

บทที่ 2

เอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปริมาณของเหลือจากกระบวนการผลิตอาหาร

ของเหลือจากกระบวนการผลิตอาหารแต่ละที่ แต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบที่แตกต่างกันไป เช่น โรงงานผลิตก๋วยเตี๋ยวจะมีปริมาณของแป้งเหลือจากกระบวนการผลิตมาก โรงงานผลิตเนื้อสัตว์ จะมีของเหลือที่มีองค์ประกอบของโปรตีนมากกว่าองค์ประกอบอื่นๆ โรงงานผลิตน้ำตาลซึ่งมีองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตเหลือออกมาจากกระบวนการผลิต เป็นต้น ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบของเหลือจากอุตสาหกรรมอาหารต่างๆ โดยอุตสาหกรรมอาหารแต่ละประเภทจะมีปริมาณของคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน ความชื้น เกลือแร่ และไฟเบอร์ (เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส) ที่แตกต่างกัน ขึ้นกับประเภทวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต จากตารางที่ 2.1 พบว่า ถ้าสามารถแยกเอาองค์ประกอบที่สำคัญออกมาได้ก็มีความเป็นไปได้ที่จะนำของเหลือกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่อีกครั้ง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของของเหลือจากอุตสาหกรรมอาหารประเภทต่างๆ

ชนิดของของเหลือทิ้ง	ปริมาณน้ำ	เทียบกับน้ำหนักแห้ง (ร้อยละ)				
		โปรตีน	ไขมัน	เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส (เส้นใยอาหาร)	แร่ธาตุ	อื่นๆ
ของเหลือทิ้งที่มีปริมาณโปรตีนสูง						
เลือด (Blood)	86	85.7	2.1		7.1	5.1
ต้นอ่อนของมอลต์ (Seedlings from malt)	8.8	33.0	2.2	9.4	6.6	48.8
ยีสต์ (Yeast)		51.0	2.4	1.9	6.9	37.8
ของเหลือทิ้งที่มีปริมาณไขมันสูง						
ของเสียจากโรงฆ่าสัตว์ (Slaughterhouse waste)	74	34.6	53.8		7.7	3.9
ของเหลือทิ้งที่มีปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสสูง						
ข้าวโอ๊ต (Oat)	7.1	3.4	1.4	33.5		61.7
ซังอ้อย (Pulp from sugar beds (post-extraction))	9.4	10.0	0.9	20.6		68.5
ข้าวหัก (Broken grains), เมล็ดข้าว (grain), แกลบ (peels, husks)	10-15	15	4-5	20-30	1-3	53-60
ของเหลือทิ้งที่มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูง						
ของเสียจากการผลิตก๋วยเตี๋ยว (Dough waste noodles)	10.7	12.3	2.8	3.4	0.9	69.9
รำข้าว (Bran)	10.9-12.2	14.7-18.0	3.5-5.2	5.8-15.8		51.2-76
ของเสียจากข้าวโอ๊ต (Waste from oats)	8.4-9.1	14.3-14.9	7.4	2.2-5.3		72.4-76.1

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ชนิดของของเหลือทิ้ง	ปริมาณน้ำ	เทียบกับน้ำหนักแห้ง (ร้อยละ)				
		โปรตีน	ไขมัน	เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส (เส้นใยอาหาร)	แร่ธาตุ	อื่นๆ
ของเหลือทิ้งที่มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูง						
รำข้าวโอ๊ต (Oat bran)	9.2	8.9	3.5	2.8		84.8
ข้าวโอ๊ตที่ไม่ขัดสี (Brown rice oat)	13.1	8.3	2.5		1.4	87.8
รำข้าว (Rice bran)	9.0	13.0	14.0	15.2		57.8
แป้งข้าว (Rice flour)	9.7-10.8	14.1-14.5	14.0-16.7	8.8		50.8-53.4
กากน้ำตาล (Molasses)	33.0	12.9	0.2	0.5		86.4
ส่วนต่างๆ ของพืช เช่น หัวบีต (beets), ราก (root)	83.0	11.0	2.0	14.0		73
เวย์ (whey)	93.4-94.4	12.1-17.9			7.6-14.3	76.8-80.3
เปลือกมันฝรั่ง (Potato peels)	77.8	2.0	0.1	2.5	1.0	
ของเหลือทิ้งที่มีแร่ธาตุสูง						
เปลือกไข่ (Eggshells)		5.0			95.0 CaCO ₃	0
ตะกอนจากกระบวนการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbonation sludge)	72-75	1.9			56.3-88.8	9.3

ที่มา : Russ and Meyer-Pittroff (2004)

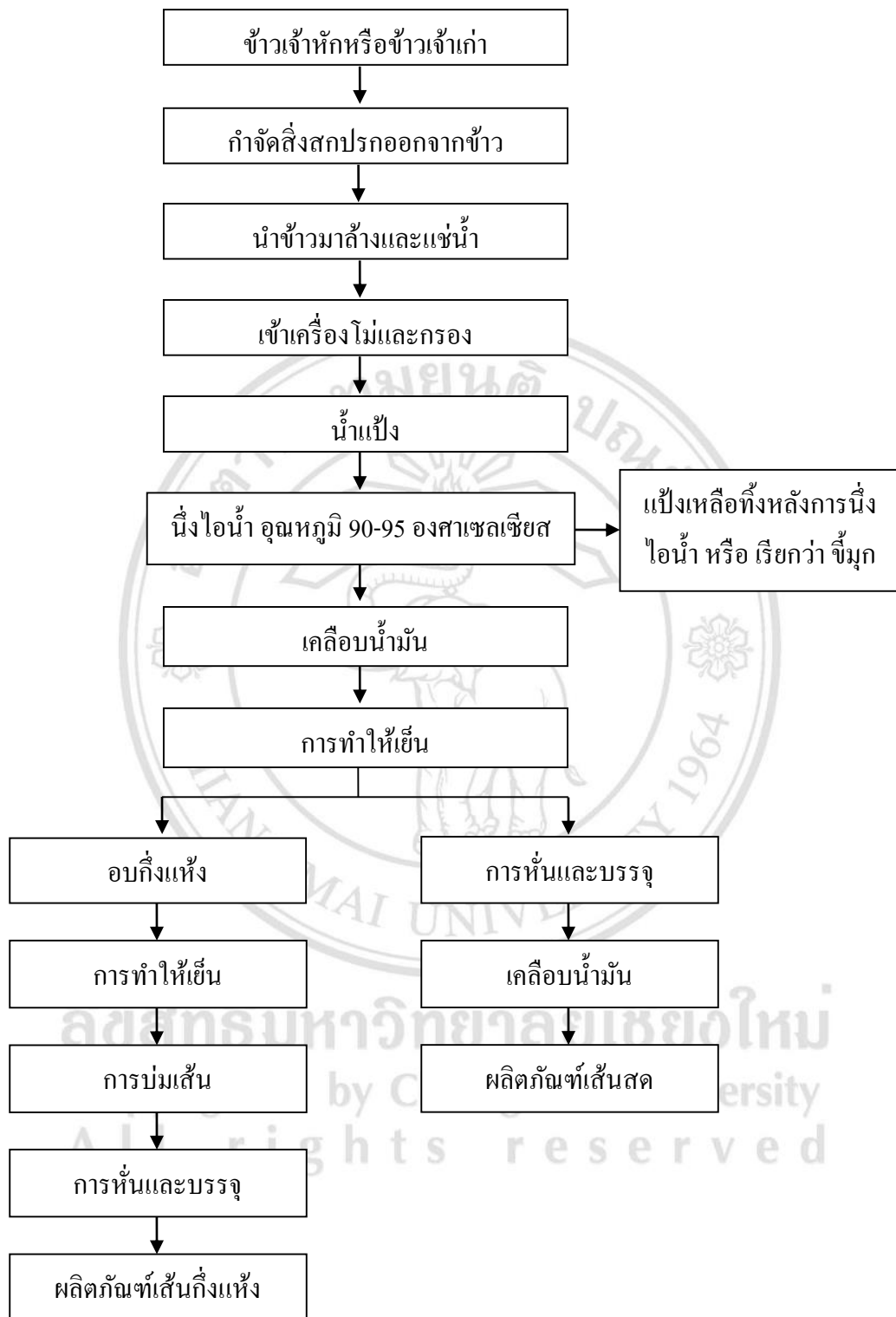
ประเทศไทยเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกข้าวรายใหญ่ของโลก ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่ทำรายได้ให้ประเทศปีละไม่ต่ำกว่า 65,000 ล้านบาท และเป็นอาหารหลักของคนไทยกว่า 60 ล้านคน (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2555) นอกจากนี้ยังมีการนำเอาข้าวมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปจากข้าวเพื่อเพิ่มความหลากหลายให้แก่ผลิตภัณฑ์อาหาร และตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคในประเทศ ผลิตภัณฑ์ข้าวที่สำคัญและสามารถขยายการผลิตในระดับอุตสาหกรรมได้ ได้แก่ ผลิตภัณฑ์จำพวกแป้งจากข้าวชนิดต่างๆ เส้นก๋วยเตี๋ยวประเภทต่างๆ ขนม และอาหารกึ่งสำเร็จรูป เป็นต้น

ก๋วยเตี๋ยวเป็นอาหารชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเป็นเส้นยาวผลิตจากข้าวเจ้าหักและข้าวเก่าที่มีอายุการเก็บไม่น้อยกว่า 4 เดือน ข้าวดังกล่าวมีปริมาณอะมิโลสสูงกว่าร้อยละ 28 ส่วนใหญ่นิยมใช้แป้งจากปลายข้าว ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าว จึงมีราคาถูกกว่าข้าวประเภทอื่นๆ โดยปลายข้าวมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นแป้งร้อยละ 79.2 โปรตีนร้อยละ 7 ไขมันร้อยละ 0.4 เถ้าร้อยละ 0.5 และสารอาหารอื่นอีกร้อยละ 0.9 (อรอนงค์, 2540)

การผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวเริ่มจากการโม่เมล็ดข้าวแบบ โม่เปียก แป้งข้าวที่ได้เรียกว่า ฟลาวร์ (flour) ซึ่งนิยมนำมาผลิตเป็นเส้นก๋วยเตี๋ยว ไม่ว่าจะเป็นเส้นใหญ่ เส้นเล็ก เส้นหมี่ เส้นก๋วยเตี๋ยวมีแป้ง (flour) ประมาณร้อยละ 70-80 ส่วนการผลิตสตาร์ช (starch) คือการสกัดเอาโปรตีนและสิ่งแปลกปลอมในแป้ง (flour) ออกเกือบหมด (กล้าณรงค์และเกื้อกูล, 2543) ก๋วยเตี๋ยวสดเป็นก๋วยเตี๋ยวที่ได้จากการนำแผ่นก๋วยเตี๋ยวมานั้นเป็นเส้น โดยไม่ผ่านขั้นตอนการทำให้แห้ง ซึ่งอาจเป็นเส้นเล็กหรือเส้นใหญ่ก็ได้ โดยเส้นเล็กมีขนาด 0.4-0.5 เซนติเมตร ส่วนเส้นใหญ่มีขนาด 1.5-2.5 เซนติเมตร ก๋วยเตี๋ยว 2 ชนิดนี้มีความชื้นประมาณร้อยละ 62-64 โดยมีขั้นตอนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว

2.1.1 ก๋วยเตี๋ยวกึ่งแห้งเป็นก๋วยเตี๋ยวที่ผ่านการึ่งลมก่อนเพื่อลดความชื้นให้เหลือประมาณ ร้อยละ 37

2.1.2 ก๋วยเตี๋ยวแห้งเป็นก๋วยเตี๋ยวที่ตัดเป็นเส้นและทำให้แห้ง และลดความชื้นให้เหลือประมาณ ร้อยละ 13 ก๋วยเตี๋ยวแห้งนี้สามารถเก็บได้นานกว่าประเภทอื่น



ภาพที่ 2.1 กระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวกึ่งแห้งและสด
ที่มา : อิศริยะผล (2555)

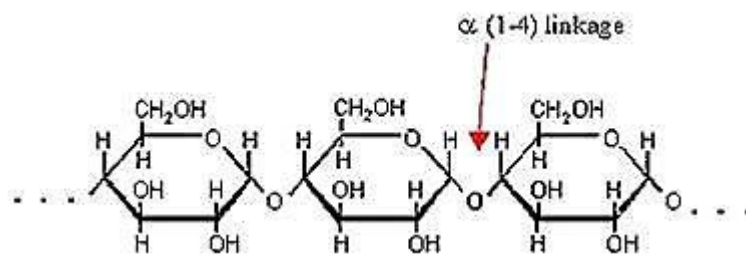
ในประเทศไทยมีโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตกล้วยเดี่ยว ประมาณ 400 กว่าโรงงาน ซึ่งเป็นทั้งโรงงานขนาดเล็กและขนาดกลาง กระจายอยู่ทั่วทุกภูมิภาคของประเทศ กระบวนการผลิตกล้วยเดี่ยว ดังภาพที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าในขั้นตอนการนึ่งเส้นกล้วยเดี่ยว มีการสูญเสียแป้งคิดเป็นร้อยละ 0.6 ของปริมาณการผลิตทั้งหมด หรือประมาณ 100 กิโลกรัมต่อวัน โดยแป้งที่สูญเสียจากขั้นตอนการนึ่งไอน้ำ มีสีขาวและลักษณะขุ่นหนืด เรียกว่า ซีมูก โดยในเบื้องต้นผู้ประกอบการจะกำจัดซีมูกโดยการขายเป็นอาหารสัตว์ แต่ถ้าสามารถนำซีมูกไปใช้ประโยชน์ เช่น นำไปเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ใหม่ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มรายได้และใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้อีกด้วย (อิสริยะผล, 2555)

2.2 โครงสร้างและองค์ประกอบภายในเม็ดแป้ง

แป้งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ มีสูตรเคมีโดยทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งเกิดจาก D-กลูโคสหลายๆ หน่วยมาจับกันและต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) โครงสร้างทางเคมีของแป้งจะประกอบด้วยโพลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ โพลิเมอร์เชิงเส้น (อะมิโลส) และโพลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะมิโลเพกทิน) วางตัวในแนวรัศมี แป้งจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินแตกต่างกัน ทำให้คุณสมบัติของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกัน (กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2543)

2.2.1 อะมิโลส

อะมิโลสเป็นโพลิเมอร์ของ α -D-กลูโคส หลายๆ หน่วยมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4 กลูโคซิดิก โดยคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของหน่วยกลูโคสต่อกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสที่อยู่ถัดไปจึงมีโครงสร้างเป็นเส้นตรง ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของอะมิโลส

ที่มา : อรอนงค์ (2547)

แป้งจากพืชแต่ละชนิดจะมีปริมาณอะมิโลสแตกต่างกัน เช่น แป้งจากธัญพืชจะมีปริมาณอะมิโลสสูงประมาณร้อยละ 28 แป้งจากรากและพืชหัวมีปริมาณอะมิโลสต่ำ

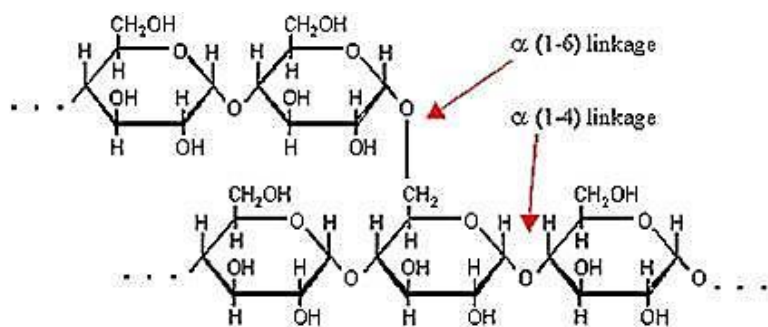
ประมาณร้อยละ 20 และแป้งข้าวโพดมีปริมาณอะมิโลสมากกว่า ร้อยละ 80 จึงสามารถจำแนกแป้งที่ได้จากพืชตามปริมาณอะมิโลสได้ ดังนี้

1. แป้งที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำมาก โดยจะมีปริมาณอะมิโลสน้อยกว่าร้อยละ 9 เช่น แป้งจากข้าวเหนียว
2. แป้งที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ จะมีปริมาณอะมิโลสประมาณร้อยละ 9-20 เช่น แป้งจากรากและพืชหัว ข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 กข 15 และ กข 21 เป็นต้น
3. แป้งที่มีปริมาณอะมิโลสปานกลาง มีปริมาณอะมิโลสร้อยละ 20-27 เช่น แป้งจากข้าวโอ๊ต มันฝรั่ง และข้าวเจ้า ได้แก่ พันธุ์ปทุมธานี 60 และเหลืองประทิว 123 เป็นต้น
4. แป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูง จะมีปริมาณอะมิโลสมากกว่าร้อยละ 27 เช่น แป้งจากข้าวโพด ข้าวเจ้าพันธุ์ กข 13 เป็นต้น

อะมิโลสของแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลของอะมิโลสที่แตกต่างกัน ขนาดโมเลกุลของอะมิโลสจะมีผลต่อระดับการเกิดโพลิเมอร์ (degree of polymerization, DP) และแป้งที่มีโมเลกุลของอะมิโลสยาวจะมีแนวโน้มการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ลดลงอีกด้วย นอกจากนี้อะมิโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับสารประกอบอินทรีย์ เช่น บิวทานอล กรดไขมัน สารลดแรงตึงผิว ฟีนอล ไฮโดรคาร์บอน และไอโอดีนได้ สารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำ โดยอะมิโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารประกอบอินทรีย์ นอกจากนี้อะมิโลสที่รวมตัวกับไอโอดีน จะทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีน้ำเงิน ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสได้ (Galliard and Bowler, 1987; กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2543)

2.2.2 อะมิโลเพกทิน

อะมิโลเพกทินเป็นโพลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคสที่มี α -D-กลูโคสหลายๆ หน่วยมาเชื่อมต่อกัน โดยส่วนที่เป็นเส้นตรงเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4 กลูโคซิดิก และส่วนที่เป็นสายกิ่งที่เชื่อมต่อกับกลูโคสในสายตรงด้วยพันธะ α -1,6 กลูโคซิดิก จึงมีโครงสร้างของอะมิโลเพกทินเป็นกิ่งก้านสาขา ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างอะมิโลเพกทิน

ที่มา : อรอนงค์ (2547)

การเชื่อมต่อด้วยพันธะ α -1, 6 กลูโคซิดิก มีอยู่ประมาณร้อยละ 5 ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะมิโลเพกทินทั้งหมด อะมิโลเพกทินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะมิโลส และมีการคืนตัวต่ำ เนื่องจากอะมิโลเพกทินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่งเมื่ออะมิโลเพกทินอยู่ในสารละลายที่เป็นกลางจะไม่เกิดการรีโทรเกรดชัน โมเลกุลจะเสถียรหรือคงตัว และไม่สามารถรวมตัวกันได้ง่ายเหมือนอะมิโลส (กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2543) ปริมาณและขนาดโมเลกุลของอะมิโลส อะมิโลเพกทิน และอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.2 และลักษณะโครงสร้างและคุณสมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 ปริมาณและขนาดโมเลกุลของอะมิโลส อะมิโลเพกทิน และอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งชนิดต่างๆ

แหล่งแป้ง	ปริมาณอะมิโลส (ร้อยละ)	ขนาดโมเลกุลเฉลี่ย (หน่วย)	ปริมาณอะมิโลเพกทิน (ร้อยละ)	ขนาดโมเลกุลเฉลี่ย (หน่วย)	อุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (องศาเซลเซียส)
ข้าวเหนียว	1	-	83	18,500	55 - 65
ข้าวเจ้า	14 - 32	1,000	83	4,700-12,800	61 - 78
ข้าวโพด	28	930	72	8,200	62 - 70
ข้าวสาลี	16 - 31	1,300	72	4,800	53 - 65
มันฝรั่ง	23	4,900	79	9,800	58 - 66
มันสำปะหลัง	17	2,600	83		52 - 64

ที่มา: Blanshard (1987) ; นิธิยา (2543); กล้าณรงค์และเกื้อกุล (2543)

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน

คุณสมบัติ	อะมิโลส	อะมิโลเพกทิน
ลักษณะโครงสร้าง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะกันเป็นเส้นตรง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะกันเป็นกิ่งก้าน
พันธะที่จับ	α -1,4 กลูโคซิดิก	α -1,4 และ α -1,6 กลูโคซิดิก
ขนาด	200-2,000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 10,000 หน่วยกลูโคส
การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
การเกิดปฏิกิริยากับ ไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะจับ ตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

ที่มา : Beynum and Roels (1985); กล้าณรงค์และเกื้อกุล (2543)

2.3 คุณสมบัติที่สำคัญของแป้ง

2.3.1 การพองตัว (swelling) และการละลาย (solubility)

