สำนักงานวิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

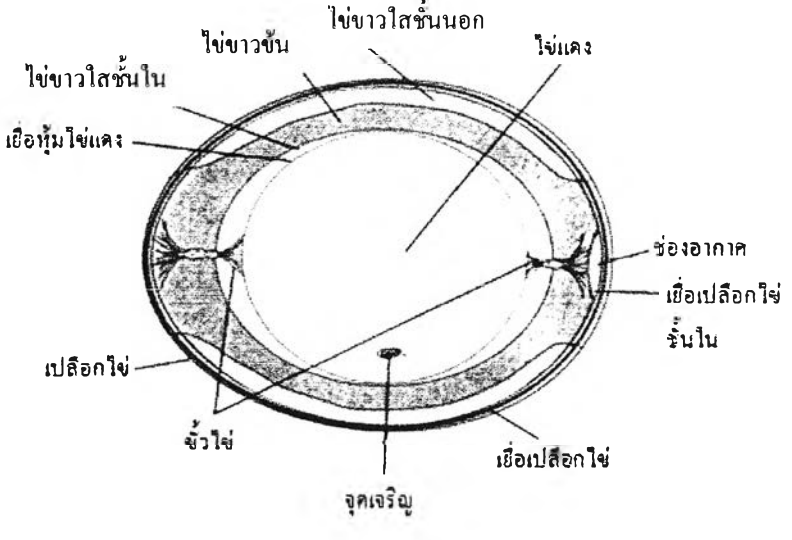
วารสารปริทัศน์

2.1 ไข่ไก่

ไข่มีความสำคัญในแง่ที่ใช้เป็นอาหารของมนุษย์ เพราะเป็นแหล่งอาหารที่มีราคาถูก รสชาติอร่อย มีคุณค่าทางโภชนาการสูง และเก็บไว้ได้นาน ไข่ไก่ที่นำมาบริโภคนั้นจะมาจากไก่ที่มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Gullus domesticus* ไข่ไก่ 1 ฟองมีน้ำหนักโดยเฉลี่ยประมาณ 60 กรัม โดยมีไข่ขาวอยู่ 6 ส่วน ไข่แดง 3 ส่วน และเปลือกไข่อีก 1 ส่วน (Li-Chan et al., 1995) ซึ่งโปรตีนในไข่ถือเป็นโปรตีนมาตรฐานที่นักวิชาการด้านโภชนาการนำมาใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับโปรตีนจากแหล่งอาหารอื่นเนื่องจากมีกรดอะมิโนจำเป็นครบถ้วน (Watkins, 1995)

2.1.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของไข่ไก่

สุวรรณ เกษตรสุวรรณ (2529) รายงานว่าไข่ทั้งฟองของสัตว์ปีกชนิดต่าง ๆ จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ เปลือกไข่ ไข่ขาว และไข่แดง (ภาพที่ 2.1) โดยมีสัดส่วนใกล้เคียงกันทุกฟอง แต่มีปริมาณแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิด และขนาดของสัตว์ปีก



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของไข่ไก่

ที่มา: ดัดแปลงจาก สุวรรณ เกษตรสุวรรณ (2529)

2.1.1.1 เปลือกไข่

เปลือกไข่มีอยู่ร้อยละ 9.5 ของน้ำหนักไข่ทั้งฟอง ประกอบด้วย 2 ชั้น ได้แก่ เปลือกไข่ชั้นนอก (spongy layer) และเปลือกไข่ชั้นใน (mammillary layer) ผิวนอกของเปลือกไข่

จะมีชั้นเยื่อมิวซินที่บางฉาบเคลือบผิวไข่อยู่ ซึ่งก๊าซสามารถผ่านเข้าออกได้ โดยเปลือกชั้นนอกเป็นแคลเซียมอยู่ในรูปผลึกของหินปูน เป็นชั้นที่แข็งที่สุดและแน่นที่สุด มีลักษณะเป็นรูพรุนเล็ก ๆ คล้ายฟองน้ำแต่มีความแข็งแรงมาก ส่วนเปลือกไข่ชั้นในเป็นสารประกอบของแมกนีเซียมและฟอสเฟต เป็นชั้นที่บางของเปลือกและอยู่ติดกับเยื่อหุ้มไข่ชั้นนอก โครงสร้างเปลือกไข่มีประโยชน์อย่างมากต่อการป้องกันการแทรกซึมของจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ตลอดจนการรักษาคุณภาพภายในของไข่

2.1.1.2 ไข่ขาว (egg white หรือ albumen)

ไข่ขาวมีอยู่ร้อยละ 63 ของน้ำหนักไข่ทั้งฟอง แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่

ไข่ขาวใสชั้นนอก (outer liquid layer) เป็นชั้นที่อยู่รอบ ๆ ด้านข้างของไข่ขาวข้น มีลักษณะเหลวใสเป็นชั้นบาง ๆ อยู่ติดกับเยื่อเปลือกไข่ มีปริมาณร้อยละ 23.2 ของไข่ขาวทั้งหมด ซึ่งส่วนประกอบของไข่ขาวใสชั้นนอกนี้จะเหมือนกับไข่ขาวข้นแต่มีเส้นใยมิวซิน (mucin fiber) อยู่ปริมาณน้อยกว่า ซึ่งเส้นใยมิวซินมีประโยชน์เป็นสารช่วยเจือจางน้ำเชื้อในการผสมพันธุ์เทียม และช่วยในการขึ้นฟูในผลิตภัณฑ์ขนมอบ

ไข่ขาวข้น (dense albumen) เป็นชั้นที่อยู่ถัดจากไข่ขาวใสชั้นนอกใกล้มาทางไข่แดง มีลักษณะเป็นชั้น หรือถุงไข่ขาวข้นที่ห่อหุ้มไข่แดงและไข่ขาวใสชั้นใน ความข้นของไข่ขาวจะช่วยประคองไข่แดง และส่วนไข่ขาวใสชั้นในให้แขวนลอยอยู่ ไข่ขาวส่วนนี้มีปริมาณร้อยละ 57.3 ของไข่ขาวทั้งหมด เส้นใยมิวซินเป็นส่วนประกอบสำคัญของไข่ขาวข้นซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นใยข้น (semisolid fiber) ที่รวมกับส่วนที่เป็นของเหลว เส้นใยเหล่านี้ด้านนอกอยู่ติดกับไข่ขาวใสชั้นนอก ถ้าใช้ความร้อน หรือย้อมสีไข่ขาวข้นจะเห็นเป็นชั้น ๆ ได้ด้วยตาเปล่า ถ้าใช้กล้องขยายจะเห็นแต่ละชั้นประสานกันอย่างซับซ้อนห่างกันชั้นละประมาณ 10 มิลลิเมตร

ไข่ขาวใสชั้นใน (inner liquid layer) เป็นส่วนของไข่ขาวที่ค่อนข้างเหลวใส เป็นชั้นที่อยู่รอบนอกไข่แดง มีประมาณร้อยละ 16.8 ของไข่ขาวทั้งหมด ภายในชั้นนี้ไม่มีเส้นใยมิวซินอยู่เลย เป็นชั้นที่เยื่อขั้วไข่แดงยึดไข่แดงให้ลอยอยู่ตรงกลางฟองไข่

เยื่อขั้วไข่แดง (chalaziferous) มีปริมาณร้อยละ 27.0 ของไข่ขาวทั้งหมด โดยมีส่วนของขั้วไข่แดง (chalazae) ซึ่งเป็นเส้นใยมิวซินที่มีลักษณะเป็นสายคล้ายเกลียวเชือกยื่นออกมาต่อกับส่วนของไข่ขาวข้นทางด้านป้านและด้านแหลมของไข่ ขั้วที่อยู่ทางด้านแหลมเรียกว่า choacal มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวและใหญ่กว่าของด้านป้าน ที่เรียกว่า infundibular chalaza ทำหน้าที่ช่วยยึดไม่ให้ไข่แดงเคลื่อนที่ไปมาจากตำแหน่งเดิม เมื่อเก็บไข่ไว้นานขึ้น ส่วนนี้จะเกิดการอ่อนตัวลงทำให้ไข่แดงเคลื่อนที่ได้มากขึ้น

2.1.1.3 ไข่แดง (yolk หรือ vitellus)

ไข่แดงมีอยู่ร้อยละ 27.5 ของน้ำหนักไข่ทั้งฟอง ส่วนของไข่แดงจะแยกออกจากไข่ขาวอย่างชัดเจน มีลักษณะเป็นรูปทรงกลม สีเหลืองส้มจากสีของรงควัตถุคาโรตินอยด์ โดยไข่แดงจะถูกห่อหุ้มด้วยเยื่อหุ้มไข่แดง ซึ่งเยื่อหุ้มนี้บางและอ่อนนุ่ม สามารถหดและพองออกได้ ไข่แดงทำหน้าที่เปรียบเสมือนเป็นแหล่งสะสมอาหารสำหรับตัวอ่อน ในไข่ไก่ที่ออกจากแม่ไก่ใหม่ ๆ ไข่แดงจะมีความถ่วงจำเพาะมากกว่าไข่เก่า ดังนั้นเวลาส่องดูจะเห็นว่าไข่แดงจมต่ำกว่าระดับกลางของไข่ ต่อมาเมื่อน้ำในไข่ระเหยออกจากไข่ขาวเป็นเหตุให้ไข่ขาวข้นขึ้น ทำให้ไข่แดงลอยขึ้นมาอยู่บริเวณส่วนของชั้นไข่ขาวข้น

2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของไข่

องค์ประกอบทางเคมีของไข่ไก่จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของไก่ อาหาร และอายุของไก่ โดยไข่ไก่ 1 ฟองจะมีน้ำหนักประมาณ 50-63 กรัม น้ำเป็นองค์ประกอบที่พบมากในไข่ไก่ รองลงมา คือ โปรตีน และไขมัน ส่วนคาร์โบไฮเดรตและเกลือแร่จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 2.1 (Li-Chan et al., 1995; Ibrahim, 1997) ไข่ไก่เป็นอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงโดยเป็นแหล่งของโปรตีนชนิดสมบูรณ์ จึงใช้เป็นมาตรฐานในการเปรียบเทียบกับโปรตีนในอาหารชนิดอื่น ๆ โดยโปรตีนในไข่ประกอบด้วยกรดอะมิโนที่จำเป็น ซึ่งเป็นโปรตีนพื้นฐานที่ร่างกายต้องการและไม่สามารถสร้างขึ้นเองได้ นอกจากนี้ไข่ไก่ยังเป็นแหล่งของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวที่จำเป็นต่อร่างกาย (essential unsaturated fatty acids) อีกทั้งยังพบแร่ธาตุอีกหลายชนิด เช่น เหล็ก ฟอสฟอรัส รวมทั้งวิตามินเอ วิตามินดี วิตามินอี และวิตามินบี เป็นต้น (Watkins, 1995) คุณค่าทางโภชนาการของไข่ไก่แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของไข่ไก่

ส่วนประกอบของไข่	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนักเปียก)				
	น้ำ	โปรตีน	ไขมัน	คาร์โบไฮเดรต	เถ้า
ไข่ทั้งฟอง	72.8-75.6	12.8 - 13.4	10.5-11.8	0.3-1.0	0.8-1.0
ไข่ขาว	87.87-89.37	9.7- 10.6	0.03	0.4-0.9	0.5-0.6
ไข่แดง	45.8-51.2	15.7-16.6	31.8-35.5	0.2-1.0	1.1

