวโพดแห้งก่อนนำมาเก็บ อุณหภูมิในการทำให้แห้งต้องไม่เกิน 50 องศาเซลเซียส เพราะที่อุณหภูมิสูง ๆ สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนและแป้ง โดยที่โปรตีนและแป้งจะสูญเสียน้ำไปในขณะทำให้แห้ง ทำให้เกิดการพองตัวน้อยลง เมื่อนำข้าวโพดไปแช่แล้ว เมล็ดข้าวโพดที่เน่าเสียเนื่องจาก ความชื้น, แมลง หรือ เชื้อรา ไม่เหมาะสมที่จะนำมาผลิตเพราะจะทำให้คุณภาพของแป้งไม่ดี และปริมาณน้ำมันที่จะได้น้อยลง

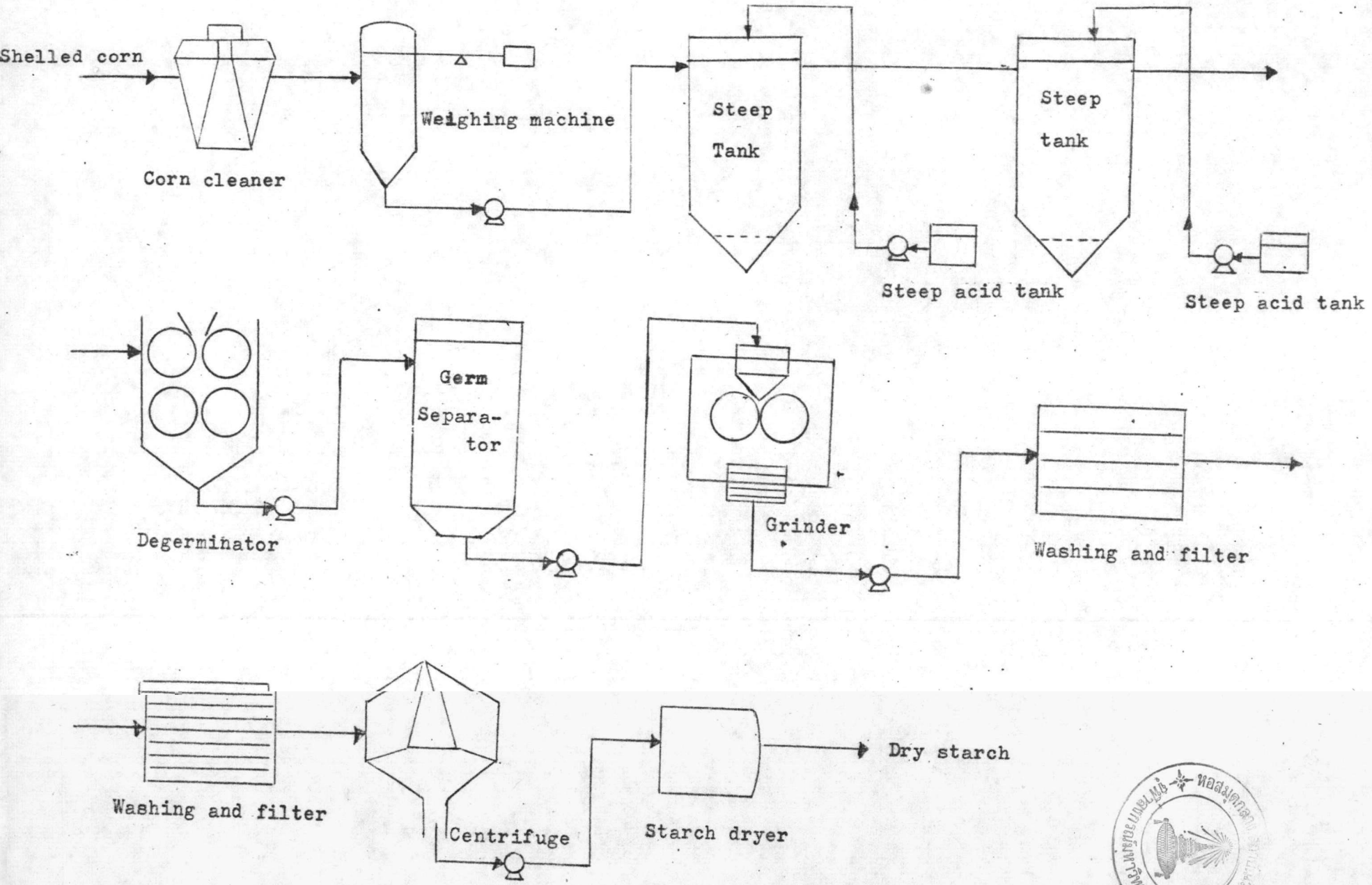
2.3.2 การทำความสะอาดเมล็ดข้าวโพด (19,44)

ข้าวโพดที่ได้จากการเก็บเกี่ยวจะมีสิ่งแปลกปลอมหลายประเภทดังนี้ พวกที่มีขนาดใหญ่กว่าเมล็ดข้าวโพด เช่น อิฐ, หิน, เศษไม้, ซังข้าวโพด พวกเมล็ดพืชอย่างอื่น เช่น ถั่ว, งา, ข้าว พวกที่เล็กกว่าเมล็ดข้าวโพด ได้แก่ ฝุ่น, เศษผง, เมล็ดข้าวโพดที่แตกหัก, แมลงต่าง ๆ พวกเศษโลหะต่าง ๆ เช่น เศษเหล็ก, ตาปู

ดังนั้นก่อนจะทำการแยกแป้ง ต้องทำความสะอาดเมล็ดข้าวโพดก่อน เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมเหล่านี้ เพราะถ้าไม่มีการแยกออกก่อนจะทำให้เครื่องจักรเสียหายได้ และยังทำให้แป้งที่ได้ออกมาไม่บริสุทธิ์ การแยกขั้นแรกใช้แม่เหล็ก (Magnetic separator) แยกเอาพวกเศษเหล็ก, ตาปู และโลหะอื่น ๆ ออกจากข้าวโพด ต่อจากนั้นจะผ่านข้าวโพดไปยังตะแกรงร่อนที่มี 2 ชั้น โดยที่ชั้นบนมีขนาดห่างพอที่ให้เมล็ดข้าวโพดผ่านได้ ส่วนพวกที่มีขนาดใหญ่กว่าจะไม่สามารถผ่านได้ ชั้นล่างมีขนาดเล็กพอที่จะร่อนเมล็ดข้าวโพดไว้ได้ แต่พวกที่มีขนาดเล็กกว่าผ่านไปได้



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการผลิตแป้งข้าวโพดโดยขบวนการ Wet milling (13)



รูปที่ 2.3 ขบวนการผลิตแป้งข้าวโพดโดยวิธี Wet milling

ตารางที่ 2.5 ส่วนประกอบเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ได้จากขบวนการ (ต่อน้ำหนักแห้ง)(6)

Component		%
Steepwater :	Yield of solids	4.3
	Protein content	31.3
Coarse fiber:	Yield	12.5
	Protein content	14.7
	Starch content	19.7
Fine fiber :	Yield	6.2
	Protein content	23.7
	Starch content	30.6
Starch :	Yield	65.4
	Recovery(a)	87.9
	Protein content	0.54
Gluten :	Yield	8.1
	Protein content	42.9
	Starch content	26.6
Process water:	Yield of solids	2.8
	Protein content	37.4

(a) Recovery is base on total starch present in grain.

จากนั้นนำข้าวโพดไปแยกเศษผง ฝุ่นละออง, แมลง และสิ่งเจือปนอื่น ๆ ที่มีน้ำหนักเบาออกโดยการพ่นอากาศเข้าไป

2.3.3 การแช่เมล็ดข้าวโพด (37,44)

การแช่เมล็ดข้าวโพดนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญมากต่อการบดแยกส่วนต่าง ๆ ของเมล็ดข้าวโพดออกจากกัน และต่อผลผลิตของแป้งที่ได้ เมล็ดข้าวโพดที่ต้องการแยกแป้งต้องแช่ในน้ำที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ประมาณ 0.2-0.4% อุณหภูมิของน้ำอยู่ในช่วง 48 ถึง 50 องศาเซลเซียส และเวลาในการแช่อยู่ในช่วง 30 ถึง 50 ชั่วโมง ซึ่งจะขึ้นกับอายุของเมล็ดข้าวโพด, ปริมาณความชื้น และชนิดของข้าวโพดที่นำมาแช่ (37) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการใช้ในรูปของโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ (40) แต่ในทางอุตสาหกรรมจะผลิตโดยการเผาซัลเฟอร์ในเตาเผาเพื่อให้เกิดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จากนั้นก็ปล่อยให้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ไปดูดซึมน้ำเพื่อผลิตเป็นกรดซัลฟูรัสในปริมาณความเข้มข้นที่ต้องการ ดังสมการ

$$SO_2 + H_2O \longrightarrow H_2SO_3$$

จุดประสงค์ในการแช่เมล็ดข้าวโพด คือ

1. เพื่อให้เมล็ดข้าวโพดอ่อนนุ่มง่ายต่อการบดแยกส่วนต่าง ๆ ออก
2. เพื่อให้เกิดการแยกกระจายของโปรตีนที่เกาะติดกับเม็ดแป้งในลักษณะเป็นตาข่าย (Protein matrix)
3. เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของพวกจุลินทรีย์

ในทางการค้าจะแช่ข้าวโพดในถังขนาดใหญ่ทำจากไม้หรือที่เป็นสเตนเลส ซึ่งสามารถทนต่อการกัดกร่อนของกรด ถังแช่แต่ละใบที่ฐานจะมีลักษณะเป็นรูปกรวยและมีท่อเปิดข้างล่าง เพื่อสะดวกในการเทน้ำแช่ออก ถึงแม้การแช่เมล็ดข้าวโพดในน้ำที่มีซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แต่ในเมล็ดข้าวโพดอาจจะมีพวกแบคทีเรีย ยีสต์ หรือ รา ติดมา ถึงแม้จะมีปริมาณน้อยก็ตาม แต่ก็สามารถเจริญเติบโตได้ในช่วงอุณหภูมินี้คือ ที่อุณหภูมิ 45-50 องศาเซลเซียส และสารละลายที่ค่อนข้างเป็นกรดเหมาะกับการเจริญเติบโตของพวกแลคติก แบคทีเรีย แบคทีเรียเหล่านี้สามารถจะใช้น้ำตาลต่าง ๆ ที่ละลายออกมาจากข้าวโพดเป็นอาหาร และจะผลิตเป็นกรดแลคติกจากน้ำตาล ปริมาณกรด

แลคติคที่เกิดขึ้นนี้มีน้อยมากจนไม่สามารถทำให้เกิดการเน่าเสียของเมล็ดข้าวโพดได้เพียงแต่จะช่วยให้เมล็ดข้าวโพดอ่อนนุ่มขึ้นเท่านั้น

2.3.4 การทำให้ต้นอ่อนแยกจากเมล็ด (11)

การแยกส่วนต้นอ่อนออกจากเมล็ดข้าวโพดนั้นขึ้นกับสภาวะการแช่เมล็ดข้าวโพดเพื่อให้เมล็ดอ่อนนุ่มเต็มที่ เครื่องมือที่ใช้แยกต้นอ่อนอาจจะเป็นแบบแผ่นโลหะที่ทำจากโลหะสเตนเลส 2 แผ่น แผ่นหนึ่งหมุนด้วยความเร็วประมาณ 900 รอบ/นาที อีกแผ่นหนึ่งอยู่กับที่ ช่องว่างระหว่างโลหะทั้ง 2 แผ่นจะปรับให้การแยกต้นอ่อนออกโดยที่ให้ต้นอ่อนแตกหักน้อยที่สุด ที่ผิวด้านในของแผ่นโลหะทั้งสองมีลักษณะเป็นปุ่มคล้ายฟัน ซึ่งจะออกแบบให้เป็นการบดแยกส่วนต้นอ่อนให้ออกจากเมล็ดข้าวโพดเท่านั้น แต่ไม่ทำให้บดละเอียดทั้งเมล็ดเลย หรืออาจจะใช้เครื่องมือเป็นแบบลูกกลิ้งเซาะร่อง (Corrugated crushing rolls) ที่หมุนเข้าหากันด้วยความเร็วต่างกันเพื่อทำให้เมล็ดข้าวโพดแตกออกและทำให้ส่วนต้นอ่อนหลุดออกโดยไม่ทำให้ต้นอ่อนแตกหัก