แป้งดิบจะไม่ละลายน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้กันเชื่อมต่อกันอยู่ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายน้ำแป้งให้สูงขึ้น เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัวได้เพิ่มมากขึ้น และเมื่ออุณหภูมิของสารละลายน้ำแป้งสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งสูงกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนซ์ เม็ดแป้งเกิดการพองตัวทำให้เกิดการละลายความหนืดและมีความใสมากขึ้น และแตกออกจนไม่เห็นลักษณะของเม็ดแป้ง (กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2543)

การพองตัวของเม็ดแป้งจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของแป้ง ความแข็งแรง และลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนภายในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายน้ำแป้ง และการตัดแปรแป้งทางเคมี ซึ่งปัจจัยดังกล่าวจะทำให้แป้งแต่ละชนิดมีลักษณะการพองตัวและการละลายที่แตกต่างกันไป (กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2543)

2.3.2 ความหนืด

ความหนืดของแป้งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของน้ำแป้งหลังจากได้รับความร้อน โดยเมื่อดแป้งได้รับความร้อนจะเกิดการดูดซึมน้ำและพองตัวขยายใหญ่ขึ้น จึงทำให้น้ำบริเวณรอบๆ เม็ดแป้งลดน้อยลง แป้งจึงเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น จึงเกิดความหนืดขึ้น และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นความหนืดก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน จนกระทั่งถึงจุดที่มีความหนืดสูงสุดเป็นจุดที่เม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ และมีการกวนอย่างต่อเนื่อง จะทำให้โครงสร้างภายในเม็ดแป้งแตกออก ความหนืดของแป้งจะลดลง และเมื่อลดอุณหภูมิลงจะทำให้เกิดรีโทรเกรเดชัน ความหนืดจะเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งเป็นความหนืดที่เกิดจากการเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลอะมิโลสที่หลุดออกมาจากเม็ดแป้ง (กล้าณรงค์และเกื้อกูล, 2543)

ปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดของแป้ง ได้แก่ ชนิดของแป้งและการตัดแปรแป้งด้วยวิธีต่างๆ นอกจากนี้ยังพบว่า แป้งที่มีขนาดเม็ดแป้งใหญ่ จะมีความสามารถในการพองตัวสูงและมีค่าความหนืดสูง และปริมาณอะมิโลสที่สูงมีผลทำให้แป้งมีค่าความหนืดสุดท้ายสูงเช่นกัน (กล้าณรงค์และเกื้อกูล, 2543)

2.3.3 การเกิดเจลลิตินเซชัน

การเกิดเจลลิตินเซชันของแป้ง เกิดจากการให้ความร้อนกับการละลายแป้ง โดยในช่วงแรก เม็ดแป้งจะเริ่มดูดน้ำจากภายนอก จากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสารละลายแป้ง เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัว จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในภายในโมเลกุลของเม็ดแป้ง และเมื่ออุณหภูมิของสารละลายน้ำแป้งสูงกว่าอุณหภูมิเจลลิตินเซชันของแป้ง ความร้อนจะทำลายพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลของเม็ดแป้ง ส่งผลให้เม็ดแป้งพองตัวและแตกออก สารละลายน้ำแป้งจะมีความหนืดเพิ่มขึ้น การเกิดเจลลิตินเซชันของแป้งนี้เป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ และเมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเจล นอกจากนี้ความหนืดสูงสุดของสารละลายแป้งในระหว่างการเกิดเจลลิตินเซชันจะแตกต่างกันตามชนิดของแป้ง และอุณหภูมิการเกิดเจลลิตินเซชันจะแตกต่างกันไปตามชนิดและองค์ประกอบของแป้งอีกด้วย (กล้าณรงค์และเกื้อกูล, 2543)

2.3.4 ความใสของแป้งสุก

สารละลายแป้งจะมีลักษณะทึบแสง แต่เมื่อมีการให้ความร้อนจนเกิดการเจลาติไนซ์ เซชัน เม็ดแป้งจะละลายและสามารถกระจายตัวในน้ำได้ดีขึ้น เนื่องจากเม็ดแป้งเกิดการพองตัวและแตกตัวเนื่องจากความร้อนที่ได้รับ ดังนั้นการสุกของแป้งทำให้แสงสามารถส่องผ่านได้มากขึ้น และความใสของแป้งสุกจะเกี่ยวข้องกับลักษณะการกระจายตัวและลักษณะการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้ง ความใสของแป้งสุกจะขึ้นกับชนิดของแป้ง โดยแป้งสุกของพืชหัวและกลุ่มแป้งข้าวเหนียวจะมีการส่องผ่านของแสง หรือความใสมากกว่ากลุ่มแป้งจากธัญพืช

โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อความใสของแป้งสุกในระหว่างการเก็บรักษา ได้แก่

1. ความสามารถในการพองตัวของเม็ดแป้ง เมื่อเม็ดแป้งมีการพองตัวได้มากขึ้นจึงทำให้ความสามารถในการส่องผ่านของแสง และแป้งก็จะมีความใสมากขึ้น และในทางตรงข้าม หากเม็ดแป้งมีการพองตัวต่ำความสามารถในการส่องผ่านของแสงก็จะมีค่าต่ำความใสของแป้งก็จะมีน้อยด้วยเช่นกัน
2. พันธะที่เกิดขึ้นทั้งภายในและระหว่างโมเลกุลของแป้ง และปริมาณของอะมิโลสที่หลุดออกมานอกเม็ดแป้งเมื่อได้รับความร้อน โดยโมเลกุลของอะมิโลสที่หลุดออกมาจะรวมตัวกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล ซึ่งถ้าปริมาณอะมิโลสที่หลุดออกมานอกเม็ดแป้งมีมาก การรวมกันของอะมิโลสและการสร้างพันธะไฮโดรเจนเกิดขึ้นมากแป้งจะมีลักษณะขุ่นไม่ใสส่งผลให้การส่องผ่านแสงของแป้งสุกลดลง
3. ความยาวของสายอะมิโลสต้องมีความยาวที่เหมาะสมจึงเกิดการรีโทรเกรเดชันได้ดีที่สุด ซึ่งถ้าแป้งเกิดการรีโทรเกรเดชันได้มาก ก็จะส่งผลให้ความใสของแป้งลดลง
4. ไขมันที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในเม็ดแป้งจะส่งผลกระทบต่อลักษณะและคุณสมบัติของแป้ง โดยจะไปลดความสามารถในการพองตัว การละลาย และการจับตัวกันของแป้งเมื่อเกิดฟิล์มและแป้งสุก และไขมันยังไปรวมตัวกับอะมิโลส เกิดเป็น inert complex ส่งผลทำให้เกิดลักษณะทึบแสงหรือขุ่นได้ ความใสของแป้งจึงลดลง

2.3.5 รีโทรเกรเดชัน

รีโทรเกรเดชันเกิดจากสารละลายน้ำแข็งที่ได้รับความร้อนสูงกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์เซชันต่อไปเรื่อยๆ จนเม็ดแข็งเกิดการพองตัวและแตกออก โมเลกุลของอะมิโลสจึงกระจายออกมา แล้วเมื่อถูกทำให้เย็นลง โมเลกุลของอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติได้โครงสร้างใหม่ที่สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการควบแน่นน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลหนืดคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชันหรือการคืนตัว (Smith, 1979) เมื่ออุณหภูมิต่ำลงไปอีก ลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเซลล์ ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น (กล้าณรงค์และเกื้อกูล, 2543)

ปริมาณและขนาดอะมิโลสมีความสำคัญต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้ง โดยแป้งที่มีอะมิโลสสูงจะเกิดรีโทรเกรเดชันได้ดีและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ หรือมีปริมาณอะมิโลเพกทินสูง อะมิโลเพกทินจะมีผลทำให้เกิดรีโทรเกรเดชันได้น้อย ดังนั้นแป้งแต่ละชนิดจะมีอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันที่แตกต่างกัน (กล้าณรงค์และเกื้อกูล, 2543)

2.4 ฟิล์มจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ

การผลิตฟิล์มจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ เช่น พอลิแซ็กคาไรด์ โปรตีน ลิพิด หรือการผสมกันระหว่างพอลิเมอร์ธรรมชาติดังกล่าว ได้นำมาใช้งาน เช่น การใช้ฟิล์มบรีโกลได้จากเวย์โปรตีนเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาถั่วเมล็ดแห้ง (Javanmard, 2008) การใช้ฟิล์มจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ เช่น แป้งข้าวโพด และ โปรตีนถั่วเหลืองเพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์เครื่องปรุงรสในบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป (Cho *et al.*, 2010) และ การใช้ฟิล์มจากพอลิแซ็กคาไรด์เพื่อป้องกันการซึมผ่านของน้ำมันในระหว่างการทำของผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ (Williams and Mittal, 1999) โดยฟิล์มจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ มีข้อดี คือ สามารถบรีโกลได้พร้อมกับอาหาร สามารถย่อยสลายได้ และยังมีคุณสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซ

พอลิเมอร์ธรรมชาติในกลุ่มของพอลิแซ็กคาไรด์ เช่น สตาร์ช เซลลูโลส และไคโตซาน เป็นต้น สตาร์ชเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติได้รับความนิยมเพราะสามารถหาได้ง่าย ย่อยสลายได้โดย

ธรรมชาติ และราคาไม่แพง (Kramer, 2009) ดังนั้น จึงมีการผลิตฟิล์มจากสตาร์ชที่ได้จากวัตถุดิบทางธรรมชาติ เช่น ลำปะหรั่ง (Chiumarelli and Hubinger, 2012; Paes *et al.*, 2008; Chillo *et al.*, 2008; Fama *et al.*, 2005; Flores *et al.*, 2007; Muller *et al.*, 2008; Mali *et al.*, 2005; Alves *et al.*, 2007) ข้าวเจ้า (Bourtoom and Chinnan, 2008; Dias *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2008; Krogars *et al.*, 2003) และข้าวโพด (Li *et al.*, 2011; Ghanbarzadeh *et al.*, 2011; Yan *et al.*, 2012; Lopez *et al.*, 2008; Ryu *et al.*, 2002; Fu *et al.*, 2011; Ghanbarzadeh and Oromiehi, 2008) เป็นต้น สตาร์ชจากวัตถุดิบธรรมชาติแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการขึ้นฟิล์มต่างกันเนื่องจากปริมาณอะมิโลสและอะมิโลเพกทินที่แตกต่างและไม่เท่ากัน Lourdin *et al.* (1995) ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนของปริมาณอะมิโลสและอะมิโลเพกทินของสตาร์ช พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึง และค่าการยืดตัว ณ จุดที่ขาดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณอะมิโลสเพิ่มขึ้น Pagella *et al.* (2002) พบว่า สตาร์ชที่มีปริมาณของอะมิโลสสูง เมื่อนำมาผลิตแผ่นฟิล์มเป็นที่ยอมรับในเชิงการค้า Mehyar and Han (2004) ศึกษาสมบัติการต้านทานแรงดึง การซึมผ่านของไอน้ำและออกซิเจน การเก็บแผ่นฟิล์มที่ผลิตได้จากแป้งข้าวและแป้งจากถั่วลิสงที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ พบว่า ฟิล์มที่ผลิตจากแป้งข้าวและแป้งจากถั่วลิสงที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะมีสมบัติป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนได้ดี นอกจากนี้ Chiumarelli and Hubinger (2012) ได้ศึกษาสมบัติของฟิล์มที่ทำจากแป้งมันสำปะหลังเพื่อใช้สำหรับห่อหุ้มชิ้นแอปเปิ้ล ผลการศึกษาพบว่า ฟิล์มที่ทำจากแป้งมันสำปะหลังสามารถรักษาความสดและคุณค่าทางโภชนาการของแอปเปิ้ลไว้ได้ดี