ที่มา: ดัดแปลงจาก Li-Chan และคณะ (1995)

หอสมุดกลาง สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 คุณค่าทางโภชนาการของไข่ไก่

คุณค่าทางโภชนาการ (ต่อ 100 กรัมที่รับประทานได้)	ไข่ทั้งฟอง	ไข่ขาว	ไข่แดง
พลังงาน (กิโลแคลอรี)	152	50	377
โปรตีน (กรัม)	12	10.2	16.1
ไขมันทั้งหมด (กรัม)			
กรดไขมันอิ่มตัว (กรัม)	3.67	-	11.42
กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว (กรัม)	4.50	-	14.57
กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (กรัม)	1.32	-	4.20
คอเลสเตอรอล (กรัม)	0.425	-	1.28
แคลเซียม (มิลลิกรัม)	53	10	148
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม)	202	22	599
โปตัสเซียม (มิลลิกรัม)	135	150	100
เหล็ก (มิลลิกรัม)	1.97	0.14	6.0
วิตามินเอ (IU)	480	-	1527
วิตามินดี (IU)	50	-	161
วิตามินอี (มิลลิกรัม)	1.6	-	5.1
วิตามินบี 12	0.88	-	2.83
ไบโอติน (ไมโครกรัม)	20	6.8	49.1
โคลีน (มิลลิกรัม)	430	1.2	1400
ไทอะมีน (มิลลิกรัม)	0.09	0.011	0.28
ไรโบฟลาวิน (มิลลิกรัม)	0.119	0.021	0.334
ไนอะซิน (มิลลิกรัม)	0.082	0.092	0.061

ที่มา: ดัดแปลงจาก Watkins (1995)

2.2 ไข่ขาว

เมื่อตอกไข่ไก่จะเห็นไข่ขาวแยกเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งเหลวและอีกส่วนข้นอยู่ติดกับไข่แดง ไข่ขาวมีสีเหลืองอ่อนจากสีของรงควัตถุโอโวฟลาวิน สาเหตุที่เรียก egg white หรือ albumen ว่าไข่ขาวเพราะเวลาไข่ขาวเกิดเจล (gelation) ไข่ขาวจะเปลี่ยนลักษณะปรากฏจากสีเหลืองอ่อนเป็นสีขาว (สุวรรณ เกษตรสุวรรณ, 2529) ไข่ขาวเป็นระบบโปรตีนที่ประกอบด้วยเส้นใยโอโวมิวซินละลายอยู่ในสารละลายของกลอบูลาร์โปรตีนหลายชนิด ซึ่งส่วนประกอบของโปรตีนในไข่ขาวใสชั้นในและไข่ขาวข้นจะแตกต่างกันเฉพาะที่ปริมาณของโปรตีนโอโวมิวซิน (Li-Chan et al., 1995)

2.2.1 โปรตีนที่พบในไข่ขาว

ไข่ขาวมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 11 ของน้ำหนักไข่ขาว ซึ่งประกอบด้วยโปรตีนมากกว่า 40 ชนิด โดยโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบหลักในไข่ขาว ได้แก่ โอวัลบูมิน (ovalbumin) มีประมาณร้อยละ 54 ของโปรตีนไข่ขาวทั้งหมด รองลงมา คือ โอโวทรานส์เฟอร์ริน (ovotransferrin) และโอโวมิวคอยด์ (ovomucoid) ซึ่งมีอยู่ร้อยละ 12 และ 11 ตามลำดับ (Ibrahim, 1997) โปรตีนที่สำคัญของไข่ขาวสามารถแยกลำดับส่วนโดยการตกตะกอนด้วยแอมโมเนียมซัลเฟต และทำให้บริสุทธิ์โดยใช้เทคนิคของ ion exchange สำหรับโปรตีนแต่ละชนิดที่แยกได้จากไข่ขาว พบว่ามีสมบัติทางเคมีและทางกายภาพดังแสดงในตารางที่ 2.3 (Li-Chan et al., 1995)

ตารางที่ 2.3 ชนิด สมบัติทางเคมีและกายภาพของโปรตีนที่พบในไข่ขาว

ชนิดของโปรตีน	ร้อยละ	pI[/1]	มวลโมเลกุล (kDa)	T_d[/2] (°C)	สมบัติ
โอวัลบูมิน	54	4.5	45	84.0	ฟอสโฟไกลโคโปรตีน มีหมู่ซัลไฮดริล 4หมู่
โอโวทรานส์เฟอร์ริน	12-13	6.1	76-80	61.0	ไกลโคโปรตีน สามารถทำปฏิกิริยากับโลหะเหล็กได้ สารประกอบเชิงซ้อน
โอโวมิวคอยด์	11	4.1	28	79.0	ไกลโคโปรตีน ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ทริปซิน
โอโวมิวซิน	3.5	4.5-5.0	$5.5\text{-}8.3\times10^3$	ND	ไกลโคโปรตีน
ไลโซไซม์	3.4	10.7	14.3	75.0	ย่อยสลายแบคทีเรียบางชนิด
โอโวโกลบูลิน	4.0	4.8-5.5	35	ND	ไกลโคโปรตีน
อะวิดิน	0.05	10.0	68.3	ND	ทำปฏิกิริยากับไบโอติน

หมายเหตุ /1 คือ Isoelectric point

/2 คือ อุณหภูมิที่เสียสภาพ

ND คือ ไม่ตรวจพบ (not detected)

ที่มา: ดัดแปลงจาก Li-Chan และคณะ (1995) และ Mine (1995)

2.2.1.1 โอวัลบูมิน

โอวัลบูมินเป็นโปรตีนที่มีมากที่สุดในไข่ขาวโดยมีอยู่ประมาณครึ่งหนึ่งของโปรตีนในไข่ขาวทั้งหมด เป็นสารประกอบฟอสโฟไกลโคโปรตีน (phosphoglycoprotein) ที่มีคาร์โบไฮเดรต และหมู่ฟอสเฟตเกาะอยู่กับสายพอลิเพปไทด์ แบ่งได้ออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ A_1, A_2 และ A_3 ซึ่งหมายถึงการมีหมู่ฟอสเฟต 2 หมู่ 1 หมู่ และไม่มีเลยต่อโมเลกุล ตามลำดับ มีมวล

โมเลกุล 45 กิโลดาลตัน (Mine, 1995) โอวัลบูมินจัดเป็นโปรตีนไข่ขาวเพียงชนิดเดียวที่มีหมู่ซัลไฟดริลอิสระ โปรตีนชนิดนี้สามารถทนความร้อนได้ดี โดยมีอุณหภูมิในการเสียสภาพธรรมชาติ (denaturation temperature) 84.0 องศาเซลเซียส เมื่อไข่มีอายุการเก็บนานขึ้น โอวัลบูมินจะเปลี่ยนไปเป็นเอส-โอวัลบูมิน (s-ovalbumin หรือ stable-ovalbumin) เป็นโปรตีนที่ทนความร้อนได้มากกว่า โดยมีอุณหภูมิในการเสียสภาพธรรมชาติ 92.5 องศาเซลเซียส ซึ่งองค์ประกอบของกรดอะมิโนในโมเลกุลของโอวัลบูมิน และเอส-โอวัลบูมินนั้นจะไม่แตกต่างกัน (Li-Chan et al., 1995; Mine, 1995)

2.2.1.2 โอโวทรานส์เฟอร์ริน

โอโวทรานส์เฟอร์ริน หรือคอนอัลบูมิน (conalbumin) มีปริมาณร้อยละ 12 ของโปรตีนไข่ขาวทั้งหมด จัดเป็นสารประกอบไกลโคโปรตีน (glycoprotein) โอโวทรานส์เฟอร์รินมีมวลโมเลกุล 76 กิโลดาลตัน มีค่า pI ประมาณ 6.1 ประกอบด้วยกรดอะมิโน 686 ตัว และมีพันธะไดซัลไฟด์ 15 พันธะ ไม่มีหมู่ฟอสเฟต หรือหมู่ซัลไฟดริลอิสระ (Mine,1995) โอโวทรานส์เฟอร์รินเป็นโปรตีนที่แยกได้ง่ายโดยการตกตะกอนด้วยแอมโมเนียมซัลเฟต ทนความร้อนได้น้อยกว่าโอวัลบูมิน อุณหภูมิที่ทำให้เสียสภาพธรรมชาติประมาณ 61 องศาเซลเซียส สามารถจับกับอนุมูลโลหะได้ (chelating agent) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ทนต่อความร้อน โดยจับอนุมูลโลหะ 2 อะตอมต่อ 1 โมเลกุลคอนอัลบูมิน อีกทั้งยังสามารถยับยั้งแบคทีเรียได้ (Li-Chan et al., 1995)

2.2.1.3 โอโวมิวคอยด์

โอโวมิวคอยด์ เป็นโปรตีนที่มีอยู่ประมาณร้อยละ 11 ของโปรตีนไข่ขาวทั้งหมด เป็นสารพวกไกลโคโปรตีน ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 25 ทำให้สามารถทนต่อความร้อนได้ดี และทนได้มากกว่าโอโวทรานส์เฟอร์ริน โอโวมิวคอยด์มีมวลโมเลกุล 28 กิโลดาลตัน มีค่า pI 4.1 และมีพันธะไดซัลไฟด์ 9 พันธะ แต่ไม่มีหมู่ซัลไฟดริลอิสระ สามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ทริปซิน ในช่วงความเป็นกรด โอโวมิวคอยด์จะสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนได้ดี โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและทางเคมี แต่ในสภาวะที่เป็นเบส โอโวมิว-คอยด์จะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว (Mine, 1995) โอโวมิวคอยด์ที่เปลี่ยนแปลงด้วยความร้อนจะสูญเสียความสามารถในการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ทริปซิน และจะถูกย่อยได้ง่ายด้วยเอนไซม์ไคโมทริปซิน (Li-Chan et al., 1995)

2.2.1.4 โอโวมิวซิน (ovomucin)

โอโวมิวซิน เป็นไกลโคโปรตีนที่มีหมู่ซัลเฟต มีลักษณะเป็นเส้นใยทำให้ไข่ขาวข้นเป็นก้อนคล้ายวุ้น โดยพบโอโวมิวซินในไข่ขาวข้นมากกว่าไข่ขาวใสถึง 4 เท่า โอโวมิวซินมีมวลโมเลกุล 5,500-8,300 กิโลดาลตัน โครงสร้างของโอโวมิวซินนั้นมีส่วนสำคัญมากในการทดสอบสมบัติเชิงเคมีกายภาพของโปรตีน ทั้งนี้โอโวมิวซินแบ่งออกเป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ ชนิดที่มี

