

การตรวจเอกสาร

1. องค์ประกอบทางเคมีของไข่

องค์ประกอบทางเคมีของไข่ไก่และไข่เป็ด แสดงดังตารางที่ 1 จากตารางจะเห็นว่าไข่ไก่ทั้งฟองประกอบไปด้วยโปรตีนร้อยละ 12.49 สำหรับไข่เป็ดทั้งฟองนั้นประกอบไปด้วยโปรตีนร้อยละ 12.81 ซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกับไข่ไก่ แต่ปริมาณองค์ประกอบอื่น ๆ ยกเว้นความชื้นจะมีปริมาณสูงกว่า นอกจากนี้ปริมาณของกรดอะมิโนของโปรตีนในไข่ทั้ง 2 ชนิด มีปริมาณแตกต่างกัน ดังตารางที่ 2 คาร์โบไฮเดรตในไข่ขาวจะอยู่ในรูปอิสระ และรูปที่อยู่ร่วมกับโปรตีน (glycoprotein) ซึ่ง คาร์โบไฮเดรตอิสระส่วนใหญ่ (ร้อยละ 98) จะเป็นกลูโคส พบประมาณร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนักของไข่ขาว ส่วนในรูปของไกลโคโปรตีนจะประกอบด้วยแมนโนส และกาแล็กโทสร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของไข่ขาว ปริมาณคาร์โบไฮเดรต ทั้งหมดอาจจะมีมากถึงร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของไข่ขาว (Stadelman and Cotterill, 1995)

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบของไข่ขาว ไข่แดง ไข่ทั้งฟองของไข่ไก่ และไข่เป็ด

ส่วนประกอบของไข่	ปริมาณองค์ประกอบ (ร้อยละ)				
	โปรตีน	ไขมัน	คาร์โบไฮเดรต	เกลือ	ความชื้น
ไข่ขาว (ไข่ไก่) ¹	9.7-10.6	0.03	0.4-0.9	0.5-0.6	87.87 – 89.37
ไข่แดง (ไข่ไก่) ¹	15.7-16.6	31.8-35.5	0.2-1.0	0.94	45.96 – 51.36
ไข่ทั้งฟอง (ไข่ไก่) ²	12.49	10.02	1.22	0.94	75.33
ไข่ทั้งฟอง (ไข่เป็ด) ²	12.81	13.77	1.45	1.14	70.78

ที่มา : ¹Stadelman and Cotterill (1995)

²Anonymous (2005)

ตารางที่ 2 ชนิด ความมีขั้ว ค่า pI และปริมาณของกรดอะมิโนในไข่ขาวของไข่ไก่และไข่เป็ดต่อน้ำหนักส่วนที่บริโภค 100 กรัม

ชนิดของกรดอะมิโน	ความมีขั้ว ¹	ค่า pI ^{2,3}	ไข่ไก่ (กรัม) ⁴	ไข่เป็ด (กรัม) ⁴
อะลานีน	non-polar	6.0	0.696	0.631
อาร์จินีน	+	10.76	0.749	0.765
กรดแอสพาร์ติก	-	2.77	1.225	0.777
ซีสทีน	non-polar	5.07	0.290	0.285
กรดกลูตามิก	-	3.22	1.633	1.789
ไกลซีน	non-polar	5.98	0.420	0.422
ฮิสทีดีน	+	7.59	0.296	0.320
ไอโซลิวซีน	non-polar	6.02	0.682	0.598
ลิวซีน	non-polar	5.98	1.067	1.097
ไลซีน	+	9.74	0.897	0.951
เมทไธโอนีน	non-polar	5.74	0.390	0.576
เฟนิลอะลานีน	non-polar	5.48	0.664	0.840
โพรลีน	non-polar	6.30	0.498	0.480
เซอรีน	non-polar	5.68	0.929	0.963
ทรีโอนีน	non-polar	5.68	0.600	0.736
ทริปโทเฟน	non-polar	5.89	0.152	0.260
ไทโรซีน	non-polar	5.66	0.510	0.613
วาลีน	non-polar	5.96	0.761	0.885

ที่มา : ¹พรงาม (2545)

²Li-Chan and Nakai (1989)

³Damodaran (1996)

⁴Anonymous (2005)

2. ไข่ขาว

สาเหตุที่เรียกว่าไข่ขาวเนื่องจากเวลาตกกิม (coagulation) จะเป็นสีขาว ปริมาณไข่ขาวมีประมาณร้อยละ 60 ของเนื้อไข่ทั้งฟอง ไข่ขาวมีสีเหลืองอ่อน เนื่องจากสีของโอโวเฟลวิน (ovoflavin) และบางครั้งพบว่ามีสีชมพูหรือสีเขียวอ่อน เนื่องจากอาหารบางชนิดที่ใช้เลี้ยงไก่

ไข่ขาวประกอบด้วยส่วนย่อย ๆ ดังนี้คือ

2.1 เยื่อข้าวไข่แดง (chalaziferous) เป็นส่วนของไข่ขาวชั้นที่มาห่อหุ้มไข่แดงอยู่ชิดกับเยื่อหุ้มไข่แดง (vitelline membrane) และขมวดเป็นเกลียวอยู่ที่หัวท้ายตามแกนยาวของไข่แดง น้ำหนักของเยื่อข้าวไข่แดงในไข่ฟองหนึ่งจะหนักไม่ถึง 1 กรัม เฉพาะน้ำหนักของตัวข้าวยึดไข่แดงทั้ง 2 ข้าง (chalazae) นี้ประมาณ 0.15 กรัม โดยที่ข้าวยึดไข่แดงจะเป็นสายของไข่ขาวชั้นที่ยื่นออกมาจากส่วนไข่ขาวชั้น มีลักษณะบิดเป็นเกลียวขึ้นไปทางด้านป้านและด้านแหลมของไข่ ข้าวที่อยู่ทางด้านแหลมเรียกว่า choacal chalaza ซึ่งจะมีลักษณะเป็นเส้นใยยาวและใหญ่กว่าของด้านป้าน ที่เรียกว่า infundibular chalaza ทำหน้าที่ช่วยยึดไม่ให้ไข่แดงเคลื่อนที่ไปมาจากตำแหน่งเดิม เมื่อเก็บไข่ไว้นานขึ้น ส่วนนี้จะเกิดการอ่อนตัวลงทำให้ไข่แดงเคลื่อนที่ได้มากขึ้น

2.2 ไข่ขาวเหลวชั้นใน (inner liquid layer) เป็นส่วนของไข่ขาวที่ค่อนข้างเหลวใส อยู่ชั้นรอบนอก มีประมาณร้อยละ 16.8 ของไข่ขาวทั้งหมด ภายในชั้นนี้ไม่มีเส้นใยมิวซิน (mucin fiber) อยู่เลย เป็นชั้นที่เยื่อข้าวไข่แดงโยงดึงไข่แดงให้ลอยอยู่ตรงกลางฟองไข่

2.3 ไข่ขาวชั้น (dense albumen) อยู่ถัดไข่ขาวใสชั้นนอกออกมา เป็นชั้นหรือถุงไข่ขาวชั้น ที่ห่อหุ้มไข่แดงกับไข่ขาวใสตอนใน ความชื้นของตัวมันจะช่วยประคองไข่แดงและน้ำไข่ขาวใสตอนในให้แขวนลอยอยู่ และพ้นอันตรายจากการกระทบกระทั่ง ไข่ขาวส่วนนี้มีปริมาณร้อยละ 57.3 ของไข่ขาวทั้งหมด เส้นใยมิวซินของชั้นนี้เป็นส่วนประกอบสำคัญของไข่ขาวชั้น และไปเชื่อมยึดกับเยื่อหุ้มไข่ชั้นในที่ด้านป้านกับด้านแหลมของฟองไข่ ไข่ขาวชั้นจะมีลักษณะเป็นเส้นใยชั้น ๆ (semisolid fiber) ที่รวมกับส่วนที่เป็นของเหลวทำให้ดูข้นขึ้น เส้นใยเหล่านี้ด้านนอกที่ติดกับไข่ขาวเหลวชั้นนอกเป็นเส้นใยยาวอยู่กันอย่างหนาแน่น ถ้าใช้ความร้อน หรือย้อมสีไข่ขาวชั้น จะเห็นเป็นชั้น ๆ ได้ด้วยตาเปล่า ถ้าใช้กล้องขยายจะเห็นแต่ละชั้นนั้นประสานกันอย่างซับซ้อนห่างกันชั้นละประมาณ 10 มิลลิเมตร

2.4 ไข่ขาวใสชั้นนอก (outer liquid layer) หรือน้ำคั่งไข่ จะอยู่รอบ ๆ ด้านข้างของไข่ขาว ส่วนชั้น เว้นแต่ที่ตรงหัวและท้ายของไข่ มีลักษณะเหลวใส อยู่เป็นชั้นบาง ๆ ติดเยื่อเปลือกไข่ มี ปริมาตรร้อยละ 23.2 ของไข่ขาวทั้งหมด โดยส่วนประกอบของไข่ขาวใสชั้นนอกนี้จะเหมือนกับไข่ขาวใสชั้นในแต่มีเส้นใยมิวซินบ้างเล็กน้อย ใช้ประโยชน์เป็นตัวเจือจางน้ำเชื้อ (extender) ในการผสมพันธุ์เทียม และใช้ช่วยในการขึ้นฟูของขนม (สุวรรณ, 2529)

3. โปรตีนไข่ขาว

ไข่ขาวเป็นระบบโปรตีนที่ประกอบด้วยเส้นใยโอโวมิวซินละลายอยู่ในสารละลายเอควียสของไกลบูลาร์โปรตีนหลายชนิด ส่วนประกอบของโปรตีนในชั้นในไข่ขาวใสและไข่ขาวชั้นต่างกัน เฉพาะที่ปริมาณของโอโวมิวซิน โปรตีนที่สำคัญของไข่ขาวสามารถแยกลำดับส่วนด้วยแอมโมเนียมซัลเฟต และทำให้บริสุทธิ์โดยใช้เทคนิคของ ion exchange สำหรับโปรตีนแต่ละชนิดที่แยกได้จากไข่ขาว พบว่ามีสมบัติทางเคมี และทางกายภาพดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ชนิด สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของโปรตีนจากไข่ขาวจากไข่ไก่

ชนิดของโปรตีน	ร้อยละในไข่ขาว	pI ^{1/}	มวลโมเลกุล (Da)	T _d ^{2/} (°C)	สมบัติ
โอวัลบูมิน	54	4.5	45,000	84.0	ฟอสโฟไกลโคโปรตีน มีหมู่ซัลไฮดริล 4 หมู่
โอโวทรานส์เฟอร์ริน	12 – 13	6.1	76,000–80,000	61.0	ไกลโคโปรตีน: โลหะเหล็กทำปฏิกิริยากันได้สารประกอบเชิงซ้อน
โอโวมิวคอกซ์	11	4.1	28,000	79.0	ไกลโคโปรตีน: ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ทริปซิน
โอโวมิวซิน	3.5	4.5–5.0	5,500 – 8,300x10 ³	ND	ไกลโคโปรตีน

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ชนิดของโปรตีน	ร้อยละใน ไข่ขาว	pI ^{1/}	มวลโมเลกุล (Da)	T _d ^{2/} (°C)	สมบัติ
ไลโซไซม์	3.4	10.7	14,300	75.0	ย่อยสลายแบคทีเรียบางชนิด
อะวิดิน	0.05	10.0	68,300	85.0	ทำปฏิกิริยากับไบโอติน
โอโวไกลบูลิน	4.0	4.8-5.5	35,000	ND	ไกลโคโปรตีน
โอโวอินฮิบิเตอร์	1.5	5.1	49,000	ND	ไกลโคโปรตีน
โอโวฟลาโวโปรตีน	0.8	4.0	32,000	ND	ทำปฏิกิริยากับไโรโบฟลาวิน

หมายเหตุ ^{1/} คือ Isoelectric point

^{2/} คือ อุณหภูมิที่เสียสภาพ (denature temperature)

ND คือ Not determined

ที่มา : Gossett *et al.* (1984)

Mine (1995)

Stadelman and Cotterill (1995)

3.1 โอวัลบูมิน (Ovalbumin)

โอวัลบูมินเป็นโปรตีนที่มีมากที่สุดในไข่ขาว คือ ประมาณครึ่งหนึ่งของโปรตีนไข่ขาว โดยน้ำหนัก เป็นสารพวกฟอสโฟไกลโคโปรตีน (phosphoglycoprotein) เพราะมีคาร์โบไฮเดรต และหมู่ฟอสเฟตเกาะอยู่กับสายพอลิเพปไทด์ โดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ A₁, A₂ และ A₃ ซึ่งหมายถึง การมีหมู่ฟอสเฟต 2 หมู่ 1 หมู่ และไม่มีเลยต่อโมเลกุลตามลำดับ มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 45 kDa (Mine, 1995) ประกอบด้วยหมู่ซัลไฟด์ไรล (sulfhydryl group) ทั้งหมด 4 หมู่ โดยมีหมู่ซัลไฟด์ไรลอิสระ 1 หมู่ จัดเป็นโปรตีนไข่ขาวเพียงชนิดเดียวที่มีหมู่ซัลไฟด์ไรลอิสระ และมีพันธะไดซัลไฟด์ 1 พันธะ มีค่า pI (Isoelectric point) เท่ากับ 4.5 โปรตีนชนิดนี้สามารถทนความร้อนได้ดี โดยมี

อุณหภูมิการเสียสภาพเท่ากับ 84.0 องศาเซลเซียส เมื่อไข่มีอายุการเก็บรักษานานขึ้นโอวัลบูมินจะเปลี่ยนไปเป็นเอส-โอวัลบูมิน (S-ovalbumin) ซึ่งเป็นโปรตีนที่ทนความร้อนได้มากกว่า อุณหภูมิในการเสียสภาพเท่ากับ 92.5 องศาเซลเซียส โดยที่องค์ประกอบของกรดอะมิโนในโมเลกุลของโอวัลบูมิน และเอส-โอวัลบูมินนั้นไม่แตกต่างกัน (Mine, 1995) นอกจากนี้โอวัลบูมินยังสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงไปได้ง่ายเมื่อทำการเขย่า (shaking) สารละลายโปรตีน (Warner, 1954; Stadelman and Cotterill, 1995)

3.2 โอโวลทรานส์เฟอรัริน (Ovotransferrin)

โอโวลทรานส์เฟอรัริน หรือคอนอัลบูมิน (conalbumin) คิดเป็นปริมาณร้อยละ 12 ของโปรตีนไข่ขาวทั้งหมด มีมวลโมเลกุล เท่ากับ 76 kDa และมีค่า pI ประมาณ 6.1 ประกอบด้วยกรดอะมิโน 686 ตัว และมีพันธะไดซัลไฟด์ 15 พันธะ ไม่มีหมู่ฟอสเฟต หรือหมู่ซัลไฮดริลอิสระ (Mine, 1995) จัดเป็นพอลิเพปไทด์สายเดี่ยว ที่เรียกว่า ไกลโคโปรตีน ประกอบด้วยโปรตีน และคาร์โบไฮเดรต โดยมีน้ำตาลเฮกโซส (hexose) ร้อยละ 0.8 และเฮกโซซามีน (hexosamine) ร้อยละ 1.4 เป็นโปรตีนที่แยกได้ง่ายโดยการตกตะกอนด้วยแอมโมเนียมซัลเฟต ทนความร้อนได้น้อยกว่าโอวัลบูมิน อุณหภูมิที่ทำให้เสียสภาพประมาณ 61 องศาเซลเซียส สามารถจับกับอนุมูลโลหะได้ (chelating agent) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ทนต่อความร้อน และการย่อยสลายของโปรตีนได้อนุมูลโลหะ เช่น Fe^{3+} , Al^{3+} , Cu^{2+} หรือ Zn^{2+} โดยอนุมูลโลหะ 2 อะตอมต่อ 1 โมเลกุลคอนอัลบูมิน จะเกิดสารเชิงซ้อนที่เสถียร และให้สีแดง ไม่มีสี สีเหลือง และไม่มีสี ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสามารถยับยั้งแบคทีเรียได้ (Stadelman and Cotterill, 1995)