2.3.5 การแยกต้นอ่อนจากส่วนของแป้ง (19,43)

ข้าวโพดที่ผ่านเครื่องแยกต้นอ่อนแล้วจะมีส่วนต้นอ่อนปนกับส่วนแป้ง แยกต้นอ่อนออกโดยใช้หลักการที่แตกต่างกันอย่างมากของความถ่วงจำเพาะระหว่างต้นอ่อนกับส่วนแป้ง วิธีหนึ่งคือการใช้ไฮโดรโคลน (Hydroclone) ซึ่งเป็นท่อรูปทรงโคน นำส่วนที่ต้องการจะแยกทั้งหมดในรูปของเหลวที่มีแป้งละลายออกมาบ้างผ่านเข้าไปในท่อนี้ ภายใต้ความดันโดยใช้ความเร็วที่พอเพียงที่จะแยกส่วนที่มีความหนาแน่นต่างกันออกจากกันได้ ส่วนของต้นอ่อนเบากว่าจะลอยอยู่ด้านบนและแยกออกได้ ส่วนแป้งหนักกว่าจะอยู่ด้านล่าง หรืออาจจะใช้วิธีการลอยตัวของต้นอ่อน (Flotation) ในถังที่มีลักษณะรูปตัวยู มีสายพานอยู่ตรงส่วนล่าง ด้านบนจะมีส่วนที่ใช้สำหรับกวาดต้นอ่อนออก การแยกต้นอ่อนในน้ำแป้งที่มีใบพัดกวนเบา ๆ อยู่ด้วย แยกส่วนต้นอ่อนที่ลอยอยู่ด้านบนโดยการกวาดของเครื่องมือ ส่วนแป้งจะจมอยู่ด้านล่างและถูกพาออกไปโดยการทำงานของสายพาน วิธีการแยกต้นอ่อนโดยใช้ไฮโดรโคลนมีข้อได้เปรียบกว่าแบบการลอยตัวของต้นอ่อน คือ ใช้พื้นที่น้อยกว่าได้ต้นอ่อนที่มีส่วนแป้งติดมาน้อยกว่า และสะดวกต่อการดูแลรักษา (19)

ส่วนต้นอ่อนที่แยกได้นั้นจะนำไปล้างด้วยน้ำ เพื่อชะล้างส่วนแป้งที่ติดมาออกให้หมดบนตะแกรง

ที่มีขนาดเล็กพอให้เศษแป้งข้าวโพดหลุดไปได้ นำต้นอ่อนที่ได้มาล้างและทำให้แห้ง แล้วนำไปสกัดเป็นน้ำมันข้าวโพดต่อไป

2.3.6 การบดแป้งให้ละเอียด (19)

เพื่อให้สะดวกในการแยกแป้งออกมาต้องมีการบดแป้งให้ละเอียดโดยใช้เครื่องบดเป็นโม่หิน หรือ เครื่องบดอื่น ๆ ที่ทันสมัย เช่น Impact mill เครื่องบดแบบทันสมัยจะมีอัตราการบดเร็วกว่า บดได้ในปริมาณที่มากกว่า การทำงานเป็นไปได้อย่างสม่ำเสมอ ช่วยปรับปรุงคุณภาพแป้งและเพิ่มปริมาณผลผลิตของแป้งที่แยกได้ด้วย

2.3.7 การล้างและกรอง (19)

ส่วนที่ถูกบดละเอียดแล้วนั้นประกอบไปด้วย แป้ง, โปรตีน และเส้นใยซึ่งจะแยกส่วนเส้นใยออกโดยการล้างและกรองหลาย ๆ ครั้ง เพื่อแยกแป้งออกจากเส้นใยมากที่สุด โดยการผ่านส่วนที่ถูกบดละเอียดทั้งหมดไปยังเครื่องกรองที่สั่นไปมา ตะแกรงกรองทำจากเหล็กสเตนเลสมีขนาดตาห่าง 18-30 เม็ช จะกรองส่วนเส้นใยหยาบไว้ได้ ส่วนที่ผ่านการกรองแล้วจะนำไปแยกเส้นใยละเอียดออกโดยการกรองผ่านเครื่องกรองที่มีขนาดตาห่าง 200 เม็ช ทำการล้างและกรองหลาย ๆ ครั้ง เพื่อแยกแป้งออกมามากที่สุด

เส้นใยที่กรองได้ทั้งหมดจะถูกบีบน้ำออกและนำไปรวมกับน้ำหลังจากแช่ที่ทำให้เข้มข้นแล้ว จากนั้นนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์

007612

2.3.8 การแยกโปรตีนออกจากแป้ง (19)

ส่วนที่ได้จากการกรองแล้วจะประกอบด้วยแป้ง, โปรตีน และสิ่งเจือปนอื่น ๆ การแยกโปรตีนและสิ่งเจือปนอื่น ๆ ออกจากแป้ง ในสมัยก่อนจะแยกออกโดยใช้ Starch table ซึ่งเป็นโต๊ะที่มีความยาวประมาณ 100 ถึง 200 ฟุต และกว้าง 2 ฟุต ให้ส่วนที่ต้องการแยกผ่านไปด้วยความเร็วสม่ำเสมอ แป้งมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าจะตกตะกอนลงบนพื้น ส่วนโปรตีนจะแขวนลอยอยู่และผ่านไปยังส่วนปลายสุดของโต๊ะ แต่ปัจจุบันมีการแยกโดยใช้เครื่องเหวี่ยง ความแตกต่างกันระหว่างความถ่วงจำเพาะของแป้งกับโปรตีนจะแยกออกจากกันได้โดยแรงเหวี่ยง ในทางอุตสาหกรรมเครื่องเหวี่ยงจะสามารถแยกส่วนโปรตีนออกทางด้านบน และส่วนแป้งออกทางด้านล่าง การเหวี่ยงจะทำ

เป็น 2 ขั้นตอน ขั้นแรกจะได้โปรตีนที่มีคุณภาพดี มีโปรตีนประมาณ 60-70% ขั้นที่สองจะเหวี่ยง เพื่อให้แป้งบริสุทธิ์มากขึ้น แป้งที่ได้จากการเหวี่ยงครั้งที่สองจะมีโปรตีนประมาณ 0.3% ในขั้นที่สองนี้อาจจะใช้ไฮโดรโคลนแทนเครื่องเหวี่ยง โดยใช้หลายตัวเรียงติดกัน แป้งที่ได้จะบริสุทธิ์มากขึ้น

วิธีการแยกโปรตีนโดยใช้เครื่องเหวี่ยงมีข้อได้เปรียบกว่าการใช้ Starch table คือ จะได้แป้งที่มีผลผลิตมากกว่า, มีคุณภาพที่ดีกว่า, มีการปนเปื้อนน้อยกว่า เนื่องจากเป็นระบบปิด, เวลาในการทำสั้นลงมาก และพื้นที่ทำงานลดลง โปรตีนที่แยกได้จะนำไปทำให้เข้มข้น แล้วนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์

2.3.9 การทำให้แป้งแห้ง

แป้งที่ได้จากการแยกโปรตีนออกแล้วจะทำให้แห้งให้เหลือความชื้นประมาณ 10-15% ในสมัยก่อนจะใช้วิธีการทำให้แห้งโดยใช้เตาเผาให้ความร้อนโดยใช้อุณหภูมิไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส วิธีนี้จะใช้เวลานานและแป้งที่ได้หลังจากแห้งแล้วต้องนำมาบดให้ละเอียดแล้วร่อนด้วยตะแกรง ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคนิคการอบแห้งอย่างกว้างขวาง เพื่อลดเวลาการอบแห้งให้สั้นลง และช่วยปรับปรุงคุณภาพแป้งที่ได้ด้วย โดยใช้เครื่องอบแป้งที่เรียกว่า Flash dryer ซึ่งเป็นการพ่นลมร้อน และแป้งที่ต้องการอบผสมรวมกัน แป้งจะสัมผัสโดยตรงกับลมร้อนที่พ่นเข้าไปทำให้แป้งระเหยความชื้นออกไปได้เร็ว และขนาดแป้งที่แห้งแล้วจะมีขนาดสม่ำเสมอ

2.4 ผลของอุณหภูมิ, เวลา และปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในการแยกแป้งจากเมล็ดข้าวโพด

ในขั้นตอนการแช่เมล็ดข้าวโพด ตัวแปรต่าง ๆ มีผลต่อการแยกแป้งในแง่ของการให้ความอ่อนนุ่มต่อเมล็ดข้าวโพด, หยุดยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และผลต่อการแยกกระจายโปรตีนออกจากเม็ดแป้ง

2.4.1 ผลต่อความอ่อนนุ่มต่อเมล็ดข้าวโพด

ในการแช่เมล็ดข้าวโพดนั้นจะเกิดการแพร่กระจายของน้ำที่มีซัลเฟอร์ไดออกไซด์ละลายอยู่ด้วยเข้าไปภายในเมล็ดทำให้เมล็ดอ่อนนุ่มขึ้น ในขณะที่มีการแพร่กระจายเข้าไปของน้ำนั้นก็จะมีการแพร่กระจายออกมาของสารที่ละลายได้จากเมล็ดข้าวโพด เช่น โปรตีน, น้ำตาล และเกลือแร่ต่าง ๆ การแพร่กระจายเข้าและออกนั้นจะถูกชลอจากชั้นของ อาลิวโรน (Aleurone layer)

ดังนั้นพบว่าอัตราการแพร่กระจายของสารละลายเข้าและออกจากเมล็ดข้าวโพดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น (18) นอกจากนั้นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ใช้ในการแช่เมล็ดข้าวโพดสามารถที่จะทำให้โปรตีน (Dissolved protein) ละลายออกมาจากเมล็ดข้าวโพดได้ ซึ่งจากการทดลองของ Cox และ Max Master (15) ได้นำน้ำที่ใช้ในการแช่เมล็ดข้าวโพดที่มีซัลเฟอร์ไดออกไซด์ละลายอยู่มาปรับความเป็นกรด-ด่างให้เป็น 7.0 และต้ม ให้ความร้อนจนเดือด จะมีการตกตะกอนของโปรตีนที่ละลายออกมา ถ้าใช้น้ำกลั่นอย่างเดียวแช่เมล็ดข้าวโพด จะไม่เกิดการตกตะกอนของโปรตีน

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีอยู่ในน้ำแช่เมล็ดข้าวโพดจะมีผลต่อความอ่อนนุ่มของเมล็ดข้าวโพด ซึ่งเมื่อใช้กรดตัวอื่น เช่น กรดน้ำส้ม และกรดเกลือ ในปริมาณที่เท่ากันพบว่า เมล็ดข้าวโพดที่แช่ด้วยกรดน้ำส้มและกรดเกลือไม่ออนนุ่มและยากต่อการบด (15) ในระหว่างการแช่อาจจะมีกรดแลคติคเกิดขึ้น ซึ่งจะช่วยทำให้เมล็ดข้าวโพดอ่อนนุ่มยิ่งขึ้น และช่วยให้การบดได้ง่ายขึ้น

2.4.2 ผลต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีผลต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ การแช่เมล็ดข้าวโพดโดยไม่มีซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จะเกิดการเน่าเสียเนื่องจากจุลินทรีย์

2.4.3 ผลต่อการแยกโปรตีนออกจากเม็ดแป้ง

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ใช้ในการแช่เมล็ดข้าวโพดเพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์นั้น ต่อมาได้พบว่ามีผลต่อการแยกแป้ง ทำให้ได้แป้งที่มีคุณภาพดี เนื่องจากโปรตีนในเมล็ดข้าวโพดส่วนใหญ่จะอยู่ในส่วนแป้งแข็ง และอยู่ในลักษณะรวมตัวกับเม็ดแป้งอย่างหนาแน่นเป็นร่างแห (Protein network) ดังนั้นจึงต้องมีการแยกส่วนร่างแหของโปรตีนออกจากเม็ดแป้ง เพื่อให้แยกแป้งได้มาก จากการศึกษาโดยใช้วิธีทางไมโครสโคปิค (Microscopic) พบว่า ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ใช้แช่ในเมล็ดข้าวโพดในขบวนการ Wet milling มีผลอย่างเฉพาะเจาะจงมากในการแยกโปรตีนออกจากเม็ดแป้ง เมื่อซัลเฟอร์ไดออกไซด์ละลายน้ำแล้วจะเกิดสมดุลย์ดังนี้

$$SO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2SO_3 \rightleftharpoons H^+ + HSO_3^-$$