คาร์โบไฮเดรตมาก (β-ovomucin) และชนิดที่มีคาร์โบไฮเดรตน้อย (α-ovomucin) โดยมีปริมาณของคาร์โบไฮเดรตอยู่ถึงร้อยละ 60 และ 15 ตามลำดับ จึงทำให้โอโวมิวซินชนิดที่มีคาร์โบไฮเดรตมากมีความคงทนต่อความร้อนได้ดี โอโวมิวซินและไลโซไซม์สามารถรวมกันเกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำด้วยแรงกระทำไฟฟ้าสถิตที่มีต่อกัน แต่ที่ช่วง pH เกินกว่า 7.2-10.4 แรงกระทำระหว่างโปรตีนทั้งสองจะลดลง โดยเฉพาะที่ค่า pH เพิ่มสูงใกล้ค่า pI ของไลโซไซม์ (pI=10) ไลโซไซม์จะแยกตัวจากโอโวมิวซิน ซึ่งทำให้ไข่ขาวมีลักษณะใสขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา สมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งของโปรตีนชนิดนี้ คือ เป็นสารช่วยให้เกิดฟองและมีความสามารถในการยับยั้งการทำงานของไวรัส (Li-Chan et al., 1995)

2.2.1.5 ไลโซไซม์ (lysozyme)

ไลโซไซม์ หรือที่รู้จักกันในชื่อ mucopeptide *N*-acetylmuramoylhydrolase (EC 3.2.1.17) เป็นเอนไซม์ในไข่ขาวที่สามารถทำลายผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมลบ ซึ่งทำหน้าที่เป็นโปรตีโอไกลแคน (proteoglycan) ได้โดยย่อยสลายพันธะ β(1→4) linkages ระหว่าง N-acetylglucosamine และ N-acetylmuraminic acid ไลโซไซม์มีมวลโมเลกุล 14.3 กิโลดาลตัน มีค่า pI เท่ากับ 10.7 ประกอบด้วยกรดอะมิโน 129 ตัว และมีพันธะไดซัลไฟด์ 4 พันธะ แต่ไม่มีหมู่ซัลไฟดริลอิสระ (Mine, 1995) การใช้ความร้อนในการยับยั้งเอนไซม์นี้ขึ้นอยู่กับค่า pH และอุณหภูมิ โดยที่ค่า pH มากกว่า 7 ขึ้นไป ไลโซไซม์จะถูกทำลายมากขึ้น และถูกทำลายให้เสียสภาพที่อุณหภูมิประมาณ 70-75 องศาเซลเซียส (Li-Chan et al., 1995; Mine, 1995)

2.2.1.6 อะวิดิน (avidin)

อะวิดินเป็นไกลโคโปรตีนที่ประกอบด้วยกรดอะมิโน 128 ตัว มีมวลโมเลกุล 68.3 กิโลดาลตัน มีค่า pI เท่ากับ 10.0 และมีพันธะไดซัลไฟด์ 1 พันธะ ทนความร้อนได้ดี โดยมีอุณหภูมิเสียสภาพ 85 องศาเซลเซียส สามารถจับกับไบโอตินซึ่งเป็นวิตามินที่มนุษย์ต้องการได้ โดยอะวิดิน 1 โมเลกุลสามารถจับกับไบโอตินได้ 4 โมเลกุล สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะวิดินและไบโอตินสามารถทนความร้อนได้ดีที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส การนำไบโอตินมาใช้ได้จะต้องให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส จึงจะเกิดการสลายพันธะระหว่างอะวิดินและไบโอติน นอกจากนี้อะวิดินยังสามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ได้ (Li-Chan et al., 1995)

2.2.1.7 โอโวโกลบูลิน (ovoglobulin)

โอโวโกลบูลิน มีอยู่ประมาณร้อยละ 4 ของโปรตีนไข่ขาว ประกอบด้วยโปรตีน 3 ส่วน คือ G_1, G_2 และ G_3 โดยที่ G_1 เป็นไลโซไซม์ ส่วน G_2 และ G_3 นั้นยังมีการศึกษาค่อนข้างน้อย เมื่อวิเคราะห์ด้วย Sodium dodecyl-polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) พบว่า G_2 และ G_3 เป็นสารไกลโคโปรตีน มีค่า pI เท่ากับ 5.5 และ 4.8 ตามลำดับ และพบว่าเป็นสารที่ช่วยในการเกิดฟอง ซึ่งช่วยในการขึ้นฟูในผลิตภัณฑ์ขนมอบ (Li-Chan et al., 1995; Mine, 1995)

2.2.2 สมบัติทางกายภาพของไข่ขาว

2.2.2.1 ความเป็นกรดด่าง

ไข่ขาวมีค่า pH อยู่ในช่วง 7.6-8.5 ซึ่งในไข่ขาวจะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โซเดียมไบคาร์บอเนต และโปแตสเซียมไบคาร์บอเนตละลายอยู่ ทำหน้าที่เปรียบเสมือนเป็นบัฟเฟอร์ช่วยป้องกันไม่ให้ไข่ขาวมีค่า pH สูงขึ้น แต่เมื่อเก็บไข่ไก่ไว้เป็นระยะเวลานาน ไข่ขาวจะมีค่า pH สูงขึ้น เป็นผลจากการที่ไข่ไก่สูญเสียก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกทางรูของเปลือกไข่ ทำให้ความเข้มข้นของไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนตไอออนในไข่ขาวลดลง ไข่ขาวจึงมีค่า pH สูงขึ้น (สุวรรณ เกษตรสุวรรณ 2529; Li-Chan et al., 1995) ซึ่งการที่ไข่ขาวมีค่า pH สูงขึ้นนั้นจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของประจุบนสายพอลิเพปไทด์ภายในโครงสร้างของโปรตีนโอวัลบูมิน สายพอลิเพปไทด์จะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่โดยหันหมู่ที่ไม่มีขั้ว (hydrophobic group) ออกมาด้านนอกโมเลกุลเพิ่มขึ้น โปรตีนจะมีความคงทนต่อความร้อนเพิ่มขึ้น โดยเรียกโปรตีนชนิดนี้ว่า เอส-โอวัลบูมิน (Li-Chan et al., 1995; Ibrahim, 1997)

2.2.2.2 ความหนืด

ความหนืดของไข่ขาวขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น อายุการเก็บไข่ไก่ วิธีในการผสมไข่ขาว อุณหภูมิ และอัตราเฉือน (shear rate) เป็นต้น (Li-Chan et al., 1995) Tung และคณะ (1970) ได้วัดค่าความหนืดของไข่ขาวในไข่ไก่ที่เก็บไว้นาน 4 สัปดาห์เปรียบเทียบกับไข่ขาวในไข่ไก่ใหม่โดยใช้เครื่อง narrow-gapped rotational viscometer พบว่าที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส และอัตราเฉือน 8.1-147 s^{-1} ไข่ขาวทั้ง 2 ชุดการทดลองมีค่าความหนืดลดลงเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นพฤติกรรมการไหลแบบ shear thinning โดยไข่ขาวที่เก็บไว้นาน 4 สัปดาห์ มีค่าความหนืดน้อยกว่าไข่ขาวใหม่ ซึ่งในระหว่างการเก็บรักษาไข่ไก่ ไข่ขาวจะมีความหนืดลดลง ปรากฏการณ์เช่นนี้จะเกิดขึ้นในเวลาเดียวกันกับการเพิ่มขึ้นของค่า pH ในภาวะที่ไข่ขาวมีความเป็นด่างจะทำให้โปรตีนโอโวมิวซินในไข่ขาวข้นเกิดการสลายตัว มีผลทำให้ไข่ขาวมีความหนืดลดลง (สุวรรณ เกษตรสุวรรณ, 2529; Li-Chan et al., 1995)

2.2.2.3 แรงตึงผิว (surface activity)

สมบัติด้านการเป็น surface active ของโปรตีนจะขึ้นอยู่กับความสามารถของโปรตีนที่จะเกิดการดูดซับที่ผิวสัมผัสระหว่างชั้นน้ำกับชั้นอากาศ หรือชั้นน้ำกับชั้นน้ำมัน ความสามารถของโปรตีนในการคลายเกลียว และเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ที่บริเวณผิวสัมผัส และความสามารถของโปรตีนที่จะเกิดอันตรกิริยากับโปรตีนข้างเคียง เกิดเป็นชั้นฟิล์มโปรตีนที่สามารถทนต่อความร้อนและแรงกล (Damodaran, 1997) ไข่ขาวมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบหลัก จึงทำให้ไข่ขาวมีสมบัติในการเป็น surface active โดยไข่ขาวจะมีค่าแรงตึงผิวน้อยกว่าน้ำกลั่นที่มีค่าแรงตึงผิวเท่ากับ 72 dynes/cm ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (Li-Chan et al., 1995) Antipova และ

คณะ (1999) พบว่าสารละลายโอวัลบูมินเข้มข้น 0.001% (w/v) ที่ค่า pH 7.0 มีค่าแรงตึงผิวประมาณ 55 dynes/cm ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

2.3 สมบัติเชิงหน้าที่ของไข่ขาว

สมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีน หมายถึง สมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่มีผลต่อพฤติกรรมของโปรตีนในอาหารระหว่างการแปรรูป การเก็บรักษา การเตรียมอาหาร และการบริโภค (Damodaran, 1996) ซึ่งสมบัติเชิงหน้าที่หลักของไข่ขาวในผลิตภัณฑ์อาหารจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ประการ ได้แก่ สมบัติด้านการเกิดโฟม และสมบัติด้านการเกิดเจล ส่วนสมบัติด้านการเป็นอิมัลซิ-ไฟเออร์ของไข่ขาวนั้นจะไม่เด่นชัดเมื่อเปรียบเทียบกับไข่แดง (Yang and Baldwin, 1995)

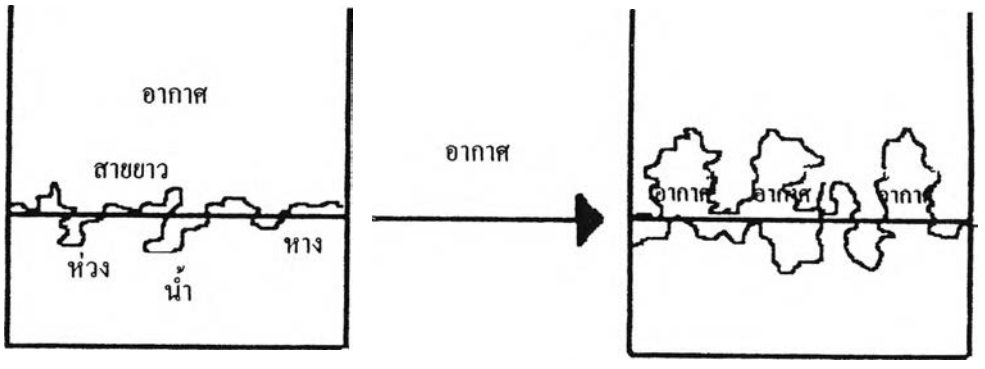
2.3.1 สมบัติด้านการเกิดโฟม

สมบัติการเกิดโฟมของโปรตีน หมายถึง ความสามารถของโปรตีนที่ทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างชั้นน้ำกับชั้นอากาศ และรักษาความคงตัวให้กับฟิล์มไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงกระทำจากภายนอก ผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องการสมบัติการเกิดโฟม ได้แก่ ไอศกรีม เค้ก และเมอร์แรงจ์ เป็นต้น (Damodaran, 1997)