3.3 โอโวลิวคอยด์ (Ovomucoid)

โอโวลิวคอยด์ เป็นโปรตีนที่มีอยู่ประมาณร้อยละ 10 ของโปรตีนไข่ขาว เป็นสารพวกไกลโคโปรตีน ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 25 ทำให้สามารถทนต่อความร้อนได้ดี และทนได้มากกว่าโอโวลทรานส์เฟอรัริน โอโวลิวคอยด์มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 28 kDa มีค่า pI เท่ากับ 4.1 และมีพันธะไดซัลไฟด์ 9 พันธะแต่ไม่มีหมู่ซัลไฮดริลอิสระ สามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ทริปซิน (trypsin inhibitor) โดย 1 โมเลกุลของโอโวลิวคอยด์สามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ได้ 1 โมเลกุล ในช่วงความเป็นกรดโอโวลิวคอยด์จะสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนได้ดี โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ และทางเคมี แต่ในสภาวะที่เป็นเบสโอโวลิวคอยด์จะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว (Mine, 1995) ซึ่งโอโวลิวคอยด์ที่เปลี่ยนแปลงด้วยความร้อนจะสูญเสีย

ความสามารถในการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ทริปซิน และจะถูกย่อยได้ดีขึ้นโดยเอนไซม์ไคโม-ทริปซิน (chymotrypsin) (Stadelman and Cotterill, 1995)

3.4 โอโวมิวซิน (Ovomucin)

โอโวมิวซิน เป็นไกลโคโปรตีนที่มีหมู่ซัลเฟต ทำให้ไข่ขาวชั้นมีลักษณะเป็นก้อนคล้ายวุ้น โดยพบโอโวมิวซินในไข่ขาวชั้นมากกว่าไข่ขาวใสถึง 4 เท่า มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 5,500-8,300 kDa โครงสร้างของโอโวมิวซินนั้นมีส่วนสำคัญมากในการทดสอบสมบัติเชิงเคมีกายภาพ (physicochemical) ของโปรตีน โอโวมิวซินแบ่งออกเป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ ชนิดที่มีคาร์โบไฮเดรตมาก (carbohydrate-rich) เรียก β - ovomucin และชนิดที่มีคาร์โบไฮเดรตน้อย (carbohydrate-poor) เรียก α - ovomucin (Mine, 1995) โดยมีปริมาณของคาร์โบไฮเดรตอยู่ถึงร้อยละ 30 และเนื่องจากมีปริมาณของคาร์โบไฮเดรตสูงจึงทำให้ทนต่อความร้อนได้ดี พบว่าสารละลายโอโวมิวซินที่ pH 7.1 - 9.4 นั้นจะไม่เปลี่ยนแปลงความหนืด (viscosity) หรือความทึบแสง (optical density) ระหว่างที่ให้ความร้อน 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โอโวมิวซิน และไลโซไซม์สามารถรวมกันเกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำ โดยแรงกระทำไฟฟ้าสถิตที่มีต่อกัน แต่ที่ pH เกินกว่าช่วง 7.2-10.4 แรงกระทำระหว่างโปรตีนทั้งสองจะลดลง โดยเฉพาะที่ pH เพิ่มขึ้นใกล้ pI ของไลโซไซม์ (pI = 10) เพราะไลโซไซม์จะแยกตัวจากโอโวมิวซิน ทำให้ไข่ขาวใสขึ้นระหว่างการเก็บไข่ และสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งของโปรตีนชนิดนี้ คือ เป็นสารช่วยให้เกิดฟองที่คงทน และมีความสามารถในการยับยั้งการทำงานของไวรัส (viral hemagglutination) (Stadelman and Cotterill, 1995)

3.5 ไลโซไซม์ (Lysozyme)

ไลโซไซม์ หรือที่รู้จักกันใน mucopeptide N-acetylmuramoylhydrolase (EC3.2.1.17) เป็นเอนไซม์ในไข่ขาวที่สามารถทำลายผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมลบ ซึ่งเป็นโปรตีนไกลแคน (proteoglycan) ได้ โดยย่อยสลายพันธะ $\beta(1-4)$ linkages ระหว่าง N-acetylglucosamine และ N-acetylmuramic acid ไลโซไซม์นั้นมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 14.3 kDa มีค่า pI เท่ากับ 10.7 ประกอบด้วยกรดอะมิโน 129 ตัว มีพันธะไดซัลไฟด์ 4 หมู่ แต่ไม่มีหมู่ซัลไฟดริลอิสระ (Mine, 1995) การใช้ความร้อนในการยับยั้งเอนไซม์นี้ขึ้นอยู่กับ pH และอุณหภูมิ โดยไลโซไซม์จะถูกทำลายมาก

ขึ้น ถ้า pH มากกว่า 7 ขึ้นไป และถูกทำลายให้เสียสภาพที่อุณหภูมิประมาณ 70-75 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับ pH และสถานะของสารละลาย (Mine, 1995; Stadelman and Cotterill, 1995)

3.6 อะวิดิน (Avidin)

อะวิดินเป็นไกลโคโปรตีนที่ประกอบด้วยกรดอะมิโน 128 ตัว มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 68.3 kDa ค่า pI เท่ากับ 10.0 และมีพันธะไดซัลไฟด์ 1 พันธะ สามารถทนความร้อนได้ดี โดยมีอุณหภูมิเสียสภาพเท่ากับ 85 องศาเซลเซียส สามารถจับกับไบโอติน (biotin) ซึ่งเป็นวิตามินที่มนุษย์ต้องการ โดยพบว่าอะวิดิน 1 โมเลกุลสามารถจับกับไบโอตินได้ 4 โมเลกุล สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะวิดินและไบโอตินนั้นสามารถทนความร้อนได้ดีที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ดังนั้นการที่จะนำไบโอตินมาใช้ได้นั้นจะต้องให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงเกินกว่า 100 องศาเซลเซียส จึงจะเกิดการสลายพันธะระหว่างอะวิดินและไบโอติน นอกจากนี้อะวิดินยังสามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ได้อีกด้วย เนื่องจากอะวิดินสามารถที่จะจับกับแบคทีเรียทั้งแกรมบวกและแกรมลบได้ (Stadelman and Cotterill, 1995)

3.7 โอวโกลบูลิน (Ovoglobulin)

โอวโกลบูลิน มีอยู่ประมาณร้อยละ 4 ของโปรตีนไข่ขาว พบว่า ประกอบด้วยโปรตีน 3 ส่วน คือ G_1 , G_2 และ G_3 โดยที่ G_1 นั้นต่อมาได้ระบุว่าเป็นไลโซไซม์ ส่วน G_2 และ G_3 นั้นยังมีการศึกษาค่อนข้างน้อย เมื่อวิเคราะห์ด้วย Sodium dodecyl-polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) นั้น พบว่า G_2 และ G_3 เป็นสารไกลโคโปรตีน มีค่า pI เท่ากับ 5.5 และ 4.8 ตามลำดับ และพบว่าเป็นสารที่ช่วยในการเกิดฟองได้ดี (foaming agent) ช่วยในการขึ้นฟูในผลิตภัณฑ์ขนมอบ (Mine, 1995; Stadelman and Cotterill, 1995)

3.8 โอวอินฮิบิเตอร์ (Ovoinhibitor)

โอวอินฮิบิเตอร์เป็นสารประกอบประเภทไกลโคโปรตีน มีอยู่ร้อยละ 1.5 ของไข่ขาว ทั้งหมด ประกอบด้วยเฮกโซสร้อยละ 3.5 และเฮกโซซามีนร้อยละ 2.7 สามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ทริปซิน และเอนไซม์ไคโมทริปซินได้ดีพอ ๆ กับเอนไซม์ย่อยโปรตีนของราและแบคทีเรีย (fungal and bacterial protease) (Stadelman and Cotterill, 1995)

3.9 โอโวฟลาโวโปรตีน (Ovoflavoprotein)

โอโวฟลาโวโปรตีน มีอยู่ร้อยละ 0.8 ของโปรตีนไข่ขาว จัดเป็นสารประกอบประเภท ฟอสโฟไกลโคโปรตีน มีมวลโมเลกุลประมาณ 32 kDa และมีค่า pI เท่ากับ 4.0 ประกอบด้วย คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 15 และฟอสฟอรีน มีน้ำตาลแมนโนสร้อยละ 6 กาแลคโตสร้อยละ 1.3 กลูโค-ซามีนร้อยละ 11.2 สามารถจับกับไรโบฟลาวิน (riboflavin) ที่พบในไข่ขาวไว้ทั้งหมดในอัตราส่วน 1 : 1 และทำหน้าที่ในการขนถ่ายไรโบฟลาวินจากน้ำเลือดไปยังไข่ขาว (Stadelman and Cotterill, 1995)

ตารางที่ 4 สมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนไข่ขาวจากไข่ไก่

ชนิดโปรตีน	สมบัติเชิงหน้าที่
โอวัลบูมิน	ช่วยในการจับตัวเป็นก้อน
โอโวทรานส์เฟอร์รินส์	สามารถจับอนุมูลโลหะได้ (chelating agent)
โอโวมิวคอยด์	ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ทริปซิน
โอโวมิวซิน	เป็นสารช่วยในการเกิดฟอง
ไลโซไซม์	ยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแกรมลบ
อะวิดิน	สามารถจับไบโอติน และแบคทีเรียได้
โอโวไกลบูลิน	เป็นสารช่วยในการขึ้นฟูในผลิตภัณฑ์ขนมอบ
โอโวอินฮิบิเตอร์	ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ทริปซิน และโคโมทริปซิน
โอโวฟลาโวโปรตีน	สามารถจับไรโบฟลาวิน

ที่มา : Stadelman and Cotterill (1995)

4. การจัดระดับคุณภาพของไข่

ราคาไข่จะขึ้นลงตามฤดูกาล ในต่างประเทศ เช่น ยุโรป อเมริกา ซึ่งนิยมบริโภคไข่นั้น ราคาจะแปรตามขนาดและคุณภาพภายในของไข่ แต่สำหรับประเทศไทยการซื้อขายไข่ภายในประเทศนั้นราคาแปรตามขนาดของไข่เป็นสำคัญ คุณภาพภายในไข่ยังไม่ได้ได้รับความสนใจ บ่อยครั้งที่พบว่า

ไข่ที่ซื้อเพื่อบริโภคจะไม่สด บางทีพบจุดเลือดจุดเนื้อในไข่ หรือพบว่าไข่มีกลิ่นซึ่งไม่ใช่กลิ่นธรรมชาติของไข่เป็นต้น การจัดระดับคุณภาพไข่นั้นอาจทำได้ 2 ลักษณะด้วยกัน คือ

4.1 จัดตามขนาด เป็นการแบ่งตามขนาดหรือน้ำหนักไข่ สุวรรณ (2529) กล่าวถึงการจัดมาตรฐานไข่ไก่ในสหรัฐอเมริกาไว้ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 น้ำหนักมาตรฐานของไข่ไก่ในสหรัฐอเมริกา

ขนาด	น้ำหนักอย่างน้อย (ออนซ์/โหล)	น้ำหนัก (กรัม/ฟอง)
ไข่ใหญ่พิเศษ	30	77.7
ไข่ใหญ่มาก	27	69.9
ไข่ใหญ่	24	62.2
ไข่ขนาดกลาง	21	54.4
ไข่เล็ก	19	46.6
ไข่จิ๋ว	15	38.9

ที่มา : สุวรรณ (2529)

4.2 จัดตามลักษณะคุณภาพ ซึ่งจะพิจารณาจัดเกรดตามคุณภาพที่สำคัญ ดังนี้

4.2.1 คุณภาพภายนอก พิจารณาจากรูปร่างของไข่ กล่าวคือ ไข่รูปทรงปกติควรมีปลายด้านหนึ่งป้าน และข้างหนึ่งแหลมมน ผิวเปลือกค่อย ๆ ลาดมาทางด้านแหลม เปลือกเกลี้ยง ไม่สกปรก และแตกร้าวหรือมีรอยขีด (check) บนเปลือก ซึ่งจะทำให้เปลือกแตกได้ง่าย

4.2.2 คุณภาพภายในซึ่งตรวจโดยวิธีส่องไฟ (Candling) ใช้แสงไฟประมาณ 60 วัตต์ขึ้นไป เมื่อส่องได้ฟองไข่จะทำให้เห็นคุณภาพภายในฟองไข่ได้ คุณภาพที่พิจารณา คือ ตำแหน่งและขนาดของช่องอากาศ ตำแหน่งและเงาไข่แดง ความหนาแน่นของไข่ขาว และจุดเลือดและจุดเนื้อในไข่

4.2.3 คุณภาพเมื่อต่อไข่ออกดู วิธีนี้ใช้การสุ่มตัวอย่างไข่มารวบรวมเพื่อเป็นการยืนยันคุณภาพของไข่แต่ละเกรด ผู้ตรวจจะต่อไข่ใส่ภาชนะที่แบนเพื่อดูการกระจายของไข่ขาว และความหนืดของไข่แดง มีการคมกลืนเพื่อตรวจหาความผิดปกติของการดูดซับกลืนและการเน่าเสีย ไข่ที่มีคุณภาพดีควรมีไข่แดงที่นูนตั้ง ไข่ขาวเกาะตัวไม่กระจายแผ่กว้าง และมีกลิ่นตามธรรมชาติของไข่ บางครั้งอาจทำการตรวจวัดความสูงของไข่ขาวหรือไข่แดง โดยใช้เครื่องมือ เช่น ฮอฟฟ์เกจ (Haugh gage) ซึ่งเป็นเครื่องมือมาตรฐานสำหรับวัดคุณภาพภายในของไข่ ค่าที่ได้จะเป็นค่าสำเร็จแสดงเป็นฮอฟฟ์ยูนิต (Haugh Unit) มีสเกลตั้งแต่ 0 – 100 สามารถใช้ในการแบ่งระดับคุณภาพของไข่ได้ โดยไข่ที่มีคุณภาพดีจะมีค่าฮอฟฟ์ยูนิตอยู่ระหว่าง 72 – 100 เครื่องฮอฟฟ์เกจนั้นประกอบด้วยไมโคร-มิเตอร์ที่มีขาหยั่ง 3 ขา แผ่นกระจกเรียบ ทำการวัดโดยการชั่งไข่ให้ทราบน้ำหนักต่อ 1 โหล หมุนเลื่อนขอบหน้าปิดตามน้ำหนักไข่ที่ชั่งได้ ต่อไข่อ้อย ๆ เทลงบนกระจก แล้วกดฮอฟฟ์เกจวางลงไปให้ปลายไมโครมิเตอร์อยู่ส่วนบนของไข่ขาว ห่างจากไข่แดงออกมา 3/8 นิ้ว หรือกึ่งกลางระหว่างไข่แดงกับขอบไข่ขาวชั้น ค่อย ๆ หมุนปุ่มเลื่อนปลายไมโครมิเตอร์ลงไปจนพอดีจรดกับผิวไข่ขาว อ่านค่าเป็นฮอฟฟ์ยูนิตจากหน้าปิดได้ทันที โดยไข่ใหม่จะมีไข่ขาวชั้นหนา ค่าฮอฟฟ์ยูนิตที่ได้ก็จะสูง ส่วนไข่เก่าไข่ขาวจะอ่อน และแบนกว่า ดังนั้นค่าฮอฟฟ์ยูนิตที่ได้จึงต่ำกว่า (สุวรรณ, 2529)

ค่าฮอฟฟ์ยูนิต เป็นค่าสากลมีค่าตั้งแต่ 0 – 100 เป็นค่าสำเร็จ ซึ่งคำนวณโดยอาศัยความสัมพันธ์ของความสูงของไข่ขาวกับน้ำหนักไข่ ดังนี้

$$H.U. = 100 \log \left(\frac{H - \sqrt{G} (30 W^{0.37}) - 100}{100} + 1.9 \right)$$