ซึ่งไบซัลไฟต์อิออน (HSO_3^-) นี้ เป็นตัวการสำคัญ (Active agent) ในการแช่เพื่อแยกโปรตีน ปฏิกริยาของไบซัลไฟต์อิออนกับโปรตีนในส่วนแป้งแข็ง เกิดขึ้นตามลำดับขั้นดังนี้ เมื่อแช่เมล็ดข้าวโพดแล้วโปรตีนจะเริ่มดูดน้ำ (Hydration) จนกลายเป็นลักษณะพองกลม (Globules) อัตราการเกิดการพองของโปรตีนจะสัมพันธ์โดยตรงกับความง่ายในการแยกแป้ง จากนั้นจะเกิดการแยกกระจาย (Dispersion) ของโปรตีนออกจากเม็ดแป้ง โปรตีนที่แยกกระจายออกมาแล้วสามารถละลายออกมาจากเมล็ดข้าวโพดได้ ซึ่งถ้าแช่ในน้ำกลั่นธรรมดาจะไม่มีโปรตีนละลายออกมาเลย

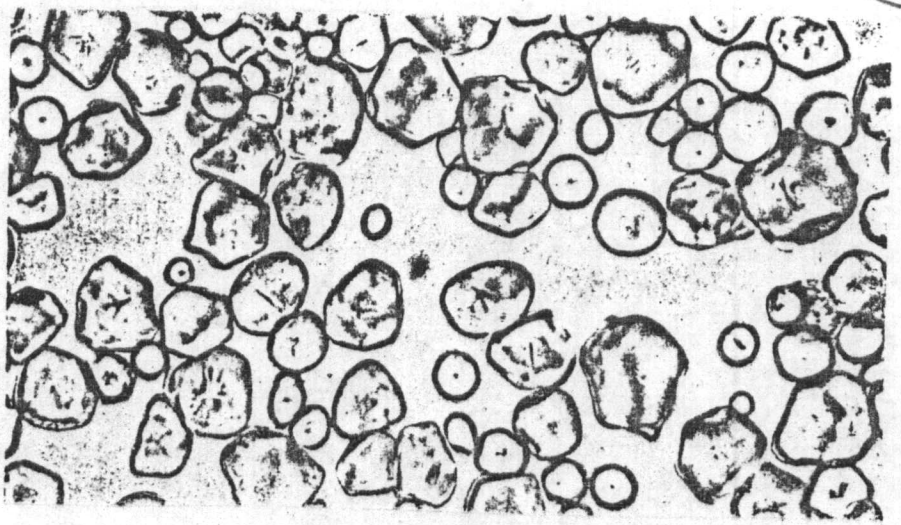
อัตราการแยกกระจายของโปรตีนจะขึ้นกับปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์, อุณหภูมิ และเวลาในการแช่เมล็ดข้าวโพด พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์, อุณหภูมิ และเวลาแล้ว การแยกของโปรตีนจะมีมากขึ้น (15) พบว่าความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำที่ใช้ในการแช่เมล็ดข้าวโพดที่ได้จากกรดชนิดอื่นไม่มีผลต่อการแยกของโปรตีน จากการทดลองโดยใช้กรดอื่น ๆ ในปริมาณที่สมมูลย์กัน พบว่าจะไม่มีผลต่อการกระจายของโปรตีนจากเม็ดแป้ง กรดแลกติคที่เกิดขึ้นในปริมาณเพียงเล็กน้อยในระหว่างการแช่ นอกจากจะช่วยให้เมล็ดข้าวโพดอ่อนนุ่มขึ้น ยังช่วยให้มีการแยกกระจายของโปรตีนเกิดขึ้นในระหว่างการแช่ด้วย (27)

2.5 คุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของแป้งข้าวโพด

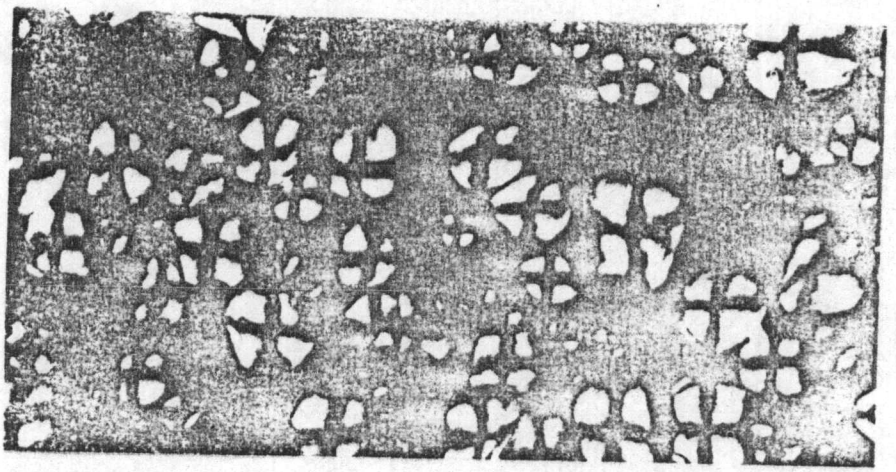
2.5.1 คุณสมบัติด้านกายภาพ (13,43)

แป้งข้าวโพดมีลักษณะปรากฏเป็นผงฝุ่น (Powder) เมื่อมองผ่านกล้องจุลทัศน์จะเห็นเป็นลักษณะของเม็ดแป้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และเมื่อใช้แสงโพลาไรซ์จะเห็นลักษณะเม็ดแป้งแสดงในรูปที่ 2.5 เม็ดแป้งของแป้งข้าวโพดมี 2 ชนิด คือ เป็นลักษณะกลม (Spherical shape) และรูปร่างไม่แน่นอน (Irregular shape) ขนาดของเม็ดแป้งมีเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ในช่วง 5 - 25 ไมครอน เม็ดแป้งที่มีลักษณะกลมจะอยู่ในชั้นแป้งอ่อน (Floury Endosperm) ส่วนเม็ดแป้งที่มีลักษณะไม่แน่นอนจะอยู่ในชั้นแป้งแข็ง (Horny Endosperm)

แป้งข้าวโพดไม่ละลายในน้ำเย็น และตัวทำละลายทุกชนิด เนื่องจากในเม็ดแป้งมีการรวมกันของไฮโดรเยนบอนด์ ในระหว่าง อมิโลช และระหว่าง อมิโลเพคติน หรือระหว่าง อมิโลช กับ อมิโลเพคติน เมื่อเพิ่มความร้อนขึ้น ไฮโดรเยนบอนด์จะแยกออกจากกัน ทำให้แป้งสามารถละลายน้ำได้ แต่อย่างไรก็ตามแป้งสามารถละลายได้ที่อุณหภูมิห้องโดยละลายแป้งใน DMSO (Dimethyl-



รูปที่ 2.4 ลักษณะของเม็ดแป้งข้าวโพด (43)



รูปที่ 2.5 ลักษณะของเม็ดแป้งข้าวโพดเมื่อใช้แสงโพลาไรซ์ (43)

sulfoxide) โดยทั่วไปความเป็นกรด-ด่างของสารละลายแป้งข้าวโพดประมาณ 5-7

2.5.2 โครงสร้างโมเลกุล (43)

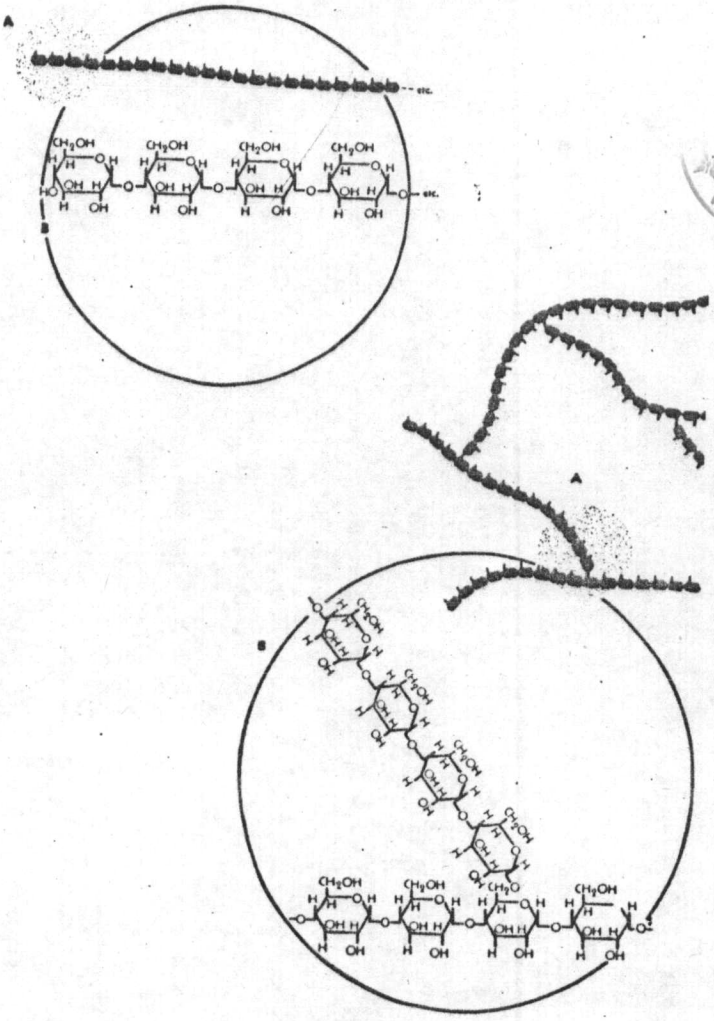
แป้งข้าวโพดเป็นโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบขึ้นจากหน่วยกลูโคสที่ต่อกันด้วยบอนด์ทางเคมี เกิดเป็นโพลีเมอร์ 2 ชนิด คือ อมิโลซ เป็นโพลีเมอร์เส้นตรงที่กลูโคสต่อกันด้วย α - 1,4 linkage และอีกชนิดคือ อมิโลเพคติน เป็นโมเลกุลที่มีกิ่งก้านสาขา กลูโคสต่อกันด้วย α - 1,4 และ α - 1,6 linkage อัตราส่วนของอมิโลซ กับ อมิโลเพคติน เป็น 27 : 73 อมิโลซมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 140,000 อมิโลเพคติน มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 4×10^6 มีกลูโคสในส่วนของ α -1,4 linkage ประมาณ 25 หน่วย โครงสร้างโมเลกุลดังแสดงอยู่ในรูปที่ 2.6

2.5.3 Granule architecture (13)

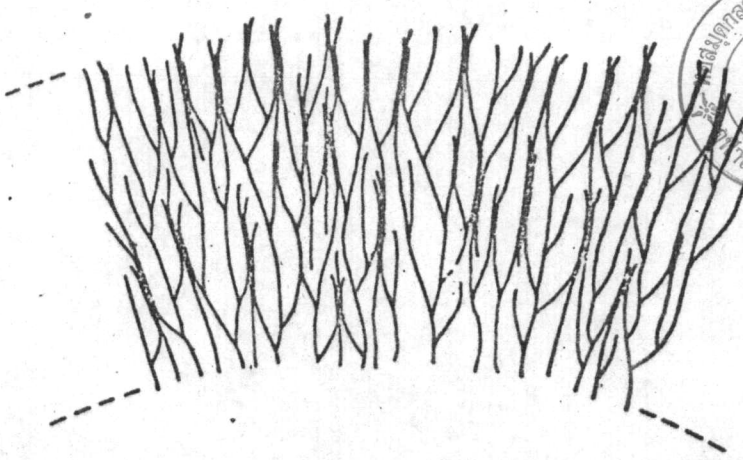
โครงสร้างเม็ดแป้งของแป้งข้าวโพด เป็นผลจากการเรียงตัวของโมเลกุลทั้ง 2 ชนิด โดยมีทิศทางการเรียงตัวในแนวรัศมี ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ในขณะเกิดเม็ดแป้ง ส่วนของอมิโลซและ อมิโลเพคติน ที่เรียงใกล้กันจะมีแนวโน้มที่จะเกิดไฮโดรเยนบอนด์กันเกิดเป็น Bundles หรือ Micelles ซึ่งบริเวณที่มี Micelles อยู่มากก็จะมีแรงยึดของไฮโดรเยนบอนด์มากเรียกว่า บริเวณ Crystalline ส่วนที่มีไฮโดรเยนบอนด์น้อยเรียกว่าบริเวณ Amorphous การเรียงตัวของบริเวณทั้ง 2 นี้จะเป็นไปอย่างมีระเบียบในลักษณะเป็นชั้นแบบ Concentric ทำให้เม็ดแป้งสามารถแสดง Dark cross pattern เมื่อส่องดูด้วยกล้องโพลาไรซ์ซึ่งเรียกว่า Birefringence