โฟมเป็นระบบคอลลอยด์ มีก๊าซเป็นวัฏภาคกระจายอยู่ในไข่ขาว เมื่อตีไข่ขาวจะทำให้ฟองอากาศภายในโฟมไข่ขาวกระจายตัวเป็นฟองเล็ก ๆ แทรกอยู่ในไข่ขาว ส่งผลให้ไข่ขาวมีลักษณะปรากฏเปลี่ยนแปลงไป จากเดิมที่มีลักษณะโปร่งแสงเปลี่ยนเป็นทึบแสง การตีไข่ขาวเป็นเวลานานเกินไปจะทำให้โฟมไข่ขาวยุบตัว (collapse) เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า "over beating" (Yang and Baldwin, 1995)

2.3.1.1 กลไกการเกิดโฟม

การเกิดโฟมของไข่ขาวเกิดขึ้นเมื่อโปรตีนได้รับแรงกลจากการตี ทำให้สายพอลิ-เพปไทด์ภายในโครงสร้างของโปรตีนคลายเกลียวจากการพับซ้อน และเคลื่อนที่ไปดูดซับบริเวณผิวสัมผัสระหว่างชั้นน้ำกับชั้นอากาศ สายพอลิเพปไทด์จัดเรียงตัวใหม่ในลักษณะสายยาว (train) ห่วง (loop) และหาง (tail) (ภาพที่ 2.2) โดยลักษณะสายยาว คือ ส่วนที่ไม่มีขั้วที่หันเข้าสู่ฟองอากาศ และส่วนที่มีขั้ว (hydrophilic group) มีลักษณะเป็นห่วงหันเข้าสู่ชั้นน้ำ ส่วนหางจะเป็น N-terminal และ C-terminal ของโปรตีนจะหันเข้าสู่ชั้นน้ำเช่นกัน จากนั้นสายพอลิเพปไทด์จะเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงเกิดเป็นชั้นฟิล์มโปรตีน (lamellae) ล้อมรอบฟองอากาศไว้ ซึ่งชั้นฟิล์มโปรตีนที่เกิดขึ้นนี้จะมีความคงตัวและสามารถกักเก็บอากาศและของเหลวไว้ได้โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงกระทำจากภายนอก (Damodaran, 1996; Zayas, 1997)



ภาพที่ 2.2 แบบจำลองกลไกการเกิดโฟมของโปรตีน

ที่มา: ดัดแปลงจาก Wong (1989)

2.3.1.2 วิธีวิเคราะห์สมบัติด้านการเกิดโฟม

สมบัติด้านการเกิดโฟมของโปรตีนจะพิจารณาจากค่าความสามารถในการเกิดโฟม (foam ability หรือ foam capacity) ของโปรตีน ซึ่งจะรายงานในรูป foaming power (FP) หรือ foam expansion (FE) ดังสมการ (1)

$$\text{foam expansion} = \frac{\text{ปริมาตรของโฟม}}{\text{ปริมาตรของของเหลวเริ่มต้น}} \times 100 \qquad .....(1)$$

นอกจากนี้ Phillips และคณะ (1987) ได้เสนอวิธีการวัดความสามารถในการเกิดโฟมของโปรตีนในรูปของ %overrun ดังสมการ (2) ทั้งนี้ความสามารถในการเกิดโฟมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณโปรตีนมากขึ้น แต่ความสามารถในการเกิดโฟมจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่งจากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณโปรตีนให้มากขึ้นค่าความสามารถในการเกิดโฟมจะเริ่มคงที่ อย่างไรก็ตามความสามารถในการเกิดโฟมของโปรตีนยังขึ้นอยู่กับวิธีทำให้เกิดโฟมด้วย (Zayas, 1997)

$$\%\text{overrun} = \frac{(\text{ปริมาตรของโฟม} - \text{ปริมาตรของของเหลวเริ่มต้น})}{\text{ปริมาตรของของเหลวเริ่มต้น}} \times 100 \qquad .....(2)$$

สำหรับความคงตัวของโฟม (foam stability) หมายถึงความสามารถของโปรตีนที่จะรักษาเสถียรภาพของโฟมไว้ได้เมื่อมีแรงกระทำอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงของโลก หรือแรงกลต่าง ๆ ซึ่งจะวัดอยู่ในรูปของเวลาที่ใช้ในการลดปริมาตรของโฟมลงครึ่งหนึ่งของปริมาตรโฟม

เริ่มต้น หรือเวลาที่ตั้งโฟมทิ้งไว้จนมีปริมาณของของเหลว (drainage) ครึ่งหนึ่งของปริมาณโปรตีนเริ่มต้น (Lomakina and Mikova, 2006)

2.3.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติด้านการเกิดโฟม

-การเติมน้ำตาล

การเติมน้ำตาลลงในไข่ขาวมีผลทำให้ไข่ขาวมีความสามารถในการเกิดโฟมลดลง แต่จะช่วยให้ไข่ขาวมีความคงตัวของโฟมสูงขึ้น เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลน้ำตาลสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโปรตีน และขัดขวางการคลายเกลียวของสายพอลิเพปไทด์ภายในโครงสร้างของโปรตีน ทำให้โปรตีนมีสมบัติด้านการเป็น surface active ลดลง อย่างไรก็ตามการที่น้ำตาลขัดขวางการคลายเกลียวของโปรตีนจะมีผลให้โปรตีนเกิดอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนด้วยกันเอง (protein-protein interaction) น้อยลง ทำให้มีปริมาณโปรตีนไปจัดเรียงตัวที่บริเวณพื้นผิวรอยต่อเพื่อสร้างฟิล์มโปรตีนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มโปรตีนที่ล้อมรอบฟองอากาศหนามากขึ้น จึงช่วยให้โฟมไข่ขาวมีความคงตัวเพิ่มขึ้น (Patino et al., 1995) Lua และ Dickinson (2005) ศึกษาผลของการเติมสารละลายน้ำตาลอินเวิร์ตลงในไข่ขาวต่อความสามารถในการเกิดโฟมและความคงตัวของโฟมไข่ขาว โดยเติมสารละลายน้ำตาลอินเวิร์ตเข้มข้น 50, 60, 70 และ 82 °Brix ลงในสารละลายไข่ขาวผงเข้มข้น 6% (w/v) จากนั้นตีไข่ขาวให้เกิดโฟมเป็นเวลา 5 นาที แล้ววิเคราะห์ค่า %overrun และค่าครึ่งชีวิตของการเกิดโฟมเปรียบเทียบกับไข่ขาวที่ไม่เติมสารละลายน้ำตาลอินเวิร์ต พบว่าการเติมสารละลายน้ำตาลอินเวิร์ตลงในไข่ขาวทำให้ความสามารถในการเกิดโฟมของไข่ขาวลดลง โดยไข่ขาวที่เติมสารละลายน้ำตาลอินเวิร์ตเข้มข้น 50°Brix มีค่า %overrun สูงที่สุด คือ 530% รองลงมา คือ ไข่ขาวที่เติมสารละลายน้ำตาลอินเวิร์ตเข้มข้น 70°Brix มีค่า %overrun คิดเป็น 310% และไข่ขาวที่เติมสารละลายน้ำตาลอินเวิร์ตเข้มข้น 82°Brix จะมีค่า %overrun ต่ำที่สุด คือ 50% ในขณะที่การเติมสารละลายน้ำตาลอินเวิร์ตลงในไข่ขาวจะทำให้โฟมไข่ขาวมีความความคงตัวเพิ่มขึ้น โดยไข่ขาวที่เติมสารละลายน้ำตาลอินเวิร์ตเข้มข้น 60°Brix มีค่าครึ่งชีวิตของการเกิดโฟมสูงที่สุดโดยมีค่ามากกว่า 42 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับโฟมไข่ขาวที่ไม่เติมสารละลายน้ำตาลอินเวิร์ตที่มีค่าครึ่งชีวิตของการเกิดโฟมน้อยกว่า 1 ชั่วโมง นอกจากนี้รายงานของ Sun และคณะ (2008) ยังพบว่าการเติมน้ำตาลฟรุกโตสลงในสารละลายไข่ขาวผงเข้มข้น 5% (w/v) มีส่วนช่วยให้โฟมไข่ขาวมีความคงตัวเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน โดยเมื่อตั้งโฟมไข่ขาวทิ้งไว้เป็นเวลานาน 10 นาที โฟมไข่ขาวที่เติมน้ำตาลฟรุกโตสปริมาณ 15% (w/v) มีค่าร้อยละของ

ปริมาณ drainage ต่ำที่สุด คือ ร้อยละ 12 เมื่อเปรียบเทียบกับโฟมไข่ขาวที่ไม่เติมน้ำตาลที่มีค่าร้อยละของปริมาณ drainage สูงที่สุด คือ ร้อยละ 28

-การเติมเกลือ

เกลือมีลักษณะโมเลกุลที่มีทั้งขั้วบวกและขั้วลบ (counter ion) เมื่อเกลือเกิดอันตรกิริยากับโปรตีนจะช่วยลดแรงผลักกัน (electrostatic repulsion) ระหว่างโปรตีนได้ ส่งผลให้โปรตีนสามารถจัดเรียงตัวที่ผิวสัมผัสระหว่างชั้นน้ำกับชั้นอากาศได้เพิ่มขึ้น ดังนั้นการเติมเกลือลงในไข่ขาวจึงช่วยปรับปรุงความสามารถในการเกิดโฟมและความคงตัวของโฟมไข่ขาวให้ดีขึ้นได้ Raikos และคณะ (2007a) ศึกษาผลของน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านการเกิดโฟมของไข่ขาว โดยแปรอัตราส่วนน้ำตาลต่อเกลือที่เติมลงในไข่ขาวที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสนาน 2 นาที เป็น 0.12%:0%, 0%:0.12% และ 0.6%:0.6% (w/w) จากนั้นตีไข่ขาวให้เกิดโฟมเป็นเวลา 10 นาที แล้ววิเคราะห์ค่า %overrun และค่าครึ่งชีวิตของการเกิดโฟมเปรียบเทียบกับไข่ขาวที่ไม่เติมทั้งน้ำตาลและเกลือ พบว่าการเติมเกลือลงในไข่ขาวมีส่วนช่วยให้ไข่ขาวมีความสามารถในการเกิดโฟมและความคงตัวของโฟมเพิ่มขึ้น โดยไข่ขาวที่เติมเกลือ 0.12% (w/w) มีค่า %overrun สูงที่สุด คือ 1000% รองลงมา คือ ไข่ขาวที่เติมทั้งเกลือและน้ำตาล 0.6%:0.6% (w/w) ที่มีค่า %overrun เท่ากับ 600% ส่วนไข่ขาวที่เติมน้ำตาล 0.12% (w/w) จะมีค่า %overrun ต่ำที่สุดคือ 500% และเมื่อพิจารณาความคงตัวของโฟมไข่ขาวพบว่า ไข่ขาวที่เติมเกลือ 0.12% (w/w) มีค่าครึ่งชีวิตของการเกิดโฟมสูงที่สุด คือ 90 นาที ส่วนไข่ขาวที่เติมน้ำตาล 0.12% (w/w) และไข่ขาวที่เติมทั้งน้ำตาลและเกลือ 0.6%:0.6% (w/w) จะที่มีค่าครึ่งชีวิตของการเกิดโฟมรองลงมาคือ 75 และ 70 นาที ตามลำดับ ในขณะที่ไม่เติมทั้งน้ำตาลและเกลือมีค่าครึ่งชีวิตของการเกิดโฟมต่ำที่สุด คือ 50 นาที