โดยที่

H.U. = ฮอฟฟ์ยูนิต

H = ความสูง (มิลลิเมตร) ของไข่ขาวชั้นที่ตำแหน่งซึ่งห่างจากขอบไข่แดงประมาณ 3/8 นิ้ว

G = 32.2

W = น้ำหนักของไข่ (กรัม)

4.2.4 คุณภาพเมื่อไข่สุก ซึ่งใช้การสุ่มตัวอย่างมารวบรวมเช่นเดียวกับข้อ 4.2.3 โดยนำไข่มาต้มหรือทอด และพิจารณาดำแหน่งของไข่แดง ไข่ที่ดีควรมีไข่แดงอยู่กลางฟอง

5. การเปลี่ยนแปลงภายในไ้ระหว่างการเก็บรักษา

ในระหว่างที่เก็บรักษาไ้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับไ้ขาว ไ้แดง และเปลือกไ้ ซึ่งมีผลให้สมบัติของไ้เปลี่ยนไปจากไ้สด การเปลี่ยนแปลงนี้จะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นกับสภาวะของการเก็บรักษา การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกล่าวโดยสรุปได้ดังนี้

5.1 การระเหยของน้ำและการสูญเสียก๊าซจากภายในไ้ ซึ่งเป็นผลให้ช่องอากาศของไ้มีขนาดใหญ่ขึ้น การระเหยของน้ำจะมาจากน้ำในไ้ขาว ส่วนก๊าซมาจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ในไ้ อัตราการระเหยขึ้นกับอุณหภูมิ และความชื้นในบรรยากาศที่เก็บรักษาไ้ รวมทั้งระยะเวลาของการเก็บรักษา ความหนาของเปลือก และขนาดของไ้ การสูญเสียก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากภายในไ้ทำให้ pH ของไ้สูงขึ้นอาจสูงถึง 9.7 ในไ้ขาว ซึ่งมีส่วนช่วยกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในไ้เร็วขึ้น

5.2 การเคลื่อนไ้ของน้ำภายในไ้ ปริมาณน้ำในชั้นต่าง ๆ ของไ้ขาวจะแตกต่างกัน และต่างจากไ้แดง ทำให้เกิดการเคลื่อนไ้ของน้ำเข้าสู่ไ้แดง เมื่อไ้แดงพองตัวขึ้นเยื่อหุ้มไ้แดงก็จะขยายตัวออก ทำให้เยื่อนี้ค่อย ๆ บาง และหมดความเหนียวลง ถ้าความทนทานแรงกด (breaking strength) ของเยื่อนี้ลดลงถึง 2500 ไลต์ต่อตารางเซนติเมตร เวลาที่ไ้ออกจากเปลือกลงบนพื้นเรียบ ไ้แดงจะแตก เพราะเยื่อหุ้มไ้แดงหมดความเหนียว รักษารูปทรงไว้ไม่ได้อีกต่อไป

5.3 ไ้ขาวชั้นเปลี่ยนเป็นไ้ขาวใส เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของโปรตีนในไ้ขาวที่สำคัญ คือ โอโวมิวซิน ซึ่งมีเส้นใยมิวซินอยู่มาก ไ้ขาวชั้น และข้าวยัดไ้แดงก็อ่อนตัวลงเช่นเดียวกัน โดยปรากฏการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นในเวลาเดียวกันกับการเพิ่มขึ้นของ pH ซึ่งความเข้มข้นของมิวซินถูกทำลายในเบสอ่อน ดังนั้นความเป็นเบสของไ้ขาวจึงน่าจะเป็นตัวละลายเส้นใยมิวซิน ทำให้ไ้ขาวเหลวเป็นน้ำ นอกจากนี้ในการส่องไ้เมื่อหมุนฟองไ้จึงเห็นการเคลื่อนไ้ที่และเงาของไ้แดงอย่างชัดเจน การเปลี่ยนแปลงของไ้ขาวชั้นนี้เปิดโอกาสให้แบคทีเรียเจริญในไ้ได้ง่าย

5.4 การเสื่อมเสียโดยจุลินทรีย์ จากการศึกษาถึงชนิดของโปรตีนในไ้ขาวพบว่า โปรตีนหลายตัวมีส่วนช่วยในการทำลายจุลินทรีย์ซึ่งเข้ามารุกรานไ้ แต่ถ้าปริมาณจุลินทรีย์ที่เข้าสู่ไ้มีมาก การต้านทานนี้จะทำให้ไ้ไม่สมบูรณ์ไ้จึงอาจเสียได้ การผ่านเข้ามาของจุลินทรีย์นี้เข้ามาทางรูเปลือกไ้ซึ่งปกติจะมีนวลไ้ช่วยปิดรูเปลือกไ้ไม่ให้เส้นทางผ่านของจุลินทรีย์ การที่นวลไ้หลุดหายไปเนื่องจากการถูหรือขัดสีบริเวณเปลือกไ้จึงเป็นการเปิดช่องทางสำหรับการรุกรานของจุลินทรีย์

5.5 การดูดกลืนที่ไม่ต้องการ เนื่องจากความเป็นรูปนูนของเปลือกไข่ จึงทำให้สารโมเลกุลเล็ก ๆ ผ่านเข้าออกได้ ดังนั้นถ้าเก็บไข่ไว้ในสภาพแวดล้อมที่มีกลิ่นฉุนจะเกิดการซึมผ่านของกลิ่นนั้นเข้าสู่ไข่ ทำให้เกิดกลิ่นที่ผิดธรรมชาติขึ้นได้ (สุวรรณ, 2529)

6. ฟิล์มและสารเคลือบบริโภคได้

แผ่นฟิล์ม (film) โดยทั่วไปจะหมายถึงฟิล์มแผ่นเดี่ยว ๆ (stand-alone) โดยมากจะใช้โครงสร้างของฟิล์มในการพิจารณาสมบัติในด้านการขวางกั้น (barrier properties) สมบัติด้านเชิงกล (mechanical properties) สมบัติการละลาย (solubility property) และสมบัติในด้านอื่น ๆ ของฟิล์ม การใช้ฟิล์มนั้นจะใช้ในรูปของการคลุม (covers) การห่อ (wraps) หรือการทำเป็นชั้น ๆ (separation layers) ซึ่งสามารถนำไปขึ้นรูปทำเป็นไส้เทียม (casing) แคปซูล (capsules) หรือถุง (pouches) ได้โดยสามารถปรับความหนาของแผ่นฟิล์มได้ ส่วนสารเคลือบ (coating) นั้นเป็นการเกิดแผ่นบาง ๆ โดยตรงบนผิวหน้าของวัตถุ และจะยังคงอยู่บนผลิตภัณฑ์ตลอดการใช้งานและการบริโภค ซึ่งนำมาใช้กับอาหารด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น การห่อหุ้ม (enrobing) การจุ่ม (dipping) การแปรง (brushing) หรือการพ่นฝอย (spraying) เพื่อกั้นมิให้ก๊าซ ไอ-ระเหย และสารละลายเข้าหรือออกจากอาหารได้ ถ้าตลอดกระบวนการผลิตใช้โปรตีน และวัตถุ-เจือปนอาหารชนิดที่รับประทานได้ ได้แก่ ชนิดของพลาสติกไซเซออร์ กรดหรือเบส เกลือและเอนไซม์โดยมีกระบวนการที่ทำให้โปรตีนเกิดการเสียสภาพ (denature) ได้แก่ ความร้อน การปรับ pH การเติมเกลือ (salt-addition) การดัดแปลงโดยใช้เอนไซม์ และการกำจัดน้ำออกไป ฟิล์มและสารเคลือบที่ได้นั้นก็จะสามารถรับประทานได้ (edible) (Krochta, 2002)

6.1 สมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของฟิล์มและสารเคลือบบริโภคได้

ฟิล์ม และสารเคลือบบริโภคได้ มีสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของสารต่าง ๆ กัน ดังนี้

6.1.1 การป้องกันการซึมผ่านความชื้น ฟิล์มที่มีสมบัตินี้มีการนำไปใช้กันอย่างกว้างขวางเพื่อควบคุมปริมาณความชื้นและกิจกรรมของอาหารที่มีองค์ประกอบหลายอย่าง หรือมีส่วนผสมของธาตุอาหาร ซึ่งมีอิทธิพลต่อคุณภาพทางจุลชีววิทยา ทางกายภาพ ทางเคมี และลักษณะทางประสาทสัมผัสของอาหาร

6.1.2 การป้องกันการซึมผ่านของก๊าซ พลาสติกที่มีสมบัตินี้จะช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ของอาหาร เพื่อลดการเกิดกลิ่นเหม็นหืนและการสูญเสียวิตามิน อย่างไรก็ตาม กรณีฟิล์มและสารเคลือบที่ใช้กับผักและผลไม้สด ควรจะยอมให้มีการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน และการรับอนไดออกไซด์ได้ในระดับที่เหมาะสม

6.1.3 การป้องกันการซึมผ่านของลิพิดและสารถูกละลาย พลาสติกที่มีสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของลิพิดจะช่วยลดการซึมผ่านของน้ำมัน/ไขมันเข้าไปในอาหารได้ ส่วนฟิล์มที่มีสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของสารถูกละลาย มีการนำไปใช้ในช่องของการเก็บรักษาเนื้อสัตว์แช่แข็ง และอาหารทะเลในน้ำเกลือ หรือระหว่างการทำแห้งด้วยออสโมติกของขึ้นผักและผลไม้ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องเคลือบด้วยฟิล์มก่อนจึงจะสามารถลดการซึมผ่านของสารถูกละลายได้ (Matholuthi, 1994)

6.2 ข้อดีของฟิล์มและสารเคลือบบริโภคนได้

ข้อดีของฟิล์มบริโภคนได้ที่เหนือกว่าฟิล์มพลาสติก จากการรวบรวมของ Gennadios and Weller (1990) มีดังนี้ คือ

6.2.1 สามารถบริโภคนได้พร้อมกับผลิตภัณฑ์ จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

6.2.2 เพิ่มคุณภาพทางประสาทสัมผัส ชวนให้ผลิตภัณฑ์น่ารับประทานมากขึ้น และสามารถเข้ากันได้ดีกับสารประกอบ

6.2.3 เสริมคุณค่าทางโภชนาการ โดยเฉพาะฟิล์มที่ทำจากโปรตีน

6.2.4 ใช้หุ้มอาหารโดยแยกออกเป็นแต่ละชิ้น เช่น ถั่ว สตรอเบอร์รี่

6.2.5 ใช้เป็นแผ่นกั้นระหว่างอาหารที่มีองค์ประกอบต่างกัน เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพ เนื่องจากการถ่ายเทความชื้นและไขมันในเนื้ออาหารที่แตกต่างกัน เช่น พืชฯ พาย เป็นต้น

6.2.6 ทำหน้าที่เป็นตัวพาหะ (carrier) สำหรับสารป้องกันจุลินทรีย์และสารกันหืน นอกจากนี้ยังช่วยควบคุมอัตราการซึมผ่านของสารกันเสียและสารกันหืนจากฟิล์มเข้าสู่เนื้ออาหาร

6.2.7 สามารถทำฟิล์มให้เป็นเม็ดแคปซูล เพื่อบรรจุสารให้กลิ่นรส และสารทำให้ขึ้นฟู (leavening agent) ได้ เพื่อควบคุมการเติมสารเหล่านี้ลงในอาหารให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

6.3 ชนิดของฟิล์มบิโกลได้

สารที่ใช้ทำฟิล์มบิโกลได้มีหลายชนิด เช่น โพลีแซ็กคาไรด์ โปรตีน และลิพิด ฟิล์มที่ผลิตขึ้นอาจใช้สารชนิดเดียว หรือใช้สารหลายชนิดร่วมกัน โดยนำคุณลักษณะเด่นของสารแต่ละชนิดมาใช้ประโยชน์ ตัวอย่างฟิล์มที่มีองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น ฟิล์มที่มีสตาร์ช และอัลจินต หรือมีสตาร์ช วุ้น ลิพิด และไฮโดรคอลลอยด์ เป็นต้น สารหลายชนิดที่นำมารวมกันเป็นฟิล์มบิโกลได้จะทำให้ฟิล์มมีสมบัติในการห่อหุ้มอาหารที่ดี ทำให้อาหารมีลักษณะทางประสาทสัมผัสที่น่ารับประทาน และยังช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการอีกด้วย (Kester and Fennema, 1986; Krochta, 2002)

6.4 การเกิดฟิล์มโปรตีน

ฟิล์มโปรตีนมักเกิดจากการที่โปรตีนละลาย หรือกระจายตัวในตัวทำละลาย ซึ่งตัวทำละลายที่ใช้มักเป็นน้ำ เอทานอล หรือเอทานอลผสมน้ำ และทำการแยกสารนั้นออกจากตัวทำละลาย ในสายของโปรตีนนั้นมีส่วนที่เป็นทั้งส่วนที่ชอบไขมัน (lipophilic) และส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) พันธะหรือปฏิกริยาระหว่างสายโปรตีนจะทำให้เกิดการเกาะกันของฟิล์ม โดยมีทั้งพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) พันธะไอออนิก (ionic bond) และพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) ดังนั้น โครงสร้างของโปรตีน และชนิดของกรดอะมิโนในสายโปรตีนจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการเกาะกันของฟิล์ม ซึ่งในการเกิดฟิล์มนั้นจะมีแรง 2 ชนิดที่มีส่วนเกี่ยวข้อง คือ แรงโคฮีชัน (cohesion) เป็นแรงระหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์ด้วยกันเองจะเกิดขึ้นระหว่างการเกิดฟิล์ม ทำให้เกิดการเชื่อมต่อนของผิววัตถุเดียวกัน สร้างพันธะที่แข็งแรงซึ่งจะช่วยป้องกันหรือต้านทานการแยกจากกัน ปัจจัยที่มีผลต่อแรงโคฮีชัน ได้แก่ โครงสร้างและสมบัติทางเคมีของพอลิเมอร์ ระบบการละลาย และสภาวะในการเตรียมฟิล์ม โดยแรงโคฮีชันมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุล ความสม่ำเสมอของโครงสร้างสายโซ่ การแผ่กิ่งก้านสาขา และการกระจายของกลุ่มที่มีขั้วบนสายพอลิเมอร์ คือ สายพอลิเมอร์ที่ยาวทำให้เกิดการยึดเกาะกันได้ดี การกระจายของกลุ่มที่มีขั้วอย่างเป็นระเบียบในสายพอลิเมอร์ จะช่วยให้เกิดพันธะ ไอออนิกระหว่างสายโซ่ทำให้มีความแข็งแรง การละลายของพอลิเมอร์ในการเตรียม

ฟิล์มยังมีผลต่อแรงโคฮีชัน คือ ถ้าโมเลกุลของพอลิเมอร์ละลายหรือขยายตัวได้มากที่สุด จะได้โครงสร้างซึ่งเชื่อมกันด้วยแรงโคฮีชันที่มาก ฟิล์มที่ได้มีความแข็งแรง ส่วนสภาวะในการเตรียมนั้น ควรเตรียมฟิล์มโดยใช้สารละลายที่อุ่น และทำให้ฟิล์มแห้งโดยใช้ความร้อนที่เหมาะสม เพราะถ้าใช้อุณหภูมิสูงอาจทำให้อัตราการระเหยของตัวทำละลายเร็วเกินไป โมเลกุลของพอลิเมอร์ถูกตรึงก่อนที่จะเชื่อมกันอย่างสมบูรณ์ทำให้เกิดรูเข็ม (pinhole) หรือทำให้ฟิล์มมีความหนาไม่สม่ำเสมอ ซึ่งทำให้การซึมผ่านฟิล์มของสารต่าง ๆ เพิ่มขึ้น ระดับของแรงโคฮีชันมีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์ม ได้แก่ ความอัดแน่น (compactness) ความหนาแน่น ความรูพรุน (porosity) การซึมผ่าน (permeability) ความยืดหยุ่น (flexibility) และความเปราะเป็นต้น ส่วนแรงอีกชนิดหนึ่ง คือ แรงแอดฮีชัน (adhesion) เป็นแรงระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์กับพลาสติกไซเซออร์ ซึ่งจะมีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มเช่นกัน (Banker, 1966)