2.5.4 Swelling, Gelatinization & Retrogradation (19,43)

เมื่อแป้งข้าวโพดละลายน้ำที่อุณหภูมิห้องจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงไม่มีการละลาย เมื่อตั้งทิ้งไว้จะตกตะกอนแยกชั้น เมื่อค่อย ๆ เพิ่มความร้อนขึ้นพร้อมทั้งมีการกวนสารละลายของแป้งตลอดเวลาจะเกิดขบวนการแบบไดนามิค ดังแสดงในรูปที่ 2.8 เริ่มต้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 37 ถึง 35 องศาเซลเซียส ไฮโดรเยนบอนด์ในบริเวณ Amorphous จะเกิดการแยกออกจากกัน น้ำเริ่มซึมเข้าไปในเม็ดแป้งมากขึ้น ทำให้เม็ดแป้งเริ่มพองตัวขึ้น (Swelling) แต่สารละลายยังขุ่นและมีแป้งตกตะกอนอยู่ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นจาก 55 ถึง 65 องศาเซลเซียส จะเกิดการหลุดออกจาก

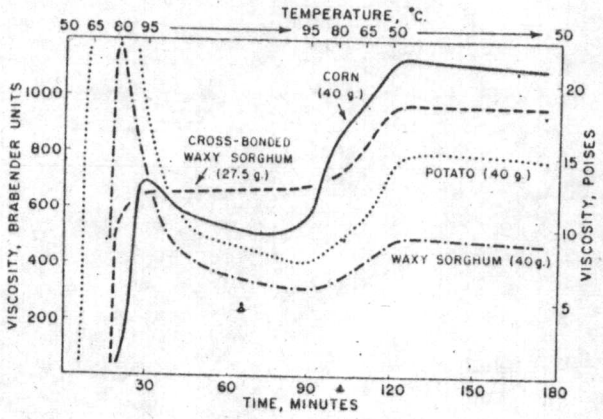


รูปที่ 2.6 โครงสร้างโมเลกุลของแป้งข้าวโพดแสดงส่วน
อมิโลส และ อมิโลเพคติน (43)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างในลักษณะเป็นชั้นของ เม็ดแป้ง (13)

กันของไฮโดรเยนบอนด์ในบริเวณ Amorphous มากขึ้น มีการพองตัวของ เม็ดแป้งมากขึ้น เริ่มมีการสูญเสีย Birefringence ของ เม็ดแป้งไป และสารละลายแป้ง เริ่มจะเหนียวขึ้นแต่ยังมีลักษณะขุ่น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 65 ถึง 95 องศาเซลเซียส ไฮโดรเยนบอนด์ในบริเวณ Crystalline เริ่มแยกออกจากกัน มีการพองตัวของ เม็ดแป้ง เพิ่มมากขึ้น ได้สารละลายของแป้งที่หนืด เม็ดแป้งจะเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปจาก เดิม (Deformation) ซึ่งช่วงนี้เรียกว่าช่วงของการเกิด Gelatinization ของแป้ง ซึ่งอุณหภูมิในการเกิด Gelatinization ของแป้งข้าวโพดอยู่ในช่วง 62 ถึง 72 องศาเซลเซียส เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส คงที่ตลอดเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง จะเกิดการแยกกันของไฮโดรเยนบอนด์ในบริเวณ Crystalline มากขึ้น มีการพองตัวของ เม็ดแป้งมากขึ้น เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปมากขึ้น และเกิดการ Break down ของ เม็ดแป้ง ทำให้ความหนืดของสารละลายแป้งนั้นลดลง เมื่อลดอุณหภูมิลงจาก 95 องศาเซลเซียสจนถึงอุณหภูมิห้อง จะพบว่าแป้งข้าวโพดจะเกิดปรากฏการณ์ Retrogradation ซึ่งเกิดจากการรวมไฮโดรเยนบอนด์กันอีกของ อมิโลซที่อยู่ใกล้เคียงกัน ทำให้สูญเสียน้ำออกจากสารละลายที่หนืดของแป้ง เป็นผลให้สารละลายแป้งนั้นหนืดขึ้น สารละลายแป้งจะขุ่นขึ้น และจะเซทตัวเป็นเจลซึ่งเรียกว่าเกิด Set back



รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งชนิดต่าง ๆ (ความเข้มข้นของแป้งมีหน่วยเป็นกรัมต่อน้ำหนักแห้งใน 500 มล.)

2.5.5 Paste characteristic (19)

ลักษณะของ Paste ของแป้งข้าวโพดค่อนข้างขุ่น และมีแนวโน้มจะเซทตัวเป็นเจลเมื่อตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง

เมื่อแป้งละลายน้ำแล้วให้ความร้อนมากกว่าอุณหภูมิของการเกิด Gelatinization เกิดการพองตัวของเม็ดแป้งอย่างเต็มที่ ผลที่เกิดตามมาคือ ได้ Paste ที่หนืดเหนียวขึ้น สามารถติดตามการเปลี่ยนความหนืดได้โดยการใช้ Viscometer ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนืดในรูปที่ 2.8 จะเห็นว่า Potato และ Waxy sorghum จะมีความหนืดสูงมากในระยะแรกของการให้ความร้อน ซึ่งก็เนื่องมาจากมี Swelling power ที่สูงนั่นเอง แต่อย่างไรก็ตาม เม็ดแป้งที่พองมาก ๆ นี้จะถูก Break down ลงด้วยการกวนทำให้ความหนืดของมันลดลงในขณะทำให้ร้อน Waxy sorghum แสดงการเพิ่มของความหนืดมีน้อยมากในขณะทำให้เย็น เนื่องจาก Waxy sorghum ไม่มีอมิโลซ จึงไม่เกิด Retrogradation ขึ้น แป้งข้าวโพดอย่างเดียวเท่านั้นที่แสดงถึงเส้นโค้งของความหนืดที่ดีพอประมาณ ซึ่งมีการ Break down ในระหว่างการทำให้เย็น

น้อยมาก เนื่องมาจากมี Swelling power ที่ต่ำกว่า และความคงตัวของเม็ดแป้งที่พองตัวแล้วดีที่สุดด้วย แต่อย่างไรก็ตามก็ยังแสดงการ Set back อย่างมากในขณะทำให้เย็น ซึ่งก็เป็นไปตามการเกิด Retrogradation ของอมิโลซนั่นเอง จะเห็นว่า Cross-bonded waxy sorghum นี้คงตัวที่สุด ไม่มีความหนืดในขณะทำให้ร้อนและไม่เกิดการ Break down ในขณะทำให้เย็น

2.6 การใช้ประโยชน์ของแป้งข้าวโพด (13,19,31)

แป้งข้าวโพดสามารถนำมาใช้ประโยชน์โดยไม่ต้อง Modified หรือนำมา Modified เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านเคมีและฟิสิกส์ เพื่อให้นำไปใช้ในด้านอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้มากขึ้น และเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ ให้ดีขึ้น

2.6.1 ประโยชน์ในด้านอาหาร

จะใช้แป้งข้าวโพดเป็นส่วนใหญ่ในจุดประสงค์ต่าง ๆ กันคือ

1. เป็นตัวให้ความหนืด เช่น ซ๊อส, ซุบ, ไส้ขนมพาย
2. เป็นตัวป้องกันความชื้นในน้ำตาลที่บดละเอียด (Icing sugar) ในปริมาณ 3% เพื่อป้องกันการจับก้อนของน้ำตาล
3. เป็นตัวที่ทำให้เกิดเจล (Gel-forming agent) ในอาหารประเภท Gum confections
4. เป็นตัวเชื่อม (Binder) ในเวเฟอร์ (Wafers), โคนไอศครีม
5. เป็นตัวเคลือบ (Coating and glazing agent)ใน ลูกกวาด, Nut meats.

2.6.2 ประโยชน์ในการผลิตเป็นน้ำตาล

แป้งข้าวโพดนำมาผลิตเป็นน้ำตาลในลักษณะของเหลวได้ โดยใช้กรดหรือเอนไซม์เป็นตัวย่อย

2.6.3 อุตสาหกรรมกระดาษ

ใช้แป้งข้าวโพดหรือแป้งข้าวโพดบางชนิดในการทำกระดาษ ใช้เพื่อเป็น Surface-sizing ของการทำกระดาษ เพื่อช่วยเพิ่ม Water resistance และเพิ่ม Strength หรืออาจจะเคลือบผิวหน้าของกระดาษด้วยแป้งข้าวโพด เพื่อช่วยให้ผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ ทำให้การเขียนและการลบดียิ่งขึ้น

2.6.4 อุตสาหกรรมทอผ้า

ใช้แป้งข้าวโพดหรือแป้งข้าวโพดบางชนิดในการทอผ้า เป็นตัว Sizing agent เพื่อให้ได้เส้นด้ายแข็งแรงพอเพียงในการเสียดสีขณะทอ หรืออาจจะใช้เป็นตัว Coating สำหรับผ้าที่ทอเสร็จแล้วก็ได้ แป้งข้าวโพดหรือ เดกตริน จะใช้เป็นตัวช่วยกระจายสีและสารเคมีอื่น ๆ เมื่อต้องการย้อมสีของผ้า

2.6.5 ในการซักรีดผ้า

นิยมใช้แป้งข้าวโพดและ Thin-boiling starch ในการซักรีด โดยใช้เป็นตัว Sizing และ Coating

2.6.7 อุตสาหกรรมทำกาว

นิยมใช้แป้งข้าวโพด และเดกตริน ทำเป็นกาวเป็นส่วนมาก เนื่องจากมีคุณสมบัติเหนียว เมื่อโดนน้ำและความร้อนจึงใช้เป็นตัวเชื่อมติดสำหรับวัสดุบางอย่างได้ เช่น กล่องกระดาษ, ถุงกระดาษ เป็นต้น

2.6.8 ประโยชน์ในการอัดรวมกับตัวยา

แป้งข้าวโพดใช้เป็นตัวเชื่อม (Binder) ในเม็ดยาโดยผสมกับตัวยาอัดเป็นเม็ด

2.6.9 ประโยชน์ในการขุดเจาะบ่อน้ำมัน

ใช้เป็นตัว Thickening agent ในการขุดเจาะบ่อน้ำมันลึก ๆ โดยผสมรวมกับโคลนดินเหนียว นิยมใช้ Pregelatinized starch เพื่อช่วยดูดซึมน้ำที่ออกมาในขณะเจาะและจะเกิดการพองตัว และดูดซึมน้ำไว้ได้ ทำให้ตัวล่อลื่นที่ใช้ในการเจาะนั้นมีน้ำอยู่ไม่ไหลออกมาและจะเหนียวและลื่นอยู่ตลอดเวลา

นอกจากนั้นแป้งข้าวโพดและชนิดของแป้งข้าวโพดยังใช้ประโยชน์อีกมากเช่น เป็นตัวทำให้เจือจาง และตัวพาในเครื่องสำอางค์, ยาผงฆ่าแมลง, ถ่านหินที่อัดเป็นก้อน เป็นตัวเชื่อม ในการทำแอสเบสตอส และ กระดานแอสเบสตอส เป็นตัวให้ฝุ่นละออง (Dry dusting agent) ในการหล่อยางในแท่นพิมพ์ เป็นต้น

2.7 น้ำตาลเหลวจากข้าวโพด (Corn syrup) (3,14,20)

น้ำตาลเหลวจากข้าวโพด คือสารละลายของซัคคาไรด์ (Saccharides) ที่ได้จากการย่อยแป้งข้าวโพด และได้ผ่านกรรมวิธีทำให้บริสุทธิ์ และทำให้เข้มข้นแล้ว

การผลิตน้ำตาลเหลวจากข้าวโพดนั้นมีหลายวิธี ซึ่งอาจจะใช้กรดหรือเอ็นไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกริยา เช่น

- โดยการใช้กรด (Acid hydrolysis)
- โดยการใช้กรดและเอ็นไซม์ (Acid-enzyme hydrolysis)
- โดยการใช้เอ็นไซม์และเอ็นไซม์ (Enzyme-Enzyme hydrolysis)