จากงานวิจัยต่างๆ พบว่าแป้งข้าวเจ้าเป็นวัตถุดิบหนึ่งที่ได้จากธรรมชาติและเป็นวัตถุดิบที่เหมาะสมสำหรับการทำฟิล์ม มีคุณสมบัติในการทำให้เกิดฟิล์มได้ดี เนื่องจากแป้งข้าวเจ้ามีองค์ประกอบของโมเลกุลของอะมิโลสและโมเลกุลของอะมิโลเพกทิน ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดฟิล์ม โดยโมเลกุลของอะมิโลสและโมเลกุลของอะมิโลเพกทินในแป้งจะเกิดการเรียงตัวกัน ทำให้เกิดโครงสร้างของฟิล์มที่ดี เกิดเป็นโครงร่างตาข่ายเชื่อมโมเลกุลแป้งเข้าด้วยกันและต่อเนื่องกันทำให้เกิดฟิล์มมีความแข็งแรงมากขึ้น การใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นพอลิแซ็กคาไรด์และเป็นพอลิเมอร์จากธรรมชาติ ราคาถูก และหาได้ง่าย จากงานวิจัยของ Dias *et al.* (2010) ได้ศึกษาการผลิตฟิล์มจากสตาร์ชจากข้าวเจ้าและฟลาวัวร์ พบว่า ฟิล์มจากฟลาวัวร์มีค่าการยืดตัว ณ จุดที่ขาดสูงกว่าและค่าความต้านทานการดึงขาดต่ำกว่าฟิล์มที่ผลิตจากสตาร์ช เมื่อเติมพลาสติกไซเซอร์ที่ระดับความเข้มข้นที่เท่ากัน และงานวิจัยของ Bourtoom and Chinnan (2008) ได้ศึกษาการใช้สตาร์ชจากข้าวเจ้าผสมกับไคโตซาน พบว่า ฟิล์มที่ใช้สตาร์ชและเติมกลีเซอรอลร้อยละ 30 จะมีค่าการยืดตัว ณ จุดที่ขาดและค่าการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่าการผสมระหว่างสตาร์ชและเซลลูโลส และ Laohakunjit and Noomhorm (2004) ศึกษาการใช้สตาร์ช

จากข้าวเจ้า เพื่อผลิตฟิล์มแป้งเช่นกัน นอกจากนี้การเติมพลาสติกไซเซอร์ เช่น กลีเซอรอล และ ซอร์บิทอลลงในฟิล์มยังช่วยเพิ่มค่าความยืดหยุ่นและความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำและ ก๊าซ

2.5 วิธีการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม

การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มจากพอลิเมอร์ธรรมชาติสามารถทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ โดยวิธีการขึ้นรูปฟิล์มที่สำคัญ มีดังนี้

2.5.1 การหล่อฟิล์ม (casting technique)

การหล่อฟิล์ม เป็นการทำให้เกิดฟิล์ม โดยการนำสารละลายที่ใช้ทำฟิล์ม เทบนแผ่นแม่แบบที่มีผิวเรียบ เช่น พลาสติก อะคริลิก กระดาษ เป็นต้น จากนั้นนำไปอบแห้งด้วยลมร้อน สภาพที่ใช้อบแห้งมีผลต่อโครงสร้างของฟิล์มที่ได้ Alcantara *et al.* (2006) ทำการผลิตฟิล์ม โดยใช้เว็บบอร์ดิน โดยใช้วิธีการหล่อฟิล์ม พบว่า ฟิล์มที่ทำแห้งที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส จะมีลักษณะแข็ง และมีการยืดตัว ณ จุดที่ขาดต่ำกว่าฟิล์มที่ทำแห้งที่อุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส ดังนั้นการผลิตฟิล์มโดยใช้วิธีหล่อฟิล์มจะต้องศึกษาสภาพที่ใช้ให้เหมาะสมต่อการเกิดฟิล์ม วิธีการผลิตฟิล์มโดยการหล่อฟิล์มนี้ เป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยาก ซับซ้อน แต่มีข้อเสียคือต้องใช้เวลาในการอบแห้งนาน (Cha *et al.*, 2003)

เช่นเดียวกับกมลทิพย์ (2553) เตรียมฟิล์มจากแป้งบุกที่เติมซินไฮโดรไลเซท โดยวิธีการหล่อฟิล์มและใช้แผ่นพลาสติกกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร อบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 16 ชั่วโมง พบว่า การเพิ่มเวลาในการย่อยซินไฮโดรไลเซทจะส่งผลให้ค่าการละลายน้ำและการยืดตัว ณ จุดที่ขาดลดลง แต่ค่าความต้านทานแรงดึง ค่าการยืดตัว ณ จุดที่ขาด และการซึมผ่านไอน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มจากแป้งบุกที่ไม่เติมซินไฮโดรไลเซท

และ Dias *et al.*, (2011) ผลิตฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าผสมเซลลูโลส โดยใช้วิธีการหล่อฟิล์มบนแผ่นอะคริลิก ขนาด 14 ตารางเซนติเมตร แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เวลา 14 ชั่วโมง พบว่า การเพิ่มเซลลูโลสในฟิล์มจะมีผลทำให้ค่าการซึมผ่านไอน้ำมีค่าลดลงและค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น

2.5.2 การอัดรีด (extrusion technique)

การอัดรีดเป็นการขึ้นรูปฟิล์มและพลาสติกโดยการให้ความร้อนเม็ดพลาสติกจนหลอมละลายระหว่างที่เคลื่อนที่ไปตามเอกซ์ทรูเดอร์ที่มีการปรับอุณหภูมิและให้ความร้อนและสารละลายพลาสติกจะไหลผ่านหัวตาย (die) ออกไปด้วยแรงดันที่เกิดขึ้นภายในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ การอัดรีดเป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม เช่น การผลิตฟิล์มสังเคราะห์ ถุงพลาสติก ซึ่งสามารถนำมาใช้เพื่อผลิตฟิล์มที่ทำจากวัสดุธรรมชาติได้ เช่น การผลิตฟิล์มคอลลาเจนด้วยวิธีการอัดรีด เพื่อใช้ในผลิตภัณฑ์ประเภทไส้กรอก (Arvnitoyanis *et al.*, 1997)

สำหรับ Andreuccetti *et al.*, (2012) ได้รายงานไว้ว่า ฟิล์มเจลลาตินที่ผลิตโดยใช้วิธีการอัดรีดจะมีค่าการซึมผ่านไอน้ำต่ำกว่าฟิล์มเจลลาตินที่ผลิตโดยใช้วิธีการหล่อฟิล์ม

และ Ming *et al.*, (2011) ได้ศึกษาปริมาณอะมิโลสที่มีผลต่อคุณสมบัติของฟิล์มจากแป้งข้าวโพดที่ผลิตได้โดยใช้วิธีการอัดรีด พบว่า ฟิล์มจากแป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลสสูงและสภาวะการผลิตฟิล์มที่เหมาะสมจะส่งผลให้ฟิล์มมีคุณสมบัติทางกลและความร้อนดีกว่าฟิล์มจากแป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ

2.5.3 การอัดขึ้นรูป (compression technique)

การอัดขึ้นรูปเป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนและแรงดันในการทำให้สารละลายฟิล์มผ่านหัวฉีดไปยังแม่พิมพ์ และเมื่อฟิล์มเย็นตัวลงฟิล์มที่ได้จะแข็งตัวตามรูปทรงของแม่พิมพ์ (Kaya, 2000)

Sothornvit and Songtip (2012) ผลิตฟิล์มแป้งจากกล้วยที่ผ่านการตัดแปรและไม่ผ่านการตัดแปรและเติมกลีเซอรอลเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ โดยใช้เทคนิคการอัดขึ้นรูป อุณหภูมิที่ใช้อัด เท่ากับ 105 องศาเซลเซียส เวลา 4 นาที แล้วให้ความดัน 5 MPa เวลา 3 นาที พบว่า ฟิล์มแป้งจากกล้วยที่ผ่านการตัดแปรมีความสามารถในการละลายสูง แต่มีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำกว่าฟิล์มแป้งกล้วยที่ไม่ผ่านการตัดแปร

และ Chuaynukul *et al.*, (2010) เตรียมฟิล์มเจลลาตินจากกระดูกและหนังปลา โดยใช้เทคนิคการอัดขึ้นรูป อุณหภูมิที่ใช้อัด เท่ากับ 120, 140 และ 160 องศาเซลเซียส เวลา 5 และ 10 นาที แล้วให้ความดัน 20 MPa เวลา 2 นาที พบว่า ฟิล์มเจลลาตินจากกระดูกปลาที่

อัดขึ้นภาพที่สภาวะอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เวลา 5 นาที เป็นสภาวะที่เกิดฟิล์มได้ดีที่สุด และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึง การยืดตัว ณ จุดที่ขาด และอัตราการซึมผ่านไอน้ำมีค่าลดลงอีกด้วย

2.6 ชนิดของฟิล์มที่ทำจากวัสดุธรรมชาติ

ฟิล์มที่ทำจากวัสดุธรรมชาติเกิดจากการนำสารพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและมีคุณสมบัติในการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ หรือเกิดร่างแหได้มาทำให้เกิดการกระจายตัวกันอย่างสมบูรณ์โดยใช้วิธีต่างๆ เช่น การทำให้ตัวทำละลายระเหยออกไป การเติมอิเล็กโทรไลต์เพื่อให้เกิดพันธะข้าม การปรับความเป็นกรด-เบส หรือโดยการทำให้สารที่เกิดการหลอมเหลวแข็งตัว นอกจากนี้การทำฟิล์มยังมีการเติมสารอื่นๆ ลงไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของฟิล์ม เช่น พลาสติไซเซอร์ โดยทั่วไปพอลิเมอร์หรือสารประกอบที่ใช้ทำแผ่นฟิล์ม ได้แก่ พอลิเมอร์กลุ่มไฮโดรฟิลิก ไลปิด และน้ำตาล (Bourtoom, 2008)