โดยทั่วไปสมมติฐานของกลไกในการเกิดฟิล์มโปรตีนนั้นจะเกี่ยวข้องกับพันธะไดซัลไฟด์ภายใน และระหว่างโมเลกุล (intra- and intermolecular S-S bonds) ที่สภาวะเป็นด่างเกิดการสลายพันธะไดซัลไฟด์ในโมเลกุลเป็นหมู่ซัลไฮไดรล ดังนั้นโปรตีนจึงกระจายตัวดีขึ้น ในช่วงให้ความร้อนจะช่วยในการคลายเกลียว (unfold) ของสายโปรตีน ทำให้หมู่ซัลไฮไดรล และหมู่ไฮโดรโฟบิก (hydrophobic group) ต่าง ๆ นั้นหันออกมาด้านนอก ดังนั้นในช่วงของการแข็งตัว และการทำแห้งนั้น หมู่ซัลไฮไดรลก็จะกลับมาสร้างพันธะไดซัลไฟด์ทั้งภายในโมเลกุลและระหว่างโมเลกุล โดยเกิดการออกซิเดชัน และเกิดการสร้างพันธะระหว่างหมู่ซัลไฮไดรลและพันธะไดซัลไฟด์ (sulfhydryl-disulfide interchange reaction) (Mine, 1992; Gennadios *et al.*, 1996) ทำให้เกิดโครงสร้างร่างแห 3 มิติ

6.5 การขึ้นรูปฟิล์ม

การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ การขึ้นรูปที่รวดเร็วเป็นที่ต้องการในแง่อุตสาหกรรม แต่จะต้องควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสม เพื่อให้ฟิล์มขึ้นรูปไม่เร็วเกินไป มิฉะนั้นฟิล์มที่ได้จะไม่สม่ำเสมอ ผิวหน้าขรุขระและแตกง่าย (Banker, 1966)

6.5.1 วิธีเทสารละลายลงบนวัสดุต่าง ๆ (solvent casting) ในปี 1989 Kester and Fennema ทำการขึ้นรูปฟิล์มจากเซลลูโลสอีเทอร์ และไขมันบนแผ่นกระจก โดยวิธีโครมาโตกราฟีแบบแผ่นบาง (thin-layer chromatography) และนำไปทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

Gennadios *et al.* (1996) ทำการเตรียมฟิล์มจากสารละลายไข่ขาวจากไข่ไก่ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 9 ในสภาวะที่เป็นเบส (pH 11.25) มีการเติมกลีเซอรอล (glycerol) ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของโปรตีน พอลิเอทิลีนไกลคอล (polyethylene-glycol-400; PEG-400) และซอร์บิทอลที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 50 และ 60 โดย น้ำหนักของโปรตีน เป็นพลาสติกไซเซออร์ ให้ความร้อนสารละลายไข่ขาวที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที และขึ้นรูปฟิล์มโดยการเทลงบนแผ่นกระจกที่เคลือบด้วยเทฟลอน (Teflon) จากนั้นทิ้งให้แข็งตัว (solidification) ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่อุณหภูมิห้อง ประมาณ 5 – 6 ชั่วโมง ก่อนที่จะทำให้แห้งโดยสมบูรณ์ในตู้อบที่ควบคุมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ซึ่งจากการทดลอง พบว่า ฟิล์มที่เติมซอร์บิทอล และพอลิเอทิลีนไกลคอล-400 นั้น จะให้ค่าการต้านทานแรงดึงขาดสูงกว่าฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์ที่ทุกระดับความเข้มข้น โดยที่ฟิล์มที่เติมพอลิเอทิลีนไกลคอล-400 เป็นพลาสติกไซเซออร์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 60 จะให้ค่าร้อยละการยืดตัวสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 88.1 และฟิล์มที่เติมซอร์บิทอลที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 50 นั้นจะให้ค่าการซึมผ่านของไอน้ำต่ำที่สุดเท่ากับ 4.90 กรัม.มิลลิเมตรต่อตารางเมตร.ชั่วโมง.กิโลปาสกาล

Handa *et al.* (1999a) ได้ใช้เทคนิคนี้ในการเตรียมฟิล์มบรีโกลได้จากโปรตีนไข่ขาว โดยนำไข่ขาวผงที่ผ่านการทำให้แห้งโดยวิธีพ่นฝอย (spray-dried egg white) มาเตรียมเป็นสารละลายความเข้มข้น 9 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตรในน้ำกลั่น เติม silicone oil ร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักโปรตีนไข่ขาว และใช้พอลิเอทิลีนไกลคอล-400 ความเข้มข้นร้อยละ 60 โดยน้ำหนักโปรตีนไข่ขาว เป็นพลาสติกไซเซออร์ ซึ่ง silicone oil นั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันการเกิดโฟม (anti-foaming agent) ปรับ pH ของสารละลายให้อยู่ในช่วง 10.5 – 11.5 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้น 2 นอร์มัล และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นขึ้นรูปฟิล์มบนแผ่นเทฟลอน และทำแห้งที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 พบว่าฟิล์มที่ระดับ pH 11.5 นั้นจะให้ค่าการต้านทานแรงดึงขาด และค่าร้อยละการยืดตัวสูงกว่าฟิล์มที่ระดับ pH 10.5 อย่างมีนัยสำคัญ โดยฟิล์มที่ระดับ pH 11.5 นั้นจะมีค่าการต้านทานแรงดึงขาดและร้อยละการยืดตัวเท่ากับ 5.13 เมกะปาสกาล และร้อยละ 40.6 ตามลำดับ ส่วนฟิล์มที่ระดับ pH 10.5 นั้นมีค่าการต้านทานแรงดึงขาด และร้อยละการยืดตัวเท่ากับ 4.27 เมกะปาสกาล และร้อยละ 26.4 ตามลำดับ

6.5.2 วิธีเอ็กซ์ทรูชัน (extrusion) ใช้เคซีน (collagen casing) และฟิล์มที่ใช้สำหรับห่อหุ้มผลิตภัณฑ์เนื้อนั้นถูกผลิตโดยการเอ็กซ์ทรูดคอลลาเจนที่มีความเป็นกรด มีลักษณะเป็น

ของเหลวชั้นหนืด ลงในอ่างที่ทำให้เกิดการจับตัวเป็นก้อน และมีสภาพเป็นกลาง จากนั้นทำการล้างและเติม พลาสติกไซเซอร์ และทำแห้ง อย่างไรก็ตามการทำเอ็กซ์ทรูชันนี้ก็เป็นวิธีที่น่าสนใจในการทำเปลือกหุ้มและฟิล์มจากโปรตีน เพื่อต้องการหลีกเลี่ยงการเติมและการกำจัดตัวทำละลายโดยการทำแห้ง บางงานวิจัยแนะนำว่าโปรตีนบางชนิดมีลักษณะเป็นเทอร์โมพลาสติก แม้ว่าการศึกษาลักษณะการเป็นเทอร์โมพลาสติกของโปรตีนนั้นยังไม่กว้างขวางนัก แต่ในการผลิตฟิล์มโปรตีนบริโภคนได้โดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูชันแบบดั้งเดิมก็ประสบความสำเร็จ และมีประสิทธิภาพตลอดจนพัฒนาไปในระดับการค้า อย่างไรก็ตามการตีพิมพ์ในด้านนี้ก็ยังไม่แพร่หลายนัก (Krochta, 2002)

Redl *et al.* (1999) ทำการขึ้นรูปฟิล์มกลูเตนโดยวิธีเอ็กซ์ทรูชัน เติมกลีเซอรอลร้อยละ 34.6 โดยน้ำหนักเป็นพลาสติกไซเซอร์ เอ็กซ์ทรูชันจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นช่องใส่กลูเตน และกลีเซอรอลให้ผสมเข้ากัน ส่วนที่ 2 ที่ผนังจะมีการให้ความร้อน ทำให้เกิดการหลอมละลายบางส่วน และส่วนที่ 3 เป็นช่วงที่มีการหลอมละลายอย่างสมบูรณ์ โดยผนังจะมีอุณหภูมิสูงถึง 80 องศาเซลเซียส และขับออกผ่านทางหน้า die ซึ่งจะขยายตัวถึงร้อยละ 200 ฟิล์มที่ได้มีลักษณะผิวเรียบ

6.5.3 วิธีการทำแห้งด้วยลูกกลิ้ง (drum drier) Hullinger (1965) รายงานว่ามีการผลิตฟิล์มบริโภคนได้จากสตาร์ช เรียกว่า ออบเลตฟิล์ม ซึ่งเตรียมจากการผสมสตาร์ชข้าวเจ้า กับกัมจากพืชเล็กน้อย ทำให้เป็นเพสต์เจือจางแล้วนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มบนลูกกลิ้งร้อน 103-108 องศาเซลเซียส หมุนด้วยความเร็ว 70 - 110 วินาทีต่อรอบ นำฟิล์มที่ได้มาทำแห้งด้วยลมร้อนจนมีความชื้นร้อยละ 13 ฟิล์มมีลักษณะปรากฏเป็นดวง ๆ บางมาก เปราะแตกง่าย เมื่อเก็บรักษาโดยไม่ควบคุมความชื้น

6.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม

6.6.1 โครงสร้างของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์ส่วนใหญ่มีลักษณะกิ่งก้านกิ่งงอพื้นฐาน มีส่วนน้อยที่เป็นผลึกทั้งหมดหรืออสัณฐานทั้งหมด โครงร่างตาข่ายของพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกสูงจะแข็งแรงกว่าโครงร่างตาข่ายของพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกต่ำ เนื่องจากการจัดตัวของสายพอลิเมอร์มีระเบียบทำให้โมเลกุลใกล้ชิดกันมาก และมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างพอลิเมอร์กับพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นพันธะทุติยภูมิ เช่น พันธะไฮโดรเจนจำนวนมาก ส่วนพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกต่ำจะมีการจัดตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ไม่เป็น

ระเบียบ เนื่องจากพอลิเมอร์พวกนี้เกิดปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์กับพอลิเมอร์ได้น้อยกว่าจึงทำให้โครงร่างตาข่ายมีความแข็งแรงน้อยกว่า แต่มีความยืดหยุ่นมากกว่าโครงร่างตาข่ายของพอลิเมอร์ที่มีดีกรีความเป็นผลึกสูง การขึ้นรูปฟิล์มต้องการพอลิเมอร์สายโซ่เพื่อทำให้โครงร่างตาข่ายของฟิล์มมีความแข็งแรง และความแข็งแรงของฟิล์มเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ที่ใช้เป็นโครงร่างตาข่ายของฟิล์มยาวขึ้น (Banker, 1966)

6.6.2 ตัวทำละลาย

การเลือกตัวทำละลายสำหรับพอลิเมอร์ อาจพิจารณาจากค่า dielectric constant กล่าวคือ พอลิเมอร์ที่มีค่า dielectric constant สูง จะละลายได้ดีในตัวทำละลายที่มีค่า dielectric constant สูง พอลิเมอร์ที่มีค่า dielectric constant ต่ำ จะละลายได้ดีในตัวทำละลายที่มีค่า dielectric constant ต่ำ พอลิเมอร์พวกรพุนพันธะเกลือไอออนซึ่งมีความมีขั้วสูง จะละลายได้ดีในตัวทำละลายที่มีความมีขั้วสูง เช่น น้ำ ไกลคอล และแอลกอฮอล์ เป็นต้น ส่วนพอลิเมอร์ซึ่งสายโซ่มีทั้งส่วนที่มีความมีขั้วสูง และส่วนที่มีความมีขั้วต่ำ จะละลายในตัวทำละลายผสมที่มีตัวทำละลายที่มีความมีขั้วและตัวทำละลายที่มีความมีขั้วต่ำได้ดีกว่าละลายในตัวทำละลายชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงชนิดเดียว การละลายของพอลิเมอร์ในตัวทำละลายจะเริ่มเห็นได้จากการที่ พอลิเมอร์อุ่มตัวทำละลายเข้าไปเป็นส่วนหนึ่งของ polymer domain ทำให้เกิดการพองตัว และในกรณีที่พอลิเมอร์ซึ่งมีประจุหรือเกิดไอออนได้บนสายโซ่โมเลกุลในตัวทำละลายนั้น ซึ่งเรียกว่า polyelectrolyte ถ้าประจุบนสายโซ่โมเลกุลเป็นชนิดเดียวกัน แรงผลักระหว่างประจุจะทำให้สายโซ่โมเลกุลกระจายตัวได้ในตัวทำละลายนั้น (Banker, 1966)

6.6.3 ความเข้มข้นของสารละลาย

การเกิดโครงร่างตาข่ายที่แข็งแรงต้องมีการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ที่เพียงพอในตัวทำละลาย สารละลายพอลิเมอร์ที่มีความเข้มข้นต่ำ มีผลให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้มาก เกิดการพันกันระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ แต่ก็เกิดการแยกตัวของโครงร่างตาข่ายบางส่วนที่เกิดขึ้นก่อนแล้วตกตะกอนไปก่อน จึงได้โครงร่างตาข่ายที่ไม่แข็งแรง ส่วนสารละลายพอลิเมอร์ที่มีความเข้มข้นสูงจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์กับพอลิเมอร์น้อย สายโซ่พอลิเมอร์ขยายตัวได้น้อย การพันกันระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์เกิดได้น้อยจึงทำให้โครงร่างตาข่ายไม่แข็งแรงเช่นเดียวกัน (Banker, 1966)

6.6.4 อุณหภูมิที่ใช้ระเหยตัวทำละลาย

การให้ความร้อนแก่สารละลายพอลิเมอร์เพื่อระเหยตัวทำละลายนั่น ขณะให้ความร้อนโมเลกุลจะเคลื่อนที่แบบ Brownian หลังจากนั้นทำสารละลายให้เย็น ซึ่งทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่ช้าลง และเกิดปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์กับพอลิเมอร์ ซึ่งอาจเกิดการพันกันของสายพอลิเมอร์ หรืออาจเกิดปฏิกิริยาทางเคมี การเกิดปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์กับพอลิเมอร์นี้ทำให้เกิดเป็นโครงร่างตาข่าย ถึงแม้ว่าการให้ความร้อนแก่สารละลายมีผลต่อการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ และปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์กับพอลิเมอร์ก็ตาม แต่ปริมาณความร้อนที่ใช้ก็มีขอบเขตจำกัด กล่าวคือ การใช้ความร้อนสูงมากจนเกิดการระเหยของตัวทำละลายอย่างรวดเร็ว ทำให้สารละลายพอลิเมอร์มีความเข้มข้นสูงมาก โมเลกุลของพอลิเมอร์หยุดการเคลื่อนที่ก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยาระหว่าง พอลิเมอร์กับพอลิเมอร์ทำให้เกิดได้น้อย ดังนั้นโครงร่างตาข่ายจึงไม่แข็งแรง ในทางตรงกันข้าม การใช้ความร้อนต่ำเพื่อระเหยตัวทำละลายอย่างช้า ๆ ทำให้สารละลายพอลิเมอร์มีความเข้มข้นต่ำมาก ทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์บางส่วนเกิดการตกตะกอนอย่างช้า ๆ แล้วแยกออกจากกลุ่มโมเลกุลที่ตกตะกอนเร็วกว่า และเกิดโครงร่างตาข่ายไปก่อนแล้ว จึงได้โครงร่างตาข่ายที่ไม่แข็งแรง (Banker, 1966)