การเลือกวิธีการผลิตนั้นจะขึ้นกับชนิดของน้ำตาลเหลวจากข้าวโพดที่จะผลิตขึ้นมา ขนาดของการย่อยของแป้งข้าวโพดให้เป็นน้ำตาลเหลวนั้นจะวัดออกมาในเทอมของสมมูลย์เดกโตรส (Dextrose equivalent) ซึ่งกำหนดว่าเป็นปริมาณร้อยละของน้ำหนักของน้ำตาลรีดิวซิงคิดเป็นเดกโตรสที่มีอยู่ในน้ำตาลเหลวจากข้าวโพดที่แห้ง (1)

น้ำตาลเหลวจากข้าวโพดมีหลายชนิด แต่ละชนิดจะมีค่าสมมูลย์เดกโตรสต่างกัน ซึ่งจะขึ้นกับความเหมาะสมในการเลือกชนิดของน้ำตาลเหลวต่าง ๆ นี้ไปใช้ในอุตสาหกรรมแต่ละอย่าง โดยทั่วไปจะมีการผลิตขึ้นมา 5 ชนิด คือ

1. น้ำตาลเหลวจากข้าวโพดที่มีค่าสมมูลย์เดกโตรสอยู่ในช่วง 28 ถึง 37 (Low conversion)
2. น้ำตาลเหลวจากข้าวโพดที่มีค่าสมมูลย์เดกโตรสอยู่ในช่วง 38 ถึง 47 (Regular conversion)
3. น้ำตาลเหลวจากข้าวโพดที่มีค่าสมมูลย์เดกโตรสอยู่ในช่วง 48 ถึง 57 (Intermediate conversion)

4. น้ำตาลเหลวจากข้าวโพดที่มีค่าสมมูลย์เดกโตรสอยู่ในช่วง 58 ถึง 67 (High conversion)

5. น้ำตาลเหลวจากข้าวโพดที่มีค่าสมมูลย์เดกโตรสอยู่ในช่วง 68 ถึง 100 (Extra-high conversion)

น้ำตาลเหลวจากข้าวโพดที่มีค่าสมมูลย์เดกโตรสอยู่ในช่วง 28 ถึง 57 นั้นส่วนใหญ่จะใช้กรดเป็นตัวย่อยแป้ง จะได้น้ำตาลเหลวที่ค่อนข้างหนืดใส มีความหวานเล็กน้อย ซึ่งเหมาะกับการใช้ในการควบคุมการตกผลึกของน้ำตาลอื่น ๆ และช่วยเพิ่มความหนืดอีกด้วย ส่วนพวกที่มีค่าสมมูลย์เดกโตรสอยู่ในช่วง 58 ถึง 100 นั้น จะใช้กรดหรือเอ็นไซม์ย่อยแป้งบางส่วนก่อน แล้วตามด้วยการย่อยด้วยเอ็นไซม์ตัวที่สอง ซึ่งจะได้น้ำตาลเหลวที่มีความหวานเพิ่มมากขึ้น (20)

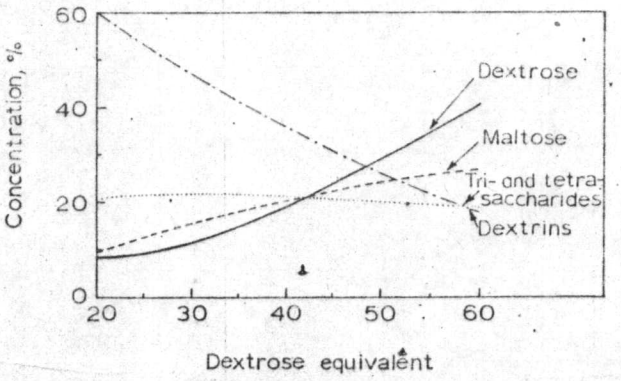
2.8 การย่อยแป้งข้าวโพดโดยใช้กรด

แป้งข้าวโพดเมื่อถูกย่อยด้วยกรดและมีความร้อนสูงจะเกิดการแตกของบอนด์ระหว่าง C-O-C อย่างเดาสุ่ม (Random) กรดที่เติมลงไปทำหน้าที่เป็นตัวเร่งในปฏิกริยา ในตอนแรกที่ปฏิกริยาเกิดขึ้นนั้น แป้งเกิดการ Gelatinization ก่อนแล้วจะถูกย่อยไปเป็นเดกตริน เมื่อปฏิกริยาดำเนินต่อไปเดกตรินก็จะถูกย่อยให้เป็นน้ำตาลกลูโคส และมอลโตส เมื่อปริมาณน้ำตาลเพิ่มขึ้น ความหนืดของสารละลายจะลดลง ดังนั้นสามารถควบคุมปฏิกริยาการย่อยโดยใช้กรดได้ เพื่อให้ได้ค่าสมมูลย์เดกโตรสตามต้องการ

กรดที่ใช้ในการย่อยอาจจะใช้กรดเกลือหรือกรดซัลฟุริค แต่จะนิยมใช้กรดเกลือเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากเกลือที่เกิดขึ้นเมื่อทำให้เป็นกลางด้วยด่างแล้วคือเกลือแกง (NaCl) ซึ่งเป็นเกลือที่ใช้ในการบริโภคอยู่แล้ว

การย่อยแป้งด้วยกรดจะมีข้อควรสามารถจำกัดคือ จะมีค่าสมมูลย์เดกโตรสเพียง 50-55 เท่านั้น (33) ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อปล่อยให้ปฏิกริยาดำเนินไปมากกว่านี้จะเกิดสีเข้มมากขึ้นและมีรสขม ซึ่งเกิดมาจากปฏิกริยาผันกลับ (Reversion reaction) ของน้ำตาลกลูโคสที่เกิดขึ้น (9)

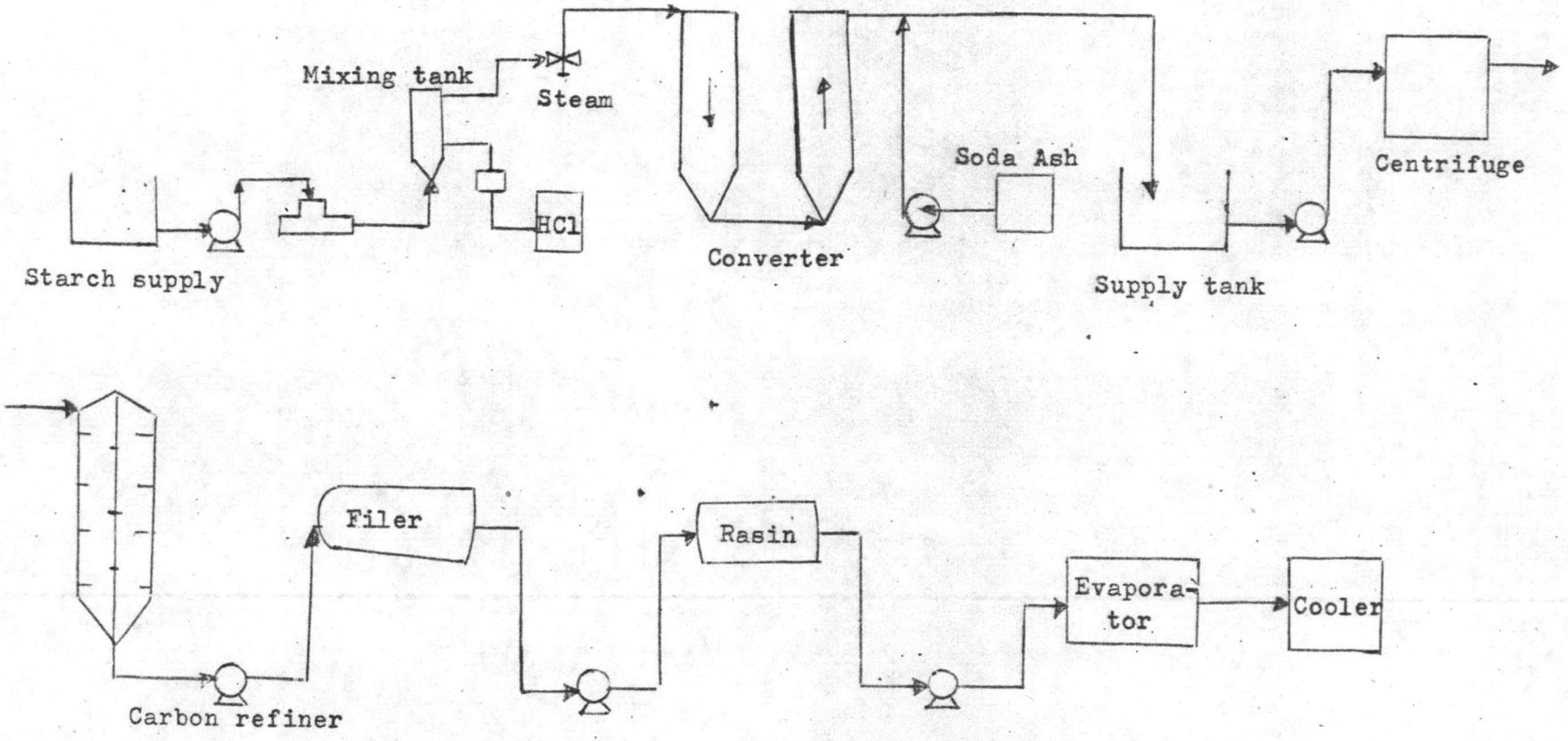
การย่อยแป้งข้าวโพดด้วยกรดโดยให้มีค่าสมมูลย์เดกโตรสต่าง ๆ กันจะได้น้ำตาลหลาย ๆ ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.9 เช่นน้ำตาลเหลวที่มีค่าสมมูลย์เดกโตรส 42 จะมีส่วนประกอบคือ น้ำตาลเดกโตรส 22%, มอลโตส 20%, ไตรและเตตราซัคคาไรด์ 20% และเดกตริน 38%



รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบของน้ำตาลเหลวจากข้าวโพดที่ได้จากการย่อยโดยใช้กรดและมีค่าสมมูลย์เดกโตรสต่าง ๆ กัน (17)

ขบวนการผลิตน้ำตาลเหลวจากข้าวโพดโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งแสดงอยู่ในรูปที่ 2.10 การผลิตจะใช้ถังที่ควบคุมอุณหภูมิและความดันได้ (Converter) โดยใส่แป้งข้าวโพดที่ละลายน้ำให้มีความเข้มข้นประมาณ 30% (ต่อน้ำหนักแห้ง) เติมกรดเกลือลงไปในสารละลายของแป้งนี้ จากนั้นก็เพิ่มอุณหภูมิภายใต้ความดันเท่าที่ต้องการ ปล่อยให้ปฏิกริยาดำเนินไปจนถึงจุดที่ต้องการ ในการผลิตทางการค้า อาจจะใช้แบบขั้นตอนเดียว (Batch process) หรือแบบต่อเนื่อง ขอบเขตของการย่อยแป้งขึ้นกับปริมาณกรดที่ใช้, เวลา, อุณหภูมิ และความดันในการย่อย ตัวแปรต่าง ๆ มักขึ้นต่อกันโดยตรง และขึ้นตรงกับน้ำตาลเหลวที่จะผลิตให้มีสมมูลย์เดกโตรสเท่าใด เมื่อปฏิกริยาดำเนินมาจนถึงจุดสุดท้ายที่ต้องการแล้ว หยุดให้ความร้อน และหยุดการย่อยโดยการเติมด่าง (ใช้โซเดียมคาร์บอเนต) เพื่อทำให้เป็นกลาง ให้ได้ความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในช่วง 4 ถึง 5.5 เนื่องจากกรดเกลือทำหน้าที่เป็นตัวเร่ง ซึ่งจะไม่ทำปฏิกริยากับแป้งเลย เกลือที่ได้จากการทำให้เป็นกลางจะเป็นเกลือแกงธรรมดา

หลังจากทำให้เป็นกลางแล้ว มักพบไขมันละลายอยู่ที่ผิว ซึ่งจะถูกกำจัดออกได้โดยใช้เครื่องเหวี่ยงเอาไขมันออก (Fat separating centrifuge) ส่วนพวกที่ละลายแขวนลอยอยู่จะกำจัดออกด้วยการกรองจนได้สารละลายใส แล้วนำไปทำให้บริสุทธิ์โดยการใช้ผงถ่านเพื่อฟอกสีและดูดกลิ่น ดังนั้นน้ำตาลเหลวที่ได้จะมีสีใสเหมือนกับน้ำ ถ้าต้องการทำให้น้ำตาลเหลวจากข้าวโพดบริสุทธิ์และมี