2.6.1 ฟิล์มโพลีแซคคาไรด์ (polysaccharide film) เป็น โมเลกุลคาร์โบไฮเดรตสายยาวที่ประกอบด้วยโมโนแซคคาไรด์ ตั้งแต่ 10 โมเลกุลขึ้นไป เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก โครงสร้างมีได้ตั้งแต่เส้นตรงไปจนถึงแตกกิ่งมากมาย โพลีแซคคาไรด์ที่พบในธรรมชาติเป็นสารประกอบอสัณฐาน (amorphous) โพลีแซคคาไรด์ที่สามารถนำมาผลิตเป็นฟิล์มได้ เช่น สตาร์ช (starch) ฟลาวัวร์ (flour) แอลจินेट เพกติน คาราจีแนน ไคโตซาน อนุพันธ์ของเซลลูโลส เป็นต้น อย่างไรก็ตามฟิล์มแข็งมีคุณสมบัติในการดูดความชื้น (hygroscopicity) ทำให้มีการแพร่ผ่านของไอน้ำได้ง่าย (Liu, 2005; Vargas, 2008)

2.6.2 ฟิล์มโปรตีน เป็นสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งเป็นพอลิเมอร์สายยาวของกรดอะมิโน (amino acid) ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเปปไทด์ (peptide bond) ฟิล์มโปรตีนที่ได้จากแหล่งโปรตีนต่างๆ จะมีสมบัติที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับลำดับของกรดอะมิโนที่เป็นหน่วยโครงสร้าง การจับกันของอะตอมในสายพอลิเปปไทด์ ความยาวและการขดพับของสายพอลิเปปไทด์ ฟิล์มจากโปรตีนมีความแข็งแรง โปร่งแสง และป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้ดี การซึมผ่านของไอน้ำต่ำ (Bourtoom, 2009) แต่ไวต่อความชื้น แหล่งของโปรตีนที่นิยมนำมาผลิตฟิล์ม เช่น เวย์ไข่ขาว ถั่วเหลือง ถั่วเหลือง ก้ามเนื้อปลา คอลลาเจน เจลาติน นม และกลูเตนในข้าวสาลี เป็นต้น (Zhang and Mittal, 2010; Cuq *et al.*, 1998)

- 2.6.3 फिल्मไขมัน ไขมันเป็นสารประกอบหลายชนิดซึ่งมีลักษณะร่วมกันคือ ละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ แต่ไม่ละลายน้ำ फिल्मไขมันส่วนใหญ่จะใช้ในรูปแบบเคลือบ ไขมันส่วนใหญ่ที่นำมาใช้ผลิตฟิล์ม ได้แก่ กรดไขมันอิ่มตัว เช่น กรดปาล์มิติก และกรดสเตียริก รวมถึงน้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันดอกทานตะวัน และไข (Colla *et al.*, 2006; Garcia *et al.*, 2000; Péroval *et al.*, 2002) ไขมันจะช่วยลดการซึมผ่านของไอน้ำ ออกซิเจน และการบอบไดออกไซด์ผ่านฟิล์ม แต่ฟิล์มที่ผลิตได้มีลักษณะขุ่นทึบ และเปราะแตกหักง่าย
- 2.6.4 फिल्मที่ผลิตได้จากหลายองค์ประกอบ เป็นฟิล์มที่ใช้วัตถุดิบในการผลิตฟิล์มมากกว่า 1 ชนิด โดยใช้คุณลักษณะเด่นของแต่ละสาร เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีคุณสมบัติตามต้องการ และปรับปรุงลักษณะปรากฏ คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลของฟิล์มให้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย เช่น กลุ่มพอลิแซคคาไรด์จะมีสมบัติในการเกิดฟิล์มได้ดี และฟิล์มที่ได้จะมีคุณสมบัติการป้องกันการซึมผ่านไอน้ำต่ำแต่จะป้องกันการซึมผ่านของน้ำมันและไขมันได้ดี फिल्मโปรตีนจะมีสมบัติทางกลและป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้ดี การซึมผ่านของไอน้ำต่ำ ส่วนฟิล์มไขมันจะช่วยลดการซึมผ่านของความชื้นและก๊าซได้ดี (Kester and Fennema, 1986; Guilbert, 1984; Bourtoom, 2008)

2.7 พลาสติไซเซอร์

พลาสติไซเซอร์ เป็นสารเจือปนชนิดหนึ่งที่ใช้ในการผลิตฟิล์มเพื่อปรับปรุงสมบัติฟิล์ม เช่น มีความอ่อนนุ่ม ยืดหยุ่นสูง ทนต่อสภาวะความเป็นกรดต่าง ทนต่ออุณหภูมิสูง จึงทำให้สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น ทั้งในอุตสาหกรรมอาหารและยา เครื่องมือทางการแพทย์ ของเล่นสำหรับเด็ก เป็นต้น โดยสารพลาสติไซเซอร์จะไปแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของฟิล์มและทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลลดลง สายโพลีเมอร์สามารถเคลื่อนไหวได้เพิ่มขึ้น จึงทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น มีความแข็งแรงและความเปราะลดลง ฟิล์มจึงไม่แตกในระหว่างการเก็บรักษา อย่างไรก็ตามการเติมพลาสติไซเซอร์จะมีผลต่อคุณสมบัติการซึมผ่านไอน้ำและก๊าซ และถ้าเติมมากเกินไปจะทำให้คุณสมบัติเชิงกลด้อยลงอีกด้วย (Melissa *et al.*, 2011)

พลาสติไซเซอร์ที่นิยมใช้กับฟิล์มที่ได้จากวัสดุธรรมชาติมีหลายประเภท เช่น โมโนเมอร์พลาสติไซเซอร์ (monomeric plasticizers) โพลีเมอร์พลาสติไซเซอร์ (polymeric plasticizers) โอลิโกแซคคาไรด์ โดยส่วนใหญ่เป็นสารในกลุ่มน้ำตาล เช่น น้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส พวกลีโอลซึ่งเป็นอนุพันธ์ของน้ำตาลที่มีหมู่คีโตนหรืออัลดีไฮด์ถูกแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่ง

เกิดจากปฏิกิริยารีดอกซ์กับหมู่คาร์บอนิลของโมโนแซคคาไรด์ เช่น กลีเซอรอล ซอร์บิทอล โพลีเอทีลีนไกลคอล และพวกไขมันและอนุพันธ์ของไขมัน เช่น กรดโอเลอิก กรดสเตียริก เป็นต้น (Bordor *et al.*, 2009; Averous and Boquillon., 2004; Tharanathan., 2003) แสดงตัวอย่างการนำพลาสติกไซเซออร์มาใช้เพื่อผลิตฟิล์ม ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 พลาสติกไซเซออร์ที่นิยมใช้สำหรับผลิตฟิล์มที่ทำจากวัสดุธรรมชาติ (โพลีแซคคาไรด์ โปรตีน และไขมัน)

วัสดุธรรมชาติที่นำมาผลิตฟิล์ม	พลาสติกไซเซออร์ที่ใช้	เอกสารอ้างอิง
โพลีแซคคาไรด์		
แป้งข้าวเจ้า	กลีเซอรอล และซอร์บิทอล	Bourtoom., 2008
สตาร์ชจากข้าวเจ้า	กลีเซอรอล และซอร์บิทอล	Laohakunjit and Noomhorm., 2004
สตาร์ชจากมันฝรั่ง	กลีเซอรอล และเอทิลีนไกลคอล	Smits <i>et al.</i> , 2003
สตาร์ชจากข้าวโอ๊ต	กลีเซอรอล ซอร์บิทอล และยูเรีย	Galdeano <i>et al.</i> , 2009
สตาร์ชจากถั่ว	น้ำตาลแมนโนส กลูโคส ฟรุคโตส กลีเซอรอล และซอร์บิทอล	Zhang <i>et al.</i> , 2007
สตาร์ชจากข้าวโพด	กลีเซอรอล ซอร์บิทอล และน้ำ	Funke <i>et al.</i> , 1998
โปรตีน		
เคซีน	น้ำ และซอร์บิทอล	Kristo <i>et al.</i> , 2006
เวย์โปรตีน	กลีเซอรอล และซอร์บิทอล	Kim <i>et al.</i> , 2001
กลูเตน	ไกลคอล และ โพรพิลีนไกลคอล	Chinnan., 1999
เจลาติน	กลีเซอรอล และซอร์บิทอล	Thomazing <i>et al.</i> , 2005
	ไกลคอล และ โพรพิลีนไกลคอล	Chinnan., 1999
ไขมันและอื่นๆ		
ซังข้าวโพด	กรดโอเลอิก และลิโนเลอิก	Santosa and Padua, 1999
เจลาติน	กรดโอเลอิก	Cao <i>et al.</i> , 2009
เวย์โปรตีนผสมซีฟี่ง	กลีเซอรอล	Pommet <i>et al.</i> , 1998

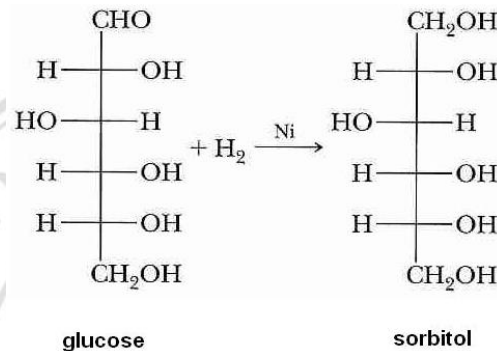
โดยพลาสติกไซเซออร์ที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตฟิล์มแข็ง ได้แก่ กลีเซอรอลและซอร์บิทอล เนื่องจากฟิล์มแข็งที่เติมกลีเซอรอลจะมีการยืดตัวและอัตราการซึมผ่านไอน้ำเพิ่มขึ้น และฟิล์มที่เติมซอร์บิทอลจะมีอัตราการซึมผ่านของก๊าซต่ำกว่าฟิล์มที่เติมกลีเซอรอล และโพลีเอทิลีนไกลคอล และฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลและซอร์บิทอลจะค่าความต้านทานแรงดึงลดลงเช่นกัน (Laohakunjit and Noomhorm., 2004; Gontard *et al.*, 1992; Garcia *et al.*, 2000; McHugh *et al.*, 1994) ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงได้เลือกใช้กลีเซอรอล และซอร์บิทอล มาใช้ในการทดลอง