นอกจากพอลิเมอร์กับตัวทำละลายแล้ว การขึ้นรูปฟิล์มส่วนใหญ่จะมีการเติมพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) มีผลทำให้คุณภาพทางกายภาพของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลง เนื่องจากพันธะทุติยภูมิระหว่างพอลิเมอร์กับพลาสติกไซเซอร์ ทำให้เกิดผลต่อเนื่องดังต่อไปนี้ ปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์กับพอลิเมอร์ลดลง เกิดการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์สูงขึ้น ความต้านทานแรงดึงของฟิล์มลดลง ดังนั้นการเติมพลาสติกไซเซอร์ จึงทำให้ได้ฟิล์มมีลักษณะไม่เปราะ และมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น (Guilbert, 1986)

7. พลาสติกไซเซอร์กับฟิล์มบริโกลได้

7.1 ความหมาย หน้าที่ สมบัติ และชนิดของพลาสติกไซเซอร์

พลาสติกไซเซอร์ เป็นวัตถุเจือปนชนิดหนึ่งที่ใช้ในการผลิตฟิล์ม โดยมีสมบัติในการรวมเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ที่ใช้ทำฟิล์ม ระเหยได้ยาก จุดเดือดสูง อาจจะละลายในตัวทำละลายได้ดี เพื่อมิให้เกิดการแยกตัวของพลาสติกไซเซอร์ระหว่างการทำฟิล์มให้แห้ง แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ พลาสติกไซเซอร์ภายนอก (external plasticizer) เป็นสารที่เติมลงไปในโครงสร้างพอลิ-

เมอร์แล้วทำให้เกิดสารเชิงซ้อน หรือการจับกลุ่มของโมเลกุล เนื่องจาก พลาสติกไซเซอร์ไปยึดจับกับพอลิเมอร์ ทำให้แรงระหว่างโมเลกุลของสายพอลิเมอร์ที่อยู่ใกล้กันอ่อนลง เกิดโครงสร้างที่อ่อนตัว และพลาสติกไซเซอร์ภายใน (internal plasticizer) เป็นสารที่เติมลงไปแล้วทำหน้าที่เป็นสารร่วมช่วยในการเกิดพอลิเมอร์ (copolymerization) (Guilbert, 1986)

หน้าที่ของพลาสติกไซเซอร์ คือ จะทำให้แรงระหว่างโมเลกุลของสายพอลิเมอร์ที่อยู่ติดกันนั้นอ่อนลง เป็นผลให้ค่าการต้านทานแรงดึงขาดลดลง พิล์มมีความยืดหยุ่นมากขึ้นและช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์ม นอกจากนี้ผลจากการที่โครงสร้างฟิล์มจับกันแบบหลวมทำให้การซึมผ่านของก๊าซและไอรระเหยต่าง ๆ เพิ่มขึ้น (Kester and Fennema, 1986)

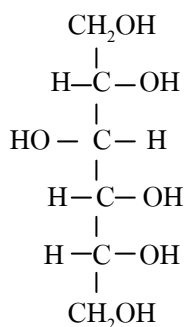
พลาสติกไซเซอร์ไม่ให้กลิ่นรสหรือให้กลิ่นรสน้อยมาก และมีระดับความคงตัวของฟิล์มสูง สมบัติอื่น ๆ เช่น ความคงตัวทางเคมี สีส กลิ่นรส โดยจะมีความสำคัญมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของฟิล์ม ความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอร์จะอยู่ประมาณร้อยละ 10-60 ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของฟิล์ม ชนิดของฟิล์ม และลักษณะการนำไปใช้ (Guilbert, 1986)

ฟิล์มบริโภคนได้จะมีลักษณะเช่นเดียวกับฟิล์มพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ คือ ประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลสูง และสารทำละลาย นอกจากนี้ยังมีพลาสติกไซเซอร์เป็นองค์ประกอบสำคัญ (Mahmoud and Savello, 1992) เพื่อทำหน้าที่ปรับปรุงสมบัติของฟิล์มให้มีความยืดหยุ่นเพียงพอ ไม่แตกหักระหว่างการนำไปใช้ และการเก็บรักษา พลาสติกไซเซอร์ที่นำมาใช้จะต้องได้รับอนุญาตจากคณะกรรมการอาหารและยา (FDA) โดยมีการพิสูจน์และยอมรับแล้วว่าไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคทั้งในระยะเฉียบพลันและในระยะยาว พลาสติกไซเซอร์ที่นำมาใช้กับฟิล์มบริโภคนได้มีหลายประเภท ได้แก่ โมโน ไค และโอลิโกแซ็กคาไรด์ พอลิออล และลิพิด หรืออนุพันธ์ของลิพิด

พอลิออล (polyols) หรือพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ เป็นอนุพันธ์ของน้ำตาลซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลเข้าแทนที่หมู่คีโตนหรือแอลดีไฮด์ พอลิออลบางชนิดพบในผลไม้เฉพาะพวกที่มีคาร์บอน 6 อะตอม เช่น ซอร์บิทอล หรือสามารถผลิตจากปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน (hydrogenation) ให้กับน้ำตาล พอลิออลมีสมบัติคงทนต่อสารเคมีและความร้อนได้ดีจึงไม่สลายตัวง่าย ดูดซับและเก็บความชื้นได้ดี ละลายน้ำ มีรสหวานน้อยกว่าน้ำตาล มีแคลอรีเพียง 2.4 กิโลแคลอรีต่อกรัม เนื่องจากถูกดูดซึมได้ช้ามาก จึงสามารถใช้กับผู้ป่วยโรคเบาหวานได้ นอกจากนี้ยังไม่ทำให้ฟันผุ เพราะแบคทีเรียในปากไม่สามารถใช้ได้ JECFA (Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives) กำหนดปริมาณการบริโภคต่อวัน (ADI) ของพอลิออลเป็น “not specified” หมายถึง สามารถใช้ได้ในระดับ

ที่จำเป็นต่อกระบวนการแปรรูป เพื่อให้ได้อาหารที่มีคุณลักษณะตามต้องการ อย่างไรก็ตามพอลิแอลกอฮอล์อาจมีผลให้ระบายท้อง ดังนั้นผู้ใหญ่ไม่ควรบริโภคเกิน 60-80 กรัมต่อวัน และเด็กอายุ 5-16 ปี ไม่ควรบริโภคเกิน 30-40 กรัมต่อวัน (Le Bot and Gouy, 1995)

ซอร์บิทอล (sorbitol) เป็นพอลิแอลกอฮอล์ที่มีคาร์บอน 6 อะตอม น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 182 โครงสร้างโมเลกุล (ดังภาพที่ 1) พบในผักและผลไม้หลายชนิด เช่น แอปเปิล แพร์ เชอร์รี่ เป็นต้น ในทางการค้าจะผลิตดี-ซอร์บิทอลจากการเร่งปฏิกิริยาเติมไฮโดรเจนของดี-กลูโคส ซึ่งได้จากการย่อยสลายพืชที่มีความบริสุทธิ์สูงด้วยเอนไซม์ ซอร์บิทอลเป็นผลึกสีขาว อยู่ในรูปของแอมโม-ซอร์บิทอล ซึ่งคงตัว (Gonze and Rapaille, 1992) มีรสหวานน้อยกว่าน้ำตาลครึ่งหนึ่ง ละลายน้ำได้ดี สารละลายที่ได้มีความหนืดต่ำ เป็นสารทำละลายน้ำมันที่ไม่ดี เมื่อใช้ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 - 60 สามารถรักษาความชื้นและคงลักษณะความยืดหยุ่นไว้ได้ (Le Bot and Gouy, 1995) ในปี 1994 McHugh *et al.* ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มจากเวย์โปรตีนโดยใช้ซอร์บิทอลเป็นพลาสติกไซเซอร



ภาพที่ 1 โครงสร้างของซอร์บิทอล

ที่มา : Le Bot and Gouy (1995)

พอลิเอทิลีนไกลคอล (polyethylene glycol) มีสูตรเคมีพื้นฐานทั่วไป คือ $\text{H}(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_n\text{OH}$ โดยที่ n มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 4 พอลิเอทิลีนไกลคอลมีลักษณะเป็นผลึกสีขาว หรืออยู่ในรูปของเหลวใส ไม่มีสี มีความชื้นหนืด ละลายน้ำได้ให้สารละลายใส เสื่อมเสียได้ยาก เนื่องจากเชื้อราไม่สามารถเจริญได้ มีความเป็นพิษต่ำ เช่น พอลิเอทิลีนไกลคอล 400 มีค่า n อยู่ระหว่าง 8.2-9.1 น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 380-420 อยู่ในรูปของเหลวข้นหนืด มีกลิ่นจาง ๆ วัตถุประสงค์การเปลี่ยนแปลงความชื้นเล็กน้อย (Windholz *et al.*, 1976) มีการศึกษาการใช้พอลิเอทิลีนไกลคอลเป็นพลาสติกไซเซอรในฟิล์มบริโภคได้เช่นเดียวกับพอลิแอลกอฮอล์อื่น ๆ (Park *et al.*, 1994; McHugh and Krochta, 1994a; 1994b)

7.2 บทบาทของพลาสติกไซเซออร์ในฟิล์มบริโกลได้

การเติมพลาสติกไซเซออร์ในระหว่างการเตรียมฟิล์มบริโกลได้นั้น ใช้วิธีการละลายโดยทั้งพลาสติกไซเซออร์ และพอลิเมอร์ละลายในตัวทำละลายชนิดเดียวกัน ระหว่างการละลายมีการกวนผสมพร้อมทั้งให้ความร้อนที่อุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมแล้วจึงนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม จากนั้นระเหยตัวทำละลายออกไปในสถานะที่ไม่รุนแรง การใช้พลาสติกไซเซออร์ลักษณะนี้เป็นแบบภายนอก (external) คือ เมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์ลงไปแล้วจะไปจับยึดกับพอลิเมอร์ด้วยพันธะเวเลนซ์ทุติยภูมิ (secondary valency) (Mellan, 1961) เกิดพันธะมีขั้ว หรือพันธะไฮโดรเจนอย่างหลวม ๆ ทำให้แรงระหว่างโมเลกุลของสายพอลิเมอร์ที่อยู่ใกล้กันอ่อนลง ซึ่งเกิดจากสาเหตุ 2 ประการ คือ อิทธิพลของความร้อนระหว่างการเตรียมสารละลายฟิล์มทำให้พลาสติกไซเซออร์สามารถแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างสายพอลิเมอร์ได้ง่ายขึ้น และพันธะไฮโดรเจน หรือแรงอื่น ๆ ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ถูกหักล้างไป และเกิดแรงดึงดูดที่แข็งแรงระหว่างพอลิเมอร์กับพลาสติกไซเซออร์ทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์ไม่สามารถจับกันเองได้ (Beerler and Fenney, 1983) ส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ลดความเปราะแตกง่าย การต้านทานแรงฉีกขาด (tear resistance) เพิ่มขึ้น แต่การต้านทานแรงดึงขาดลดลง นอกจากนี้พลังงานที่ใช้แยกสายโซ่พอลิเมอร์ที่อยู่ใกล้กัน ยังมีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ไปกระตุ้นการแพร่กระจายของก๊าซและไอให้ผ่านแผ่นฟิล์ม ดังนั้นเมื่อแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่ลดลงทำให้ค่า Ed (energy of activation for diffusion) ลดลง การซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำผ่านแผ่นฟิล์มจึงเพิ่มขึ้น (Banker, 1966)

7.3 ผลของพลาสติกไซเซออร์ต่อสมบัติของฟิล์มบริโกลได้

สมบัติของฟิล์มบริโกลได้ที่มีการเติมพลาสติกไซเซออร์ลงไปนั้น ขึ้นอยู่กับชนิด โครงสร้างทางเคมี ความเข้มข้นที่ใช้ และระดับการกระจายตัวของสารในฟิล์ม นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ รวมทั้งการเตรียมฟิล์มอีกด้วย (Kester and Fennema, 1986) สำหรับฟิล์มโพรตีน มีงานวิจัยหลายเรื่องที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลาสติกไซเซออร์เพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์ม Mahmoud and Savello (1992) รายงานผลของความเข้มข้นของกลีเซอรินในฟิล์มเวย์โพรตีนที่มีต่อค่าแรงที่ทำให้ฟิล์มแตก (breaking force) และปริมาณความชื้นของฟิล์ม โดยใช้กลีเซอรินความเข้มข้นร้อยละ 0.125, 0.25, 0.5, 1 และ 2 ของสารละลาย พบว่า ความเข้มข้นของกลีเซอรินมีอิทธิพลต่อค่าทั้งสองอย่างมีนัยสำคัญ คือ เมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรินเพิ่มขึ้น แรงที่ใช้ในการทำให้ฟิล์มแตกจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 100 ถึง 1900 กรัมต่อตารางเซนติเมตร และความชื้นเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 ถึงร้อยละ

การเตรียมแผ่นฟิล์มบางชนิดอาจต้องเติมสารอิมัลซิไฟเออร์ เพื่อทำให้เกิดความคงตัวของอิมัลชัน ซึ่งสารดังกล่าวอาจมีผลให้สารบางชนิดผ่านแผ่นฟิล์มที่เตรียมไว้ได้มากขึ้น ในการเตรียมฟิล์มอาจผสมสารชนิดต่าง ๆ ลงไปในสารที่ทำฟิล์ม เช่น สารกันหืน (antioxidant) สารต้านจุลชีพ (antimicrobial) แล้วห่อหุ้มอาหารที่จะเสื่อมสภาพ รวมทั้งยังสามารถเติมสารที่มีคุณค่าอาหาร สารให้รสชาติ หรือรงควัตถุผสมในการเตรียมฟิล์มด้วย แต่การเติมวัตถุเจือปนต่าง ๆ ให้ได้ผลดีนั้นต้องคำนึงถึงองค์ประกอบของวัตถุเจือปนเหล่านั้นด้วย เพราะอาจทำให้ฟิล์มลดความสามารถในการต้านทานไอระเหย หรือก๊าซ นอกจากนี้อิทธิพลของวัตถุเจือปนที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม ยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของวัตถุเจือปนที่ใช้ โครงสร้างทางเคมีของสาร และระดับการกระจายตัวของสารในฟิล์มด้วย (Kester and Fennema, 1986)

Gennadios *et al.* (1993c) พบว่า การใช้ไตรเอทิลีนไกลคอลแทนกลีเซอรอลในการเป็นพลาสติกไซเซอร์ในฟิล์มกลูเตน จะทำให้ค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากขนาดโมเลกุลของไตรเอทิลีนไกลคอลที่มีขนาดใหญ่กว่ากลีเซอรอล และมีความมีขั้วต่ำกว่า จึงเป็นการเพิ่มขนาดของ free volume และลดความมีขั้วของพันธะ และแรงในการยึดจับระหว่างสายพอลิเมอร์ (cohesive energy density) ของฟิล์ม

Gontard *et al.* (1993) ศึกษาผลของปริมาณกลีเซอรอลต่อค่าการต้านทานแรงที่มทะลุ (puncture strength) ของฟิล์มกลูเตน โดยใช้กลีเซอรอลปริมาณ 0 - 33.3 กรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง พบว่า เมื่อใช้กลีเซอรอลตั้งแต่ 15 กรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้งขึ้นไป ทำให้ค่าการต้านทานแรงที่มทะลุลดลงจาก 2 ถึง 0.25 นิวตัน และการเสียรูป (deformation) เพิ่มขึ้นจาก 5 ถึง 20 มิลลิเมตร ส่วนอัตราการซึมผ่านของไอน้ำเพิ่มขึ้นจาก 0.00345 ถึง 0.00545 กรัมต่อตารางเซนติเมตร.วัน