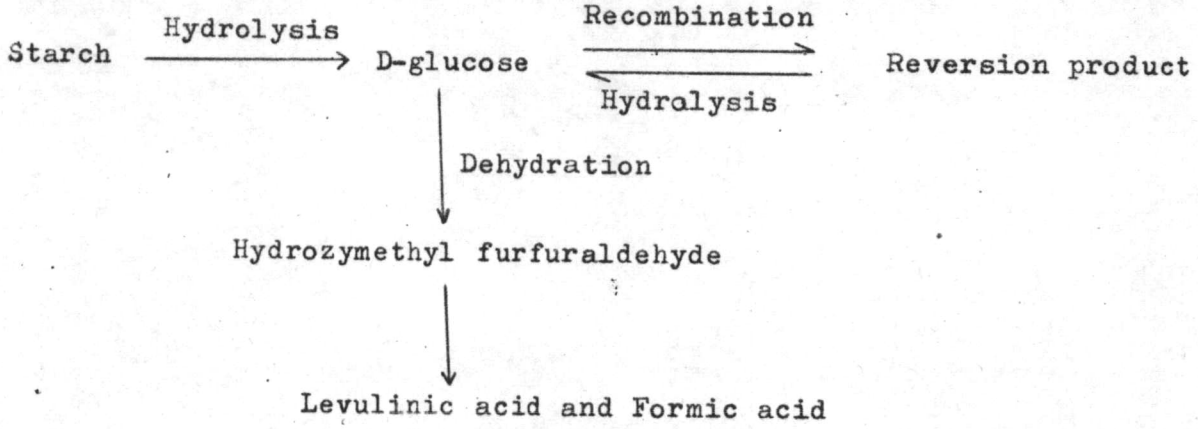
รูปที่ 2.10 ขั้นตอนในการผลิตน้ำตาลเหลวจากข้าวโพดโดยใช้กรด (20)

คุณภาพดียิ่งขึ้นจะต้องนำไปผ่าน เรซิน ซึ่งเป็นตัวกำจัดพวก แร่ธาตุ, เถ้า และสารอื่น ๆ ที่อยู่ในรูปของอิออนออก จากนั้นนำน้ำตาลเหลวที่ได้ไประเหยให้เข้มข้นโดยใช้ความร้อนต่ำโดยไม่ทำให้สีของน้ำตาลเหลวเปลี่ยนแปลงไป ระเหยจนได้ความเข้มข้นมากกว่า 70%

2.8.1 ปฏิกริยาที่เกี่ยวข้อง เมื่อแป้งถูกย่อยด้วยกรด

กรดเป็นตัวเร่งในปฏิกริยาการย่อย (Hydrolysis) ผลิตภัณฑ์สุดท้ายจะได้น้ำตาลกลูโคส ภายใต้สภาวะของการย่อยที่อุณหภูมิสูง ๆ นี้ จะมีปฏิกริยาอื่น ๆ (Secondary reaction) เกิดขึ้นอีกคือ ปฏิกริยาการผันกลับ (Reversion reaction) และปฏิกริยาที่เกิดสารที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต

ปฏิกริยาทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระหว่างการย่อยแป้งด้วยกรดดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ปฏิกริยาทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระหว่างการย่อยแป้งด้วยกรด (43)

ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเป็นลำดับที่ 2 (Secondary reaction) ทั้ง 2 ปฏิกริยานี้ไม่เพียงแต่จะทำให้ปริมาณกลูโคสลดลงเท่านั้น แต่ยังทำให้คุณภาพของน้ำตาลเหลวที่ได้ไม่ดีเช่น สีและกลิ่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำตาลเหลวที่มีผลสุดท้ายเป็นพวกที่มี Reversion product มาก (22)

2.8.1.1 ปฏิกริยาการผันกลับ (Reversion reaction)

เนื่องจากน้ำตาลริดิวซิง เช่น กลูโคสในสารละลายที่มีกรดเป็นตัวเร่งจะเกิดการรวมตัวกันอีกครั้งภายใต้สภาวะการย่อยแป้ง ปฏิกริยาการย่อยแป้งจะเกิดขึ้นดังนี้

$$(C_6H_{12}O_6)(C_6H_{10}O_5)_x + xH_2O \longrightarrow (1 + x)(C_6H_{12}O_6)$$

และเมื่อความเข้มข้นของกลูโคสเพิ่มมากขึ้น ปฏิกริยาผันกลับจะเกิดขึ้นดังนี้

$$2C_6H_{12}O_6 \rightleftharpoons C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O$$

ปฏิกริยาผันกลับที่เกิดขึ้นนี้เป็นปฏิกริยาสมดุลย์ (Equilibrium reaction) ซึ่งดำเนินไปในรูปแบบของการลดปริมาณเดกโตรสจนกระทั่งถึงสมดุลย์ ตำแหน่งของสมดุลย์และอัตราของปฏิกริยาที่เข้าใกล้จุดสมดุลย์จะขึ้นกับความเข้มข้นของกลูโคสเริ่มต้น, ความเข้มข้นของกรด, และอุณหภูมิ (43) ดังนั้นการใช้ความเข้มข้นของแป้งมาก, ปริมาณกรดมาก ๆ และอุณหภูมิสูงจะมีผลต่อการลดลงของกลูโคสเนื่องจากปฏิกริยานี้

Silin และ Sapegina (22) ได้ศึกษาปฏิกริยาสมดุลย์โดยการทดลองหาค่าของกลูโคสที่จุดสมดุลย์หลาย ๆ จุด (ตารางที่ 2.4) และผลจากการทดลองได้เสนอสมการของปฏิกริยาสมดุลย์ คือ

$$k = \frac{A.n^2}{100(100-n)}$$

เมื่อ k = ค่าคงที่ของสมดุลย์ (Equilibrium constant)

A = ความเข้มข้นของกลูโคสเริ่มต้นเป็น %

n = ความเข้มข้นของกลูโคสที่เหลืออยู่ที่จุดสมดุลย์เทียบกับจำนวนเริ่มต้นคิดเป็น %

ค่า k มีค่า 259 ซึ่งใช้กับค่าความเข้มข้นของกลูโคสเริ่มต้นในช่วง 8.6 ถึง 62.9% เมื่อแทนค่า k จะคำนวณค่า n ได้ทุก ๆ ค่าของความเข้มข้นของกลูโคสเริ่มต้นโดยสมการนี้คือ

$$n = \frac{100(\sqrt{1-0.015444\ A} - 1)}{0.007722\ A}$$

ตารางที่ 2.6 แสดงจุดสมดุลย์ของการผันกลับของกลูโคสที่ 100 องศาเซลเซียส (22)

Initial concentration of starch, % by weight	Initial concentration, base on glucose % weight of mass (A)	% Glucose(dry basis) at equilibrium (n)
4.5	5	98.1
9.0	10	96.0
13.5	15	94.0
18.0	20	91.8
22.5	25	89.6
27.0	30	87.4
36.0	40	82.5
45.0	50	77.1
54.0	60	70.9
63.0	70	63.6

จากตารางที่ 2.6 แสดงเปอร์เซนต์ของกลูโคสที่สมดุลย์ที่ได้จากการย่อยแป้งด้วยความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยกรดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะเห็นว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายแป้งเข้มข้น 4.5% เปอร์เซนต์กลูโคสที่อยู่ที่จุดสมดุลเมื่อเทียบกับจำนวนกลูโคสเริ่มต้น (n) มีค่าเป็น 98.1 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายแป้งมากขึ้น เปอร์เซนต์ของกลูโคสที่จะเหลือที่จุดสมดุลย์ก็จะน้อยลงตามลำดับ เช่นที่ความเข้มข้นของสารละลายแป้งเป็น 36.0% ค่า n จะเหลือเพียง 82.5% เป็นต้น

2.8.1.2 ปฏิกริยาที่เกิดสารที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต

กลูโคสที่เกิดขึ้นสามารถถูกกำจัดน้ำ (Dehydrated) ออกไปได้ในสารละลายที่มีกรดอยู่ในที่อุณหภูมิสูง ๆ เป็นพวก Furfural ซึ่งส่วนใหญ่จะได้ 5-hydroxymethyl furfural แต่จะมีโอกาสเกิดเพียง 1% ภายใต้การย่อยแป้งที่สภาวะปกติ (22) นอกจากนั้นจะเกิดเป็นพวกกรด

Levulinic และ Formic การแตกสลายของเดกโตรสเป็น Furfural นี้จะเกิดเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของกรด, ความเข้มข้นของแป้งและอุณหภูมิ

2.9 การย่อยแป้งข้าวโพดโดยใช้กรดและเอ็นไซม์

การย่อยแป้งโดยใช้กรดและเอ็นไซม์ทำเป็น 2 ขั้นตอน คือ

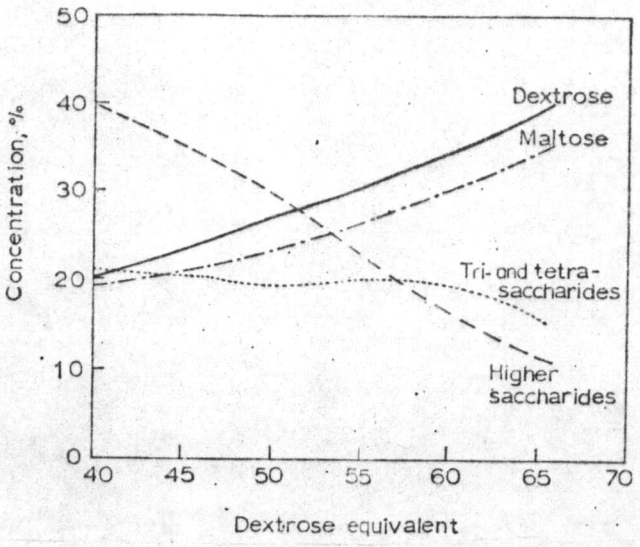
ขั้นแรก ใช้กรดเป็นตัวย่อย (Liquefaction) ซึ่งอาจจะทำได้ทั้งแบบตอนเดียว (Batch process) หรือแบบต่อเนื่อง ขอบเขตของการย่อยแป้งในช่วงนี้ควบคุมได้โดยปริมาณกรด เวลา, อุณหภูมิ และความดันที่ใช้ในการย่อย

ขั้นที่สอง ใช้เอ็นไซม์ย่อยต่อ (Saccharification) เอ็นไซม์ที่ใช้เป็นประเภทที่มีความสามารถเฉพาะเจาะจงในการย่อยแป้งคือ เอ็นไซม์อมิเลส ซึ่งมีหลายประเภท เช่น อัลฟา เอมิเลส (α - amylase) เบต้าเอมิเลส (β - amylase) และกลูโคอมิเลส (Gluco-amylase) โดยทั่วไปในขั้นนี้มักใช้เอ็นไซม์กลูโคอมิเลสเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากสามารถย่อยโมเลกุลของเดกตรินให้เป็นโมเลกุลของกลูโคสเดี่ยว ๆ ได้ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมของเอ็นไซม์ ปัจจัยที่ใช้ในการควบคุมอัตราการเร่งปฏิกริยาของเอ็นไซม์คือ ความเข้มข้นของเอ็นไซม์, ความเข้มข้นของแป้ง, เวลา, อุณหภูมิ และความเป็นกรด-ด่างที่ใช้ในการย่อย ผลของปัจจัยเหล่านี้ต่างกันไปตามชนิดของเอ็นไซม์ด้วย (29)

การย่อยในขั้นแรกโดยใช้กรดต้องมีสมมูลย์กรดพอเพียงที่จะทำให้แป้งละลายได้หมดเพื่อให้เอ็นไซม์สามารถย่อยเดกตรินต่อไปได้อย่างสม่ำเสมอตลอด การใช้กรดและเอ็นไซม์ย่อยแป้งนี้ได้น้ำตาลเหลวที่มีปริมาณมอลโตสสูงกว่าเมื่อใช้กรดอย่างเดียว (33) นอกจากนั้นการย่อยโดยใช้กรดและเอ็นไซม์จะได้ขอบข่ายของสมมูลย์เดกโตรสสูงกว่าใช้กรดอย่างเดียว ซึ่งขึ้นกับขอบเขตของการใช้กรดย่อยในขั้นแรกด้วย น้ำตาลเหลวที่ได้จากวิธีนี้มีสีอ่อนกว่า, กลิ่นรสที่ดีกว่า มีความหนืดน้อยกว่า เนื่องจากมีเดกตรินน้อยกว่า

การย่อยแป้งข้าวโพดโดยใช้กรดและเอ็นไซม์ แสดงน้ำตาลต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการย่อย ดังแสดงในรูปที่ 2.12

การผลิตน้ำตาลเหลวจากข้าวโพดโดยใช้กรดและเอ็นไซม์แสดงอยู่ในรูปที่ 2.13 ขั้นแรกโดย

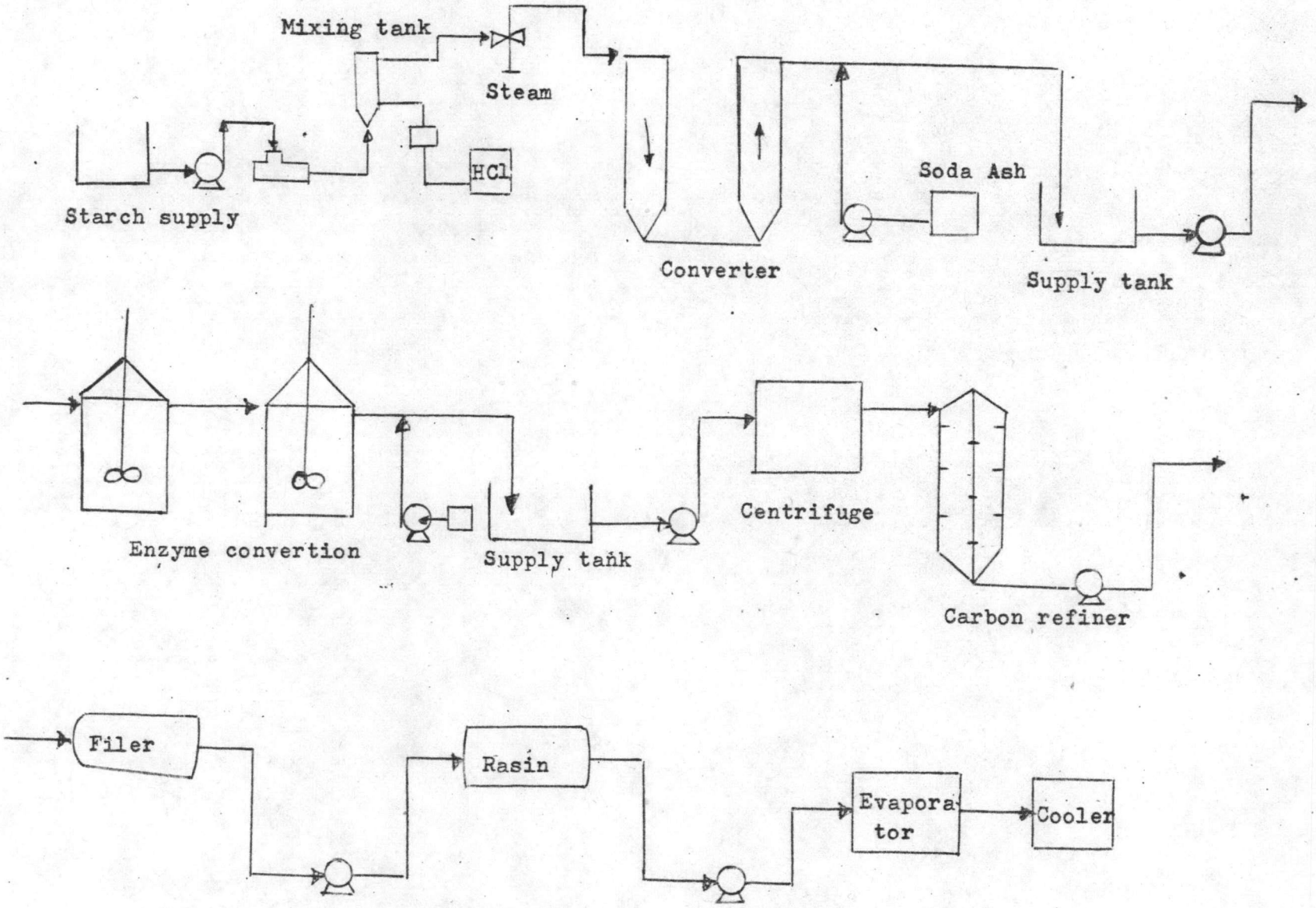


รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบของน้ำตาลเหลวจากข้าวโพดที่ได้จากการย่อยโดยใช้กรดและเอ็นไซม์ และมีค่าสมมูลย์เดกโตรสต่าง ๆ กัน (33)

ใช้กรดเป็นตัวย่อย นำแป้งข้าวโพดละลายน้ำให้มีความเข้มข้นประมาณ 30% (ต่อน้ำหนักแห้ง) เติมกรดเกลือลงในสารละลายแป้งในปริมาณที่เพียงพอที่จะทำให้แป้งเกิดการละลายเป็นเนื้อเดียวกันหมด โดยใช้อุณหภูมิภายใต้ความดัน และเวลาในการย่อยนั้นขึ้นกับค่าสมมูลย์เดกโตรสที่ต้องการ เมื่อการย่อยดำเนินถึงจุดที่ต้องการแล้ว แป้งที่ถูกย่อยด้วยกรดจะถูกนำออกจากถังผลิต (Converter) ทำให้เย็นและทำให้เป็นกลางด้วยด่าง (โซเดียมคาร์บอเนต) ให้ได้ความเป็นกรดด่างประมาณ 4.5 จากนั้นใช้เอ็นไซม์ กลูโคอมิเลสย่อยต่อ โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมของเอ็นไซม์นี้ กำหนดค่าต่าง ๆ ตามบริษัท NOVO(29) ดังนี้คือ

ปริมาณเอ็นไซม์	1.5	ลิตรต่อตันของแป้งแห้ง
เวลาในการย่อย	48	ชั่วโมง
อุณหภูมิในการย่อย	60	องศาเซลเซียส
ความเป็นกรด-ด่าง	4.5	

เมื่อการย่อยของเอ็นไซม์ดำเนินถึงจุดที่ต้องการแล้ว เอ็นไซม์จะถูกทำลายไปโดยการเพิ่ม



รูปที่ 2.13 ขั้นตอนในการผลิตน้ำตาลเหลวจากข้าวโพดโดยใช้กรดและเอ็นไซม์ (20)

ความร้อนขึ้น จากนั้นทำให้บริสุทธิ์ และระเหยน้ำออกให้เข้มข้นโดยวิธีเดียวกับการย่อยด้วยกรด

2.9.1 เอ็นไซม์กลูโคอมิเลซที่ใช้ในการย่อย

กลูโคอมิเลส (α - D - (1 - 4) -glucanglucohydrolases) จะย่อยแป้งให้กลายเป็นกลูโคสโดยตรง ซึ่งผลิตได้จากราหลายพันธุ์เช่น Aspergillus, Rhizopus, Endomyces และสายพันธุ์อื่น ๆ ชื่อที่เรียกเอ็นไซม์นี้มีหลายชื่อ เช่น กลูโคอมิเลส, อมิโลกลูโคซิเดส (Amyloglucosidase) และ แกมม่าอมิเลส (Gamma amylase) เอ็นไซม์กลูโคอมิเลสที่สกัดจาก Aspergillus niger จะมีช่วงอุณหภูมิและความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมคือ 50 ถึง 60 องศาเซลเซียส และ 4 ถึง 5 ตามลำดับ

เอ็นไซม์กลูโคอมิเลสนี้ขึ้นกับกลุ่มของสายพันธุ์ที่เตรียมขึ้น เช่น จาก Aspergillus และ Rhizopus ดังนั้น คุณสมบัติทางเคมีจะแตกต่างกันไปด้วย เช่น อุณหภูมิและความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม แต่การย่อยภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจะเกิดการย่อยเป็นน้ำตาลกลูโคสได้อย่างสมบูรณ์

เอ็นไซม์กลูโคอมิเลส เป็น เอ็กโซอมิเลส (Exo-amylase) ซึ่งจะเร่งปฏิกริยาการย่อยโดยแยกโมเลกุลของแป้งออกเป็นหน่วยของน้ำตาลกลูโคสเดี่ยว ๆ จากทางปลายที่ไม่เป็นรีดิวซิง (Non-reducing end) และมีความสามารถย่อยได้ทั้งบอนด์ระหว่าง α-1,4 - และ α-1,6 linkage ในโพลีซัคคาไรด์ แต่การย่อยบอนด์ระหว่าง α-1,6- มีอัตราการย่อยช้ากว่า และสามารถย่อย α-(1,6)- และ α-1,3 linkage ใน Oligosaccharide ได้ด้วย

อัตราการย่อยของเอ็นไซม์กลูโคอมิเลสขึ้นกับความยาวของโมเลกุล คือ ซัคคาไรด์ที่มีโมเลกุลที่สูงกว่าจะถูกย่อยได้เร็วกว่า (29) เช่น มอลโตเตตร้าโอส (Maltotetraose) และโอลิโกซัคคาไรด์ (Oligosaccharides) ที่มีโมเลกุลสูง ๆ กว่าจะถูกย่อยได้เร็วกว่า มอลโตไตรโอส (Maltotriose) และมอลโตไตรโอส จะถูกย่อยได้เร็วกว่ามอลโตส เป็นต้น

ในการเตรียมเอ็นไซม์กลูโคอมิเลสในสมัยก่อนประกอบไปด้วยเอ็นไซม์ ทรานส์กลูโคอมิเลสที่มากพอ ซึ่งเอ็นไซม์นี้สามารถเร่งให้เกิดปฏิกริยาการเปลี่ยนจากตำแหน่ง α -1,4- ไปเป็น α -1,6- ได้ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ขึ้นมาใหม่ และจะถูกย่อยต่ออีกได้ยากขึ้น ดังนั้นต้องมีการกำจัดเอ็นไซม์นี้ออก หรือเลือกใช้ราสายพันธุ์ที่ไม่มีการเกิดเอ็นไซม์ชนิดนี้ขึ้น ปัจจุบันเอ็นไซม์กลูโคอมิเลสที่สกัดจากรา Aspergillus จะไม่มีเอ็นไซม์ทรานส์กลูโคอมิเลสเลย

2.9.2 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเมื่อแป้งถูกย่อยด้วยเอ็นไซม์

เอ็นไซม์กลูโคอมิเลสนอกจากจะเร่งปฏิกริยาการย่อยแป้งแล้วยังสามารถเร่งปฏิกริยาการผันกลับ (Reversion reaction) ได้ (29) ผลที่ได้จากปฏิกริยาการผันกลับคือ มอลโตส และไอโซมอลโตส แต่จะเกิดไอโซมอลโตสในอัตราที่ต่ำกว่า ปฏิกริยานี้จะเกิดได้ดีเมื่อมีความเข้มข้นของกลูโคสสูง ๆ ดังนั้นเมื่อต้องการใช้ความเข้มข้นของแป้งสูง ๆ และใช้เวลาการย่อยนาน ๆ ปฏิกริยาการเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาลกลูโคสจึงไม่สมบูรณ์ ซึ่งมีผลิตภัณฑ์อย่างอื่น ๆ ที่เกิดได้ทั้ง ไดซัคคาไรด์ และโอลิโกซัคคาไรด์ (Oligosaccharides) ถ้าเพิ่มความเข้มข้นของแป้ง สมดุลย์ของปฏิกริยาจะเกิดเป็นปฏิกริยาผันกลับได้มากขึ้น ทำให้ความเข้มข้นของกลูโคสที่ได้ลดลง ปฏิกริยาผันกลับจะเกิดได้อย่างช้า ๆ ซึ่งขอบเขตของการเกิดจะขึ้นกับปริมาณแป้ง, เอ็นไซม์ที่ใช้, และเวลาในการใช้ย่อย

ผลของปฏิกริยาการย่อยแป้งและปฏิกริยาการผันกลับ ทำให้ความเข้มข้นของกลูโคสเพิ่มขึ้นได้มากสุดในช่วง 95 ถึง 97% ถ้าปฏิกริยายังคงดำเนินต่อไปหลังจากได้ค่าสมมูลย์เดกโตรสมากที่สุดแล้ว ความเข้มข้นของกลูโคสจะลดลงอย่างช้า ๆ เนื่องจากเกิดปฏิกริยาผันกลับ