2.7.1 ซอร์บิทอล

ซอร์บิทอล มีสูตรโมเลกุล $C_6H_{14}O_6$ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ ซอร์บิทอลเหลว มีลักษณะเป็นน้ำใสๆ เหนียวหนืดพอสมควร และซอร์บิทอลผง มีลักษณะเป็นผลึกสีขาว ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีรสหวาน ละลายน้ำได้ สารรักษาความชื้น สารให้ความหวาน แทนน้ำตาล และใช้เป็นสารพลาสติกไซเซออร์สำหรับการทำฟิล์ม โดยฟิล์มที่ใช้ซอร์บิทอลจะมีค่าความต้านทานแรงดึงของแผ่นฟิล์มสูง มีความสามารถในการดูดความชื้น การซึมผ่านไอน้ำ และการละลายน้อยกว่าฟิล์มที่ใช้กลีเซอรอล (Siew *et al.*, 1999; Donhowe and Fennema, 1993) โดยคุณสมบัติที่สำคัญของซอร์บิทอล (ฉวีวรรณ, 2540) สามารถสรุปได้ ดังนี้

1. ใช้เป็นสารแทนน้ำตาล (sugar substitute) ในผลิตภัณฑ์อาหารสำหรับผู้ที่ต้องการควบคุมน้ำหนัก (diet food) อาหารให้พลังงานต่ำ (low-calorie) หรือไม่มีน้ำตาล (sugar-free) และใช้ในอาหารสำหรับผู้ป่วย โรคเบาหวานในผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ เช่น เบเกอรี่ (bakery) แยม (jam) หมากฝรั่ง ลูกกวาด ลูกอม และผสมเครื่องดื่ม (beverage)
2. รักษาความชุ่มชื้นในผลิตภัณฑ์
3. ป้องกันการตกผลึกของน้ำตาล ในการผลิตช็อกโกแลต ลูกกวาด ลูกอม
4. ป้องกันการเกิดผลึกน้ำแข็ง (cryoprotectant) โดยไปทำให้จุดเยือกแข็ง (freezing point) ของอาหารลดลง น้ำในอาหารอยู่ในรูปของเหลวที่อุณหภูมิต่ำมาก จึงไม่เกิดผลึกน้ำแข็งที่ไปทำลายเซลล์เนื้อเยื่อ ใช้ในอาหารแช่เยือกแข็ง เช่น ซูริมิ (surimi) ไอศกรีม (ice cream)

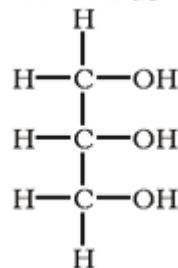
ซอร์บิทอล พบมากในแอปเปิ้ล, ลูกแพร์, ลูกพีช และแอปปริคอต หรือการสังเคราะห์จากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ได้แก่ อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าว และข้าวสาลี เป็นต้น โดยซอร์บิทอลได้มาจากการย่อยโมเลกุลของสตาร์ชให้เป็นโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคส แล้วทำปฏิกิริยาไฮโดรเจนชันด้วยการเติมไฮโดรเจนให้กับโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคส และใช้นิกเกิลตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพที่ 2.4 ปฏิกิริยาไฮโดรเจนชันน้ำตาลกลูโคสให้เป็นซอร์บิทอล
ที่มา : นิธิยา, (2551)

2.7.2 กลิเซอรอล (วิภา, 2546)

กลีเซอรอล (glycerol) หรือกลีเซอริน (glycerine) สูตรโมเลกุลคือ $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ แสดงโครงสร้าง ดังภาพที่ 2.5 กลิเซอรอลเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตสบู่ มีลักษณะเป็นของเหลวข้นใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น รสหวาน ละลายในน้ำและแอลกอฮอล์ได้ในโมเลกุลมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) 3 หมู่ จึงทำให้ละลายในน้ำได้ดี มีสมบัติในการดูดจับน้ำได้ดี และละลายในตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิดได้เล็กน้อย เช่น อีเทอร์ (ether) และ ไดออกเซน (dioxane) แต่ไม่ละลายในไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbons)



ภาพที่ 2.5 สูตรโครงสร้างของกลีเซอรอล
ที่มา : นิธิยา, (2551)

คุณสมบัติที่สำคัญของกลีเซอรอล มีดังนี้

1. กลีเซอรอลไม่สามารถถูกออกซิไดซ์ จึงมีความคงตัวสูง (high stability)
2. ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีและกลิ่นรสเมื่อเก็บไว้เป็นเวลานาน
3. ละลายได้ดีในน้ำและแอลกอฮอล์ จึงเหมาะสำหรับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท
4. สามารถเกิดสถานะ supercool ได้ ทนต่อสถานะการแช่เยือกแข็งและการละลาย
5. มีความข้นหนืดจึงสามารถใช้เป็นสาร thickening หรือสารเพิ่ม body สำหรับผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวหรือเจลได้
6. มีรสชาติหวานเล็กน้อย โดยมีค่าความหวานประมาณร้อยละ 55-75 ของระดับความหวานของน้ำตาลซูโครส (ขึ้นกับระดับความเข้มข้นที่ใช้)
7. ไม่มีกลิ่นรุนแรงจึงสามารถนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์ขนมหวานได้ดีโดยไม่ส่งผลกระทบต่อกลิ่นรส
8. กลีเซอรอลนอกจากจะเป็นสารเพิ่มความชุ่มชื้นแล้ว ยังมีคุณสมบัติเป็นตัวพลาสติกไซเซอร์ จึงช่วยให้ผลิตภัณฑ์คงความนุ่ม มีความยืดหยุ่นดี มีลักษณะ creaminess และยังช่วยยืดอายุผลิตภัณฑ์อีกด้วย
9. มีความดันไอต่ำและไม่ระเหยที่อุณหภูมิปกติ เป็นสารไม่มีพิษ (nontoxic) ต่อระบบการย่อยอาหาร ผิวหนังและเนื้อเยื่ออื่นๆ
10. ไม่มีปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม
11. กลีเซอรอลได้รับอนุญาตจาก GRAS (generally recognized as safe) จากสหรัฐอเมริกาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1975 และจัดให้อยู่ในรายการของสารที่มีคุณสมบัติหลากหลาย (multipurpose) (FDA, 2005)

2.8 การตรวจสอบสมบัติฟิล์ม

ฟิล์มที่ถูกนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์จะต้องคำนึงถึงโครงสร้างและสมบัติการใช้งาน ดังนั้นการตรวจสอบฟิล์มจึงเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อให้เลือกใช้ฟิล์มที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์

เนื่องจากฟิล์มแข็งนั้นจะมีความแปรเปลี่ยนตามสถานะแวดล้อม ดังนั้นในการตรวจสอบสมบัติต่างๆ จึงจำเป็นต้องมีการปรับสถานะขึ้นทดสอบให้ตรงตามมาตรฐานเสมอและวิธีการตรวจสอบของ

ฟิล์ม จะยึดถือตามมาตรฐานสากลหรือมาตรฐานของชาติ ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันทั่วโลก เพื่อให้ผลการตรวจสอบที่ได้มีความถูกต้องและสามารถเปรียบเทียบในแต่ละครั้งได้

สมบัติของฟิล์มที่สำคัญ ได้แก่

2.8.1 ความต้านทานแรงดึง (tensile strength, TS) หมายถึง ความสามารถของฟิล์มที่จะต้านทานแรงดึงสูงสุด (maximum force, F_{max}) โดยค่าความต้านทานแรงดึงหาได้โดยการนำเอาแรงดึงสูงสุดหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของฟิล์มที่ตั้งฉากกับแรงดึงสูงสุด (ความหนาของฟิล์มคูณความกว้างของฟิล์ม) แสดงดังสมการที่ 2.1 และการยืดตัวของฟิล์ม ณ จุดที่ขาด (elongation at break) เป็นการทดสอบความสามารถของฟิล์มที่ยืดออก ณ จุดที่ฟิล์มขาดเทียบกับความยาวเริ่มต้นของแผ่นฟิล์ม สามารถแสดงค่าการยืดตัวของฟิล์ม ณ จุดที่ขาดในรูปร้อยละ (% elongation at break) ดังสมการที่ 2.2 (ค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดที่ขาด เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D882-95)

$$\text{ความต้านทานแรงดึง (tensile strength, TS)} = \frac{\text{แรงดึงสูงสุด (maximum force, } F_{max} \text{)}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง}} \quad (2.1)$$

$$\text{ร้อยละการยืดตัวของฟิล์ม ณ จุดที่ขาด} = \left\{ \frac{\left\{ \begin{array}{l} \text{ผลต่างระหว่างความยาวที่ฟิล์มยืดออก} \\ \text{ณ จุดที่ขาด และความยาวเริ่มต้นของ} \\ \text{แผ่นฟิล์มตัวอย่าง} \end{array} \right\}}{\text{ความยาวเริ่มต้นของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง}} \right\} \times 100 \quad (2.2)$$

2.8.2 ความหนา คือ ระยะตั้งฉากระหว่างผิวหน้าทั้งสองของฟิล์ม มีหน่วยวัดเป็น ไมโครเมตร หรือมิลลิเมตร

2.8.3 ค่าสี (L^* , a^* และ b^*) และค่าความแตกต่างของสีทั้งหมด (Total color difference, ΔE^*) วัดโดยใช้เครื่องวัดสี (Color Quest XE, Fairfax, USA) ระบบ CIE โดยสามารถคำนวณค่าความแตกต่างของสีทั้งหมดได้ดังสมการที่ (2.3)

$$\text{ค่าความแตกต่างของสีทั้งหมด } \Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (2.3)$$

เมื่อค่า ΔL^* , Δa^* และ Δb^* คือค่าความแตกต่างของสีตัวอย่างเทียบกับแผ่นสีขาวมาตรฐาน

2.8.4 อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (water vapour transmission rate, *WVTR*) ได้จากการหาความสัมพัทธ์ระหว่างน้ำหนักของฟิล์มที่เปลี่ยนแปลงต่อพื้นที่ของแผ่นฟิล์มต่อเวลา แสดงการคำนวณค่า *WVTR* ดังสมการที่ (2.4)

$$\begin{aligned} & \text{อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (WVTR, } g \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}\text{)} \\ & = \frac{\text{น้ำหนักฟิล์มที่เปลี่ยนแปลงไป (กรัม)}}{\text{พื้นที่ของแผ่นฟิล์ม (ตารางเมตร)} \times \text{(ระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักฟิล์ม (วัน))}} \end{aligned} \quad (2.4)$$