-ระยะเวลาการเก็บไข่ไก่

เมื่อเก็บไข่ไก่ไว้เป็นระยะเวลานาน ไข่ไก่จะสูญเสียก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกทางรูเปลือกไข่ ทำให้ไข่ขาวมีค่า pH สูงขึ้น (Li-Chan et al., 1995) ส่งผลให้ไข่ขาวมีสมบัติด้านการเกิดโฟมเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม จากรายงานของ Alleoni และ Antunes (2004) ที่ศึกษาผลของระยะเวลาการเก็บไข่ไก่ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนเอส-โอวัลบูมินและความคงตัวของโฟมไข่ขาวในไข่ไก่ที่เปลือกเคลือบด้วย whey protein concentrate (WPC) ผงเข้มข้น 10% (w/v) พบว่าเมื่อเก็บไข่ไก่ที่เปลือกไม่ได้เคลือบด้วย WPC ไว้นาน 28 วัน ไข่ขาวมีค่า pH สูงขึ้น โดยไข่ขาวมีค่า pH เพิ่มขึ้นจาก 7.93 เป็น 9.44 ส่งผลให้ไข่ขาวมีปริมาณโปรตีนเอส-โอวัลบูมินเพิ่มขึ้นด้วย

เช่นกัน โดยไข่ขาวมีปริมาณโปรตีนเอส-โอวัลบูมินเพิ่มขึ้นจาก 18.15% เป็น 81.46% ในขณะที่โฟมไข่ขาวจะมีความคงตัวลดลงโดยมีปริมาณ drainage เพิ่มขึ้นจาก 1.08 เป็น 9.96 มิลลิลิตร เมื่อเปรียบเทียบกับไข่ขาวในไข่ไก่ใหม่ ส่วนไข่ไก่ที่เปลือกเคลือบด้วย WPC ฟิล์มของ WPC ช่วยป้องกันการสูญเสียก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกทางรูเปลือกไข่ ดังนั้นเมื่อเก็บไข่ไก่ไว้เป็นเวลา 28 วัน ไข่ขาวจึงมีค่า pH ไม่เปลี่ยนแปลง และมีปริมาณโปรตีนเอส-โอวัลบูมินน้อยลง ทำให้ไข่ขาวมีความคงตัวของโฟมเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับไข่ไก่ที่เปลือกไม่ได้เคลือบด้วย WPC

Silversides และ Budgell (2004) ศึกษาผลของระยะเวลาการเก็บไข่ไก่ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH และค่าความสามารถในการเกิดโฟมของไข่ขาว โดยเก็บไข่ไก่ไว้เป็นเวลา 5 และ 10 วัน จากนั้นนำไข่ไก่มาวัดค่าความสูงของชั้นไข่ขาว ค่า pH ของไข่ขาว และค่าปริมาตรของโฟมไข่ขาวที่เกิดขึ้นหลังจากตีโฟมไข่ขาวเป็นเวลา 80 วินาที เปรียบเทียบกับไข่ขาวในไข่ไก่ใหม่ที่เก็บไว้นาน 2 ชั่วโมง พบว่าหลังจากเก็บไข่ไก่ไว้ในช่วงเวลา 10 วัน ชั้นของไข่ขาวมีความสูงลดลง ในขณะที่ไข่ขาวมีค่า pH และค่าความสามารถในการเกิดโฟมเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับไข่ขาวที่ได้จากไข่ไก่ใหม่ ทั้งนี้เป็นเพราะในระหว่างการเก็บรักษา ไข่ขาวมีค่า pH สูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการสลายตัวของเส้นใยโอโวมิวซินในไข่ขาวข้น ไข่ขาวจึงมีความหนืดลดลง เป็นผลให้ไข่ขาวมีความสามารถในการกักเก็บอากาศได้เพิ่มขึ้น

-การให้ความร้อน

เมื่อไข่ขาวได้รับความร้อน สายพอลิเพปไทด์ภายในโครงสร้างของโปรตีนจะคลายเกลียวจากการพับซ้อน และเผยหมู่ที่ไม่มีขั้วออกมาด้านนอก ทำให้เกิดการเกาะรวมตัวกัน (aggregate) ของสายพอลิเพปไทด์ด้วยแรงยึดเหนี่ยวแบบ hydrophobic interaction (Damodaran, 1996) ส่งผลให้โปรตีนในไข่ขาวมีสมบัติด้านการเป็น surface active ลดลง อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนแก่ไข่ขาวจะช่วยให้โฟมไข่ขาวมีความคงตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเกิดการเกาะรวมตัวกันของโปรตีน จะทำให้ชั้นฟิล์มโปรตีนที่ล้อมรอบฟองอากาศมีความหนามากขึ้นจึงช่วยป้องกันการ drainage ของของเหลวออกจากฟิล์มโปรตีนได้ Ibanoglou และ Ercelebi (2007) ศึกษาผลของอุณหภูมิในการให้ความร้อนแก่ไข่ขาวต่อสมบัติด้านการเกิดโฟมของไข่ขาว โดยให้ความร้อนแก่สารละลายไข่ขาวผงเข้มข้น 0.05% (w/v) ที่อุณหภูมิ 65, 70, 75 และ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที นำไข่ขาวที่ผ่านการให้ความร้อนปริมาณ 5 มิลลิลิตร บรรจุลงในคอลัมน์ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 35 มิลลิเมตร และสูง 250 มิลลิเมตร จากนั้นป้อนอากาศเข้าไปภายในคอลัมน์เป็นเวลา 10 วินาที วัดปริมาตรของโฟมไข่ขาวที่เกิดขึ้น และค่าครึ่งชีวิตของการเกิดโฟมเปรียบเทียบกับไข่ขาวที่ไม่ผ่านความร้อน พบว่าการให้ความร้อนแก่ไข่ขาวที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ไข่ขาวมีความสามารถในการเกิดโฟมลดลง แต่โฟมไข่ขาวจะมีความคงตัวสูงขึ้น โดยไข่ขาวที่ไม่ผ่านความร้อนมีปริมาตรของโฟมสูงที่สุด คิดเป็นร้อยละ 48 ในขณะที่ไข่

ขาวที่ผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 65, 70, 75 และ 80 องศาเซลเซียส มีปริมาตรของโฟมใกล้เคียงกัน คิดเป็นร้อยละ 40 เมื่อพิจารณาความคงตัวของโฟมไข่ขาว พบว่าไข่ขาวที่ผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส มีค่าครึ่งชีวิตของการเกิดโฟมสูงที่สุดประมาณ 350 นาที รองลงมาคือ ไข่ขาวที่ผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 70 และ 65 องศาเซลเซียส มีค่าครึ่งชีวิตของการเกิดโฟมเท่ากับ 320 และ 300 นาที ตามลำดับ ส่วนไข่ขาวที่ไม่ผ่านความร้อนจะมีค่าครึ่งชีวิตของการเกิดโฟมต่ำที่สุด คือ 250 นาที

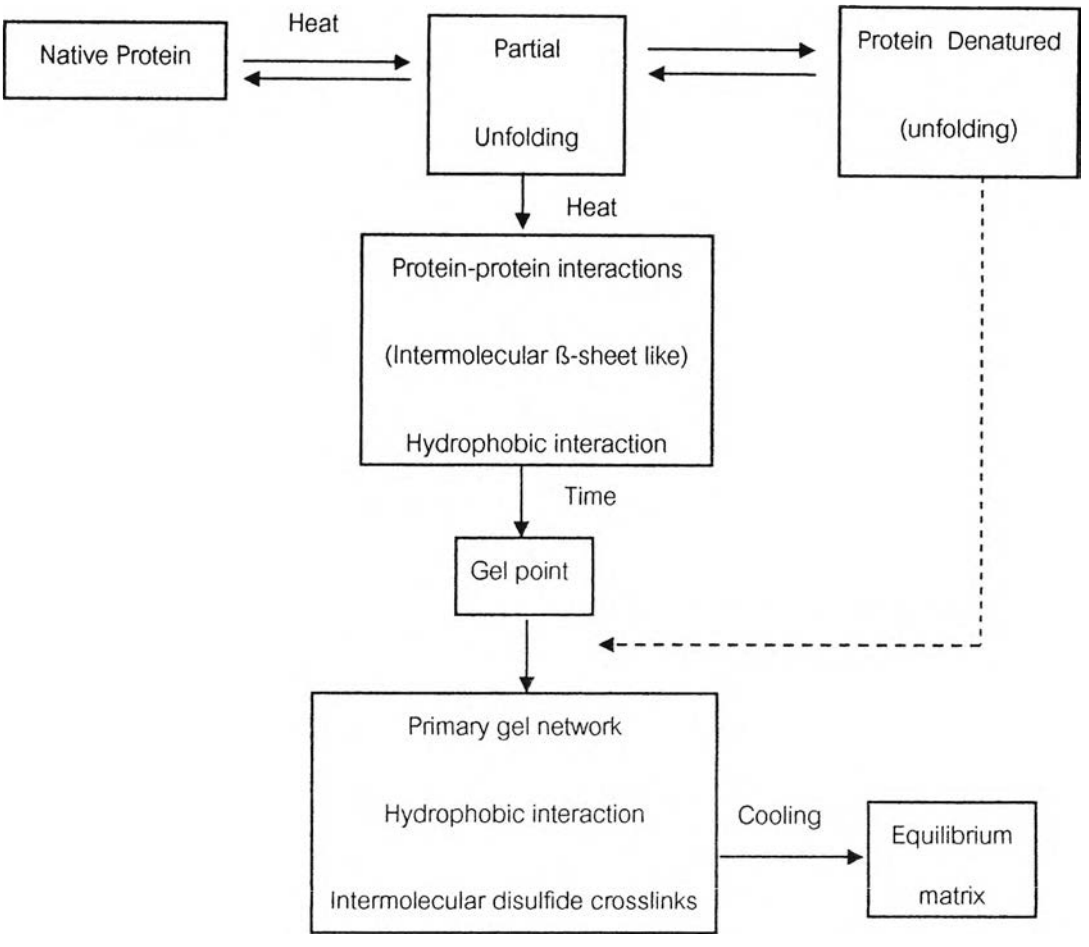
2.3.2 สมบัติด้านการเกิดเจล

เจลจัดเป็นวัฏภาคที่อยู่ระหว่างของแข็งและของเหลว โดยเจลเกิดจากการเชื่อมต่อกันของสายพอลิเมอร์ด้วยพันธะโควาเลนต์ หรือพันธะอื่นที่ไม่ใช่พันธะโควาเลนต์ก็ได้ เพื่อที่จะสร้างโครงร่างตาข่ายที่สามารถกักเก็บโมเลกุลของน้ำและโมเลกุลสารอื่น ๆ ที่มีขนาดเล็กไว้ภายใน (Damodaran, 1996) ทั้งนี้การเกิดเจลของโปรตีนเป็นกระบวนการเปลี่ยนสภาพของโปรตีนจากสภาพโซลที่มีลักษณะเป็นของเหลวไหลได้ให้กลายเป็นเจลที่มีลักษณะเป็นของกึ่งแข็งกึ่งเหลว เรียกปรากฏการนี้ว่า "gelation" ซึ่งเจลของไข่ขาวจะมีสีขาวขุ่นคล้ายน้ำนม (Yang and Baldwin, 1995) นอกจากนี้การเกิดเจลของโปรตีนยังขึ้นอยู่กับความสมดุลของแรงดึงดูด (attractive hydrophobic interaction) และแรงผลัก (repulsive electrostatic interaction) ระหว่างสายพอลิเพปไทด์ภายในโครงสร้างโปรตีนและระหว่างโปรตีนกับโมเลกุลของน้ำ หากแรงดึงดูดมีมากกว่าแรงผลักจะทำให้เจลไม่สามารถกักเก็บน้ำไว้ได้ ส่งผลให้เกิดการแยกน้ำ (syneresis) แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าแรงผลักมีมากกว่าแรงดึงดูดจะมีผลให้ไม่สามารถเกิดเป็นเจลได้ เพราะโปรตีนไม่สามารถจับตัวกันได้ (Damodaran, 1996; Zayas, 1997)