2.10 คุณสมบัติของน้ำตาลเหลวจากข้าวโพด (14,20)

น้ำตาลเหลวจากข้าวโพดมีคุณสมบัติในด้านต่าง ๆ ดังนี้คือ

2.10.1 คุณสมบัติทางด้านเคมี

2.10.1.1 ปริมาณเถ้า

น้ำตาลเหลวจากข้าวโพดประกอบด้วยเกลืออนินทรีย์ในปริมาณที่ต่ำ ตัวหลักของพวกเถ้าคือ โซเดี่ยมคลอไรด์ ซึ่งได้มาจากการทำให้เป็นกลางของกรดเกลือด้วยโซเดี่ยมคาร์บอเนต และมีพวกเกลืออนินทรีย์อื่น ๆ ในปริมาณที่น้อยกว่า ซึ่งส่วนใหญ่จะติดมากับแป้งที่นำมาทำเป็นน้ำตาลเหลว เช่นพวก ซัลเฟต และ ฟอสเฟต

ปริมาณเฉลี่ยโดยปกติของเถ้าในน้ำตาลเหลวจากข้าวโพดคือ 0.1 - 0.3% ถ้ามีการผ่านเรซิน ปริมาณเถ้าจะมีค่าต่ำลงไปอีก ค่าปริมาณเถ้าต่ำ ๆ จะเป็นตัวแสดงความคงตัว ของสีของน้ำตาลเหลว บางครั้งพวกเถ้าในน้ำตาลโดยเฉพาะพวก ฟอสเฟต และ ซัลเฟต จะทำให้เกิดความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ขึ้น เล็กน้อย ซึ่งอาจจะเป็นที่ต้องการของขบวนการผลิตอาหารบางประเภท

2.10.1.2 ปริมาณโปรตีน

ในน้ำตาลเหลวจากข้าวโพดจะมีโปรตีนอยู่ในปริมาณที่น้อย โดยเฉลี่ยมีอยู่ประมาณ 0.03-0.08% ซึ่งจะมาจากจำนวนเล็กน้อยของ เชื้อ ที่ยังเหลือติดอยู่บ้างในแป้งที่นำมาทำเป็นน้ำตาลเหลว ถ้ามีการผ่านเรซิน จะมีโปรตีนในปริมาณที่ต่ำลงไปอีก

โปรตีนในน้ำตาลเหลวจากข้าวโพดจะรวมกับพวกน้ำตาลรีดิวซิง เกิดปฏิกริยา Millard reaction ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดสีน้ำตาลที่ไม่ใช่เกิดจากเอ็นไซม์ แต่เนื่องจากมีโปรตีนในปริมาณน้อยมาก จึงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีมากนัก

2.10.1.3 ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์โดยปกติมีอยู่ในน้ำตาลเหลวจากข้าวโพดประมาณ 15-40 ppm. (0.0015 - 0.0040%) ถ้าเป็นน้ำตาลเหลวจากข้าวโพดที่ต้องบรรจุใส่ในกระป๋องเคลือบดีบุกสำหรับใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารต้องมีซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่ำกว่า 10 ppm. เนื่องจากถ้ามีมากจะเพิ่มอัตราการกัดกร่อน โดยทั่วไปสำหรับอาหารกระป๋อง ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในน้ำตาลเหลวจากข้าวโพดที่จะใช้ต้องอยู่ในช่วง 2 - 3 ppm.

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในน้ำตาลเหลวจากข้าวโพดในปริมาณเล็กน้อยจะช่วยลดการเกิดสีจากปฏิกริยา Millard reaction และช่วยป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ด้วย

2.10.1.4 Fermentable extract

Fermentable extract กำหนดไว้ในรูปของเปอร์เซนต์คาร์โบไฮเดรตคำนวณในรูปน้ำหนักแห้ง น้ำตาลเหลวจะถูกหมักโดยยีสต์ได้ เปอร์เซนต์ Fermentable จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดของการเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาลคือ เมื่อสมมูลย์เดกโตรสเพิ่มขึ้น เปอร์เซนต์ Fermentable ก็เพิ่มขึ้นด้วย

2.10.2 คุณสมบัติทางด้านกายภาพ

2.10.2.1 ความเป็นกรด-ด่าง

ความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำตาลเหลวจากข้าวโพดอยู่ในช่วง 4.0-5.5 ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ ๆ จะมีผลดีต่อความคงตัวของสีในระยะเวลาที่เก็บไว้ โดยทั่วไปค่าความเป็นกรด-ด่าง

เฉลี่ยของน้ำตาลเหลวคือ 5.0

2.10.2.2 Humectancy & Hygroscopicity

Humectancy และ Hygroscopicity เป็นค่าที่บอกถึงความสามารถของน้ำตาลเหลวจากข้าวโพดที่สามารถมีความชื้นอยู่ภายใต้สภาวะที่กำหนดให้ของความชื้นสัมพัทธ (Relative humidity) หนึ่ง ๆ

Humectancy หมายถึง ความสามารถในการต่อต้านการเปลี่ยนของปริมาณความชื้น

Hygroscopicity หมายถึง ความสามารถในการดูดความชื้นจากอากาศ

การเพิ่มหรือลดของปริมาณความชื้นของน้ำตาลเหลวจากข้าวโพดจะขึ้นกับสิ่งอื่น ๆ เช่น ความดันไอน้ำของสภาวะรอบ ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธบางระดับจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นของน้ำตาลเหลว ซึ่งเทอมนี้เรียกว่า Equilibrium Relative Humidity(ERH)

จากการทดลองพบว่า ที่ 60 % RH และที่ 38 องศาฟาเรนไฮท์ น้ำตาลเหลวจากข้าวโพดทุกชนิดจะมีปริมาณความชื้นเปลี่ยนไปน้อยที่สุด เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นพบว่า น้ำตาลเหลวจากข้าวโพดที่มีสมมูลย์เดกโตรสสูงกว่าจะสูญเสียปริมาณความชื้นน้อยกว่า และน้ำตาลเหลวที่มีสมมูลย์เดกโตรสน้อยกว่าจะมีการสูญเสียความชื้นได้มากกว่า ดังนั้นในการผลิตพวก Hard candy ซึ่งต้องเก็บไว้โดยที่ไม่ให้มีการเพิ่มของความชื้นเพื่อป้องกันการเยิ้มของลูกกวาด จึงใช้น้ำตาลเหลวจากข้าวโพดที่มีสมมูลย์เดกโตรสต่ำ เช่นในช่วง 40-45 ถ้าผลิตหมากฝรั่งจะใช้น้ำตาลเหลวจากข้าวโพดที่มีสมมูลย์เดกโตรสสูงกว่า เนื่องจากต้องการให้มีการลดความชื้นลงน้อยมากในขณะเก็บ

2.10.2.3 Control of sucrose and dextrose crystallization

การเกิดการตกผลึกขึ้นในอาหารแต่ละประเภทจะทำให้ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture) เสียไป และอาหารนั้นไม่ถูกยอมรับ ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมการตกผลึกของน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น แยม, เยลลี่ มีข้อกำหนดของปริมาณของแข็งทั้งหมดต่ำสุด (Minimum total soluble solid) อยู่ในช่วง 60-70% จะใช้น้ำตาลเหลวจากข้าวโพดช่วยป้องกันการตกผลึก, พวกขนมหวานแช่แข็งจะใช้น้ำตาลเหลวจากข้าวโพดป้องกันการเกิดการตกผลึกของซูโครส เพราะถ้าใช้น้ำตาลซูโครสอย่างเดียวจะเกิดการตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำได้ ดังนั้นจึงใช้น้ำตาลเหลวจากข้าวโพดแทนบางส่วนของซูโครส เพื่อให้ได้ปริมาณของแข็งทั้งหมดตามความจำเป็น และป้องกันการตกผลึกของซูโครสด้วย

ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสดีไม่เกิดการสากลิ้น

ในอุตสาหกรรมทำลูกกวาด, ไอสกรีม และน้ำเชื่อมผสม ใช้น้ำตาลเหลวจากข้าวโพดในการควบคุมการตกผลึกของซูโครส เช่น พวก Hard candy ไม่สามารถจะทำได้จากซูโครสอย่างเดียวเท่านั้น เพราะจำทำให้เกิดการตกผลึก และร่วน

2.10.3 คุณสมบัติทางด้าน Organoleptic

2.10.3.1 การควบคุมความหวาน (Sweetness control)

การควบคุมความหวานในอาหารจะเลือกน้ำตาลเหลวจากข้าวโพดที่มีคุณสมบัติตามต้องการของผลิตภัณฑ์ และปรับระดับความหวานโดยการเติมน้ำตาลอื่น ๆ เช่นในการผลิตไอสกรีม ต้องมีปริมาณของแข็งทั้งหมดจำกัด ดังนั้นการเลือกอัตราส่วนของน้ำตาลกับน้ำตาลเหลวจากข้าวโพดจึงมีความสำคัญ เพื่อที่จะได้ขนาดความหวานที่เราต้องการ

2.11 การใช้ประโยชน์ของน้ำตาลเหลวจากข้าวโพด (14,20,38)

ประโยชน์ของน้ำตาลเหลวจากข้าวโพดส่วนใหญ่จะใช้ในด้านอาหารต่าง ๆ ในจุดประสงค์หลายด้านดังนี้ คือ

2.11.1 ใช้ในการป้องกันการตกผลึกของน้ำตาลอื่น

อาหารหลายประเภทเช่น ลูกกวาด, ไอสกรีม, แยม, เยลลี่, น้ำเชื่อมผสม และ ขนมหวานแช่แข็ง มีน้ำตาลเป็นส่วนประกอบหลัก และอาหารเหล่านี้บางชนิดต้องมีปริมาณของแข็งทั้งหมดอยู่ในปริมาณที่กำหนด เช่น แยม, เยลลี่ และ น้ำเชื่อมผสม ต้องมีปริมาณของแข็งทั้งหมดสูงถึง 60-70% หรือมากกว่า การใช้น้ำตาลซูโครสอย่างเดียวผลิตเป็นอาหารเหล่านี้จะเกิดการตกผลึกของน้ำตาลซูโครส ซึ่งจะเป็นปัญหาสำคัญของผลิตภัณฑ์เหล่านี้คือ จะทำให้ลักษณะเนื้อสัมผัสไม่ดี เกิดความรู้สึกสากลิ้น (Sandiness) ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ถูกยอมรับ ดังนั้นจึงใช้น้ำตาลเหลวจากข้าวโพดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วน ซึ่งจะช่วยป้องกันการตกผลึกของน้ำตาลซูโครส ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดี

2.11.2 ใช้ในการช่วยเพิ่มกลิ่นและรส

น้ำตาลเหลวจากข้าวโพดมีกลิ่น และรสเฉพาะตัว จะช่วยให้ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่มีน้ำตาลเหลวจากข้าวโพดอยู่ด้วยมีกลิ่นและรสดีน่ารับประทาน เช่น อาหารประเภทลูกกวาด, หมากฝรั่ง น้ำเชื่อมผสม เป็นต้น

2.11.3 ใช้ในการปรับปรุงลักษณะปรากฏ

น้ำตาลเหลวจากข้าวโพดจะช่วยปรับปรุงลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ผลไม้กระป๋อง, ลูกกวาด เป็นต้น

2.11.4 ใช้ในการให้ความหวาน

น้ำตาลเหลวจากข้าวโพดจะช่วยให้ความหวานเพิ่มขึ้นเมื่อผสมกับน้ำตาลชนิดอื่น ตัวอย่าง เช่น ในน้ำเชื่อมผสม, หมากฝรั่ง เป็นต้น

2.11.5 ใช้ในการช่วยเพิ่มคุณภาพในการกัดเคี้ยว

อาหารประเภทหมากฝรั่งใช้น้ำตาลเหลวจากข้าวโพดที่มีสมมูลย์เดกโตรสต่ำ จะมีซัคคาไรด์ที่มีโมเลกุลสูง ทำให้เพิ่มความเหนียวกับหมากฝรั่ง

2.11.6 ใช้เป็นตัวพา (Carier) ตัวยาต่าง ๆ

ใช้น้ำตาลเหลวจากข้าวโพดผสมกับตัวยาหลายชนิดเพื่อผลิตเป็นยารักษาโรคต่าง ๆ เพื่อทำให้ยาน้ำเชื่อมมีรสหวาน กลิ่นหอมน่ารับประทานยิ่งขึ้น