2.8.5 ค่าการละลาย (solubility) ของฟิล์ม โดยการนำตัวอย่างฟิล์มที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอนใส่ลงในน้ำกลั่น แล้วกวนด้วยเครื่องกวนสารละลายที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง นำไปกรองด้วยกระดาษกรอง นำกระดาษกรองที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ค่าการละลายน้ำของฟิล์ม (ร้อยละ) หาได้จากสมการที่ (2.5) ดังนี้

$$\begin{aligned} & \text{ค่าการละลาย (ร้อยละ)} = \\ & \left\{ \frac{\text{ผลต่างระหว่างน้ำหนักฟิล์มก่อนทำการละลายและน้ำหนักฟิล์มที่เหลือบน} \\ & \text{กระดาษกรองหลังอบแห้ง}}{\text{น้ำหนักฟิล์มก่อนทำการละลาย}} \right\} \times 100 \end{aligned} \quad (2.5)$$

2.9 โปแทสเซียมซอร์เบท (Potassium sorbate)

โปแทสเซียมซอร์เบท เป็นวัตถุเจือปนอาหาร (food additive) ในกลุ่มของกรดซอร์บิกและเกลือซอร์เบท สูตรทางเคมี คือ $C_6H_7KO_2$ โปแทสเซียมซอร์เบท เป็นผงสีขาว ละลายน้ำได้ดี วัตถุประสงค์การใช้ คือใช้เป็นสารกันเสีย (preservative) ยับยั้งการเจริญของราและยีสต์ในอาหารได้ดี โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์แห้งหรือผลิตภัณฑ์รมควัน โดยกรดซอร์บิกจะขัดขวางการเจริญของยีสต์ รา และจุลินทรีย์หลายชนิด โดยขัดขวางการทำหน้าที่ของเอนไซม์ซัลไฟไฮไดรล (sulfhydryl) บางชนิด กรดนี้มีความเสถียรมาก และสามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ได้โดยไม่มีผลต่อกลิ่น รสชาติ หรือโครงสร้างของอาหารในประเทศไทยอนุญาตให้ใช้ปริมาณ 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ศิวาพร, 2546)

โพแทสเซียมซอร์เบทถูกนำมาใช้ผลิตฟิล์มเพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ยีสต์ และรา โดยเฉพาะฟิล์มที่ทำจากแป้งและสตาร์ช โดย Lucia *et al.*, (2005) เติมน้ำโพแทสเซียมซอร์เบทร้อยละ 0.3 ในฟิล์มสตาร์ชจากมันสำปะหลัง สามารถยืดอายุการเก็บรักษาฟิล์มได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับฟิล์มที่ไม่ได้เติมน้ำโพแทสเซียมซอร์เบท Xiao *et al.*, (2005) การเติมน้ำโพแทสเซียมซอร์เบทร้อยละ 15 ในฟิล์มสตาร์ชจากมันเทศ สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Escherichia coli* ได้และ Constancia *et al.*, (2013) ได้เติมน้ำโพแทสเซียมซอร์เบทในฟิล์มที่ทำจากแซนแทนกัม และสตาร์ชจากมันสำปะหลัง พบว่า ฟิล์มที่ได้สามารถลดการเจริญเติบโตของเชื้อ *Zygasaccaromyces bailii* ซึ่งเป็นเชื้อยีสต์ ได้ 2 โคลโลนีต่อกรัมของตัวอย่าง เมื่อเทียบกับฟิล์มที่ไม่ได้เติมน้ำโพแทสเซียมซอร์เบท

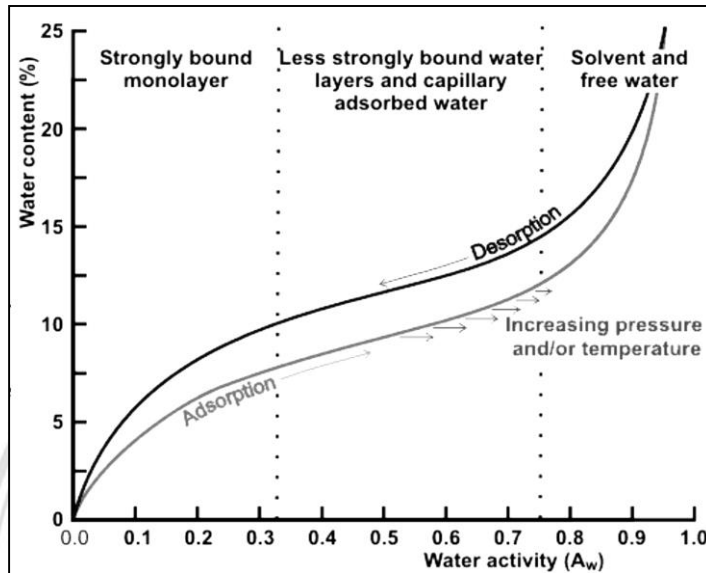
2.10 ปริมาณความชื้น (moisture content) และค่าวอเตอร์แอกติวิตี (water activity)

ปริมาณความชื้นเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเสื่อมเสียของอาหาร วิธีที่ใช้ในการถนอมอาหาร ไม่ว่าจะเป็นวิธีการทำให้แห้ง การทำแห้ง เป็นวิธีที่ทำให้ปริมาณความชื้นในอาหารลดลง ส่วนการเติมน้ำตาล หรือการเติมเกลือลงไป ในอาหาร เป็นการลดค่าวอเตอร์แอกติวิตีของอาหาร สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอาหารทั้งหมดประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนของน้ำที่เกาะติดกับอาหาร หรือถูกใช้ไปในการสร้างพันธะต่างๆ เช่น พันธะไฮโดรเจน พันธะไฮโดรเจน และอีกส่วนคือปริมาณน้ำอิสระที่ไม่ได้ถูกนำไปใช้ในการเกิดพันธะใดๆ และจะอยู่ภายในช่องว่างของอาหาร ปริมาณความชื้นเป็นปริมาณน้ำทั้งหมดที่มีอยู่ในอาหาร คือ รวมทั้งสองส่วนของน้ำดังกล่าว ในขณะที่ค่าวอเตอร์แอกติวิตีเป็นโมเลกุลของน้ำที่พร้อมจะเปลี่ยนสภาวะจากของเหลวไปเป็นไอ ซึ่งเป็นส่วนของน้ำอิสระเท่านั้น โดยอาหารที่มีความชื้นสูงหรือมีปริมาณน้ำมากกว่าส่วนที่เป็นของแข็งจะมีค่าวอเตอร์แอกติวิตีเท่ากับ 1.0 และเมื่ออาหารมีความชื้นต่ำลงหรือมีปริมาณน้ำน้อยกว่าส่วนที่เป็นของแข็งค่าวอเตอร์แอกติวิตีจะลดลงต่ำกว่า 1.0 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในอาหารที่มีหน่วยเป็นกรัมของน้ำต่อกรัมน้ำหนักแห้งของอาหาร ดังนั้นเมื่อความชื้นลดลงจะทำให้ค่าวอเตอร์แอกติวิตีลดลงด้วย ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตี สามารถนำมาเขียนกราฟเรียกว่า กราฟซอร์ชันไอโซเทอม (sorption isotherm) ได้ (นิธิยา, 2543)

2.11 ซอร์ชันไอโซเทอม (sorption isotherm)

เนื่องจากความชื้น (Moisture Content) และค่าวอเตอร์แอกติวิตีมีความสัมพันธ์กัน ดังนั้นจึงสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอกติวิตีของผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้จากการทดลองวัดค่าทั้งสองของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด ณ อุณหภูมิที่คงที่ค่าหนึ่งเท่านั้น แล้วบันทึกค่า

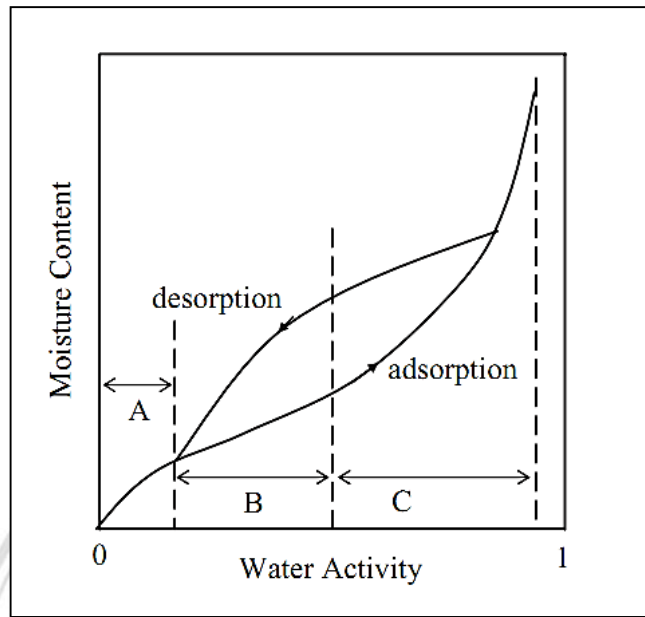
ทั้งสองเปรียบเทียบกันในรูปแบบกราฟ เรียกรูปกราฟความสัมพันธ์ที่ได้ว่า กราฟซอฟชันไอโซเทอม ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 กราฟซอฟชันไอโซเทอมที่ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในอาหารกับค่าวอเตอร์แอคทีวิตี
ที่มา : Deman, 1990; นิธิยา (2551)

จากกราฟในภาพที่ 2.6 จะพบว่าเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น ค่าวอเตอร์แอคทีวิตีจะเพิ่มขึ้นด้วย แต่เป็นการเพิ่มแบบไม่เป็นเส้นตรง นอกจากนี้กราฟซอฟชันไอโซเทอมของผลิตภัณฑ์ต่างชนิดกันจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความดันไอของโมเลกุลของน้ำในช่องว่างเหนือผลิตภัณฑ์ และพลังงานของการจับพันธะของน้ำในผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด

กราฟซอฟชันไอโซเทอมมี 2 แบบ คือ กระบวนการลดความชื้น (desorption) และการเพิ่มความชื้น (adsorption) เกิดขึ้นได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นของอากาศ และจะมีผลต่อค่าวอเตอร์แอคทีวิตีด้วย กระบวนการเพิ่มความชื้น (adsorption) และกระบวนการลดความชื้น (desorption) ไม่ได้เกิดขึ้นพร้อมกัน หรือเป็นกระบวนการที่สามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ (นิธิยา, 2543)