2.3.2.1 กลไกการเกิดเจล

วิธีที่ทำให้เกิดเจลมีทั้งวิธีทางกายภาพ เช่น การใช้ความร้อน และการใช้ความดันสูง และวิธีทางเคมี เช่น การใช้ยูเรีย ด่าง และเอนไซม์ วิธีที่ได้รับความนิยม คือ วิธีการใช้ความร้อน กลไกการเกิดเจลของไข่ขาวแสดงดังภาพที่ 2.3 เมื่อไข่ขาวได้รับความร้อน โปรตีนไข่ขาวจะเสียสภาพธรรมชาติ โดยเกิดการสลายตัวของพันธะไฮโดรเจนที่ยึดเหนี่ยวระหว่างสายพอลิเพปไทด์ ส่งผลให้สายพอลิเพปไทด์ของโปรตีนคลายเกลียวจากการพับซ้อน ไข่ขาวจะมีลักษณะข้นหนืดมากขึ้น จากนั้นจะเกิดการเกาะรวมตัวกันของสายพอลิเพปไทด์ด้วยแรงยึดเหนี่ยวแบบ hydrophobic interaction และ electrostatic attraction เกิดเป็นโครงร่างสามมิติแบบ β-sheet like ที่มีโมเลกุลของน้ำแทรกตัวอยู่ภายในโครงสร้าง หลังจากนั้นจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายพอลิเพปไทด์ด้วยแรงยึดเหนี่ยวแบบ sulfhydryl-disulfide ทำให้โครงร่างสามมิติมีความคงตัว

ยิ่งขึ้น และเมื่อเจลเย็นตัวลง สายพอลิเพปไทด์ภายในโครงร่างสามมิติจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้เจลไข่ขาวที่ได้มีความยืดหยุ่นขึ้น (Mine, 1995; Zayas, 1997)



ภาพที่ 2.3 แบบจำลองกลไกการเกิดเจลของไข่ขาว

ที่มา: Mine (1995)

2.3.2.2 วิธีในการวิเคราะห์สมบัติด้านการเกิดเจล

โดยทั่วไปอุณหภูมิในการเกิดเจล (gelation temperature) ของโปรตีนแต่ละชนิดจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า หรือเท่ากับอุณหภูมิในการเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีนชนิดนั้น ซึ่งอุณหภูมิในการเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีนจะสามารถตรวจสอบได้โดยอาศัยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) อุณหภูมิในการเสียสภาพของโปรตีนจะพิจารณาจากจุดสูงสุดของพีคที่แสดงในเทอร์โมแกรม (thermogram) ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานความร้อนของโปรตีนกับค่าอุณหภูมิที่ให้ความร้อน (Matsumura and Mori, 1996) นอกจากนี้ Hsieh และคณะ (1993) ยังพบว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลของโปรตีนสามารถวิเคราะห์

ได้จากสมบัติด้านการไหล (rheological properties) ของโปรตีนโดยใช้เครื่อง rheometer ซึ่งจะพิจารณาจากค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (elastic modulus, G´) ของโปรตีนเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการให้ความร้อน โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิในการให้ความร้อนกับค่า G´ ค่าอุณหภูมิที่โปรตีนมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจะบ่งบอกถึงอุณหภูมิในการเกิดเจลของโปรตีน

ส่วนวิธีที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของระบบเจลไข่ขาวคือ วิธีการทดสอบแบบ texture profile analysis (TPA) ซึ่งวิธีนี้ใช้ได้กับอาหารหลายประเภทโดยเฉพาะอย่างยิ่งการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของระบบเจล TPA เป็นวิธีการทดสอบที่เลียนแบบการเคี้ยวของมนุษย์ โดยเครื่องจะทำการกดลงบนอาหาร 2 ครั้งและแสดงผลอยู่ในรูปของกราฟค่าแรงและเวลา ทำให้ได้ค่าตัวแปรทางเนื้อสัมผัสที่มีความสัมพันธ์กับคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส (Rosenthal, 1999) Fernandez-Lopez และคณะ (2006) ศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลไข่ขาวของนกกระจอกเทศ โดยบรรจุไข่ขาวของนกกระจอกเทศใส่ในไส้สังเคราะห์ (cellulose casing) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.1 เซนติเมตร และสูง 80 เซนติเมตร แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที วางเจลไข่ขาวทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลไข่ขาวที่ได้ โดยใช้วิธีการทดสอบแบบ TPA ซึ่งค่าตัวแปรทางเนื้อสัมผัสจะวัดอยู่ในรูปของค่าความแข็ง (hardness) ความสามารถเกาะรวมตัวกัน (cohesiveness) ความยืดหยุ่น (springiness) ความเหนียว (gumminess) การเกาะติดพื้นผิว (adhesiveness) และการทนต่อการเคี้ยว (chewiness) ทดลองเปรียบเทียบกับเจลไข่ขาวของไก่ไข่ พบว่าเจลไข่ขาวของนกกระจอกเทศมีค่าความแข็ง ความเหนียว และการทนต่อการเคี้ยวน้อยกว่าเจลไข่ขาวของไก่ไข่อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ในขณะที่เจลไข่ขาวของนกกระจอกเทศจะมีค่าการเกาะติดพื้นผิวสูงกว่าเจลไข่ขาวของไข่ไก่อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

2.3.2.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติด้านการเกิดเจล

-การเติมน้ำตาล

การเติมน้ำตาลลงในไข่ขาวจะทำให้โปรตีนไข่ขาวมีความคงทนต่อการเสียสภาพธรรมชาติด้วยความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลน้ำตาลมีสมบัติในการจับกับโมเลกุลน้ำ ทำให้โปรตีนเกิดอันตรกิริยากับโปรตีนด้วยกันเองเพิ่มขึ้นด้วยแรงยึดเหนี่ยวแบบ hydrophobic interaction โปรตีนมีโครงรูป (conformation) ที่เสถียรยิ่งขึ้น ส่งผลให้โปรตีนมีความคงทนต่อการเสียสภาพธรรมชาติด้วยความร้อน (Antipova and Semenova, 1995; Semenova et al., 2002) Christ และคณะ (2005) ศึกษาผลของน้ำตาลซูโครสต่อการเปลี่ยนแปลง

อุณหภูมิในการเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีนไข่ขาว โดยแปรปริมาณน้ำตาลซูโครสที่เติมลงในสารละลายไข่ขาวเข้มข้น 15% (w/v) เป็น 4 ระดับ คือ 10, 20, 40 และ 60% (w/w) วิเคราะห์อุณหภูมิในการเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีนไข่ขาวโดยใช้เทคนิค DSC เปรียบเทียบกับไข่ขาวที่ไม่เติมน้ำตาล พบว่าการเติมน้ำตาลซูโครสลงในไข่ขาว มีผลทำให้อุณหภูมิในการเสียสภาพธรรมชาติของไข่ขาวสูงขึ้น โดยโปรตีนโอโวทรานส์เฟอร์รินและโอวัลบูมินในไข่ขาวที่เติมน้ำตาลซูโครส 40% (w/v) มีอุณหภูมิในการเสียสภาพธรรมชาติสูงที่สุด คือ 68.6 และ 86.8 องศาเซลเซียส ตามลำดับ รองลงมา คือ โปรตีนโอโวทรานส์เฟอร์รินและโอวัลบูมินในไข่ขาวที่เติมน้ำตาลซูโครส 20% (w/v) ที่มีอุณหภูมิในการเสียสภาพธรรมชาติ เท่ากับ 62.7 และ 80.4 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนโปรตีนชนิดโอโวทรานส์เฟอร์รินและโอวัลบูมินในไข่ขาวที่ไม่เติมน้ำตาลจะมีอุณหภูมิในการเสียสภาพธรรมชาติต่ำที่สุด คือ 59.1 และ 76.8 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เนื่องจากโมเลกุลน้ำตาลสามารถเกิดอันตรกิริยากับโปรตีนด้วยพันธะไฮโดรเจน และขัดขวางการคลายเกลียวของโปรตีน ส่งผลให้โปรตีนมีความคงทนต่อการเสียสภาพด้วยความร้อนเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าอุณหภูมิในการเกิดเจลของโปรตีนไข่ขาวสูงขึ้น นอกจากนี้ Kulmyrzaev และคณะ (2000) ที่ศึกษาผลของน้ำตาลซูโครสต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการเกิดเจลของเวย์โปรตีนยังพบว่า การเติมน้ำตาลซูโครสลงในสารละลายเวย์โปรตีนเข้มข้น 10% (w/v) มีผลทำให้อุณหภูมิในการเกิดเจลของเวย์โปรตีนสูงขึ้นเช่นกัน โดยสารละลายเวย์โปรตีนที่เติมน้ำตาลซูโครสปริมาณ 40% (w/v) มีอุณหภูมิในการเกิดเจลสูงที่สุด คือ 85.5 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายเวย์โปรตีนที่ไม่เติมน้ำตาลที่มีอุณหภูมิในการเกิดเจล เท่ากับ 76.2 องศาเซลเซียส เนื่องจากน้ำตาลขัดขวางการคลายเกลียวของโปรตีน ทำให้โปรตีนเผยหมู่ที่ไม่มีขั้วออกมาด้านนอกได้น้อยลง สายพอลิเพปไทด์ภายในโครงสร้างของโปรตีนจึงไม่สามารถเกิดการเกาะรวมตัวกันเพื่อที่จะสร้างเป็นโครงสร้างสามมิติได้ จึงต้องมีการให้ความร้อนแก่เวย์โปรตีนที่อุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อให้เกิดการคลายเกลียวของโปรตีน

-การเติมเกลือ

การเติมเกลือลงในไข่ขาวทำให้โปรตีนในไข่ขาวมีความคงทนต่อความร้อนเพิ่มขึ้น โดยเกลือจะไปขัดขวางการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนกับโมเลกุลน้ำ ทำให้โปรตีนเกิดอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนด้วยกันเองเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โปรตีนมีความคงทนต่อความร้อนเพิ่มขึ้น จากรายงานของ Raikos และคณะ (2007b) ที่ศึกษาผลของน้ำตาลและเกลือต่อการเปลี่ยนแปลงค่า

อุณหภูมิในการเกิดเจลและลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลไข่ขาว โดยแปรอัตราส่วนน้ำตาลต่อเกลือที่เติมลงในไข่ขาวที่ค่า pH 8 เป็น 3%:3% และ 0%:6% (w/w) ทำการทดลองเปรียบเทียบกับไข่ขาวที่ไม่ผสมทั้งน้ำตาลและเกลือ พบว่าการผสมเกลือลงในไข่ขาวมีผลทำให้อุณหภูมิในการเกิดเจลของไข่ขาวสูงขึ้น โดยไข่ขาวที่ผสมเฉพาะเกลือ 6% (w/v) มีอุณหภูมิในการเกิดเจลสูงที่สุด คือ 77.97 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับไข่ขาวที่ไม่ผสมทั้งน้ำตาลและเกลือที่มีอุณหภูมิในการเกิดเจลเท่ากับ 74.27 องศาเซลเซียส และเมื่อพิจารณาลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลไข่ขาว พบว่าการผสมเกลือลงในไข่ขาวมีผลให้เจลไข่ขาวมีค่าความแข็งลดลง โดยเจลไข่ขาวที่ผสมเฉพาะเกลือ 6% (w/v) มีค่าความแข็ง 9.29 นิวตัน ในขณะที่เจลไข่ขาวที่ไม่ผสมทั้งน้ำตาลและเกลือมีค่าความแข็ง 13.14 นิวตัน

-ความเป็นกรดด่าง

เมื่อความเป็นกรดด่างของระบบเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของประจุบนสายพอลิเพปไทด์ ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของสายพอลิเพปไทด์ภายในโครงสร้างของโปรตีน ซึ่งจะมีผลกระทบต่อสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีน โดยโปรตีนจะมีความคงทนต่อการเสียสภาพธรรมชาติมากที่สุดที่ค่า pI ของโปรตีนนั้น ๆ (Damodaran, 1996) Handa และคณะ (1998) ศึกษาผลของค่า pH ต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลไข่ขาว โดยแปรค่า pH ของไข่ขาวที่ได้จากไข่ไก่ที่มีอายุการเก็บ 3 วัน เป็น 5 ระดับ คือ 3, 5, 7, 9 และ 11 จากนั้นเตรียมเจลไข่ขาว โดยบรรจุไข่ขาวที่ได้ใส่ในไส้สังเคราะห์ (vinylidene chloride casing) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร และสูง 20 เซนติเมตร แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที วางเจลไข่ขาวทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลไข่ขาวที่ได้ พบว่าเจลไข่ขาวที่ค่า pH 3 และ 11 มีค่าความคงรูป (rigidity) สูงที่สุด คือ 0.41 และ 0.36 kN/cm ตามลำดับ ในขณะที่เจลไข่ขาวที่ค่า pH 5 และ 7 ไข่ขาวมีค่าความคงรูปต่ำที่สุด คือ 0.28 และ 0.27 kN/cm ตามลำดับ เนื่องจากโอวัลบูมินและคอนอัลบูมินเป็นโปรตีนที่พบมากในไข่ขาวซึ่งมีค่า pI อยู่ในช่วง 4.5-4.6 และ 6.1-6.6 ตามลำดับ ที่ค่า pH ใกล้กับค่า pI ของโปรตีน โปรตีนจะมีความคงทนต่อการเสียสภาพธรรมชาติมากที่สุด ดังนั้นไข่ขาวที่ค่า pH 5 และ 7 จึงมีความสามารถในการเกิดเจลไม่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับไข่ขาวที่มีค่า pH ห่างจากค่า pI ของโปรตีน

-อุณหภูมิในการให้ความร้อน

เมื่อโปรตีนได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานานจะทำให้โปรตีนเสียสภาพธรรมชาติ โดย degree of denaturation ของโปรตีนจะขึ้นกับอุณหภูมิและภาวะในการให้

ความร้อน (Damodaran, 1996) Goldsmith และ Toledo (1985) ศึกษาผลของอุณหภูมิในการให้ความร้อนแก่ไข่ขาวต่อสมบัติการเกิดเจลไข่ขาวโดยใช้เทคนิค nuclear magnetic resonance (NMR) เริ่มจากให้ความร้อนแก่ละลายไข่ขาวผงเข้มข้น 10% (w/v) ที่อุณหภูมิ 60, 65, 70, 75, 80 และ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลาตั้งแต่ 0.5 นาที ถึง 120 นาที จากนั้นวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงของเจลไข่ขาวและความอิสระของน้ำในเจลไข่ขาวโดยใช้เทคนิค NMR พบว่าไข่ขาวที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ไม่สามารถเกิดเจลได้ เนื่องจากที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นค่าอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิในการเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีนไข่ขาว แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการให้ความร้อนแก่ไข่ขาวเป็น 65 องศาเซลเซียสขึ้นไป เจลไข่ขาวจะมีค่าความแข็งแรงของเจลเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันการที่ไข่ขาวได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงจะมีผลให้เจลไข่ขาวมีค่า T_1 ของโปรตอนของโมเลกุลน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.001$) ด้วยเช่นกัน เนื่องจากเมื่อไข่ขาวได้รับความร้อนที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะมีผลให้ไข่โมเลกุลของน้ำถูกยึดเหนี่ยวไว้ภายในโครงร่างของเจลได้เพิ่มขึ้น ดังนั้นความอิสระของน้ำที่อยู่ภายในเจลไข่ขาวจึงลดลง

Plancken และคณะ (2005) ศึกษาผลของการให้ความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงการเผยหมู่ซัลไฮดริลในไข่ขาว โดยแปรอุณหภูมิในการให้ความร้อนแก่สารละลายไข่ขาวเข้มข้น 10% (v/v) อยู่ในช่วง 50-85 องศาเซลเซียส และให้ความร้อนแก่ไข่ขาวเป็นเวลา 20 นาที พบว่าเมื่อให้ความร้อนแก่ไข่ขาวที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสขึ้นไป ไข่ขาวจะเผยหมู่ซัลไฟดริลออกมาด้านนอกเพิ่มขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้วหมู่ซัลไฟดริลจะหลบอยู่ด้านในโครงสร้างของโปรตีน แต่เมื่อไข่ขาวได้รับความร้อน จะทำให้สายพอลิเพปไทด์ภายในโครงสร้างโปรตีนไข่ขาวคลายเกลียวจากการพับซ้อน และเผยหมู่ซัลไฟดริลออกมาด้านนอก ทำให้ไข่ขาวที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น เผยหมู่ซัลไฟดริลออกมาด้านนอกโมเลกุลได้เพิ่มขึ้น

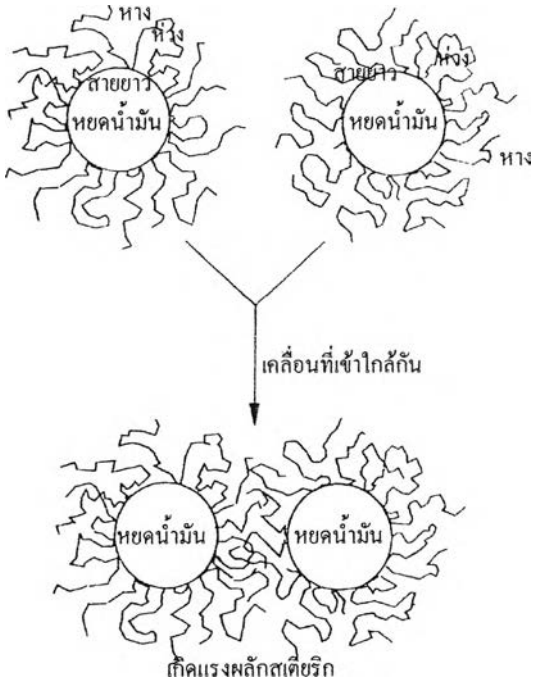
2.3.3 สมบัติด้านการเป็นอิมัลซิไฟเออร์

อิมัลชัน หมายถึง ระบบของเหลวตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปที่ไม่ละลายซึ่งกันและกัน โดยมีของเหลวชนิดหนึ่งกระจายตัวในลักษณะหยดกลมเล็ก ๆ อยู่ในของเหลวอีกชนิดหนึ่ง ระบบของอิมัลชันจะแบ่งตามลักษณะการกระจายตัว ถ้าระบบเป็นหยดน้ำมันกระจายอยู่ในน้ำ เรียกว่าอิมัลชันระบบน้ำมันในน้ำ (oil-in-water, O/W) ถ้าระบบเป็นหยดน้ำกระจายในน้ำมัน เรียกว่าอิมัลชันระบบน้ำในน้ำมัน (water-in-oil, W/O) โปรตีนทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ของระบบโดยมีการจัดเรียงส่วนที่ไม่มีขั้วของโมเลกุลโปรตีนที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำกับน้ำมัน (Damodaran, 1997; Zayas, 1997)

หอสมุดกลาง สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.3.1 กลไกการเกิดอิมัลชัน

แม้ว่าโปรตีนจะไม่สามารถลดแรงตึงผิวได้มากเท่าอิมัลซิไฟเออร์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก แต่โปรตีนจะมีบทบาทสำคัญในการรักษาความคงตัวของระบบอิมัลชันในระยะยาว โดยอาศัยกลไกของ steric stabilization เมื่อโปรตีนได้รับแรงเฉือนระหว่างการโฮโมจีไนซ์จะมีผลให้สายพอลิเพปไทด์ของโปรตีนคลายเกลียวจากการพับซ้อน สายพอลิเพปไทด์จะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ในลักษณะสายยาว ห่วง และหาง เช่นเดียวกับกลไกการเกิดโฟม (ภาพที่ 2.2) โปรตีนจะหันส่วนที่ไม่มีขั้วเข้าหาชั้นน้ำมัน ในขณะที่ส่วนที่มีขั้วหันเข้าหาชั้นน้ำ ทำให้หยดน้ำมันที่ถูกล้อมรอบด้วยโปรตีนสามารถกระจายตัวอยู่ในชั้นน้ำได้ (ภาพที่ 2.4) ทั้งนี้ความคงตัวของอิมัลชัน หรือเสถียรภาพของระบบคอลลอยด์เกิดขึ้นเพราะโปรตีนมีขนาดโมเลกุลค่อนข้างใหญ่ เมื่อโปรตีนดูดซับที่ผิวสัมผัสระหว่างหยดน้ำมันกับน้ำ จะเกิดเป็นโครงสร้างที่ทำหน้าที่กีดขวางการรวมตัวกันของหยดน้ำมัน (ปาริฉัตร หงสประภาส, 2542; Damodaran, 1997) แต่โปรตีนไข่ขาวมีสมบัติในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ต่ำ เพราะโปรตีนในไข่ขาวส่วนใหญ่เป็นไกลโคโปรตีนซึ่งมีปริมาณหมู่ที่ไม่มีขั้ว (non-polar) น้อย ทำให้มีความสามารถในการดูดซับที่ผิวสัมผัสระหว่างหยดน้ำมันกับน้ำด้อยกว่าไลโพโปรตีนซึ่งเป็นโปรตีนในไข่แดง ในอุตสาหกรรมอาหารจึงไม่นิยมใช้ไข่ขาวเป็นอิมัลซิไฟเออร์ ผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องการสมบัติการเกิดอิมัลชันได้แก่ น้ำสลัด มายองเนส และเค้ก เป็นต้น



ภาพที่ 2.4 แบบจำลองการดูดซับของโปรตีนบนอนุภาคของน้ำมัน และแรงผลักสเตียริก

ที่มา: ดัดแปลงจาก Parker (1987)

2.3.3.2 วิธีวิเคราะห์สมบัติด้านการเป็นอิมัลซิไฟเออร์

สมบัติการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ของโปรตีนจะพิจารณาจากค่า emulsion capacity (EC) ซึ่งหมายถึงความสามารถของโปรตีนในการกักเก็บน้ำมันไว้ได้โดยไม่เกิดการแยกชั้นของน้ำมัน มีหน่วยเป็นมิลลิลิตรของน้ำมันที่โปรตีนกักเก็บไว้ได้ต่อกรัมโปรตีน ส่วนเสถียรภาพของอิมัลชันจะพิจารณาจากค่า emulsion stability (ES) ซึ่งมีวิธีการคำนวณดังสมการ (3) ตามปกติอิมัลชันที่มีเสถียรภาพที่ดีนั้นจะต้องใช้เวลานานในการรอให้เกิดการแยกชั้น หากจะวัดเสถียรภาพของอิมัลชันต้องมีการใช้ภาวะที่รุนแรงช่วยเร่งให้เกิดการแยกชั้นของน้ำมัน เช่น อุณหภูมิสูง หรือการใช้แรงเหวี่ยง (Damodaran, 1996)

$$ES = \frac{\text{ปริมาตรของชั้นที่แยกออกมา}}{\text{ปริมาตรของอิมัลชัน}} \times 100 \quad .....(3)$$

นอกจากนี้ Pearce และ Kinsella (1978) ยังได้เสนอวิธีวิเคราะห์สมบัติด้านการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ของโปรตีนโดยอาศัยการวิเคราะห์ค่า emulsifying activity index (EAI) ดังแสดงในสมการ (4) ซึ่งจะใช้ประมาณความสามารถของโปรตีนในการช่วยให้เกิดอิมัลชัน และทำให้อิมัลชันเสถียร โดยอาศัยหน่วยของพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยน้ำหนักโปรตีน ซึ่งตรวจวัดด้วยความขุ่นของอิมัลชันที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร และคำนวณความเสถียรของอิมัลชันที่เกิดขึ้นจากค่า emulsion stability index (ESI) ดังสมการ (5)

$$EAI\ (m^2/g) = \frac{2\tau}{\phi C} \quad .....(4)$$

$$\tau\ (\text{ค่าความขุ่น}) = \frac{2.303 \times A_{500} \times F}{l}$$

โดยที่

A_{500} = ค่าการดูดกลืนแสงที่ 500 นาโนเมตร

F = จำนวนเท่าที่ใช้เจือจางอิมัลชัน

l = light path length (เมตร)

ϕ = สัดส่วนของน้ำมันที่ใช้ในการทำให้เกิดอิมัลชัน

C = ปริมาณโปรตีน (กรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$$ESI\ (\text{นาที}) = \frac{\tau \times \Delta t}{\Delta \tau} \quad .....(5)$$

Δt = ระยะเวลาที่ผ่านไป (นาที)

$\Delta \tau$ = ค่าความขุ่นที่เปลี่ยนไป

2.3.3.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติด้านการเป็นอิมัลซิไฟเออร์

-การเติมพอลิแซคคาร์ไรด์

โดยทั่วไปพอลิแซคคาร์ไรด์ไม่มีคุณสมบัติเป็นอิมัลซิไฟเออร์เนื่องจากมีหมู่ที่ไม่มีขั้วไม่เพียงพอที่จะดูดซับที่ผิวสัมผัสระหว่างชั้นน้ำกับชั้นน้ำมัน แต่พอลิแซคคาร์ไรด์นั้นสามารถเพิ่มความคงตัวให้กับอิมัลชันได้ (ปาริฉัตร หงสประภาส, 2542) โดยพอลิแซคคาร์ไรด์มีลักษณะโมเลกุลเป็นพอลิเมอร์สายยาว มีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลน้ำได้ด้วยพันธะไฮโดรเจน ช่วยให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น (Coffey et al., 1995; Nussinorith, 1997) ซึ่งการที่อิมัลชันมีความหนืดเพิ่มขึ้นนั้นจะมีผลให้วัฏภาคต่อเนื่องของอิมัลชันมีความหนืดสูงขึ้นด้วยเช่นกัน จึงลดการเคลื่อนที่และการชนกันของหยดน้ำมัน หยดน้ำมันจึงเกิดการเกาะรวมตัวกัน (coalesce) น้อยลง ช่วยให้อิมัลชันมีความคงตัวเพิ่มขึ้น (Herma et al., 2001) Drakos และ Kiosseoglou (2006) ศึกษาความคงตัวของอิมัลชันไข่ขาวระบบน้ำมันในน้ำที่มีค่า pH 3.8 โดยแปรความเข้มข้นของ xanthan gum ที่เติมลงในอิมัลชันไข่ขาวเป็น 0.05, 0.1, 0.2 และ 0.4% (w/v) พบว่าการเติม xanthan gum ลงในอิมัลชันช่วยให้อิมัลชันมีความหนืดสูงขึ้น โดยอิมัลชันที่เติม xanthan gum 0.4 % (w/v) มีความหนืด 40 Pa.s ในขณะที่อิมัลชันที่ไม่เติม xanthan gum มีความหนืดประมาณ 10 Pa.s ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับค่าร้อยละของความสูงของชั้นน้ำมันที่แยกชั้น ที่พบว่าอิมัลชันที่เติม xanthan gum ปริมาณ 0.4% (w/v) ไม่เกิดการแยกชั้นของน้ำมันเมื่อตั้งอิมัลชันทิ้งไว้นานมากกว่า 1000 ชั่วโมง แต่อิมัลชันที่ไม่เติม xanthan gum เกิดการแยกชั้นของน้ำมันเมื่อตั้งอิมัลชันไว้เพียง 5 ชั่วโมง และเกิดการแยกชั้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อตั้งอิมัลชันทิ้งไว้นาน 100 ชั่วโมง โดยมีค่าร้อยละของความสูงของชั้นน้ำมันที่แยกชั้น เท่ากับ ร้อยละ 35 เนื่องจากการเติม xanthan gum ลงในอิมัลชัน ทำให้อิมัลชันมีความหนืดสูงขึ้น จึงเป็นการลดการเคลื่อนที่และการชนกันของหยดน้ำมัน ส่งผลให้อิมัลชันไข่ขาวที่เติม xanthan gum มีความคงตัวต่อการแยกชั้นของน้ำมันเมื่อตั้งอิมัลชันทิ้งไว้

Jirapeangtong และคณะ (2008) ศึกษาผลของการเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (carboxymethylcellulose, CMC) ต่อเสถียรภาพของกะทิที่ผสมน้ำตาลมะพร้าวเข้มข้น 10% (w/v) และ Montanox 60 เข้มข้น 0.8% (w/v) โดยแปรความเข้มข้นของ CMC ที่เติมลงในกะทิเป็น 0.6, 0.8 และ 1% (w/v) พบว่าเมื่อเติม CMC ลงในกะทิปริมาณเพิ่มขึ้น กะทิจะมีความคง

ตัวต่อการแยกชั้นของน้ำมันมากขึ้น โดยหลังจากตั้งกะทิทิ้งไว้นาน 3 วัน กะทิที่เติม CMC ความเข้มข้น 1% (w/v) มีร้อยละของความคงตัวสูงที่สุด คือ ร้อยละ 81.16 รองลงมา คือ กะทิที่ผสม CMC ปริมาณ 0.8 และ 0.6% (w/v) โดยมีค่าร้อยละของความคงตัวคิดเป็นร้อยละ 56.33 และ 52.77 ตามลำดับ ทั้งนี้การเติม CMC ลงในกะทิมีผลทำให้กะทิมีความหนืดสูงขึ้น โดยกะทิที่เติม CMC ปริมาณ 1% (w/v) มีค่าความหนืดเท่ากับ 4.10 Pa.s ในขณะที่กะทิที่เติม CMC ปริมาณ 0.8 % (w/v) มีค่าความหนืดเท่ากับ 3.86 Pa.s ซึ่งการที่กะทิมีความหนืดเพิ่มขึ้นจะช่วยขัดขวางการเกาะรวมตัวกันของหยดน้ำมัน ทำให้กะทิมีเสถียรภาพต่อการแยกชั้นของน้ำมัน

-ความเป็นกรดด่าง

พอลิแซคคาร์ไรด์บางชนิดสามารถเกิดอันตรกิริยากับโปรตีนได้ พอลิแซคคาร์ไรด์ในกลุ่มนี้ ได้แก่ ไฮโดรคอลลอยด์ที่มีประจุลบ (anionic hydrocolloids) ในภาวะที่อิมัลชันมีค่า pH ต่ำกว่าค่า pI ของโปรตีน ไฮโดรคอลลอยด์ที่มีประจุลบจะสามารถเกิดอันตรกิริยากับโปรตีนได้ด้วยแรงยึดเหนี่ยวแบบ electrostatic interaction (Dickinson, 1995; Tolstoguzov, 1997) ส่งผลให้ชั้นฟิล์มโปรตีนที่ล้อมรอบหยดน้ำมันมีประจุเป็นลบ ทำให้หยดน้ำมันแต่ละหยดเกิดแรงผลักกัน จึงป้องกันการเกาะรวมตัวกันของหยดน้ำมัน ช่วยให้ระบบอิมัลชันมีเสถียรภาพดีขึ้น Koupantsis และ Kiosseoglou (2009) ศึกษาผลของค่า pH ต่อความคงตัวของอิมัลชันที่เตรียมจาก WPC ที่ผสม CMC ปริมาณ 2% (w/w) โดยแปรค่า pH ของอิมัลชันเป็น 3.8, 5 และ 6.8 พบว่าหลังจากตั้งอิมัลชันไว้เป็นเวลานาน 50 วัน อิมัลชันที่มีค่า pH 6.8 เกิดการแยกชั้นของน้ำมันอย่างรวดเร็ว โดยมีค่าร้อยละของความสูงของชั้นน้ำมันที่แยกชั้น เท่ากับ ร้อยละ 50 ส่วนอิมัลชันที่มีค่า pH 5 อิมัลชันจะเกิดการแยกชั้นของน้ำมันเช่นกัน โดยมีค่าร้อยละของความสูงของชั้นน้ำมันที่แยกชั้น คิดเป็นร้อยละ 10 ในขณะที่อิมัลชันที่มีค่า pH 3.8 มีความคงตัวต่อการแยกชั้นของน้ำมันมากที่สุด โดยอิมัลชันไม่เกิดการแยกชั้นของน้ำมันเมื่อตั้งอิมัลชันทิ้งไว้นาน 50 วัน เนื่องจากที่ค่า pH 3.8 เป็นค่า pH ที่ต่ำกว่าค่า pI ของเวย์โปรตีน (pI=5) โปรตีนจะมีประจุสมดุล-สุทธิไปทางบวกซึ่งเวย์โปรตีนจะสามารถจับกับ CMC ที่มีประจุเป็นลบได้ด้วยแรงยึดเหนี่ยวแบบ electrostatic interaction ฟิล์มโปรตีนที่ล้อมรอบหยดน้ำมันจะมีประจุเป็นลบ หยดน้ำมันแต่ละหยดจึงเกิดแรงผลักกัน ทำให้ระบบอิมัลชันมีความคงตัวต่อการแยกชั้นของน้ำมัน