McHugh *et al.* (1994) รายงานผลของพลาสติกไซเซอร์ต่อการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มเวย์โปรตีนที่มีความหนาใกล้เคียงกัน โดยใช้พลาสติกไซเซอร์ 3 ชนิด คือ กลีเซอรอล ซอร์บิทอล และพอลิเอทิลีนไกลคอล ในความเข้มข้นต่างกัน คือร้อยละ 37.5 และร้อยละ 50 ของน้ำหนักของแข็งทั้งหมดในสารละลาย พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอร์เท่ากัน ฟิล์มที่ใช้ซอร์บิทอลจะมีค่าการซึมผ่านของไอน้ำต่ำกว่าการใช้พลาสติกไซเซอร์อีก 2 ชนิดอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อใช้พลาสติกไซเซอร์ชนิดเดียวกัน ถ้าความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น ค่าการซึมผ่านของไอน้ำจะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงการใส่กลีเซอรอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0 ถึง 60 ในฟิล์มเวย์โปรตีน พบว่า เมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ค่าการซึมผ่านของไอน้ำเพิ่มขึ้นจาก 0.6 ถึง 7.6 กรัม.มิลลิเมตรต่อตารางเมตร. ชั่วโมง.กิโลกรัมปาสคาล

Park and Chinnan (1995) ศึกษาสมบัติในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน และไอน้ำของฟิล์มเซอิน และฟิล์มกลูเตน โดยใช้กลีเซอรินเป็นพลาสติกไซเซอร์ พบว่า ทั้งฟิล์มเซอิน และฟิล์มกลูเตนนั้น มีค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนต่ำกว่าฟิล์มพลาสติก แต่ค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มจะมีค่าสูงกว่าฟิล์มพลาสติกทั่วไป เช่น ฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์ โดยฟิล์มเซอินที่ได้จากการทดลองนั้นมีค่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 3.11×10^{-3} มิลลิลิตร.มิลลิเมตรต่อตารางเมตร.วัน.กิโลปาสกาล ซึ่งมีค่าสูงกว่าฟิล์มเซอินที่เตรียมได้จากการทดลองของ Gennadios *et al.* (1993b) เนื่องจากอัตราส่วนของกลีเซอรินต่อโปรตีนนั้นสูงกว่าอัตราส่วนที่ใช้ในการทดลองของ Gennadios *et al.* (1993b) คือ 0.26 และ 0.2 ตามลำดับ จึงส่งผลให้มีค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนที่สูงกว่า ส่วนค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มกลูเตนนั้นมีค่าอยู่ในช่วง 0.95×10^{-3} ถึง 2.42×10^{-3} มิลลิลิตร.มิลลิเมตรต่อตารางเมตร.วัน.กิโลปาสกาล นอกจากนี้ระดับของ พลาสติกไซเซอร์ที่ใช้ยังส่งผลต่อการเกิดฟองอากาศ และการเกิดรูเข็มของฟิล์ม ซึ่งก็จะส่งผลต่อไปยังการซึมผ่านของฟิล์มอีกด้วย

Gennadios *et al.* (1996) ศึกษาสมบัติของฟิล์มที่เตรียมจากโปรตีนไข่ขาวจากไข่ไก่ ผสมพลาสติกไซเซอร์กลีเซอรอลความเข้มข้นร้อยละ 30 40 และ 50 พอลิเอทิลีนไกลคอล-400 และซอร์บิทอลความเข้มข้นร้อยละ 50 และ 60 โดยน้ำหนักของโปรตีน พบว่า ฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลความเข้มข้นร้อยละ 30 นั้นจะให้ค่าการต้านทานแรงดึงขาดสูงที่สุด เท่ากับ 4.12 เมกะปาสกาล ในขณะที่เดียวกันก็จะให้ค่าร้อยละการยืดตัวต่ำที่สุดเท่ากับร้อยละ 12.4 ส่วนฟิล์มที่เติมพอลิเอทิลีนไกลคอล-400 ความเข้มข้นร้อยละ 60 นั้นจะให้ค่าร้อยละการยืดตัวสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 88.1 ส่วนฟิล์มที่เติมซอร์บิทอลความเข้มข้นร้อยละ 50 มีค่าการซึมผ่านของไอน้ำต่ำที่สุดเท่ากับ 4.90 กรัม.มิลลิเมตรต่อตารางเมตร.ชั่วโมง.กิโลปาสกาล

Miller and Krochta (1997) พบว่าโดยทั่วไปค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มบริโภคนได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งฟิล์มโปรตีนนั้นจะมีค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากโครงสร้างทางพอลิเมอร์นั้นเหมาะสม โดยในช่วงของการเกิดฟิล์มนั้นมีการเกิดความเป็นผลึก การจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์ หรือการเกิดการเชื่อมข้าม ทำให้ลดความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม ซึ่งการปรับปรุงโครงสร้างของพอลิเมอร์ร่วมกับการเลือกใช้พลาสติกไซเซอร์ที่เหมาะสมนั้นสามารถที่จะผลิตฟิล์มบริโภคนได้ที่มีสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดีเท่ากับฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVDC) และฟิล์มเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์ (EVOH)

Lim *et al.* (1998) ศึกษาสมบัติด้านการต้านทานแรงดึงขาด และการซึมผ่านของก๊าซ ออกซิเจนของฟิล์มโปรตีนไข่ขาวที่ใช้เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส โดยทำการปรับ pH ของ สารละลายไข่ขาวเท่ากับ 10.5 และเติมกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ จากนั้นปรับ pH ของ สารละลายไข่ขาวลงอย่างช้า ๆ ที่ pH เท่ากับ 8.2 เพื่อเติมเอนไซม์ ฟิล์มที่ได้มีความใส โปร่งแสง ไม่มีสี เมื่อนำมาวัดค่าการต้านทานแรงดึงขาด พบว่า ค่าการต้านทานแรงดึงขาดจะขึ้นกับความชื้น สัมพัทธ์ และปริมาณกลีเซอรอลที่เติมลงไป โดยเมื่อปริมาณกลีเซอรอล และปริมาณความชื้น สัมพัทธ์เพิ่มขึ้น ค่าการต้านทานแรงดึงขาดจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากทั้งน้ำ และกลีเซอรอล นั้นสามารถที่จะเป็นตัวพลาสติกไซเซอร์ได้อย่างดี และเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่าร้อยละ 70 ก็จะ ส่งผลให้ฟิล์มมีค่าการต้านทานแรงดึงขาดต่ำกว่า 2 เมกะปาสคาล เนื่องจากฟิล์มนั้นดูดซับน้ำจาก บรรยากาศ ส่วนการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนนั้นจะขึ้นกับระดับความชื้นสัมพัทธ์ โดยค่าการซึม ผ่านก๊าซออกซิเจนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อระดับความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้าง ร่างแหโปรตีนของฟิล์มนั้นดูดซับน้ำเอาไว้ ซึ่งน้ำนั้นจะไปเพิ่มช่องว่างให้กับตัวพอลิเมอร์ และลดค่า T_g ของฟิล์มอีกด้วย นอกจากนี้การที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณน้ำและโอกาส ที่จะเกิดเป็นหยดน้ำขนาดใหญ่ ซึ่งเหมาะแก่การละลายของก๊าซออกซิเจน ก็จะเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่า การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนโดยรวมเพิ่มมากขึ้น

Ayranci and Tunc (2003) ศึกษาค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มเมทิล-เซลลูโลสที่มีการเติมกรดสเตียริก กรดแอสคอร์บิก และกรดซิตริกลงไปในฟิล์ม เพื่อลดการเกิด ออกซิเดชันในอาหารสด พบว่า ค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการ เติมกรดสเตียริก 15 กรัมต่อเมทิลเซลลูโลส 100 กรัมลงไป ในขณะที่ค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิ-เจนของฟิล์มจะมีค่าลดลงเมื่อเติมกรดแอสคอร์บิก หรือกรดซิตริกลงไป เนื่องจากกรดสเตียริกนั้น เป็นกรดไขมันซึ่งมีความไม่มีขั้วสูง ก๊าซออกซิเจนสามารถละลาย และแพร่กระจายภายในฟิล์มได้ดี ทำให้ค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนสูง นอกจากนี้อาจเกิดรูเข็มในโครงสร้างคริสตัลของฟิล์ม เมื่อ ปริมาณกรดสเตียริกเพิ่มสูงขึ้น

Talens and Krochta (2005) ศึกษาสมบัติเชิงกลในด้านการต้านทานแรงดึงขาด และ สมบัติด้านการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มเวย์โปรตีน โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ใน อัตราส่วน 1:1, 1.5:1, 2:1, 2.5:1 และ 3:1 (โปรตีน:กลีเซอรอล) และศึกษาผลของการเป็นพลาสติกไซ เซอร์ของไขผึ้ง (beeswax) และไขคาร์นูบาร์ (carnuba wax) พบว่า ค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มจะ เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น เนื่องจากกลีเซอรอลจะไปลดการสร้างพันธะไฮโดรเจน ระหว่างสายพอลิเมอร์ และยังเป็นการเพิ่มช่องว่างระหว่างโมเลกุล (intermolecular spacing) ส่งผลให้

ฟิล์มมีความกรอบเปราะลดลง และเป็นการเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านของฟิล์มอีกด้วย และเมื่อปริมาณกลีเซอรอลที่ใช้มีปริมาณต่ำเกินไป (อัตราส่วน 3:1) พบว่า ฟิล์มจะกรอบเปราะ และเกิดการม้วนระหว่างการทำให้แห้ง ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถวัดค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มได้ ส่วนในด้านของสมบัติเชิงกลนั้น พบว่า เมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 28 เป็นร้อยละ 40 ค่าการต้านทานแรงดึงขาดจะลดลงจาก 11.2 เป็น 2.9 เมกะปาสคาล แต่ค่าร้อยละการยืดตัวจะเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อมีการเติมไขลงไป พบว่า ทั้งไขผึ้ง และไขคาร์นูบาร์จะสามารถลดค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มได้ นอกจากนี้ไขผึ้งยังส่งผลในการเป็นพลาสติกไซเซอร์ด้วย โดยจะไปลดค่าการต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์ม เพิ่มความยืดหยุ่นให้กับฟิล์ม และช่วยลดปริมาณของกลีเซอรอลที่ใช้ได้

Thomazine *et al.* (2005) ศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มเจลาติน โดยใช้กลีเซอรอลผสมซอร์บิทอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ในอัตราส่วน 0:100, 20:80, 40:60, 60:40, 80:20 และ 0:100 พบว่า เมื่อปริมาณความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอร์เพิ่มขึ้นจาก 25 เป็น 55 กรัม (พลาสติกไซเซอร์ต่อเจลาติน 100 กรัม) ฟิล์มมีความยืดหยุ่นมากขึ้น และค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มก็จะเพิ่มสูงขึ้น เมื่ออัตราส่วนของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ฟิล์มจะมีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าร้อยละการยืดตัวสูงขึ้นจากร้อยละ 5.89 (อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอล 0:100) เป็นร้อยละ 37.45 (อัตราส่วนกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอล 100:0) เนื่องจากมวลโมเลกุลของกลีเซอรอลนั้นต่ำกว่าซอร์บิทอล ซึ่งสามารถแทรกตัวในโครงสร้างร่างแหโปรตีนได้ดีกว่า และเกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ข้างของกรดอะมิโนได้ดีกว่า จึงเป็นการลดการสร้างพันธะระหว่างโปรตีนด้วยกัน ซึ่งก็จะส่งผลกระทบต่อค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม ทำให้ฟิล์มมีค่าการซึมผ่านไอน้ำสูงขึ้น จาก 12.92 เป็น 16.90 กรัม.มิลลิเมตรต่อตารางเมตร.วัน.กิโลปาสคาล เมื่ออัตราส่วนกลีเซอรอลต่อซอร์บิทอลนั้นเพิ่มจาก 0:100 เป็น 100:0

8. สมบัติของฟิล์มบริโภคได้จากโปรตีน

ในการเปรียบเทียบฟิล์มชนิดต่าง ๆ ควรทำด้วยความระมัดระวัง ค่าที่รายงานโดยนักวิจัยบ่อยครั้งจะวัดด้วยวิธีการ เครื่องมือและปัจจัยในการทดสอบที่ต่างกัน ฟิล์มจากโปรตีนมีหมู่ที่ชอบน้ำจึงดูดซับความชื้นได้ สภาวะของฟิล์มก่อนการทดสอบถือเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อสมบัติของฟิล์ม (Gennadios *et al.*, 1994)

8.1 สมบัติของฟิล์มบริโกลได้

8.1.1 การซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor permeability)

การซึมผ่านของไอน้ำ คือ อัตราที่ไอน้ำผ่านพื้นที่ 1 หน่วยวัสดุแผ่นราบที่ระดับความหนาหนึ่ง ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำระหว่างพื้นผิวทั้งสองด้าน 1 หน่วย ภายใต้อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์เฉพาะ (ASTM, 1996) การซึมผ่านของฟิล์มไม่ควรนำมาสับสนกับการส่งผ่านทางช่องว่าง (pore) ซึ่งการซึมผ่านที่แท้จริงประกอบด้วย กระบวนการละลาย และการกระจายตัว ซึ่งไอที่ละลายซึ่งอยู่ที่ด้านหนึ่งของฟิล์มจะทะลุผ่านไปอีกด้านหนึ่ง ซึ่งวัสดุบรรจุที่ป้องกันไอน้ำได้นั้น ควรมีค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำไม่เกิน 0.17 – 0.25 กรัมต่อตารางเมตร.ซั้วโมง (งามทิพย์, 2538)

$$\text{การซึมผ่านของไอน้ำ} = \frac{(\text{ปริมาณไอน้ำ}) (\text{ความหนาของฟิล์ม})}{(\text{พื้นที่ฟิล์ม}) (\text{เวลา}) (\text{ความแตกต่างของความดันไอน้ำ})}$$

8.1.2 การซึมผ่านของก๊าซ (Gas Permeability)

นักวิจัยให้ความสนใจการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ เพราะก๊าซเหล่านี้เกี่ยวข้องกับอัตราการเกิดออกซิเดชันและการหายใจของอาหารที่ถูกห่อหุ้ม

ฟิล์มโพรตีนจะมีสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้ดี โดยเฉพาะที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซจะเพิ่มขึ้นด้วย ฟิล์มเวย์โพรตีนมีความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนต่ำ แม้ที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง (McHugh and Krochta, 1994a) โดยทั่วไปวัสดุบรรจุที่ป้องกันก๊าซได้ดีมาก (high gas barrier) ควรมีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนไม่เกิน 0.08 มิลลิลิตรต่อตารางเมตร.ซั้วโมง.บรรยากาศ ส่วนวัสดุบรรจุที่ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดีพอควร จะมีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนประมาณ 0.83 – 1.25 มิลลิลิตรต่อตารางเมตร.ซั้วโมง.บรรยากาศ (งามทิพย์, 2538)

8.1.3 ความหนา (Thickness)

ความหนา คือ ระยะตั้งฉากระหว่างผิวหน้าทั้งสองของฟิล์ม มีหน่วยเป็น ไมโครเมตร หรือมิลลิเมตร ความหนามีส่วนสัมพันธ์กับสมบัติอื่น ๆ เช่น การต้านทานแรงดึงขาด การซึมผ่านไอน้ำ และการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน เป็นต้น (Guilbert, 1986)

8.1.4 ค่าการต้านทานแรงดึงขาด (Tensile strength)

ค่าการต้านทานแรงดึงขาด คือ ค่าความเครียดที่ใช้ในการดึงฟิล์มที่ปลายข้างใดข้างหนึ่งของแผ่นทดสอบที่มีความกว้างคงที่ จนแผ่นฟิล์มนั้นขาดภายใต้สภาวะการทดสอบที่กำหนด มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร ค่านี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของพันธะระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ มากกว่าความแข็งแรงของสายโซ่พอลิเมอร์ นอกจากนี้การเติมพลาสติกไซเซอร์ในโครงสร้างตาข่ายก็มีผลให้ความแข็งแรง และค่าการต้านทานแรงดึงขาดลดลง เมื่อเทียบกับฟิล์มที่ไม่ได้เติมพลาสติกไซเซอร์ ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะพลาสติกไซเซอร์ที่เติมลงไปในการละลายพอลิเมอร์ จะไปลดปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์กับพอลิเมอร์ แล้วพลาสติกไซเซอร์จับกับพอลิเมอร์ด้วยพันธะทุติยภูมิทำให้ความแข็งแรงระหว่างสายโซ่โมเลกุลลดลง (Guilbert, 1986)

8.1.5 การยืดตัว (Elongation)

การยืดตัว คือ ร้อยละของระยะทางที่ฟิล์มยืดออกด้วยแรงดึงจนขาดต่อความยาวเดิม ถ้าความยืดของฟิล์มน้อย ฟิล์มมีลักษณะเปราะและไม่ยืดหยุ่น การเติมพลาสติกไซเซอร์ในโครงสร้างตาข่ายนอกจากจะทำให้ค่าการต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มลดลงแล้ว ยังมีผลทำให้ความยืดฟิล์มเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากพลาสติกไซเซอร์ทำให้ความแข็งแรงของพันธะระหว่างสายโซ่โมเลกุลลดลง สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้มากขึ้น (Guilbert, 1986)

8.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการซึมผ่าน

8.2.1 ลักษณะทางเคมีของพอลิเมอร์ (Chemical nature of the polymer)

ลักษณะทางเคมี มีบทบาทสำคัญต่อสมบัติในการต้านไขมันของฟิล์มบรีโอกได้ ตัวอย่างเช่น พอลิเมอร์ที่มีประจุ (โพรตีน และพอลิแซ็กคาไรด์) ซึ่งมีพันธะไฮโดรเจนมาก จะมีผล

ทำให้ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซต่ำที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ หมู่ของพอลิเมอร์ที่มีขี้วมมาก ซึ่งประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl) จะมีสมบัติในการต้านการซึมผ่านของไอน้ำต่ำ ในทางตรงกันข้าม พวกที่ไม่มีขี้ว เช่น ไขมันจะมีสมบัติในการต้านการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี แต่สมบัติในการต้านการซึมผ่านของก๊าซจะต่ำ ตารางที่ 6 แสดงผลของหมู่ต่าง ๆ ที่มีผลต่อความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Ashley, 1985)

ฟิล์มที่มีสมบัติในการป้องกันก๊าซออกซิเจนได้ดี จะมีโครงสร้างที่ทำให้เกิดสายพอลิเมอร์ที่แข็งแรง ยกเว้นคลอไรด์ (Cl) ซึ่งเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำ เป็นผลให้เกิดการดูดซับน้ำที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง ๆ ได้ค่าสัมประสิทธิ์การละลายของพอลิเมอร์เหล่านี้สูง เป็นผลให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำสูง ยิ่งไปกว่านั้นการดูดซับน้ำจะทำลายโมเลกุลภายใน ทำให้เกิดการแพร่กระจายของน้ำอย่างรวดเร็ว (McHugh and Krochta, 1994b)

8.2.2 โครงสร้างของพอลิเมอร์ (Structural Nature of the polymer)

โครงสร้างของสายพอลิเมอร์มีบทบาทสำคัญต่อความสามารถในการซึมผ่านของฟิล์ม สายพอลิเมอร์ที่เป็นเส้นตรง เช่น พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene) มีการจับกันของสายพอลิเมอร์ที่แข็งแรง ทำให้ความสามารถในการซึมผ่านต่ำ สายพอลิเมอร์ที่จับกันอย่างหลวม ๆ จะทำให้การซึมผ่านเพิ่มขึ้น (Ashley, 1985)

ความเป็นระเบียบของพอลิเมอร์ มีผลต่อความสามารถในการซึมผ่าน โครงสร้างที่เป็นระเบียบจะจับตัวกันแน่น และมีแนวโน้มที่ทำให้ความสามารถในการซึมผ่านลดลง (McHugh and Krochta, 1994b)

8.2.3 ธรรมชาติของตัวซึมผ่าน (Nature of permeant)

ธรรมชาติของตัวซึมผ่านมีผลต่อการส่งผ่านฟิล์ม โมเลกุลขนาดเล็กสามารถแพร่กระจายได้เร็วกว่าโมเลกุลใหญ่ สายโมเลกุลที่เป็นเส้นตรงแพร่กระจายได้เร็วกว่าโมเลกุลใหญ่ที่มีขนาดเท่ากันแต่ไม่เป็นเส้นตรง โมเลกุลที่มีขี้วจะแพร่กระจายได้เร็วกว่าโมเลกุลที่ไม่มีขี้ว (Pascat, 1985)

ตารางที่ 6 ผลของ functional groups ต่อความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

functional groups –X(CH ₂ -CHX)	ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ^a
-OH	0.01
-CN	0.04
-Cl	8.00
-F	15.0
-COOCH ₃	17.0
-CH ₃	150.0
-C ₆ H ₅	420.0
-H	480.0

หมายเหตุ ^a ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน มีหน่วยเป็น cm³.mil/d.100in².atm

ที่มา : McHugh and Krochta (1994b)

9. ฟิล์มบริโกลได้กับการใช้ประโยชน์

มีการนำฟิล์มบริโกลได้มาใช้ประโยชน์ในหลายด้าน ดังนี้คือ

9.1 การป้องกันก๊าซ สมบัติในการเป็นตัวป้องกันก๊าซของฟิล์มเป็นสิ่งที่น่าสนใจมาก สามารถนำฟิล์มที่เป็นตัวป้องกันออกซิเจนมาใช้ในการป้องกันการเกิดออกซิเดชันในอาหาร (การเกิดกลิ่นหืน การสูญเสียวิตามินจากการออกซิไดซ์และอื่น ๆ) ในทางตรงกันข้ามความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซสูง เป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการเคลือบผักและผลไม้สด โดยเฉพาะความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การพัฒนาฟิล์มให้มีสมบัติยอมให้ก๊าซบางชนิดเลือกผ่าน เช่น ก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซเอทรีลีน เป็นต้น ทำให้สามารถควบคุมการหายใจและการเจริญของจุลินทรีย์ได้ (Gennadios, 2002)

9.2 การป้องกันความชื้น การเคลื่อนผ่านของความชื้น เนื่องจากความดันไอน้ำ หรือความเข้มข้นขององค์ประกอบต่างๆ มีผลต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัส และทางจุลินทรีย์ภายในผลิตภัณฑ์อาหาร ตัวอย่างเช่น ลูกเกด ลูกอม ผลิตภัณฑ์ที่เคลือบช็อกโกแลต แครกเกอร์ บิสกิต หรือพิซซ่า อาจเกิดลักษณะที่ไม่ต้องการ ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง

Allen (1963) ใช้สารเคลือบจากแป้งข้าวโพด และแอลจินเตเคลือบผลิตภัณฑ์เนื้อพบว่าสามารถลดการสูญเสียความชื้นได้ร้อยละ 40-48

Kester and Fennema (1989) ศึกษาการใช้ฟิล์มลิพิดเซลลูโลส เพื่อป้องกันการซึมผ่านความชื้นในระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แช่แข็ง พบว่า แผ่นฟิล์มมีประสิทธิภาพในการป้องกันการซึมผ่านความชื้นในระหว่างการเก็บรักษาได้อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์แช่แข็งที่ไม่ได้ใช้แผ่นฟิล์ม

Berberat and Wissgott (1993) ศึกษาการลดการเคลื่อนที่ของความชื้นระหว่างองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์อาหาร โดยการใช้สารเคลือบที่เตรียมจากสารผสมของไข่ขาวร้อยละ 3 - 12 โปรตีนนม (milk protein) ร้อยละ 3 - 18 และ สตาร์ชพรีเจลาติไนซ์ (pre-gelatinized starch) ร้อยละ 7 - 12 โดยชั้นบาง ๆ ของสารผสมเหล่านี้จะถูกทา หรือพ่นลงบนผิวหน้าของโดพิซซ่า (pizza dough) จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 – 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ถึง 120 วินาที เพื่อให้แข็งตัว หลังจากการให้ความร้อนองค์ประกอบต่าง ๆ ของพิซซ่าที่มีความชื้นสูง เช่น แฮม ชีส ผักและซอสมะเขือเทศจะถูกวางลงบนโด ซึ่งการให้ความร้อนนั้นมีความสำคัญต่อการพัฒนาลักษณะทางด้านความไม่ชอบน้ำ และคุณลักษณะด้านการป้องกันการซึมผ่านของสารเคลือบได้

9.3 การป้องกันไขมันและน้ำมัน

Gold (1969) ได้ทดลองใช้ฟิล์มเซลลูโลสกับมันฝรั่งทอดและหอมทอด พบว่า ฟิล์มเซลลูโลสสามารถด้านการดูดซับน้ำมันได้ร้อยละ 10-15 ในขณะที่ทอด

Balasubramaniam *et al.* (1997) ศึกษาประสิทธิภาพของฟิล์มไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลสที่เคลือบลูกชิ้นไก่ (chicken ball) ในการรักษาความชื้น และลดปริมาณไขมันในระหว่างการทอด พบว่า ลูกชิ้นที่มีการเคลือบแผ่นฟิล์ม ภายหลังการทอดปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 16.4 และปริมาณไขมันลดลงร้อยละ 33.7 เมื่อเปรียบเทียบกับลูกชิ้นที่ไม่ได้มีการเคลือบแผ่นฟิล์ม

Rayner *et al.* (2000) ได้พัฒนา และประยุกต์ฟิล์มบริโกลไค์ที่เตรียมจากโปรตีนถั่วเหลืองเพื่อลดการดูดซับน้ำมันในอาหารทอด พบว่า สามารถลดการดูดซับน้ำมันได้ถึงร้อยละ 55.12

Albert and Mittal (2002) ทำการเปรียบเทียบสารเคลือบชนิดต่าง ๆ 11 ชนิด ที่มีต่อการลดการดูดซับไขมันในอาหารทอด ได้แก่ เจลาติน แคปทา-คาร์จีแนนผสมคอนยัค โคลัสปีนัม ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส เพกติน โซเดียมเคซิเนท โปรตีนถั่วเหลือง กลูเตน เวย์โปรตีน และ เจลลันกัม โดยจุ่มชิ้นอาหารในสารละลายที่เตรียมไว้ ควบคุมเวลาในการจุ่ม เพื่อให้สารเคลือบมีความหนาเท่ากัน ทอดเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นซับน้ำมันที่ผิวออก พบว่า สารเคลือบทุกชนิดนั้น เหมาะสำหรับการเป็นสารเคลือบ ยกเว้น เจลาตินซึ่งจะละลายขณะทอด และกลูเตนซึ่งเกิดฟองอากาศขนาดใหญ่คล้ายบอลลูนขณะทอด และโซเดียมเคซิเนท ที่ฟองออกในช่วงแรก และแตกในเวลาต่อมา โดยตัวอย่างที่เคลือบด้วยโปรตีนถั่วเหลือง และเวย์โปรตีนนั้นจะมีการดูดซับไขมันต่ำที่สุด

9.4 การควบคุมการแพร่ของวัตถุเจือปนอาหาร โดยควบคุมการแพร่กระจายของวัตถุเจือปนอาหารเข้าไปภายในส่วนกลางของอาหาร ปรับปรุงความคงทนของอาหารทางด้านจุลินทรีย์ และป้องกันการปนเปื้อนของจุลินทรีย์เข้าสู่ผิวอาหาร โดยการใช้ร่วมกับวิธีอื่น เช่น การแช่เย็น และการควบคุมสภาวะบรรยากาศ (Kester and Fennema, 1986)

Torres *et al.* (1985) ศึกษาประสิทธิภาพในการควบคุมปริมาณกรดซอร์บิกที่ผิวของผลิตภัณฑ์ในสถานะต่าง ๆ โดยใช้ฟิล์มเมทิลเซลลูโลส และกรดปาล์มติดกับอาหารที่ระดับ pH 5.0 และมีวอเตอร์แอกติวิตีเท่ากับ 0.8 เก็บที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของเมทิลเซลลูโลสต่อกรดปาล์มมีติดเท่ากับ 3:1 พบว่า ฟิล์มสามารถลดการแพร่กระจายของกรดซอร์บิกเข้าไปภายในอาหารได้มากกว่าร้อยละ 50 ถ้าเก็บในสถานะห้องเย็น (5 องศาเซลเซียส) จะสามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้นานยิ่งขึ้น

ลักษณะการนำไปใช้ประโยชน์ขึ้นอยู่กับชนิดอาหาร โดยเฉพาะในเรื่องการเสื่อมเสีย เช่น ถ้าอาหารหรือองค์ประกอบมีไขมันที่ไม่อิ่มตัวในปริมาณสูง ฟิล์มที่ใช้ควรมีความต้านทานต่อการเคลื่อนผ่านของออกซิเจนได้สูง ถ้าใช้กับผักและผลไม้ ต้องป้องกันการสูญเสียความชื้น มีการควบคุมการผ่านเข้าออกของออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อป้องกันการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดลักษณะผิดปกติทางกายภาพและเกิดการสูญเสียคุณภาพอย่างรวดเร็ว (Kester and Fennema, 1986)

9.5 เป็นแผ่นคั่นระหว่างชั้นของอาหารที่มีองค์ประกอบต่างกัน หรือขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุ การใช้แผ่นฟิล์มเมทิลเซลลูโลสเคลือบไขผึ้งป้องกันการถ่ายเทความชื้นระหว่างชั้นของขนมปัง กับ ซอสมะเขือเทศของพิซซ่า แล้วห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีน นำไปเก็บที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 9 สัปดาห์ โดยในแต่ละสัปดาห์มีการเก็บตัวอย่างบางส่วนมาเก็บที่ -6.7 ± 2 องศาเซลเซียส พบว่า การใช้แผ่นฟิล์มเมทิลเซลลูโลสเคลือบไขผึ้งสามารถชะลอการถ่ายเทความชื้นจากซอสมะเขือเทศไปสู่ขนมปังได้ และเมื่อประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสหลังการอบ พบว่า คุณภาพทางประสาทสัมผัสดีกว่าไม่ใช้แผ่นฟิล์ม (Kester and Fennema, 1989)

Rico-Pena and Torres (1990) ใช้แผ่นฟิล์มที่เตรียมจากเมทิลเซลลูโลสกับกรดปาล์มมิดิกในอัตราส่วน 3:1 และแผ่นฟิล์มเมทิลเซลลูโลส เพื่อป้องกันการถ่ายเทความชื้นระหว่างโคนไอศกรีมกับชั้นของช็อกโกแลต โดยนำตัวอย่างไปเก็บที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน คือ ตัวอย่างที่ใช้แผ่นฟิล์มชนิดแรกนำไปเก็บที่อุณหภูมิ -23.3 องศาเซลเซียส และนำออกมาที่อุณหภูมิ -12.2 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 วันในทุก ๆ สัปดาห์ ส่วนฟิล์มชนิดที่สองเก็บที่อุณหภูมิ -12.2 องศาเซลเซียส พบว่า ตัวอย่างที่ใช้แผ่นฟิล์มชนิดแรกไม่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นเมื่อเก็บไว้เป็นเวลา 10 สัปดาห์ที่อุณหภูมิ -23.3 องศาเซลเซียส และ 4 สัปดาห์ที่ -12.2 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นความชื้นจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ส่วนตัวอย่างที่ใช้แผ่นฟิล์มชนิดที่สองความชื้นจะเพิ่มขึ้นมากกว่า และการใช้แผ่นฟิล์มทั้งสองชนิดจะสามารถรักษาความกรอบของโคนไอศกรีมไว้ได้นานกว่าอายุการเก็บปกติ

9.6 การบรรจุแบบแอคทีฟ (active packaging)

การบรรจุแบบแอคทีฟได้รับความสนใจเป็นอย่างมากจากนักวิทยาศาสตร์การอาหาร และนักเทคโนโลยีการบรรจุ ซึ่งความสนใจดังกล่าวนำไปสู่การพัฒนาในด้านวิทยาศาสตร์การอาหารและด้านเทคโนโลยีการบรรจุ (Labuza and Breene, 1989) การพัฒนาการบรรจุแบบแอคทีฟไม่ใช่เพียงเพื่อป้องกันแต่เพื่อเป็นการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ด้วย ดังนั้นสารเคมีจะมีบทบาทเป็นอย่างมากในภาชนะบรรจุ ซึ่งได้มีการวิจัยในระยะหลังเท่านั้น โดยที่เมื่อก่อนการวิจัยมักจะทำในเรื่องการควบคุมบรรยากาศเป็นส่วนใหญ่ (Rooney, 1995) การบรรจุแบบแอคทีฟจะปล่อยสารเคมี เช่น สารกันหืน (BHT) สารกันเสีย สารต้านจุลชีพ เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และกรดอินทรีย์ ได้มีการใช้ในเชิงการค้าร่วมกับวัสดุสังเคราะห์ อย่างไรก็ตามการวิจัยและศึกษาการบรรจุแบบแอคทีฟในฟิล์มบริโกลได้ ยังมีน้อยอยู่เนื่องจากสมบัติยังไม่เทียบเท่าฟิล์มสังเคราะห์

Guilbert (1988) ศึกษาการใช้วิตามินอี (α -tocopherol) ในฟิล์มเจลลาติน โดยในการศึกษาได้มีการเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มที่มีการเชื่อมพันธะข้าม และไม่มีการเชื่อมพันธะข้าม จากการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการเชื่อมพันธะข้ามช่วยปรับปรุงการคงอยู่ของวิตามินอีในฟิล์มที่สัมผัสกับเนยเทียมอย่างมีนัยสำคัญ และให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของวิตามินอีจากฟิล์มเจลลาตินในเนยเทียมซึ่งมีความเข้มข้นร้อยละ 5 ของเนื้อฟิล์ม มีค่าอยู่ระหว่าง 10.0×10^{-11} ถึง 3.0×10^{-11} ตารางเมตรต่อวินาที ซึ่งแสดงความเป็นไปได้ว่าจะมีการควบคุมความเข้มข้นของวิตามินอีที่ผิวของอาหาร

Herald *et al.* (1996) ศึกษาการใช้ฟิล์มโปรตีนข้าวโพด ผสมกับสารกันหืน (BHA) เพื่อช่วยปรับปรุงอายุการเก็บรักษาของไถ่แวงที่ผ่านการแปรรูปแล้ว จากการเก็บรักษาไว้ 3 วัน พบว่าไถ่แวงซึ่งห่อด้วยฟิล์มดังกล่าว มีค่าเฮกซานาล (hexanal) ซึ่งเป็นดัชนีชี้ถึงคุณภาพแสดงความหืนของผลิตภัณฑ์ต่ำกว่าไถ่แวงซึ่งห่อด้วยฟิล์มสังเคราะห์พีวีซี

Jangchud (1997) รวบรวมข้อมูลและรายงานเกี่ยวกับการบรรจุแบบแอคทีฟ โดยกล่าวถึงการศึกษาเกี่ยวกับฟิล์มบริโกลได้ สมบัติการป้องกันการเสื่อมเสียซึ่งมีสาเหตุจากจุลินทรีย์ ฟิล์มบริโกลได้สามารถปรับปรุงเสถียรภาพของผิวหน้าอาหารต่อจุลินทรีย์ โดยฟิล์มบริโกลได้เหล่านั้นมีสารกันเสียอยู่ในฟิล์มนำมาเคลือบ หรือห่อหุ้มอาหาร เช่น การใช้ฟิล์มแคลเซียมอัลจินต (calcium alginate film) เคลือบเนื้อวัว การใช้ฟิล์มไคโตแซน (chitosan film) และการใช้ฟิล์มเซลลูโลสในการเคลือบมะเขือเทศ การใช้ฟิล์มโปรตีนข้าวโพดบนเปลือกไข่ไก่ และการใช้ฟิล์มเคซีนเคลือบผลไม้ที่มีความชื้นปานกลาง นอกจากผสมสารกันเสียหรือสารกันหืนในฟิล์มแล้ว ยังมีการศึกษาถึงการเคลือบสารกันเสียหลังจากการเคลือบด้วยฟิล์มเพื่อที่ควบคุมการแพร่ของของสารกันเสียเหล่านั้น เช่น การแพร่ของกรดซอร์บิกในฟิล์มโปรตีนข้าวโพด ฟิล์มเคซีน และฟิล์มพอลิแซ็กคาไรด์-ลิพิด (polysaccharide-lipid film) และในปี 1997 Jangchud และ 1999 Jangchud *et al.* ได้ทำการตรวจสอบหาค่าการแพร่ของกรดซอร์บิกในฟิล์มจากโปรตีนถั่วลิสง (peanut protein film) และทำการทดสอบเสถียรภาพต่อ *Staphylococcus aureus* ในเนยเทียม เนื่องจากสมบัติเฉพาะของฟิล์มบริโกลได้ตามที่ได้กล่าวมา ฟิล์มชนิดนี้จึงเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำไปใช้ในอาหารที่มีความชื้นปานกลาง (intermediate moisture food) เพื่อที่จะรักษาคุณภาพทางประสาทสัมผัสไปพร้อมกับป้องกันการเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์

Sahoo and Anjaneyulu (1997) ศึกษาผลของสารกันหืนธรรมชาติ ได้แก่ วิตามินอี และ โซเดียมไตรพอลิฟอสเฟต (sodium tripolyphosphate) ต่อคุณภาพของเนื้อกบเนื้อควาย (buffalo meat

nuggets) ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส พบว่า การใช้สุญญากาศร่วมกับสารกันหืนดังกล่าวสามารถปรับปรุงคุณภาพในระหว่างการเก็บรักษาได้ในระยะ 30 วัน เมื่อเทียบกับสิ่งทดลองควบคุม ซึ่งเก็บได้เพียง 10 วัน

Vermeiren *et al.* (1999) ได้รายงานสรุปเกี่ยวกับการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ที่ควบคุมการแพร่ของสารกันหืนไว้ว่า มีการใช้สารกันหืนเพื่อป้องกันการเสื่อมเสียของฟิล์ม โดยที่ความเข้มข้นของสารกันหืนในฟิล์มลดลงในระหว่างการเก็บรักษา เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน นอกจากนี้ในอุตสาหกรรมรสชาติของสหรัฐอเมริกาบางแห่ง มีการใช้กระดาษเคลือบมันที่มีสารกันหืนผสมอยู่ด้วย นอกจากนี้ยังรายงานอีกว่ามีการใช้สารกันหืน (BHT) ผสมลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงในปริมาณสูง (ร้อยละ 0.32) สามารถช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์รสชาติจากข้าวโอ๊ตได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับการผสมในปริมาณต่ำ (ร้อยละ 0.022) และมีการแนะนำให้ใช้วิตามินอีและวิตามินซี ใส่ลงในบรรจุภัณฑ์เพื่อช่วยป้องกันการเกิดออกซิเดชัน โดยจากการศึกษาพบว่า วิตามินอีมีความคงตัวดีในฟิล์มพอลิโอฟีน (polyolefin) ในสภาวะการผลิตที่เหมาะสม และวิตามินอีเป็นสารกันหืนที่แพร่ได้น้อยกว่า BHT ในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากเป็นโมเลกุลที่ใหญ่กว่า

Wu *et al.* (2001) รายงานว่าการใช้ฟิล์มจากสตาร์ช-อัลจินต ที่มีการเติมและเคลือบด้วยวิตามินอีต่อการรักษาคุณภาพของเนื้อวัวบด (precook beef patties) ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นั้นช่วยยับยั้งการเกิดการหืนของลิพิดมากกว่าฟิล์มที่ไม่ได้เคลือบวิตามินอี

10. ใ้จ้จ้

ใ้จ้จ้ (Rootless Duckweed ; *Wolffia arrhiza*) หมายถึง สิ่งมีชีวิตที่จัดอยู่ในพวก Anthophyta เป็นกลุ่มพืชมีดอกที่มีขนาดเล็กที่สุดในโลก เป็นพืชจำพวกเดียวกับแหนเป็ด ลอยบนผิวน้ำ บางตำราจัดเป็นวัชพืช พบมากในแควยุโรป แอฟริกา บราซิล อินโดนีเซีย ออสเตรเลีย และไทย ใ้จ้จ้เป็นพืชน้ำที่มีลักษณะสีเขียวเป็นมัน มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1 – 0.2 มิลลิเมตร ดูเหมือน ๆ คล้ายไข่ปลา มีดอกแต่ขนาดเล็กมาก บางชนิดพบว่าไม่มีรากแต่บางชนิดไม่ปรากฏ ชอบขึ้นในที่ที่มีอากาศร้อน และมีแสงแดดมาก ในประเทศไทยมีการบริโภคในทางแถบภาคเหนือ และภาคอีสาน นิยมนำไปปรุงเป็นอาหาร โดยใช้เป็นส่วนผสมของแกงอ่อมใส่ปลาเนื้ออ่อน แกงไก่ แกงเนื้อ รวมทั้งผักชนิดอื่น ๆ หรืออาจนำไปตากกินสด ๆ คล้ายส้มตำมะละกอ หรือใส่ต้มยำทุกชนิด ปัจจุบันมีผู้นำไปใส่ในไข่เจียวหมูสับ หรือนำไปคั่วกับหมู เป็นต้น เนื่องจากใ้จ้จ้มีคุณค่าทางอาหารสูง โดยมีปริมาณ

โปรตีน เบต้า-แคโรทีน และแคลเซียมสูง (ตารางที่6) ชื่ออื่น ๆ ของไข่น้ำ ได้แก่ ผำ (ภาคอีสาน) ไข่แห่น (ภาคกลาง) หรือ water meal ซึ่งตามปกติจะพบลอยตามผิวน้ำ มีลักษณะเป็นแผ่น เรียก ทัลลัส (thallus) มีรูปกลม หรือรูปไข่สีเขียว พองนูนทั้งด้านบน และด้านล่าง ไม่มีราก ดอกออกเป็น ช่อขนาดเล็กมาก และจะเกิดอยู่ในถุงตรงขอบทัลลัส มีดอกเพศผู้ และเพศเมียอย่างละ 1 ดอก เป็น พืชชนิดเดียวในวงศ์นี้ที่มนุษย์นำมากินเป็นอาหาร ชอบขึ้นในแหล่งน้ำนิ่ง ใส มีสารอาหารจาก อินทรีย์วัตถุมาก ไข่น้ำจะเจริญเติบโตได้ดีขึ้นอยู่กับปริมาณสารอาหารที่มีอยู่ในแหล่งน้ำนั้น ๆ โดยทั่วไปแล้วไข่น้ำต้องการธาตุอาหารเช่นเดียวกับพืชทั่ว ๆ ไป คือ ธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และ โพแทสเซียม ในการเจริญเติบโตจำเป็นต้องใช้แสงสว่างในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (photosynthesis) เพื่อใช้ในการสร้างอาหารให้แก่เซลล์ และเกิดรงควัตถุสีเขียว ไข่น้ำเจริญเติบโต อย่างรวดเร็วในช่วงฤดูหนาวต่อกับฤดูร้อน และลดอัตราการเจริญเติบโตลงในช่วงฤดูฝน เนื่องจาก ความเข้มข้นของธาตุอาหารในฤดูฝนเจือจางกว่า และมีความเข้มแสงน้อยกว่าด้วย ไข่น้ำสกุล *Wolffia* ที่พบในเมืองไทยมี 2 ชนิด คือ *Wolffia arrhiza* (Linn) Wimm และ *Wolffia globosa* (Linn) Wimm (อาภารัตน์ และคณะ, 2541; ชนกพร, 2542; สุทธิพงษ์, 2547)



ภาพที่ 2 ไข่น้ำสด

ที่มา: ประวิทย์ (2549)

10.1 อนุกรมวิธานของไข่น้ำอ้างอิงตาม ชนกพร (2542) ได้ดังนี้

Division Anthophyta
 Class Monocotyledonae
 Order Arales
 Family Lemnaceae
 Genus Wolffia
 Species *Wolffia arrhiza* (L) Wimm

10.2 การจำแนกชนิดของพืชใน Family Lemaceae (Duckweed family) มีการจัดจำแนกโดยใช้ Duchotomous Key แบบง่าย ๆ คือ

10.2.1 Plant body with 1-several roots. (มีราก 1 รากหรือมากกว่า)

- ก. Root one : --- → genus Lemna ---- มีราก 1 ราก เช่น แหนเป็ดเล็ก
- ข. Root 2-12: --- → genus Spirodela ---- มีราก 2-12 ราก เช่น แหนเป็นใหญ่

10.2.2 Plant body without roots. (ไม่มีราก)

- ก. Plant body flattened: --- → genus Wolffia
- ข. Plant body ovoid (< 1 mm.) --- → genus Wolffia รูปไข่ เช่น ไข่น้ำ

10.3 การสืบพันธุ์ของไข่น้ำสามารถสืบพันธุ์ได้ 2 แบบ คือ

10.3.1 การสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ ไข่น้ำเป็นพืชดอกชนิดหนึ่ง ดังนั้นการสืบพันธุ์จึงเป็นแบบการผสมเกสรตัวผู้และเกสรตัวเมียภายในดอก ไข่น้ำจะออกดอกประมาณเดือนตุลาคม หลังจากปฏิสนธิกันแล้วก็จะเจริญเป็นเมล็ดสืบต่อไป

10.3.2 การสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ จะสืบพันธุ์โดยการแตกหน่อ (Budding) ที่ข้าง ๆ ท่อลัส ดังนั้นจึงมักพบว่าท่อลัสมีลักษณะเป็น 2 – 3 พู (อนัญยา, 2542)

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของไข่น้ำของกองโภชนาการกรมอนามัย (2544) พบว่า ไข่น้ำมีปริมาณความชื้นร้อยละ 97.1 โปรตีนร้อยละ 0.6 ไขมันร้อยละ 0.1 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 1.5 และ

ถั่วร้อยละ 0.7 และจากการวิเคราะห์องค์ประกอบไข่น้ำโดยน้ำหนักแห้งของ Anonymous (2006) พบว่า ไข่น้ำมีปริมาณโปรตีนร้อยละ 6.8 – 45.0 ปริมาณไขมันร้อยละ 1.8 – 9.2 ปริมาณเส้นใย 5.7 – 46.2 ปริมาณคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 14.1 – 43.6 และปริมาณถั่วร้อยละ 12.0 – 27.6

ตารางที่ 7 องค์ประกอบทางเคมี และคุณค่าทางโภชนาการของไข่น้ำ ต่อน้ำหนัก 100 กรัม

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ
น้ำ (กรัม)	97.1
พลังงาน (กิโลแคลอรี)	9
โปรตีน (กรัม)	0.6
ไขมัน (กรัม)	0.1
คาร์โบไฮเดรต (กรัม)	1.5
ถั่ว (กรัม)	0.7
โคเลสเตอรอล (มิลลิกรัม)	0
วิตามิน บี1 (มิลลิกรัม)	0.03
วิตามิน บี2 (มิลลิกรัม)	0.09
ไนอะซิน (มิลลิกรัม)	0.4
วิตามิน ซี (มิลลิกรัม)	11
วิตามิน เอ (มิลลิกรัม)	32
เบต้า-แคโรทีน (มิลลิกรัม)	385
แคลเซียม (มิลลิกรัม)	59
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม)	25
เหล็ก (มิลลิกรัม)	6.6

ที่มา : สถาบันการแพทย์แผนไทย (2541)

กองโภชนาการกรมอนามัย (2544)