ภาพที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในอาหารกับค่าวอเตอร์แอกติวิตี
ที่มา: Troller and Chritian, 1987; นิธิยา (2551)

กราฟซอเฟชันไอโซเทอมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ซึ่งจะแตกต่างกันตามปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในอาหาร หรือค่าวอเตอร์แอกติวิตี (นิธิยา, 2551) แสดงในภาพที่ 2.7 ดังนี้

ช่วงที่ 1 (A) เส้นกราฟจะค่อนข้างชัน สอดคล้องกับ monomolecular layer ของน้ำ ซึ่งเป็นน้ำที่เกาะอยู่กับสารประกอบในอาหารอย่างเหนียวแน่น และมีค่าวอเตอร์แอกติวิตี อยู่ในช่วง 0-0.25 หรือ 0.3

ช่วงที่ 2 (B) เส้นกราฟค่อนข้างราบ สอดคล้องกับ capillary water ที่มีอยู่ในอาหารซึ่งเป็นน้ำที่กำจัดออกได้แต่ค่อนข้างยาก ถ้าปริมาณน้ำส่วนนี้ลดลงจะทำให้ค่าวอเตอร์แอกติวิตีลดลงและยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์และปฏิกิริยาทางเคมีส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในอาหารได้ด้วย ปริมาณความชื้นจะลดลงเหลือประมาณร้อยละ 3-7 ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารและอุณหภูมิ โดยมีค่าวอเตอร์แอกติวิตีอยู่ในช่วง 0.3-0.8

ช่วงที่ 3 (C) เป็นน้ำอิสระที่มีอยู่ในเนื้อเยื่ออาหารทั้งจากพืชและสัตว์ สามารถกำจัดออกได้ง่าย น้ำเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวทำละลาย ถูกใช้สำหรับการเจริญของจุลินทรีย์และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี อาหารจะมีน้ำประมาณร้อยละ 12-25 และมีค่าวอเตอร์แอกติวิตีมากกว่า 0.8-1.0

กราฟไอโซเทอมแบ่งออกเป็น 5 ประเภท ดังภาพที่ 2.8 ซึ่งถูกค้นพบ โดย Brunauer, Deming and Teller ในปี 1938

ประเภทที่ 1 คือ Langmuir isotherm ซึ่งได้มาโดยการดูดซับ โมเลกุลเดี่ยวของก๊าซโดยของแข็งที่มีรูพรุน (porous solid) ในปริมาตรของช่องว่างที่จำกัด

ประเภทที่ 2 คือ Sigmoid isotherm ใช้อธิบายสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ละลายได้ และมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงที่โค้งเข้าหาแนวเส้น a_w ที่มีค่าเท่ากับ 1

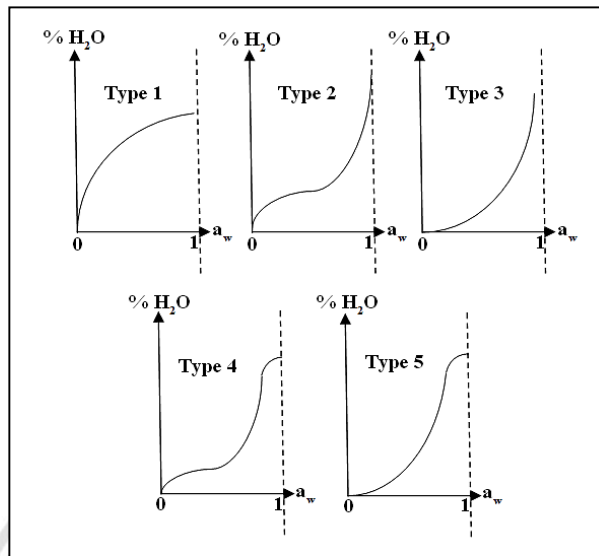
ประเภทที่ 3 คือ Flory-Huggins isotherm ใช้คำนวณสำหรับการดูดซับของตัวทำละลาย หรือผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นพลาสติกคล้ายกิลีเซอร์อลที่อุณหภูมิเหนือค่า T_g ซึ่ง ค่า T_g หรือ อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนสถานะ (glass transition temperature) คืออุณหภูมิที่สารสามารถเปลี่ยนสถานะได้ ถ้าหากเก็บที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g ส่วนที่เป็นอสัณฐานจะมีลักษณะแข็ง เปราะ ไม่ยืดหยุ่น เรียกว่าสารอยู่ใน glassy state แต่ถ้าเก็บที่อุณหภูมิสูงกว่า T_g ส่วนที่เป็นอสัณฐานจะมีเปลี่ยนสภาพจากแข็ง เปราะ ไปเป็นสารที่มีความเหนียว ยืดหยุ่นดี เรียกว่าสารอยู่ใน rubbery state หรือใช้อธิบายสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารที่มีองค์ประกอบ เช่น น้ำตาล หรือเกลือ ละลายอยู่ได้ (Rahman, 1995)

ประเภทที่ 4 อธิบายการดูดซับ โดยของแข็งที่ชอบน้ำ และมีความสามารถอุ้มน้ำได้ (swellable hydrophilic solid) จนกระทั่งถึงจุดสูงสุดของการ hydration

ประเภทที่ 5 คือ B.E.T multilayer adsorption isotherm ใช้สำหรับวิเคราะห์อาหารแห้ง ผักอบแห้ง ลำไยอบแห้ง เป็นต้น

นอกจากนี้ยังพบว่า กราฟไอโซเทอม 2 ประเภทที่พบบ่อยที่สุดในผลิตภัณฑ์อาหารคือ isotherm ประเภทที่ 2 และ 4

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพที่ 2.8 ประเภทของกราฟซอพชันไอโซเทอม
ที่มา: Brunauer *et al.*(1938)

การศึกษาซอพชันไอโซเทอมของอาหารทำให้ได้อุณหภูมิต่างๆ กัน ผลของอุณหภูมิต่อซอพชันไอโซเทอมจะให้ได้ข้อมูลที่สำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ เมื่ออาหารมีความชื้นที่เท่ากับอุณหภูมิจะส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำในอาหาร และสมดุลพลศาสตร์ระหว่างไอน้ำและวัฏภาคที่ดูดซับ (adsorbed phase) สมดุลของน้ำจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เมื่อค่าวอเตอร์แอกติวิตี้คงที่ การเพิ่มอุณหภูมิเป็นผลให้โมเลกุลน้ำได้รับการกระตุ้นไปสู่ระดับพลังงานที่สูงกว่าและแตกพันธะออกจากส่วนที่ยึดเกาะกับอาหาร เป็นผลทำให้สมดุลของปริมาณความชื้นลดลง อย่างไรก็ตามอาหารที่มีความชื้นต่ำจะสามารถดูดซับน้ำในบรรยากาศได้สูงเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น (Jamali *et al.*, 2006)

2.12 ซอพชันไอโซเทอมของฟิล์มจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ

การศึกษาซอพชันไอโซเทอมของฟิล์มก็เป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสมดุลของฟิล์มที่ได้กับค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ ซึ่งทำให้สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงความชื้นของอาหารได้ ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้จึงเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมคุณภาพของฟิล์ม โดยการศึกษาซอพชันไอโซเทอมนิยมนำมาใช้กับฟิล์มเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นสมดุลของฟิล์มที่อุณหภูมิและค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ต่างๆ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เช่น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Henderson, Smith, Halsey, Oswin และ Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) ดังสมการที่ (2.6) ถึง (2.10)

Henderson equation :

$$M_w = \left[\frac{\ln(1 - a_w)}{-A} \right]^{1/B} \quad (2.6)$$

Smith equation :

$$M_w = A + B \ln(1 - a_w) \quad (2.7)$$

Halsey equation :

$$M_w = \left[-\frac{A}{\ln a_w} \right]^{1/B} \quad (2.8)$$

Oswin equation :

$$M_w = A \left[\frac{a_w}{1 - a_w} \right]^B \quad (2.9)$$

Guggenheim-Anderson-deBoer (GAB) equation :

$$M_w = \frac{M_0 Y k a_w}{(1 - k a_w)(1 - k a_w + Y k a_w)} \quad (2.10)$$

จากสมการที่ (2.6) ถึง (2.10) M_w คือ ความชื้น (กรัมของน้ำ/100 กรัมของแข็งแห้ง) M_0 คือ GAB monolayer moisture (กรัมของน้ำ/100 กรัมของแข็งแห้ง) a_w คือค่าวอเตอร์แอกติวิตี และ A, B, Y และ k คือ ค่าคงที่

การดูดซับความชื้นของฟิล์มแต่ละชนิด ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ และธรรมชาติความชอบน้ำ (hydrophilic) ค่าไอโซเทอมที่ได้จากการทดลองนั้นจะสามารถนำมาประมาณค่าปริมาณความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในการนำฟิล์มที่ผลิตได้ไปใช้ประโยชน์กับผลิตภัณฑ์ในสภาวะแวดล้อมต่างๆ กันได้ (Jangchud and Chinnan, 1999) วรรณมณฑน์ และคณะ (2551) ได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ GAB, BET และ Smith เพื่อศึกษาคุณสมบัติการดูดความชื้นของฟิล์มจากแป้ง 3 ชนิด ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว Villalobos *et al.*, (2006) ได้ทำการศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวต่อสมบัติวอเตอร์ซอพชั่น ไอโซเทอมของฟิล์มที่ทำจากไฮดรอกซีโพรพิลเซลลูโลส โดยใช้แบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์แบบ Guggenheim-Anderson-deBoer (GAB) และ Brunauer-Emmett-Teller (BET) พบว่า สมดุลของปริมาณความชื้นจะลดลงเมื่อเพิ่มสารลดแรงตึงผิว Kim and Ustunol (2001) ได้ศึกษาสมดุลของปริมาณความชื้นของฟิล์มที่ทำจากเวย์โปรตีน โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แบบ GAB พบว่า การรวมตัวกันของไขมันมีผลทำให้ค่าการละลายและความสมดุลของปริมาณความชื้นของฟิล์มที่เติมพลาสติกไซเซอร์มีค่าลดลง Perdomo *et al.*, (2009) ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ BET, Henderson, Smith, Halsey, Oswin, GAB และ Modified GAB เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อซอฟต์แวร์ไอโซเทอมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าซอฟต์แวร์ไอโซเทอมของฟิล์มจะมีค่าลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้โมเลกุลของน้ำมีพลังงานภายในโมเลกุลเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ตลอดเวลาและส่งผลให้ความสามารถในการดึงดูระหว่างโมเลกุลลดลง ดังนั้นการดูดซับความชื้นลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved