

ผลและวิจารณ์

1. ศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่เป็ด

1.1 การเลือกชนิดวัสดุขึ้นรูปฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่เป็ด

ในการผลิตฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่เป็ดนั้น ได้ศึกษาชนิดของวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มที่เหมาะสมก่อน ซึ่งในการทดลองนี้ศึกษาวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์ม 5 ชนิด ได้แก่ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene; LDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (linear low density polyethylene; LLDPE) พอลิโพรพิลีน (polypropylene; PP) ไนลอน (nylon) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethyleneterephthalate; PET) ทำการขึ้นรูปฟิล์มจากสารละลายไข่ขาว pH 11.25 เติมซอร์บิทอลเป็นพลาสติกไซเซอรร้อยละ 50 (ตารางที่ 8) พบว่า ฟิล์มที่ได้นั้นจะเกาะติดแน่นกับพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน ไนลอน และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ซึ่งเป็นพลาสติกชนิดมีขั้ว ส่วนพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นนั้นเป็นพลาสติกชนิดไม่มีขั้ว ซึ่งสามารถลอกแผ่นฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่เป็ดออกได้ง่าย จึงเลือกพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นเป็นวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มตลอดการทดลองนี้

ตารางที่ 8 ชนิดของพลาสติกที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มต่อลักษณะปรากฏของฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่เป็ด

ชนิดพลาสติก	ลักษณะปรากฏ
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene; LDPE)	ฟิล์มใส โปร่งแสง เรียบเนียน ลอกออกจากแผ่นพลาสติกได้ง่าย
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (linear low density polyethylene; LLDPE)	ฟิล์มใส โปร่งแสง เรียบเนียน ลอกออกจากแผ่นพลาสติกได้ง่าย

ตารางที่ 8 (ต่อ)

ชนิดพลาสติก	ลักษณะปรากฏ
พอลิโพรพิลีน (polypropylene; PP)	ไม่สามารถลอกฟิล์มออกจากแผ่นพลาสติกได้
ไนลอน (Nylon)	ไม่สามารถลอกฟิล์มออกจากแผ่นพลาสติกได้
พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethyleneterephthalate; PET)	ไม่สามารถลอกฟิล์มออกจากแผ่นพลาสติกได้

1.2 ศึกษาปริมาณสารละลายไขขาวที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มโปรตีนไขขาวจากไข่เป็ด

จากการทดลอง พบว่า ปริมาณสารละลายไขขาว 20 มิลลิลิตรนั้นไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มสมบูรณ์ โดยเกิดช่องโหว่เป็นบางส่วน ขณะที่สารละลายไขขาวปริมาตร 30 และ 35 มิลลิลิตรนั้นจะให้ฟิล์มที่มีความหนาเท่ากับ 0.147 และ 0.171 มิลลิเมตรตามลำดับ (ตารางที่ 9) โดยฟิล์มมีความแข็ง และกรอบเปราะ ยากต่อการจับ และวัดสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์ม แต่การขึ้นรูปโดยใช้สารละลายไขขาว 25 มิลลิลิตร จะได้ฟิล์มที่มีความหนา 0.121 มิลลิเมตร ฟิล์มมีความยืดหยุ่น เกาะตัวเป็นแผ่นใส สามารถนำไปวัดสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มได้ จึงเลือกใช้ปริมาตรของสารละลายไขขาวเท่ากับ 25 มิลลิลิตรสำหรับการผลิตฟิล์มตลอดการทดลองนี้

ตารางที่ 9 ค่าความหนาของฟิล์มโปรตีนไขขาวจากไข่เป็ด

ปริมาตรสารละลาย (มิลลิลิตร)	ความหนาของฟิล์ม (มิลลิเมตร)
20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ เกิดรูโหว่
25	0.121 ± 0.01^a
30	0.147 ± 0.01^b
35	0.171 ± 0.01^c

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a, b, c} ที่ต่างกันในแนวนอง แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

2. ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการผลิตและสมบัติของฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่เป็ด

2.1 ศึกษาอิทธิพลของ pH ที่มีต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่เป็ด

จากการศึกษาลักษณะปรากฏของสารละลายไข่ขาว (ตารางที่ 10) พบว่า ลักษณะปรากฏของสารละลายไข่ขาวที่ปรับ pH เป็นกรดช่วง pH 2 - 6 นั้นเกิดตะกอนขุ่นขาวแขวนลอยในสารละลาย เนื่องจากโปรตีนในไข่ขาวเกิดการจับตัวกันเป็นก้อนแบบสุ่ม จึงเป็นสีขาวขุ่นทึบแสง (opacity) โดยมีปริมาณต่างกันที่แต่ละ pH กล่าวคือ ช่วง pH เท่ากับ 2 นั้นสารละลายเปลี่ยนเป็นสีขุ่นขาว และมีความหนืดสูง เนื่องจากสภาวะดังกล่าวโปรตีนไข่ขาวเสียสภาพ (denature) แต่ยังไม่จับตัวจนเกิดตะกอนแยกตัวจากสารละลาย ส่วนที่ pH เท่ากับ 4 นั้น โปรตีนเสียสภาพเพิ่มขึ้น มีสีขุ่นขาวกระจายอยู่ทั่วสารละลาย และบางส่วนจับเป็นก้อนแยกตัวอยู่ด้านล่างของภาชนะ ทั้งนี้เนื่องจากโปรตีนไข่ขาวมีหลายชนิด แต่ละชนิดมี pI แตกต่างกันจึงเกิดการรวมตัวและตกตะกอนที่ pH ต่างกัน (Gossett *et al.*, 1984; Mine, 1995) โอวัลบูมินเป็นโปรตีนที่มีอยู่มากถึงร้อยละ 54 มีค่า pI อยู่ที่ 4.5 ดังนั้นในช่วงของ pH 4 - 6 จึงเกิดการตกตะกอน และแยกตัวจากสารละลาย ส่วนที่ pH 6 ไม่พบการแยกตัวเป็นก้อนจากสารละลาย เนื่องจากโอโวทรานส์เฟอรัลซึ่งมีค่า pI อยู่ที่ 6.1 เป็นโปรตีนในไข่ขาวที่มีปริมาณน้อยจึงไม่เกิดการแยกตัวที่ชัดเจน โปรตีนไข่ขาวส่วนใหญ่จะมีค่า pI อยู่ในช่วงที่เป็นกรด (pH 4.1 - 6.6) ดังนั้นในช่วงของความเป็นเบส (pH > 7) โปรตีนจะมีประจุเป็นลบ ทำให้เกิดแรงผลักกันระหว่างโมเลกุลโปรตีน จึงทำให้โปรตีนสามารถกระจายตัวได้ดี สารละลายที่ได้จึงใสไม่มีสี ดังนั้นที่ pH 8 - 11.25 สารละลายโปรตีนไข่ขาวจึงใส ไม่มีสี ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Mine (1992); Doi *et al.* (1994); Handa *et al.* (1999a) แต่ที่ pH เท่ากับ 12 นั้นเป็นสภาวะที่เป็นเบสรุนแรง ทำให้โปรตีนเกิดการจัดเรียงตัวกันแบบ linear ทำให้เกิดเป็นเจลที่มีความโปร่งแสง (Cunningham and Cotterill, 1962; Doi, 1993) การให้ความร้อนจะมีผลต่อโปรตีนไข่ขาว เนื่องจากไข่ขาวเป็นโกลบูลาร์โปรตีน ซึ่งมีลักษณะรูปร่างทรงกลม (spherical shape) หรือกลมรี (ellipsoidal shape) อันเป็นผลจากการพันเกลียวกันของสายพอลิเพปไทด์ด้วยพันธะไฮโดรเจน พันธะไอออนิก พันธะไฮโดรโฟบิก และพันธะโควาเลนต์ (Fennema, 1996) ซึ่งความร้อนจะทำลายพันธะดังกล่าว ทำให้โปรตีนเกิดการคลายเกลียว โอโวทรานส์เฟอรัลเป็นโปรตีนไข่ขาวที่มีอุณหภูมิในการเสียสภาพต่ำที่สุด คือเท่ากับ 61 องศาเซลเซียส (Mine, 1995) ที่อุณหภูมินี้จะพบการตกตะกอนจับตัวเป็นก้อนสีขาวขุ่นเกิดขึ้น การเกิดเป็นสีขุ่นนั้นจะทำให้แผ่นฟิล์มที่ได้มีความขุ่น ไม่โปร่งแสง ซึ่งเป็นลักษณะที่ไม่ต้องการในการผลิตฟิล์ม ดังนั้นในการให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการคลายตัวของโปรตีนไข่ขาวจึงหลีกเลี่ยงไม่ใช้อุณหภูมิสูง ในการทดลองนี้จึงให้ความร้อนสารละลายไข่ขาวที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

พบว่า pH มีอิทธิพลต่อค่าความหนืดของสารละลายไข่ขาว ไข่ขาวสดมี pH 9.46 มีลักษณะใส ไม่มีสี และมีความหนืด 11.94 เซนติปัวส์ เมื่อปรับ pH เป็น 2.0 ค่าความหนืดของสารละลายไข่ขาวมีค่าสูงถึง 30.25 เซนติปัวส์ และสารละลายจะมีสีขาวขุ่น เมื่อปรับ pH สูงขึ้นเป็น 4.0 สารละลายไข่ขาวจะเกิดการตกตะกอน และค่าความหนืดจะลดลงอย่างรวดเร็ว การปรับ pH ของสารละลายเพิ่มขึ้นจนถึง 11.0 จะทำให้ค่าความหนืดเพิ่มขึ้นตามลำดับ จนมีค่าเท่ากับ 22.68 เซนติปัวส์ การเพิ่ม pH ถึง 11.25 จะทำให้ค่าความหนืดของสารละลายไข่ขาวมีค่าลดลง (16.88 เซนติปัวส์) แต่ยังคงมีลักษณะใส ไม่มีสี จากรายงานของ Shimatori *et al.* (1984) สรุปว่า ค่าความหนืดของสารละลายโอวัลบูมินที่ได้รับความร้อนจะสูงที่สุดที่ pH 3.05 ซึ่งใกล้เคียงกับการทดลองนี้ (ตารางที่ 10)

ตารางที่ 10 ค่าความหนืด ลักษณะปรากฏของสารละลายไข่ขาว และฟิล์มที่เตรียมที่ pH ต่าง ๆ กัน

สารละลาย	ค่าความหนืด (เซนติปัวส์)	ลักษณะปรากฏของ สารละลาย	ลักษณะปรากฏของฟิล์ม
ไข่ขาวสด (9.46)	11.94 ± 1.70^d	โปร่งใส ไม่มีตะกอนขุ่นขาว หนืดเล็กน้อย	ฟิล์มที่ได้มีความใส โปร่งแสง ผิวเรียบ แต่กรอบเปราะ แตก เป็นแผ่น
pH 2	30.25 ± 0.84^e	เป็นสีขาวขุ่น หนืดจับกันเป็น ก้อนเล็ก ๆ กระจายอยู่ทั่ว	ฟิล์มที่ได้ไม่เป็นแผ่น แตก เป็นเกล็ดละเอียดมีสีขาวขุ่น กรอบเปราะ
pH 4	2.71 ± 0.09^a	มีตะกอนสีขาวขุ่น จับกันเป็น ก้อน ตกตะกอนอยู่ด้านล่าง	ฟิล์มที่ได้มีความใส โปร่งแสง มากขึ้น มีก้อนขาว ๆ กระจาย อยู่เป็นบางส่วน กรอบเปราะ ไม่เป็นแผ่น

ตารางที่ 10 (ต่อ)

สารละลาย	ค่าความหนืด (เซนติปัวส์)	ลักษณะปรากฏของ สารละลาย	ลักษณะปรากฏของฟิล์ม
pH 6	6.53 ± 0.25^b	มีความโปร่งใสมากกว่าที่ pH 4 มีสี ขุ่น ๆ ออกสีนํมจาง ๆ ไม่มีตะกอน	ฟิล์มมีความใส โปร่งแสง และมีผิวเรียบมากขึ้น กรอบเปราะ แตกเป็นแผ่น ๆ
pH 8	10.11 ± 0.85^c	มีความโปร่งใสมากกว่าที่ pH 6 ไม่มีตะกอนขุ่นขาว สีขาวนํมจาง ๆ	ฟิล์มมีความใส โปร่งแสงผิวเรียบ แต่กรอบเปราะ แตกเป็นแผ่น ๆ
pH 10	10.83 ± 0.30^{cd}	มีความโปร่งใสมากกว่าที่ pH 8 หนืดมากขึ้น ไม่มีตะกอนขุ่นขาว	ฟิล์มมีความใส โปร่งแสงผิวเรียบ แต่กรอบเปราะ แตกเป็นแผ่น ๆ
pH 10.5	23.17 ± 1.18^f	มีความโปร่งใสมากกว่าที่ pH 8 หนืดมากขึ้น ไม่มีตะกอนขุ่นขาว	ฟิล์มมีความใส โปร่งแสงผิวเรียบ แต่กรอบเปราะ แตกเป็นแผ่น ๆ
pH 11	22.68 ± 1.18^f	มีความโปร่งใสมากกว่าที่ pH 8 หนืดไม่มีตะกอนขุ่นขาว	ฟิล์มมีความใส โปร่งแสงผิวเรียบ แต่กรอบเปราะ แตกเป็นแผ่น ๆ
pH 11.25	16.88 ± 0.62^c	มีความโปร่งใส ไม่มีตะกอนขุ่นขาว ๆ	ฟิล์มมีความใส โปร่งแสงผิวเรียบ แต่กรอบเปราะ แตกเป็นแผ่น ๆ

ตารางที่ 10 (ต่อ)

สารละลาย	ค่าความหนืด (เซนติปัวส์)	ลักษณะปรากฏของ สารละลาย	ลักษณะปรากฏของฟิล์ม
pH 12	วัดไม่ได้	เกิดเป็นเจลใสคล้ายแป้งเปียก	ไม่สามารถขึ้นรูปฟิล์มได้

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a, b, c, ...} ที่ต่างกันในแนวดิ่ง แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

จากการขึ้นรูปฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่เป็ด พบว่า ฟิล์มที่ทุกระดับ pH ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ ฟิล์มมีความกรอบเปราะค่อนข้างมาก และแตกเป็นเกล็ด ๆ เนื่องจากการเกิดฟิล์มนั้นโมเลกุลโปรตีนเกิดการสร้างพันธะ และจับเป็นโครงสร้างร่างแห 3 มิติ ซึ่งพันธะที่เกิดขึ้นมีทั้งพันธะไฮโดรเจน พันธะไฮโดรโฟบิก พันธะไดซัลไฟด์ และแรงกระทำไฟฟ้าสถิต (electrostatic forces) ซึ่งการเกิดพันธะดังกล่าวมีส่วนช่วยให้โครงสร้างของฟิล์มแข็งแรง โดยพันธะไดซัลไฟด์นั้นเป็นพันธะโควาเลนต์มีความแข็งแรงของพันธะสูงที่สุด โปรตีนไข่ขาวนั้นประกอบไปด้วยโปรตีนหลายชนิด โดยมีโอวัลบูมินเป็นโปรตีนหลักที่ประกอบด้วยหมู่ซัลไฮดริล 4 หมู่ และมีหมู่ซัลไฮดริลอิสระ 1 หมู่ มีพันธะไดซัลไฟด์ 1 พันธะ นอกจากนี้ยังมีโปรตีนชนิดอื่น ๆ ที่มีพันธะไดซัลไฟด์ในโมเลกุลเช่นเดียวกัน ได้แก่ โอโวทรานส์เฟอร์รินมีพันธะไดซัลไฟด์ 15 พันธะ โอโวมิวคอยด์มีพันธะไดซัลไฟด์ 9 พันธะ และไลโซไซม์มีพันธะไดซัลไฟด์ 4 พันธะ (Mine, 1995; Stadelman and Cotterill, 1995) ซึ่งการให้ความร้อน และการปรับ pH ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นจะเกิดการทำลายพันธะไดซัลไฟด์ เกิดเป็นหมู่ซัลไฮดริลอิสระ 2 หมู่ และโปรตีนเกิดการคลายเกลียวหันหมู่ไฮโดรโฟบิกและหมู่ซัลไฮดริลอิสระที่อยู่ด้านในออกมาด้านนอก ในช่วงของการทำแห้งหมู่ซัลไฮดริลเหล่านี้ซึ่งเป็นอิสระและอยู่ใกล้กันเพียงพอที่จะเกิดการสร้างพันธะใหม่ เกิดการออกซิเดชันได้พันธะไดซัลไฟด์ และเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ซัลไฮดริลและพันธะไดซัลไฟด์ขึ้นระหว่างโมเลกุลของโปรตีน (Fukushima and van Buren, 1970; Mine *et al.*, 1990; Mine, 1992; Beveridge and Arntfield, 1997; Damodaran and Paraf, 1997) นอกจากนี้มีการสร้างพันธะไฮโดรเจนและพันธะไฮโดรโฟบิกขึ้นมาใหม่เช่นเดียวกัน ทำให้เกิดโครงสร้างร่างแห 3 มิติ และมีแรงยึดจับที่แข็งแรงระหว่างสายโปรตีน (Hayakawa and Nakai, 1985; Cook and Shulman, 1998) ฟิล์มขาดความยืดหยุ่น จึงกรอบเปราะ และแตก ไม่สามารถขึ้นรูปฟิล์มเป็นแผ่นได้ จึงต้องมีการเติมสาร

พลาสติกไฮเซอรลงไปเพื่อช่วยลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสายโปรตีนพอลิเมอร์ที่อยู่ใกล้กันให้อ่อนลง เพื่อให้ได้โครงสร้างที่ยืดหยุ่น (Bechtold *et al.*, 1963)

เมื่อพิจารณาค่าความหนืดและลักษณะปรากฏของสารละลายไข่ขาวจากตารางที่ 10 จึงควรเลือกใช้สารละลายไข่ขาวที่ระดับ pH 10.5 ซึ่งมีลักษณะเด่น คือ สารละลายใส ไม่มีตะกอน และมีค่าความหนืดสูงที่สุด และเพื่อเป็นการเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Gennadios *et al.* (1996) ที่ทำการศึกษสมบัติของฟิล์มไข่ขาวจากไข่ไก่ที่ pH 11.25 ดังนั้นจึงเลือกทำการทดลองที่ระดับ pH 11.25 ด้วย

2.2 ศึกษาอิทธิพลของชนิดและความเข้มข้นของพลาสติกไฮเซอรที่มีต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่เป็ด

เมื่อนำสารละลายไข่ขาวไปวัดค่าความหนืด (ตารางที่ 11) พบว่าค่า pH ชนิด และความเข้มข้นของพลาสติกไฮเซอรนั้นมีผลต่อค่าความหนืดอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบที่ระดับ pH 10.5 และ 11.25 นั้นพบว่า สารละลายไข่ขาวที่ pH 11.25 นั้นจะมีความหนืดที่ต่ำกว่าที่ระดับ pH 10.5 เนื่องจากโปรตีนเกิดการกระจายตัวและละลายได้ดีกว่า โดยสารละลายไข่ขาวที่ระดับ pH 10.5 จะมีค่าความหนืดสูงที่สุด คือ 30.58 ± 1.09 เซนติปัวส์ เมื่อมีการเติมพลาสติกไฮเซอรลงไปค่าความหนืดกลับลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางผนวกที่ 3) เนื่องจากพลาสติกไฮเซอรที่เติมลงไปนั้นจะไปแทรกตัวระหว่างโมเลกุลของโปรตีน ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลโปรตีนนั้นลดลง ยกเว้นสารละลายไข่ขาวที่ระดับ pH 11.25 เติมซอร์บิทอลเป็นพลาสติกไฮเซอรร้อยละ 60 พบว่าค่าความหนืดจะมากกว่าเมื่อไม่เติมซอร์บิทอลอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางผนวกที่ 3) ผลการวัดความหนืดของสารละลายไข่ขาวที่ pH 10.5 และ 11.25 ในตารางที่ 11 แตกต่างจากตารางที่ 10 เนื่องจากสภาพไข่หวัดบนกระป๋องในช่วงของการทดลอง ทำให้ไม่สามารถชั่งวัตถุดิบจากแหล่งเดิมได้ ความสดของไข่ที่ได้นั้นไม่เท่ากัน และคุณภาพของไข่ขาวจากไข่เป็ดแหล่งต่างกัน อาจต่างกันได้บ้างจึงทำให้ค่าความหนืดมีความแตกต่างกัน

จากการขึ้นรูปฟิล์ม แสดงดังตารางที่ 12 พบว่า ฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายไข่ขาวที่ไม่มีการเติมพลาสติกไฮเซอรจะไม่สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ และฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายไข่ขาวที่มีการเติมพอลิเอทิลีนไกลคอล-400 ทั้งที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 50 และ 60 โดยน้ำหนักโปรตีนไข่ขาว จะไม่สามารถลอกออกเป็นแผ่นฟิล์มได้ ฟิล์มมีความกรอบเปราะและเกาะติดแน่นกับพลาสติกที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์ม เนื่องจากพอลิเอทิลีนไกลคอล-400 นั้นเป็นพอลิแอลกอฮอล์ที่มีมวลโมเลกุลขนาด

ใหญ่ เป็นสายโซ่คาร์บอนยาว การแทรกตัวระหว่างโมเลกุลของโปรตีนซึ่งเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่นเดียวกันเป็นไปได้ยาก และอาจเกิดการสร้างพันธะกันระหว่างพอลิเอทิลีนไกลคอล-400 กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น เนื่องจากมีโมโนเมอร์ใกล้เคียงกัน (Seymour and Carraher, 1992) ส่วนซอร์บิทอลนั้นมีขนาดโมเลกุลเล็กกว่า จึงสามารถแทรกตัวและขัดขวางการสร้างพันธะระหว่างโมเลกุลโปรตีนได้ดีกว่า ส่งผลให้เกิด free volume ขนาดใหญ่ และมากกว่า ฟิล์มจึงมีความยืดหยุ่นมากกว่า (Cuq *et al.*, 1997) ดังนั้นการใช้พอลิเอทิลีนไกลคอล-400 เป็นพลาสติกไซเซออร์ จึงไม่เหมาะกับการขึ้นรูปฟิล์มบนพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น ส่วนการทดลองของ Gennadios *et al.* (1996) และ Handa *et al.* (1999a, 1999b) ที่ทำการขึ้นรูปฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่ไก่ที่มีการเติมพอลิเอทิลีนไกลคอล-400 เป็นพลาสติกไซเซออร์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 50 และ 60 โดยน้ำหนักโปรตีน พบว่า สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ โดยให้ค่าร้อยละการยึดตัวที่ดี เนื่องจากในการขึ้นรูปฟิล์มของ Gennadios *et al.* (1996) และ Handa *et al.* (1999a, 1999b) นั้นทำการขึ้นรูปฟิล์มบนแผ่นกระจกที่เคลือบด้วยเทฟลอน หรือพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (polytetrafluoroethylene; PTFE) ซึ่งเป็นพลาสติกที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมี (chemical inert) มีสมบัติในการต้านแรงยึดเกาะ (anti-adhesive property) และให้ลักษณะพื้นผิวลื่น (Piringer and Baner, 2000) และในการทดลองของ McHugh *et al.* (1994) ที่ทำการขึ้นรูปฟิล์มเวย์โปรตีนซึ่งเติมพอลิเอทิลีนไกลคอล-400 เป็น พลาสติกไซเซออร์บนเพลิกซิกลาส (Plexiglas; polymethyl-methacrylate (PMMA)) ก็ สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ จะเห็นได้ว่าสามารถใช้พอลิเอทิลีนไกลคอล-400 เป็นพลาสติกไซเซออร์ในฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่ไก่ หรือฟิล์มโปรตีนชนิดอื่นได้ เพียงแต่ต้องเลือกชนิดของวัสดุในการขึ้นรูปฟิล์มให้มีความเหมาะสม และเนื่องจากทั้งเทฟลอน และเพลิกซิกลาสมีราคาแพง (Piringer and Baner, 2000) ดังนั้นในการศึกษานี้ซึ่งเป็นแค่ระดับในห้องปฏิบัติการจึงไม่สามารถเลือกใช้วัสดุดังกล่าวได้ แต่การใช้ซอร์บิทอลเป็นพลาสติกไซเซออร์ในการขึ้นรูปฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่เป็ดบนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น ก็ให้ฟิล์มที่มีความใส โปร่งแสง ผิวหน้าเรียบทั้ง 2 ด้าน ลอกออกได้ง่าย ผิวด้านที่สัมผัสอากาศสด ผิวด้านที่สัมผัสกับพลาสติกจะมันลื่น นุ่มมือ มีความอ่อนตัว สามารถพับได้โดยไม่แตกหัก ทั้งที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 50 และ 60 โดยน้ำหนักโปรตีนไข่ขาว เนื่องจากโมเลกุลของซอร์บิทอลมีขนาดเล็ก สามารถละลายน้ำได้ดี จึงสามารถแทรกตัวและยึดจับกับโมเลกุลโปรตีนไข่ขาว ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของโปรตีนพอลิเมอร์ที่อยู่ใกล้กันนั้นอ่อนลง ฟิล์มจึงมีความยืดหยุ่น (Beerler and Fenney, 1983) (ตารางที่ 12)

ตารางที่ 11 ค่าความหนืดและลักษณะปรากฏของสารละลายไข่ขาวที่มีการเติมพลาสติกไซเซอร์

สารละลาย	ค่าความหนืด (เซนติปัวส์)	ลักษณะปรากฏ
1. ไข่ขาวสด (pH 9.46)	12.87 ± 0.29^a	สารละลายใส สีออกเหลืองเล็กน้อย
2. pH 10.5 ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์	30.58 ± 1.09^h	สารละลายใส ไม่มีตะกอนขุ่นขาว
3. pH 10.5 เติมพอลิเอทิลีนไกลคอล-400 ร้อยละ 50	23.23 ± 1.02^{ef}	ไม่แตกต่างจากข้อ 2
4. pH 10.5 เติมพอลิเอทิลีนไกลคอล-400 ร้อยละ 60	24.05 ± 1.52^{fg}	ไม่แตกต่างจากข้อ 2
5. pH 10.5 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 50	20.63 ± 0.71^d	ไม่แตกต่างจากข้อ 2
6. pH 10.5 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	24.40 ± 1.35^{fg}	ไม่แตกต่างจากข้อ 2
7. pH 11.25 ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์	22.63 ± 2.91^c	ไม่แตกต่างจากข้อ 2
8. pH 11.25 เติมพอลิเอทิลีนไกลคอล-400 ร้อยละ 50	16.88 ± 0.62^c	ไม่แตกต่างจากข้อ 2
9. pH 11.25 เติมพอลิเอทิลีนไกลคอล-400 ร้อยละ 60	14.47 ± 0.70^b	ไม่แตกต่างจากข้อ 2

ตารางที่ 11 (ต่อ)

สารละลาย	ค่าความหนืด (เซนติปัวส์)	ลักษณะปรากฏ
10. pH 11.25 เดิมซอร์บิทอล ร้อยละ 50	25.40 ± 0.77^g	ไม่แตกต่างจากข้อ 2
11. pH 11.25 เดิมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	24.68 ± 0.82^g	ไม่แตกต่างจากข้อ 2

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a, b, c, ...} ที่ต่างกันในแนวดิ่ง แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 12 ลักษณะปรากฏของฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่เป็ด

ฟิล์ม	ความหนืด (เซนติปัวส์)	ลักษณะปรากฏ
1. ไข่ขาวสด (pH 9.46)	12.87 ± 0.29^a	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้
2. ไข่ขาว ที่ pH 10.5 ไม่มีการเติมพลาสติกไซเซอร์	30.58 ± 1.09^b	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้
3. ไข่ขาวที่ pH 10.5 เดิมพอลิ เอทิลีนไกลคอล-400 ร้อยละ 50	23.23 ± 1.02^{cf}	ฟิล์มแตก และเกาะติดแน่นกับพลาสติกที่ใช้ ในการขึ้นรูป
4. ไข่ขาวที่ pH 10.5 เดิมพอลิ เอทิลีนไกลคอล-400 ร้อยละ 60	$24.05 \pm 1.52^{cf,g}$	ฟิล์มแตก และเกาะติดแน่นกับพลาสติกที่ใช้ ในการขึ้นรูป

ตารางที่ 12 (ต่อ)

ฟิล์ม	ความหนืด (เซนติปัวส์)	ลักษณะปรากฏ
5. ไข่ขาวที่ pH 10.5 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 50	20.63 ± 0.71^d	ใส โปร่งแสง ผิวเรียบทั้งสองด้าน ผิวด้านที่สัมผัสอากาศสาก ผิวด้านที่สัมผัสกับพลาสติกนุ่มลื่นมือ
6. ไข่ขาวที่ pH 10.5 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	24.40 ± 1.35^{fg}	ไม่แตกต่างจากฟิล์มในข้อ 5
7. ไข่ขาวที่ pH 11.25 ไม่มีการเติมพลาสติกไซเซอร์	22.63 ± 2.91^c	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้
8. ไข่ขาวที่ pH 11.25 เติมพอลิ- เอทิลีนไกลคอล-400 ร้อยละ 50	16.88 ± 0.62^c	ฟิล์มแตก และเกาะติดแน่นกับพลาสติกที่ใช้ในการขึ้นรูป
9. ไข่ขาวที่ pH 11.25 เติมพอลิ- เอทิลีนไกลคอล-400 ร้อยละ 60	14.47 ± 0.70^b	ฟิล์มแตก และเกาะติดแน่นกับพลาสติกที่ใช้ในการขึ้นรูป
10. ไข่ขาวที่ pH 11.25 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 50	25.40 ± 0.77^e	ไม่แตกต่างจากฟิล์มในข้อ 5
11. ไข่ขาวที่ pH 11.25 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	24.68 ± 0.82^e	ไม่แตกต่างจากฟิล์มในข้อ 5

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a, b, c, ...} ที่ต่างกันในแนวดิ่ง แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

จากลักษณะปรากฏของฟิล์มสูตรต่าง ๆ นำฟิล์มที่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ (ฟิล์มโปรตีนไข่ขาวที่เติมซอร์บิทอลร้อยละ 50 และ 60 โดยน้ำหนักโปรตีนไข่ขาว ทั้งที่ระดับ pH 10.5 และ 11.25) มาวัดค่าสี ดังตารางที่ 13 พบว่า ฟิล์มที่ได้ขึ้นรูปมีความใส โปร่งแสง (ภาพที่ 3) โดยมีค่าความสว่าง (ค่า L) อยู่ระหว่าง 89.10 ถึง 89.36 ค่าสีเขียว (-a) อยู่ระหว่าง -0.88 ถึง -0.92 และค่าสีเหลือง (b) อยู่ระหว่าง 1.17 ถึง 2.08 ซึ่งฟิล์มทุกสูตรนั้นให้ค่าสีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนค่า ΔE เป็นค่าที่แสดงถึงค่าสีทั้งหมดโดยรวมที่เปลี่ยนแปลงไป ก็พบว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกัน ($p > 0.05$) (ตารางผนวกที่ 7)

ตารางที่ 13 ค่าสีของฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่เป็ด

ฟิล์ม	ค่าสี			
	L	a	b	ΔE
ไข่ขาวที่ระดับ pH 10.5 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 50	89.36 ± 0.22^{ns}	-0.92 ± 0.04^{ns}	1.17 ± 0.34^{ns}	2.58 ± 0.19^{ns}
ไข่ขาวที่ระดับ pH 10.5 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	89.10 ± 0.23^{ns}	-0.88 ± 0.06^{ns}	1.95 ± 0.15^{ns}	2.86 ± 0.22^{ns}
ไข่ขาวที่ระดับ pH 11.25 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 50	89.34 ± 0.32^{ns}	-0.91 ± 0.10^{ns}	1.83 ± 0.28^{ns}	2.66 ± 0.28^{ns}
ไข่ขาวที่ระดับ pH 11.25 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	89.26 ± 0.15^{ns}	-0.90 ± 0.02^{ns}	2.08 ± 0.18^{ns}	2.74 ± 0.16^{ns}

หมายเหตุ ^{ns} = ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

L = ค่าความสว่าง -a = ค่าสีเขียว b = ค่าสีเหลือง

$$\Delta E = \text{total color different} = [(L_f - L_{std})^2 + (a_f - a_{std})^2 + (b_f - b_{std})^2]^{0.5}$$



ภาพที่ 3 फिल्मโพรตีนไข่ขาวจากไข่เป็ด

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มโพรตีนไข่ขาวจากไข่เป็ด แสดงดังตารางที่ 14 พบว่า ระดับ pH และระดับความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอรันนั้นมีผลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และปฏิสัมพันธ์ระหว่าง pH และความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอรันมีผลต่อค่าร้อยละการยืดตัวของฟิล์มอย่างมีนัยสำคัญ (ตารางผนวกที่ 8 และ 9) โดยพิจารณาอิทธิพลของ pH พบว่า ที่ปริมาณซอร์บิทอลร้อยละ 50 ค่า pH เพิ่มขึ้นจาก 10.5 เป็น 11.25 ค่าการต้านทานแรงดึงขาดจะเพิ่มขึ้นจาก 0.57 เป็น 0.70 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร และค่าร้อยละการยืดตัวจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 6.92 เป็น 12.81 จะเห็นได้ว่าที่ระดับ pH 11.25 ฟิล์มมีโครงสร้างที่แข็งแรงกว่า หรือมีการสร้างพันธะระหว่างโมเลกุลโพรตีนมากกว่า เนื่องจากในสภาวะที่เป็นด่างพันธะไดซัลไฟด์จะถูกทำลาย โพรตีนมีความเป็นประจุลบสูง เกิดการผลักกันระหว่างสายโพรตีนทำให้กระจายตัวได้ดี ดังนั้น pH 11.25 พันธะไดซัลไฟด์จะถูกทำลายกลายเป็นหมู่ซัลไฮดริลได้มากกว่า (Hayakawa and Nakai, 1985; Hirose *et al.*, 1986) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Gennadios *et al.* (1993c) ที่ขึ้นรูปฟิล์มกวนเตนที่ pH ในช่วงต่าง ๆ พบว่า ฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่มีค่า pH สูง (9 - 13) จะมีค่าการต้านทานแรงดึงขาดสูงกว่าฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่มีค่า pH ต่ำ (2 - 4) ถึง 5 เท่า เช่นเดียวกับฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองที่เตรียมจากสารละลายที่มีค่า pH ในช่วง 8 - 10 จะให้ค่าการต้านทานแรงดึงขาดสูงกว่าฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่มีค่า pH ในช่วง 1 - 3 ถึงร้อยละ 80 และให้ผลทำนองเดียวกันในการทดลองของ Handa *et al.* (1999a) ที่ พบว่าเมื่อระดับของ pH เพิ่มขึ้นปริมาณของหมู่ซัลไฮดริลที่ผิวในสารละลายไข่ขาวก็จะเพิ่มขึ้น เมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นจาก 10.5 เป็น 11.5 นั้นปริมาณหมู่ซัลไฮดริลที่ผิวจะเพิ่มขึ้นจาก 3.81 เป็น 12.85 ไมโครโมลต่อกรัมโพรตีน เมื่อทำการขึ้นรูปฟิล์มในช่วงของการทำแห้ง หมู่ซัลไฮดริลเหล่านี้จะเกิดการออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศ เกิดการสร้างพันธะไดซัลไฟด์ขึ้นมาใหม่ เกิดเป็นโครงสร้างร่างแห 3 มิติที่แข็งแรง ฟิล์มที่ได้จึงสามารถต้านทานแรงดึงขาดได้ดี ค่าการต้านทานแรงดึงขาดและร้อยละการยืดตัวของฟิล์มจึงสูงกว่า โดยพบว่าเมื่อระดับ pH เพิ่มขึ้น

จาก 10.5 เป็น 11.5 ค่าการต้านทานแรงดึงขาดจะเพิ่มขึ้นจาก 0.44 เป็น 0.52 กิโลกรัมต่อตารางเมตร และค่าร้อยละการยืดตัวจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 26.4 เป็น 40.6 ซึ่งปริมาณของหมู่ซัลไฮดริลที่ผิวพื้นจะสัมพันธ์กับค่าร้อยละการยืดตัวของฟิล์ม เมื่อปริมาณของหมู่ซัลไฮดริลที่ผิวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พันธะไดซัลไฟด์เพิ่มขึ้น ฟิล์มมีความสามารถที่จะยืดตัว (extensibility) เพิ่มขึ้น ค่าร้อยละการยืดตัวของฟิล์มจึงสูงขึ้น เมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความร้อนก็มีผลต่อปริมาณหมู่ซัลไฮดริลที่ผิว จากการทดลองของ Handa *et al.* (1999b) ที่ทำการศึกษาปริมาณของหมู่ซัลไฮดริลที่ผิวของสารละลายไข่ขาวที่ได้รับความร้อน และไม่ได้รับความร้อน พบว่า สารละลายไข่ขาวที่ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จะมีปริมาณหมู่ซัลไฮดริลที่ผิวเพิ่มขึ้นเป็น 13.16 ไมโครโมลต่อกรัมโปรตีนเมื่อเทียบกับสารละลายไข่ขาวที่ไม่ได้รับความร้อนซึ่งมีเพียง 6.77 ไมโครโมลต่อกรัมโปรตีน และสอดคล้องกับการทดลองของ Handa *et al.* (1999a) ที่พบว่าสารละลายไข่ขาวจากไข่ไก่ที่ระดับ pH 10.5 ที่ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที จะมีปริมาณของหมู่ซัลไฮดริลที่ผิวสูงกว่าสารละลายที่ไม่ได้รับความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ โดยปริมาณหมู่ซัลไฮดริลของสารละลายที่ไม่ได้รับความร้อนและได้รับความร้อนมีค่าเท่ากับ 3.81 และ 5.07 ไมโครโมลต่อกรัมโปรตีนตามลำดับ และเมื่อนำมาขึ้นรูปฟิล์ม พบว่า ฟิล์มที่ได้จากสารละลายที่ได้รับความร้อนจะมีค่าการต้านทานแรงดึงขาด (0.50 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร) สูงกว่าเมื่อเทียบกับฟิล์มที่ได้จากสารละลายที่ไม่ได้รับความร้อน (0.44 กิโลกรัมต่อตารางเมตร) (Handa *et al.*, 1999a) จะเห็นได้ว่าฟิล์มโปรตีนส่วนใหญ่จะมีการเตรียมสารละลายในช่วงที่มี pH สูง (Gennadios *et al.*, 1993b)

ผลของระดับความเข้มข้นของซอร์บิทอลซึ่งเป็นพลาสติกไซเซอร์ต่อค่าการต้านทานแรงดึงขาด และค่าร้อยละการยืดตัว พบว่า เมื่อปริมาณพลาสติกไซเซอร์เพิ่มมากขึ้น ค่าการต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มจะลดลง แต่ค่าร้อยละการยืดตัวจะเพิ่มขึ้น ฟิล์มมีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น ที่ระดับ pH 10.5 เมื่อปริมาณซอร์บิทอลเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 50 เป็นร้อยละ 60 ค่าการต้านทานแรงดึงขาดจะลดลงจาก 0.57 เป็น 0.40 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร และค่าร้อยละการยืดตัวจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 6.92 เป็น 19.08 ตามลำดับ เช่นเดียวกับที่ pH 11.25 เมื่อปริมาณซอร์บิทอลเพิ่มขึ้น ค่าการต้านทานแรงดึงขาดจะลดลงจาก 0.70 เป็น 0.58 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร และค่าร้อยละการยืดตัวจะเพิ่มขึ้นจาก 12.81 เป็น 22.14 ตามลำดับ เนื่องจากพลาสติกไซเซอร์ที่เติมลงไปนั้นจะไปจับกับพอลิเมอร์เกิดพันธะมีซัว หรือพันธะไฮโดรเจน ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสายพอลิเมอร์ที่อยู่ใกล้กันอ่อนลง เพิ่ม free volume ทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น (Paton, 1972; Beerler and Fenney, 1983; Meier, 1990) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Gennadios *et al.* (1996) ที่ศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่ไก่ โดยใช้ไข่ขาวที่ได้จากการทำแห้งด้วยวิธีพ่นฝอย ปรับ pH ที่ระดับ 11.25 เติมซอร์บิทอลร้อยละ 50 และ 60 โดยน้ำหนักโปรตีนไข่ขาว พบว่า เมื่อปริมาณซอร์บิทอล

เพิ่มมากขึ้น ค่าการต้านทานแรงดึงขาดจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยลดลงจาก 0.38 เป็น 0.23 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร และค่าร้อยละการยืดตัวก็จะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 15.0 เป็น 18.0 และเมื่อเทียบค่าการต้านทานแรงดึงขาดระหว่างฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่เป็ดในการศึกษานี้ และฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่ไก่ของ Gennadios *et al.* (1996) จะเห็นได้ว่า ฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่เป็ดนั้นมีค่าการต้านทานแรงดึงขาด และค่าร้อยละการยืดตัวที่สูงกว่าฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่ไก่ เนื่องจากไข่ขาวของไข่เป็ดนั้นมีปริมาณกรดอะมิโนที่มีหมู่ซัลเฟอร์ (เมไทโอนีน) มากกว่าไข่ขาวจากไข่ไก่ (ตารางที่ 2) ส่งผลให้เกิดการสร้างพันธะไดซัลไฟด์มากขึ้น ซึ่งเป็นพันธะโควาเลนต์ที่มีความแข็งแรงของพันธะสูงที่สุด ฟิล์มที่ได้จึงมีโครงสร้างที่แข็งแรงกว่า และทนต่อการต้านทานแรงดึงขาด ฟิล์มของไข่ขาวจากไข่เป็ดจึงมีค่าการต้านทานแรงดึงขาด และค่าร้อยละการยืดตัวที่สูงกว่าฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่ไก่ (ที่ระดับ pH 11.25 เติมซอร์บิทอลร้อยละ 50 และ 60 โดยน้ำหนักโปรตีน)

ตารางที่ 14 สมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่เป็ด

ฟิล์ม	ความหนา (มิลลิเมตร)	ค่าการต้านทานแรงดึงขาด (กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร)	การยืดตัว (ร้อยละ)
ไข่ขาวที่ระดับ pH 10.5 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 50	0.113	0.57 ± 0.01^b	6.92 ± 0.47^a
ไข่ขาวที่ระดับ pH 10.5 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	0.116	0.40 ± 0.01^a	19.08 ± 0.43^c
ไข่ขาวที่ระดับ pH 11.25 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 50	0.121	0.70 ± 0.04^c	12.81 ± 0.47^b
ไข่ขาวที่ระดับ pH 11.25 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	0.118	0.58 ± 0.01^b	22.14 ± 0.95^d

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a, b, c, ...} ที่ต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

ส่วนการทดสอบสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม พบว่า ระดับ pH ระดับความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอร และปฏิสัมพันธ์ของทั้งสองปัจจัย มีผลต่อค่าการซึมผ่านไอน้ำอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางผนวกที่ 10) โดยเมื่อปริมาณพลาสติกไซเซอรเพิ่มมากขึ้น ค่าการซึมผ่านไอน้ำก็จะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน (ตารางที่ 15) พิจารณาที่ระดับ pH 10.5 พบว่า เมื่อปริมาณซอร์บิทอลเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 50 เป็น 60 ค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มจะเพิ่มขึ้นจาก 0.098 เป็น 0.121 กรัม.มิลลิเมตรต่อตารางเมตร.ชั่วโมง.มิลลิเมตรปรอท ยกเว้นที่ระดับ pH 11.25 พบว่า เมื่อปริมาณซอร์บิทอลเพิ่มมากขึ้น ค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มนั้นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มขึ้นของค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มที่มีระดับความเข้มข้นของซอร์บิทอลเพิ่มขึ้นดังกล่าว สอดคล้องกับการทดลองของ Gennadios *et al.* (1996) ที่พบว่าเมื่อปริมาณพลาสติกไซเซอรเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 50 เป็น 60 ค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่ไก่จะเพิ่มขึ้นจาก 0.027 เป็น 0.032 กรัม.มิลลิเมตรต่อตารางเมตร.ชั่วโมง.มิลลิเมตรปรอท จะเห็นได้ว่าค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่เป็ดในการศึกษานี้แตกต่างจากค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่ไก่ของ Gennadios *et al.* (1996) ไม่ควรนำมาเปรียบเทียบกันแม้ว่าจะเตรียมในสถานะเดียวกัน คือ ที่ระดับ pH 11.25 เดิมซอร์บิทอลความเข้มข้นร้อยละ 50 และ 60 โดยน้ำหนักโปรตีน แต่ปัจจัยด้านสถานะในการทดสอบที่แตกต่างกันก็จะให้ค่าที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ในการทดลองนี้ทำการทดสอบค่าการซึมผ่านไอน้ำที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ซึ่งเป็นสถานะจำลองการใช้งานฟิล์มภายในประเทศไทย แต่ในการทดลองของ Gennadios *et al.* (1996) ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ซึ่งในสถานะที่ความชื้นสูง ฟิล์มโปรตีนมีแนวโน้มที่จะพองตัว (swell) และโครงสร้างของโมเลกุลเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้การแพร่กระจายของโมเลกุลน้ำนั้นเพิ่มขึ้น ค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มจึงเพิ่มขึ้น (Watt, 1983)

ส่วนการทดสอบการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนด้วยเครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน โดยตัดขนาดของฟิล์มเท่ากับขนาดของแผ่นต้นแบบ (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.2 เซนติเมตร) แต่เนื่องจากฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่เป็ดนั้นมีความกรอบเปราะค่อนข้างสูง จึงต้องทำการลดพื้นที่ตัวอย่างของฟิล์มที่ใช้วัด โดยใช้อลูมิเนียมเทปตัดให้มีขนาดเท่ากับแผ่นต้นแบบ เจาะเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 เซนติเมตรบริเวณกลางแผ่น ปะทับกับชิ้นตัวอย่างฟิล์ม แล้วจึงทำการวัดค่า (ดัดแปลงจากวิธีของ Gennadios *et al.*, 1993a) แสดงดังตารางที่ 15 พบว่า ระดับของ pH และระดับความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอรนั้นมีผลต่อสมบัติการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่เป็ดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางผนวกที่ 11) ในการทดสอบฟิล์มที่ระดับ pH 10.5 และ 11.25 และความเข้มข้นของซอร์บิทอลร้อยละ 50 และ 60 พบว่า ฟิล์มที่ระดับ pH 10.5 เดิมซอร์บิทอลร้อยละ 50 นั้นจะให้ค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนต่ำที่สุดเท่ากับ 7.04 มิลลิลิตร.

มิลลิเมตรต่อตารางเมตร. ชั่วโมง.บรรยากาศ และฟิล์มที่ระดับ pH 11.25 เดิมซอร์บิทอลร้อยละ 60 จะมีการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนสูงที่สุดเท่ากับ 22.41 มิลลิตร.มิลลิเมตรต่อตารางเมตร. ชั่วโมง.บรรยากาศ เนื่องจากฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่เป็ดเป็นฟิล์มที่ชอบน้ำ (มีขี้ว) ดังนั้นความชื้นสัมพัทธ์จึงมีผลต่อการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ถ้าหากมีการใช้งานกับสถานะที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง ๆ ที่สามารถรู้ล่วงหน้า ควรมีการศึกษาข้อมูลเฉพาะที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์นั้น ๆ เนื่องจากสมบัติในการป้องกันก๊าซจะเปลี่ยนไป (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2549)

เมื่อปริมาณพลาสติกไซเซอรส์เพิ่มมากขึ้น ค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนก็จะเพิ่มมากขึ้น โดยเมื่อความเข้มข้นของซอร์บิทอลเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 50 เป็น 60 ที่ระดับ pH 10.5 ค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนจะเพิ่มขึ้นจาก 7.04 เป็น 22.41 มิลลิตร.มิลลิเมตรต่อตารางเมตร. ชั่วโมง.บรรยากาศ เนื่องจากพลาสติกไซเซอรส์ที่เติมลงไปจะไปเพิ่ม free volume ให้กับฟิล์ม ค่าการซึมผ่านของก๊าซจึงเพิ่มขึ้น (Miller and Krochta, 1997) โดยความสามารถในการซึมผ่านนั้นจะพิจารณาจาก 2 กระบวนการ คือ การที่ตัวสารซึมผ่านแทรกผ่านเข้าไปในโครงสร้างพอลิเมอร์ และความสามารถในการแพร่กระจายของตัวสารซึมผ่านในโครงสร้างพอลิเมอร์ (Robertson, 1993) ซึ่งการเติมพลาสติกไซเซอรส์มากจะไปลดสมบัติในการป้องกันของฟิล์ม ทำให้ก๊าซ ไอน้ำ และสารที่ละลายได้สามารถผ่านฟิล์มได้มากขึ้น (Banker, 1966) จากการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่เป็ดนั้นค่อนข้างสูง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วฟิล์มโปรตีนจะมีความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้ดี ที่สถานะความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ๆ (Lim *et al.*, 1998) แต่เนื่องจากฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่เป็ดนั้นมีความแข็ง และกรอบเปราะ ไม่มีความยืดหยุ่นและยากต่อการใช้งาน จึงต้องมีการเติมพลาสติกไซเซอรส์ลงไปเพื่อช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับฟิล์มเป็นปริมาณมาก ซึ่งจะส่งผลให้ฟิล์มมีค่าการซึมผ่านที่ค่อนข้างสูง นอกจากนี้ตัวพลาสติกไซเซอรส์ คือ ซอร์บิทอล ซึ่งเป็นสารที่มีหมู่ไฮดรอกซิลค่อนข้างมาก จึงเกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำในอากาศ ทำให้ปริมาณน้ำในฟิล์มเพิ่มสูงขึ้น น้ำก็จัดเป็นพลาสติกไซเซอรส์ชนิดหนึ่งซึ่งจะไปช่วยเพิ่ม free volume ให้กับฟิล์ม นอกจากนี้ยังมีโอกาสเกิดเป็นหยดน้ำขนาดใหญ่ ซึ่งเหมาะแก่การละลายของก๊าซออกซิเจน ทำให้ค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนเพิ่มสูงขึ้น (Gavara and Hernandez, 1994; Gontard *et al.*, 1996) ดังการทดลองของ Lim *et al.* (1998) ที่ทำการวัดค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มโปรตีนไข่ขาวที่ใช้เอนไซม์ทรานส์กลูตามินสเป็นสารเชื่อมข้าม และเดมซอร์บิทอลเป็นพลาสติกไซเซอรส์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 35 และ 45 พบว่า ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าร้อยละ 50 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์จะไม่ส่งผลต่อสมบัติการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม แต่ค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นมากกว่า ร้อยละ 50 ซึ่งที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์สูงปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับก็สูงขึ้น ค่าการซึมผ่านของก๊าซ

ออกซิเจนก็จะเพิ่มมากขึ้น เช่นเดียวกับการทดลองของ Park and Chinnan (1995) ที่ทำการศึกษาสมบัติการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มเซอิน และฟิล์มกูดเทน พบว่า ปริมาณของพลาสติกไฮเซอรัที่เติมลงไปนั้นมีผลต่อค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม เมื่อปริมาณพลาสติกไฮเซอรัเพิ่มมากขึ้น ค่าการซึมผ่านก็จะเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน ฟิล์มโพรตีนส่วนใหญ่ที่เตรียมจากเซอิน กูดเทน โพรตีนถั่วเหลือง หรือเวย์โพรตีนนั้นจะมีค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนสูงกว่าฟิล์มโพรตีนที่เตรียมจากคอลลาเจน (ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 0) เนื่องจากโพรตีนเหล่านี้เป็นโกลบูลาร์โพรตีน ซึ่งจะมีโครงสร้างเป็นเส้นตรงน้อย และมีกรดอะมิโนที่มีหมู่ข้างขนาดใหญ่ ทำให้จำนวนพันธะ และแรงที่ยึดเกาะกันของโมเลกุลลดลง เกิดเป็นช่องว่างขนาดใหญ่ ทำให้ค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนนั้นสูงขึ้น (Miller and Krochta, 1997) ซึ่งโพรตีนไข่ขาวจัดเป็นโกลบูลาร์โพรตีนเช่นเดียวกัน ซึ่งส่งผลให้ค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มโพรตีนไข่ขาวนั้นมีค่าสูง

ตารางที่ 15 สมบัติด้านการซึมผ่านไอน้ำ และก๊าซออกซิเจนของฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่เป็ด

ฟิล์ม	ความหนา (มิลลิเมตร)	WVP ^{1/}	P (O ₂) ^{2/}
ไข่ขาวที่ระดับ pH 10.5 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 50	0.113	0.098 ± 0.002^a	7.04 ± 2.66^a
ไข่ขาวที่ระดับ pH 10.5 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	0.116	0.121 ± 0.003^c	13.61 ± 2.48^b
ไข่ขาวที่ระดับ pH 11.25 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 50	0.121	0.115 ± 0.002^b	13.90 ± 4.93^b
ไข่ขาวที่ระดับ pH 11.25 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	0.118	0.117 ± 0.002^b	22.41 ± 2.52^c

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a, b, c, ...} ที่ต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

^{1/} การซึมผ่านของไอน้ำ (Water Vapor Permeability; WVP = กรัม.มิลลิเมตร /ตารางเมตร. ชั่วโมง.มิลลิเมตรปรอท)

^{2/} การซึมผ่านก๊าซออกซิเจน (Oxygen Permeability = มิลลิลิตร.มิลลิเมตร/ตารางเมตร. ชั่วโมง.บรรยากาศ)

2.3 ศึกษาอิทธิพลความสดของไข่ที่มีต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่เป็ด

ผลการศึกษาอิทธิพลชนิดและความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอรส์ และระดับ pH นั้น พบว่าการเติมพอลิเอทิลีนไกลคอล-400 เป็นพลาสติกไซเซอรส์นั้นไม่ว่าจะเป็นที่ระดับ pH 10.5 และ 11.25 เมื่อใช้วัสดุขึ้นรูปฟิล์มเป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นนั้น ไม่สามารถขึ้นรูปฟิล์มเป็นแผ่นได้ จึงเลือกสูตรที่มีการเติมซอร์บิทอลเป็นพลาสติกไซเซอรส์ในการทดลองนี้ โดยทำ

การขึ้นรูปฟิล์มจากไข่ที่มีความสดแตกต่างกัน คือไข่ที่มีอายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องปกติ (28 ± 3 องศาเซลเซียส) นาน 4, 11 และ 18 วัน ทำการวัดค่าความสดของไข่ด้วยเครื่องฮอฟฟ์เกจ (Haugh Gage) ซึ่งเป็นเครื่องมือมาตรฐานสำหรับวัดคุณภาพภายในของไข่ เป็นวิธีที่ยอมรับกันทั่วไป หน่วยที่วัดเรียกว่า ฮอฟฟ์ยูนิต (Haugh Unit) ซึ่งแบ่งสเกลไว้ตั้งแต่ 0-100 ยูนิต เป็นค่าสำเร็จที่คำนวณออกมาจากความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของไข่ขาวชั้นกับน้ำหนัก โดยไข่คุณภาพดีจะมีค่าฮอฟฟ์ยูนิตอยู่ระหว่าง 72 – 100 (สุวรรณ, 2529) แสดงดังตารางที่ 16 และเมื่อทำการขึ้นรูปฟิล์ม พบว่าลักษณะปรากฏของฟิล์มนั้นมีความแตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 17

ตารางที่ 16 ค่าฮอฟฟ์ยูนิต ค่าความหนืด และค่า pH ของไข่เป็ดที่มีอายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องปกติ นาน 4, 11 และ 18 วัน

เวลา (วัน)	ฮอฟฟ์ยูนิต	ความหนืด (เซนติปัวส์)	ค่า pH
4	73.41 ± 7.49^c	12.87 ± 0.29^c	9.46 ± 0.03^a
11	40.70 ± 12.06^b	12.02 ± 0.46^b	9.97 ± 0.08^b
18	28.39 ± 12.06^a	7.82 ± 0.67^a	10.05 ± 0.09^c

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a, b, c} ที่ต่างกันในแนวดิ่ง แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

จากการวัดค่าความสดของไข่เป็ดด้วยเครื่องฮอฟฟ์เกจนั้น พบว่า ค่าฮอฟฟ์ยูนิตของไข่ที่มีอายุการเก็บรักษานาน 4 วันนั้นมีค่าสูงที่สุด คือ 73.41 และไข่ที่มีอายุการเก็บรักษานาน 18 วันมีค่าต่ำสุด คือ 28.39 แต่เนื่องจากเครื่องฮอฟฟ์เกจนั้นเป็นการออกแบบมาสำหรับไข่ไก่ ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าและมีน้ำหนักน้อยกว่า แต่ในการทดลองนี้ใช้ไข่เป็ด ซึ่งมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากกว่า จึงไม่สามารถอ่านค่าจากเครื่องโดยตรง ต้องทำการวัดความสูงของไข่ขาวและทำการคำนวณกลับมาเป็นค่าฮอฟฟ์ยูนิต ค่าที่ตัวเลขยิ่งมากแสดงถึงความสดของไข่มาก

จากการวัดค่า pH ของสารละลายไข่ขาวที่ได้จากไข่ที่เก็บรักษาเป็นเวลาแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 28 ± 3 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อเก็บรักษาไข่นานขึ้น ค่า pH ของสารละลายไข่ขาวจะเพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 16 สาเหตุที่ทำให้ค่า pH ของไข่สูง เนื่องจากการสูญเสียคาร์บอนไดออกไซด์ โดยตามธรรมชาติโซเดียมไบคาร์บอเนต และโปแตสเซียมไบคาร์บอเนตช่วยป้องกันไม่ให้ pH ของไข่เปลี่ยนแปลง แต่เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์สูญเสียออกจากไข่ระหว่างการเก็บรักษา ทำให้ความเข้มข้นของไบคาร์บอเนตต่าง ๆ ของไข่ขาวลดลง เป็นเหตุให้การคั่งกันแบบนี้หมดสภาพไป ทำให้ค่า pH ของไข่ขาวเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อถึงจุด ๆ หนึ่งค่า pH ของไข่ขาวก็จะไม่เพิ่มขึ้นอีกหรือเพิ่มขึ้นน้อยมาก เนื่องจากกรดฟอสฟอริกจากไข่แดงซึมออกมาช่วยรักษาระดับ pH นี้ไว้ (สุวรรณ, 2529)

เมื่อนำสารละลายไข่ขาวที่ได้จากไข่ที่มีอายุการเก็บรักษาเป็นเวลาแตกต่างกันมาวัดค่าความหนืด พบว่า ค่าความหนืดของสารละลายไข่ขาวมีแนวโน้มลดลง คือ ค่าความหนืดลดลงเมื่ออายุการเก็บรักษาไข่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าสอฟูนิต โดยไข่ที่มีอายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 4 วัน จะมีค่าความหนืดมากที่สุดเท่ากับ 12.87 เซนติปัวส์ และไข่ที่มีอายุการเก็บรักษานาน 18 วัน จะมีค่าความหนืดต่ำที่สุด เท่ากับ 7.82 เซนติปัวส์ (ตารางที่ 16) เนื่องจากไข่ขาวนั้น แบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ เยื่อไข่แดง ไข่ขาวเหลวชั้นใน ไข่ขาวชั้น และไข่ขาวใสชั้นนอก ซึ่งไข่ขาวชั้นประกอบด้วยเส้นใยมิวซิน ทำให้ไข่ขาวชั้นนี้มีลักษณะเป็นของเหลวชั้น แต่เมื่อไข่มีอายุการเก็บรักษาเพิ่มมากขึ้น ค่า pH เพิ่มขึ้นปริมาณเส้นใยมิวซินที่ละลายได้จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยมิวซินนั้นจะละลายในสถานะที่เป็นเบส (สุวรรณ, 2529) นอกจากนี้สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโอโวมิวซินและไลโซไซม์ที่เกิดจากแรงกระทำไฟฟ้าสถิตนั้นก็เกิดการแยกตัวออกจากกัน เพราะที่ pH เพิ่มขึ้นใกล้ pI ของไลโซไซม์ (pI = 10) ไลโซไซม์จะแยกตัวออกจากโอโวมิวซิน ทำให้ไข่ขาวใสขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา (Stadellman and Cotterill, 1995) การสูญเสียความเหนียวและข้นของไข่ขาวนั้นแสดงให้เห็นว่า ไข่นั้นเป็นไข่เก่า โดยไข่ขาวชั้นจะค่อย ๆ หายไป ไข่ขาวส่วนที่ขึ้นกับส่วนที่ใสนั้นจะรวมตัวกันเป็นของเหลวที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน เวลาตอกไข่เทลงบนจานแบน จะเห็นไข่ขาวทั้งหมดเป็นน้ำค่อนข้างเหลวมากและกระจายแผ่ออกทุกทิศทาง จะเห็นได้ถึงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษาไข่ ค่าสอฟูนิต ค่า pH ของไข่ขาว และค่าความหนืดของสารละลายไข่ขาว โดยเมื่อไข่มีอายุการเก็บรักษาเพิ่มมากขึ้น (ไข่เก่า) ค่าสอฟูนิตจะต่ำ ค่าความหนืดจะลดลง และค่า pH จะเพิ่มสูงขึ้น (ตารางที่ 16)

เมื่อนำสารละลายไข่ขาวที่ได้จากไข่ที่มีอายุการเก็บรักษาต่างกัน มาปรับ pH และเติมซอร์บิทอล พบว่า pH ระดับความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอร์ และอายุการเก็บรักษาไข่นั้นมีผลต่อค่า

ความหนืดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางผนวกที่ 13) จากตารางที่ 17 เมื่อพิจารณาที่ระดับ pH 10.5 เดิมซอร์บิทอล ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักโปรตีนไข่ขาว พบว่า เมื่อไข่มีอายุการเก็บรักษาเพิ่มมากขึ้น ค่าความหนืดจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยจะลดลงจาก 20.63 เป็น 8.77 เซนติปัวส์ เมื่ออายุการเก็บรักษาไข่เพิ่มขึ้นจาก 4 วันเป็น 18 วัน และเมื่อทำการขึ้นรูปฟิล์ม พบว่า ฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายไข่ขาวที่ได้จากไข่ที่มีอายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นจะมีความกรอบเปราะมากขึ้น และมีรอยแตกบางส่วน ส่วนฟิล์มที่เตรียมจากไข่ที่มีอายุการเก็บรักษานาน 18 วัน เดิมซอร์บิทอลร้อยละ 50 ทั้งที่ระดับ pH 10.5 และ 11.25 จะไม่สามารถลอกออกเป็นแผ่นได้ กรอบเปราะมาก เนื่องจากโปรตีนบางส่วนเกิดการเสียสภาพในช่วงของการเก็บรักษา มีหมู่ซัลไฮดริลเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นในช่วงของการทำแห้งจึงเกิดการสร้างพันธะไดซัลไฟด์ พันธะไฮโดรโฟบิก และพันธะไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้น ทำให้โปรตีนจับกันอย่างแข็งแรง ฟิล์มที่ได้ขาดความยืดหยุ่น จึงมีความกรอบเปราะสูง (Mine, 1992)

ตารางที่ 17 ค่าความหนืด และลักษณะปรากฏของฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่เป็ดที่มีอายุการเก็บรักษานาน 4, 11 และ 18 วัน

เวลา (วัน)	ฟิล์ม	ค่าความหนืด (เซนติปัวส์)	ลักษณะปรากฏ
4	1. ไข่ขาวที่ระดับ pH 10.5 เดิมซอร์บิทอล ร้อยละ 50	20.63 ± 0.71^d	ใส โปร่งแสง ผิวเรียบทั้งสองด้าน ผิวด้านที่สัมผัสอากาศสาก ผิวด้าน ที่สัมผัสพลาสติกมันลื่น นุ่มมือ
	2. ไข่ขาวที่ระดับ pH 10.5 เดิมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	24.40 ± 1.35^c	ไม่แตกต่างจากฟิล์มในข้อ 1
	3. ไข่ขาวที่ระดับ pH 11.25 เดิมซอร์บิทอล ร้อยละ 50	25.40 ± 0.77^f	ไม่แตกต่างจากฟิล์มในข้อ 1
	4. ไข่ขาวที่ระดับ pH 11.25 เดิมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	24.68 ± 0.82^{cf}	ไม่แตกต่างจากฟิล์มในข้อ 1

ตารางที่ 17 (ต่อ)

เวลา (วัน)	ฟิล์ม	ค่าความหนืด (เซนติปัวส์)	ลักษณะปรากฏ
11	5. ไข่ขาวที่ระดับ pH 10.5 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 50	9.45 ± 0.31^b	ใส โปร่งแสง กรอบเปราะมากกว่า ฟิล์มในข้อ 1 มีรอยแตกเป็น บางส่วน
	6. ไข่ขาวที่ระดับ pH 10.5 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	8.77 ± 0.44^{ab}	ไม่แตกต่างจากฟิล์มในข้อ 1
	7. ไข่ขาวที่ระดับ pH 11.25 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 50	13.15 ± 0.52^c	ใส โปร่งแสง กรอบเปราะมากกว่า ฟิล์มในข้อ 5
	8. ไข่ขาวที่ระดับ pH 11.25 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	13.58 ± 0.31^c	ใส โปร่งแสง กรอบเปราะมากกว่า ฟิล์มในข้อ 5
18	9. ไข่ขาวที่ระดับ pH 10.5 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 50	8.77 ± 0.47^{ab}	มีความกรอบเปราะมาก ขาดต่อการ จับ
	10. ไข่ขาวที่ระดับ pH 10.5 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	8.72 ± 0.51^{ab}	ใส โปร่งแสง ผิวเรียบทั้งสองด้าน แต่ฟิล์มมีความกรอบเปราะ มากกว่าฟิล์มในข้อ 5
	11. ไข่ขาวที่ระดับ pH 11.25 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 50	8.80 ± 0.57^{ab}	มีความกรอบเปราะมากขึ้น ขาดต่อ การจับ

ตารางที่ 17 (ต่อ)

เวลา (วัน)	ฟิล์ม	ค่าความหนืด (เซนติปัวส์)	ลักษณะปรากฏ
18	12. ไข่ขาวที่ระดับ pH 11.25 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	8.39 ± 0.48^a	ใส โปร่งแสง ผิวเรียบทั้งสองด้าน ลอกออกจากแผ่นพลาสติกยากกว่า ฟิล์มในข้อ 6 และ 8

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a, b, c, ...} ที่ต่างกันในแนวดิ่ง แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

เมื่อทำการขึ้นรูปฟิล์มบนแผ่นกระจกเรียบที่ขึงด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น พบว่า ฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่ที่มีอายุการเก็บรักษาแตกต่างกัน จะมีค่าสีของฟิล์มแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงดังตารางที่ 18 โดยอายุของไข่นั้นจะมีผลต่อค่าสีของฟิล์ม กล่าวคือ ฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่ที่มีอายุการเก็บรักษานาน 11 และ 18 วัน จะมีค่า b (สีเหลือง) สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสีของโอโวเฟลวินที่แตกต่างกันตามธรรมชาติในไข่แต่ละฟอง (สุวรรณ, 2529) นอกจากนี้เมื่อไข่มีอายุการเก็บรักษาเพิ่มมากขึ้น น้ำในไข่เกิดการระเหยทำให้ปริมาณของโอโวเฟลวินที่มีอยู่นั้นเข้มข้นขึ้น เมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มจึงทำให้ฟิล์มที่ได้มีค่า b มากกว่าฟิล์มที่ได้จากไข่ที่มีอายุการเก็บรักษานาน 4 วัน ส่วนในด้านความสว่าง (ค่า L) ของฟิล์มอยู่ในช่วง 88.66 ถึง 89.36 ซึ่งฟิล์มที่ได้ก็ยังคงความโปร่งใสอยู่

ตารางที่ 18 ค่าสีที่วัดได้ของฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่เป็ดที่มีอายุการเก็บรักษานาน 4, 11 และ 18 วัน

เวลา (วัน)	ฟิล์ม	ค่าสี			
		L	a	b	ΔE
4	1. ไข่ขาวที่ระดับ pH 10.5 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 50	89.36 ± 0.22^d	-0.92 ± 0.04^c	1.71 ± 0.34^a	2.58 ± 0.19^a
	2. ไข่ขาวที่ระดับ pH 10.5 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	89.10 ± 0.23^{bcd}	-0.88 ± 0.06^c	1.95 ± 0.15^{abc}	2.86 ± 0.22^{abcd}
	3. ไข่ขาวที่ระดับ pH 11.25 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 50	89.34 ± 0.32^d	-0.91 ± 0.10^{bc}	1.83 ± 0.28^{ab}	2.66 ± 0.28^{ab}
	4. ไข่ขาวที่ระดับ pH 11.25 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	89.26 ± 0.15^{cd}	-0.90 ± 0.02^c	2.08 ± 0.18^{abcd}	2.74 ± 0.16^{abc}
11	5. ไข่ขาวที่ระดับ pH 10.5 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 50	88.66 ± 0.30^a	-0.93 ± 0.04^{bc}	2.35 ± 0.39^d	3.42 ± 0.36^c
	6. ไข่ขาวที่ระดับ pH 10.5 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	89.03 ± 0.30^{bcd}	-0.92 ± 0.07^{bc}	2.33 ± 0.35^{cd}	3.07 ± 0.36^{cde}
	7. ไข่ขาวที่ระดับ pH 11.25 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 50	88.90 ± 0.34^{ab}	-0.91 ± 0.04^c	2.32 ± 0.19^{cd}	3.18 ± 0.35^{de}
	8. ไข่ขาวที่ระดับ pH 11.25 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	88.91 ± 0.24^{ab}	-0.90 ± 0.03^c	2.13 ± 0.20^{bcd}	3.09 ± 0.20^{cde}

ตารางที่ 18 (ต่อ)

เวลา (วัน)	ฟิล์ม	ค่าสี			
		L	a	b	ΔE
18	9. ไข่ขาวที่ระดับ pH 10.5 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 50	89.11 ± 0.21^{bcd}	-0.99 ± 0.07^{ab}	2.32 ± 0.04^{cd}	2.98 ± 0.19^{bcd}
	10. ไข่ขาวที่ระดับ pH 10.5 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	88.96 ± 0.18^{abc}	-0.94 ± 0.06^{bc}	2.16 ± 0.19^{bcd}	3.06 ± 0.16^{cde}
	11. ไข่ขาวที่ระดับ pH 11.25 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 50	88.90 ± 0.26^{ab}	-1.03 ± 0.08^a	2.15 ± 0.49^{bcd}	3.15 ± 0.39^{de}
	12. ไข่ขาวที่ระดับ pH 11.25 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	88.94 ± 0.30^{abc}	-0.96 ± 0.09^{abc}	2.30 ± 0.22^{cd}	3.13 ± 0.34^{de}

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a, b, c, ...} ที่ต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

L = ค่าความสว่าง a = ค่าสีแดง b = ค่าสีเหลือง

$$\Delta E = \text{total color different} = [(L_f - L_{std})^2 + (a_f - a_{std})^2 + (b_f - b_{std})^2]^{0.5}$$

จากตารางที่ 17 จะเห็นได้ว่าฟิล์มที่ได้จากไข่ที่มีอายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 18 วันนั้น ฟิล์มที่ได้จากสารละลายไข่ขาวทั้งที่ระดับ pH 10.5 และ 11.25 ที่มีการเติมซอร์บิทอลความเข้มข้นร้อยละ 50 นั้นไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มเพื่อนำไปทดสอบสมบัติของฟิล์มได้ เนื่องจากไข่ขาวเกิดการเสียสภาพไปแล้วบางส่วนในช่วงของการเก็บรักษา ค่า pH เพิ่มขึ้นสูงถึง 10.05 ทำให้โปรตีนบางส่วนเสียสภาพ เกิดการคลายเกลียวหันด้านหมู่ไฮโดรโฟบิกออกมา พันธะไดซัลไฟด์ถูกทำลาย ทำให้มีหมู่ซัลไฮดริลเพิ่มมากขึ้น (Fukushima and Van Buren, 1970; Beveridge and Arntfield, 1979; Mine *et al.*, 1990; Damodoran and Paraf, 1997) นอกจากนี้เมื่อไข่มีอายุการ

เก็บรักษาเพิ่มมากขึ้น เกิดการสูญเสียภายในไข่ (สุวรรณ, 2529) แต่ปริมาณโปรตีนมีอยู่เท่าเดิม ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ปริมาตรของสารละลายในการขึ้นรูปฟิล์มเท่ากับ 25 มิลลิลิตร จึงทำให้ในส่วนของฟิล์มที่ได้จากไข่ที่มีอายุการเก็บรักษานาน 18 วันนั้นมีปริมาณโปรตีนมากกว่าไข่ที่มีอายุการเก็บรักษานาน 4 และ 11 วัน ดังนั้นในช่วงของการทำแห้งจึงเกิดการสร้างพันธะไดซัลไฟด์ พันธะไฮโดรโฟบิก และพันธะไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้นระหว่างสายโปรตีน ฟิล์มจึงมีความกรอบเปราะมาก ดังนั้นจึงนำฟิล์มที่ได้จากไข่ที่มีอายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 4 และ 11 วัน ทั้งที่ระดับ pH 10.5 และ 11.25 เติมซอร์บิทอลความเข้มข้นร้อยละ 50 และ 60 โดยน้ำหนักโปรตีน และนำฟิล์มที่ได้จากไข่ที่มีอายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 18 วัน ที่ระดับ pH 10.5 และ 11.25 เติมซอร์บิทอลร้อยละ 60 โดยน้ำหนักโปรตีนมาทำการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า ฟิล์มที่ได้จากไข่ที่มีอายุการเก็บรักษาเพิ่มมากขึ้นจาก 4 วันเป็น 11 วันนั้นจะมีค่าการต้านทานแรงดึงขาดเพิ่มขึ้น แต่ค่าร้อยละการยืดตัวจะลดต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางผนวกที่ 20 และ 21) (ตารางที่ 19) เมื่อเทียบที่ระดับ pH เดียวกัน (pH 10.5) เติมซอร์บิทอลร้อยละ 60 เมื่อไข่มีอายุการเก็บรักษาเพิ่มมากขึ้นค่าร้อยละการยืดตัวจะลดต่ำลง โดยฟิล์มที่ได้จากไข่ที่มีอายุการเก็บรักษานาน 4 วันจะมีค่าร้อยละการยืดตัวเท่ากับ 29.08 แต่เมื่ออายุการเก็บรักษาเพิ่มมากขึ้นเป็น 11 วัน ค่าร้อยละการยืดตัวของฟิล์มจะลดลงถึง 4 เท่า โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 5.42 ในขณะที่ค่าการต้านทานแรงดึงขาดต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แสดงให้เห็นว่าฟิล์มมีความกรอบเปราะมากขึ้น เมื่อไข่มีอายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น นอกจากการสร้างพันธะไดซัลไฟด์ที่เพิ่มขึ้นแล้ว อาจเนื่องมาจากความหนาที่แตกต่างกันด้วย ความหนามีผลต่อความแข็งแรงในการยึดเกาะของฟิล์ม โดยความแข็งแรงของฟิล์มจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น (Banker, 1966) เช่นเดียวกับการทดลองของ Park *et al.* (1993) ที่พบว่าเมื่อความหนาของฟิล์มเมทิลเซลลูโลส และฟิล์มไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ค่าการต้านทานแรงดึงขาดจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

จากตารางที่ 20 แสดงถึงค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม พบว่า เมื่ออายุการเก็บรักษาไข่เพิ่มมากขึ้น ค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มก็จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าสถิติของปัจจัยต่าง ๆ ในตารางผนวกที่ 22) โดยฟิล์มโปรตีนไข่ขาวที่ได้จากไข่ที่มีอายุการเก็บรักษานาน 11 วัน ที่ระดับ pH 10.5 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 60 นั้นมีค่าการซึมผ่านไอน้ำสูงถึง 0.159 กรัม.มิลลิเมตรต่อตารางเมตร.ชั่วโมง.มิลลิเมตรปรอท ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์มมีความกรอบเปราะ อาจเกิดรูรั่ว หรือรอยแตกที่มองไม่เห็นได้ด้วยตาเปล่า ทำให้ค่าการซึมผ่านไอน้ำมีค่าสูง ส่วนสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนนั้น พบว่า ฟิล์มที่ได้จากไข่ที่มีอายุการเก็บรักษานาน 11 และ 18 วันนั้น ไม่สามารถวัดค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ แม้ว่าจะทำการลดพื้นที่ตัวอย่างในการวัดแล้วก็ตาม ฟิล์มก็ยังเกิดรอยแตกขณะวัด เนื่องจากฟิล์มมีความกรอบเปราะค่อนข้างสูง จึงไม่สามารถวัดค่าการซึมผ่านได้

ตารางที่ 19 สมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีนไข่ขาวจากไข่เป็ดที่มีอายุการเก็บรักษานาน 4, 11 และ 18 วัน

เวลา (วัน)	ฟิล์ม	ความหนา (มิลลิเมตร)	ค่าการต้านทาน แรงดึงขาด (กิโลกรัมต่อตาราง มิลลิเมตร)	การยืดตัว (ร้อยละ)
4	1. ไข่ขาวที่ระดับ pH 10.5 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 50	0.113	0.57 ± 0.01^d	6.92 ± 0.47^d
	2. ไข่ขาวที่ระดับ pH 10.5 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	0.116	0.40 ± 0.01^b	19.08 ± 0.43^g
	3. ไข่ขาวที่ระดับ pH 11.25 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 50	0.121	0.70 ± 0.04^f	12.81 ± 0.47^f
	4. ไข่ขาวที่ระดับ pH 11.25 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	0.118	0.58 ± 0.01^d	22.14 ± 0.95^h
11	5. ไข่ขาวที่ระดับ pH 10.5 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 50	0.121	0.62 ± 0.04^c	3.41 ± 0.39^b
	6. ไข่ขาวที่ระดับ pH 10.5 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	0.124	0.46 ± 0.04^c	5.42 ± 0.57^c
	7. ไข่ขาวที่ระดับ pH 11.25 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 50	0.123	0.71 ± 0.04^f	2.71 ± 0.26^a

ตารางที่ 19 (ต่อ)

เวลา (วัน)	ฟิล์ม	ความหนา (มิลลิเมตร)	ค่าการต้านทาน แรงดึงขาด (กิโลกรัมต่อตาราง มิลลิเมตร)	การยืดตัว (ร้อยละ)
11	8. ไข่ขาวที่ระดับ pH 11.25 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	0.125	0.56 ± 0.01^d	9.28 ± 0.15^c
18	9. ไข่ขาวที่ระดับ pH 10.5 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	0.122	0.28 ± 0.01^a	5.85 ± 0.35^c
	10. ไข่ขาวที่ระดับ pH 11.25 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	0.122	0.28 ± 0.09^a	9.59 ± 0.29^c

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a, b, c, ...} ที่ต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

ตารางที่ 20 สมบัติด้านการซึมผ่านไอน้ำ และก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม โปรตีนไข่ขาวจากไข่เป็ดที่มีอายุการเก็บรักษานาน 4, 11 วัน

เวลา (วัน)	ฟิล์ม	ความหนา (มิลลิเมตร)	WVP ^{1/}	P(O ₂) ^{2/}
4	1. ไข่ขาวที่ระดับ pH 10.5 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 50	0.113	0.098 ± 0.002^a	7.04 ± 2.66^a
	2. ไข่ขาวที่ระดับ pH 10.5 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	0.116	0.121 ± 0.002^c	13.61 ± 2.48^b
	3. ไข่ขาวที่ระดับ pH 11.25 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 50	0.121	0.115 ± 0.002^b	13.90 ± 4.93^b
	4. ไข่ขาวที่ระดับ pH 11.25 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	0.118	0.118 ± 0.002^b	22.41 ± 2.52^c
11	5. ไข่ขาวที่ระดับ pH 10.5 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 50	0.121	0.118 ± 0.003^b	ฟิล์มขาดวัดไม่ได้
	6. ไข่ขาวที่ระดับ pH 10.5 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	0.124	0.159 ± 0.003^c	ฟิล์มขาดวัดไม่ได้
	7. ไข่ขาวที่ระดับ pH 11.25 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 50	0.123	0.141 ± 0.002^d	ฟิล์มขาดวัดไม่ได้

ตารางที่ 20 (ต่อ)

เวลา (วัน)	ฟิล์ม	ความหนา (มิลลิเมตร)	WVP ^{1/}	P(O ₂) ^{2/}
11	8. ไข่ขาวที่ระดับ pH 11.25 เติมซอร์บิทอล ร้อยละ 60	0.125	0.143 ± 0.002 ^d	ฟิล์มขาดวัดไม่ได้

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a, b, c, ...} ที่ต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

^{1/} การซึมผ่านของไอน้ำ (Water Vapor Permeability; WVP = กรัม.มิลลิเมตร /ตารางเมตร. ชั่วโมง.มิลลิเมตรปรอท)

^{2/} การซึมผ่านก๊าซออกซิเจน (Oxygen Permeability = มิลลิลิตร.มิลลิเมตร/ตารางเมตร. ชั่วโมง.บรรยากาศ)

จากผลการทดลองควรเลือกใช้ไข่ไก่เป็นที่มีความสด มีอายุการเก็บรักษาในช่วงเวลา 4 วัน ที่อุณหภูมิ 28 ± 3 องศาเซลเซียส ปรับ pH ของสารละลายไข่ขาวที่ระดับ pH 10.5 เติมซอร์บิทอลที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 50 ทำการขึ้นรูปฟิล์มบนแผ่นกระจกที่ขึงด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น ซึ่งจะให้ฟิล์มที่มีความใส โปร่งแสง โดยมีค่าความสว่าง (ค่า L) เท่ากับ 89.36 มีค่าการต้านทานแรงดึงขาดเท่ากับ 0.57 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร และค่าร้อยละการยืดตัวเท่ากับ ร้อยละ 6.92 โดยฟิล์มมีค่าการซึมผ่านไอน้ำ และก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 0.098 กรัม.มิลลิเมตรต่อตารางเมตร.ชั่วโมง.มิลลิเมตรปรอท และ 7.04 มิลลิลิตร.มิลลิเมตรต่อตารางเมตร.ชั่วโมง.บรรยากาศตามลำดับ จากค่าที่ได้จะเห็นได้ว่าแม้ว่าจะมีการเติมพลาสติกไซเซอร์ลงไปปริมาณที่ค่อนข้างมาก (ร้อยละ 50) ฟิล์มที่ได้ยังคงมีความกรอบเปราะ ขาดความยืดหยุ่น ยากต่อการใช้งานในรูปแบบของแผ่นฟิล์ม เพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าว อาจนำไปใช้ในรูปแบบของสารเคลือบบนชิ้นอาหาร โดยตรง ซึ่งสามารถลดปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ลงได้ ทำให้ฟิล์มมีสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนที่ดีขึ้น และควรใช้ร่วมกับการเก็บในที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ เพื่อให้ฟิล์มคงสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

3. การพัฒนาการใช้ประโยชน์ของไข่ขาวจากไข่เปิดเพื่อทำเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร

3.1 องค์ประกอบทางเคมีของไข่น้ำสด ไข่ขาวที่ไม่ผสมไข่น้ำอบแห้ง และไข่ขาวที่ผสมไข่น้ำอบแห้ง

ไข่น้ำ หรือค้ำเป็นผักพื้นบ้านทางภาคอีสาน มีลักษณะเป็นเมล็ดกลมเล็ก ๆ สีเขียว (ภาพที่ 2) เมื่อนำไข่ขาวที่ผสมไข่น้ำในอัตราส่วน 2 : 1 (ไข่ขาว : ไข่น้ำ) และไข่ขาวที่ไม่ผสมไข่น้ำมาขึ้นรูปเป็นแผ่น (ภาพที่ 4) จากนั้นตัดเป็นเส้นกว้าง 0.7 เซนติเมตร ยาว 5-7 เซนติเมตร (ภาพที่ 5) ขมวดเป็นปม (ภาพที่ 6) อบให้แห้ง เมื่อนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี พบว่า ไข่น้ำสดมีปริมาณโปรตีน ร้อยละ 17.98 ปริมาณเถ้าร้อยละ 4.28 ปริมาณไขมันร้อยละ 0.68 และปริมาณคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 77.05 (โดยน้ำหนักแห้ง) ส่วนไข่ขาวที่ไม่ผสมไข่น้ำ และไข่ขาวที่ผสมไข่น้ำอบแห้งมีค่าปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 6.18 และ 6.5 ตามลำดับ โดยมีปริมาณโปรตีนสูงถึงร้อยละ 80.17 (ไข่ขาวที่ไม่ผสมไข่น้ำอบแห้ง) และร้อยละ 65.98 (ไข่ขาวที่ผสมไข่น้ำอบแห้ง) จะเห็นได้ว่าเมื่อเติมไข่น้ำลงไปสัดส่วนของโปรตีนลดลง เนื่องจากในองค์ประกอบทางเคมีของไข่น้ำจะมีปริมาณเถ้า และคาร์โบไฮเดรตที่ค่อนข้างสูง ทำให้เมื่อเติมลงไปไข่ขาวแล้วทำแห้ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีส่วนของโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตแตกต่างจากไข่ขาวที่ไม่ผสมไข่น้ำอบแห้ง

ตารางที่ 21 องค์ประกอบทางเคมี (โดยน้ำหนักแห้ง) ของไข่น้ำสด ไข่ขาวที่ไม่ผสมไข่น้ำอบแห้ง และไข่ขาวที่ผสมไข่น้ำอบแห้ง

องค์ประกอบ (ร้อยละ)	ไข่น้ำสด*	ไข่น้ำสด	ไข่ขาวที่ไม่ผสม ไข่น้ำอบแห้ง	ไข่ขาวที่ผสมไข่น้ำ อบแห้ง
ความชื้น	-	-	6.18	6.5
เถ้า	24.14	4.28	4.12	6.11
โปรตีน	20.69	17.98	80.17	65.98
ไขมัน	3.45	0.68	0.77	0.48
คาร์โบไฮเดรต	51.72	77.05	8.76	20.93

หมายเหตุ *ที่มา : กองโภชนาการกรมอนามัย (2544)



ภาพที่ 4 ไข่ขาวที่ไม่ผสมไข่ น้ำ และไข่ขาวที่ผสมไข่ น้ำขึ้นรูปเป็นแผ่น



ภาพที่ 5 ไข่ขาวที่ไม่ผสมไข่ น้ำ และไข่ขาวที่ผสมไข่ น้ำตัดเป็นเส้น



ภาพที่ 6 ไข่ขาวที่ไม่ผสมไข่ น้ำ และไข่ขาวที่ผสมไข่ น้ำอัดเป็นปม

จากตารางที่ 21 จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของไข่น้ำสดที่วิเคราะห์ได้นั้นมีแนวโน้มไปทางเดียวกับค่าที่วิเคราะห์ได้จากกองโภชนาการกรมอนามัย (2544) โดยไข่น้ำจะมีปริมาณความชื้นที่ค่อนข้างสูง (ร้อยละ 94.16) (ตารางที่ 7) เนื่องจากเป็นพืชที่อาศัยอยู่ในน้ำ และมีปริมาณโปรตีนค่อนข้างสูง โดยมีปริมาณโปรตีนสูงถึงร้อยละ 17.98 โดยน้ำหนักแห้ง (ร้อยละ 1.05 โดยน้ำหนักเปียก) สอดคล้องกับ สุทธิพงษ์ (2547) รายงานว่าไข่น้ำเป็นพืชที่ให้โปรตีนสูงที่สุดเมื่อเทียบกับพืชชนิดอื่น ๆ แต่ต้องขึ้นกับสภาพของการเจริญเติบโต นอกจากนี้ยังมีปริมาณแร่ธาตุต่าง ๆ สูงอีกด้วย เช่น แคลเซียมสูงถึง 59 มิลลิกรัม ฟอสฟอรัส 25 มิลลิกรัม และเหล็ก 6.6 มิลลิกรัม ต่อ น้ำหนัก 100 กรัม (สถาบันการแพทย์แผนไทย, 2541; กองโภชนาการกรมอนามัย, 2544) จะเห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์อาหารแผ่นจากไข่ขาวจากไข่เป็ด ทั้งที่เติมและไม่เติมไข่น้ำเป็นแหล่งอาหารโปรตีนสูง และ ไขมันต่ำ การเติมไข่น้ำช่วยเพิ่มเกลือแร่ ได้แก่ แคลเซียม ฟอสฟอรัส และเหล็ก ซึ่งเป็นที่ต้องการของร่างกายคนทุกเพศทุกวัย

3.2 การทดสอบทางประสาทสัมผัสของไข่ขาวที่ไม่ผสมไข่น้ำอบแห้ง และไข่ขาวที่ผสมไข่น้ำอบแห้ง

โดยการนำไข่ขาวที่ไม่ผสมไข่น้ำ และไข่ขาวที่ผสมไข่น้ำอบแห้งมาต้มในน้ำซूप และให้ผู้ทดสอบที่เป็นนักศึกษาและไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 25 คน ทดสอบความชอบผลิตภัณฑ์ในด้านลักษณะปรากฏ สี รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม (ตารางที่ 22)

จากตารางที่ 22 พบว่า ในการชิมผลิตภัณฑ์ไข่ขาวแผ่นอบแห้ง และไข่ขาวผสมไข่น้ำแผ่นอบแห้ง ต้มในน้ำซूप ค่าคะแนนความชอบของไข่ขาวแผ่นอบแห้ง และไข่ขาวผสมไข่น้ำแผ่นอบแห้งของผู้ทดสอบทางประสาทสัมผัส 25 คน ให้คะแนนความชอบในด้านลักษณะปรากฏ สี และ รสชาติ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าคะแนนความชอบอยู่ในระดับเฉย ๆ ถึงชอบเล็กน้อย (5.86 – 6.44) ส่วนในด้านของเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมนั้นมีค่าคะแนนความชอบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางผนวกที่ 26 และ 27) โดยผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบไข่ขาวที่ผสมไข่น้ำอบแห้งมากกว่าไข่ขาวที่ไม่ผสมไข่น้ำอบแห้ง ในด้านเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม นอกจากนี้การเติมไข่น้ำลงไปในไข่ขาวนั้น จะทำให้มีสีเขียว ลักษณะเหมือนสาหร่ายแผ่นที่ใช้ในการประกอบอาหาร ทำให้น่ารับประทานมากขึ้น

จากผลการทดลองนำไข่ขาวจากไข่เป็ดมาทำเป็นผลิตภัณฑ์อาหารโดยขึ้นรูปเป็นแผ่น และเติมส่วนผสมที่ให้กลิ่นรส และ/หรือ คุณค่าทางอาหาร เช่น ไข่น้ำ พบว่า สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่น

ได้ โดยไม่ต้องเติมส่วนผสมอื่น ซึ่งแสดงถึงสมบัติของไข่ขาวในการเป็นตัวยึดเกาะ โดยมีลักษณะเด่น คือ มีสีขาว และมีกลิ่นเล็กน้อย

ตารางที่ 22 การทดสอบทางประสาทสัมผัสของไข่ขาวที่ไม่ผสมไข่น้ำอบแห้ง และไข่ขาวที่ผสมไข่น้ำอบแห้ง

คะแนนความชอบ	ไข่ขาวที่ไม่ผสมไข่น้ำอบแห้ง	ไข่ขาวที่ผสมไข่น้ำอบแห้ง
ลักษณะปรากฏ	5.86 ^{ns}	5.92 ^{ns}
สีปรากฏ	5.82 ^{ns}	5.96 ^{ns}
รสชาติ	6.04 ^{ns}	6.44 ^{ns}
เนื้อสัมผัส	5.06 ^a	6.12 ^b
ความชอบโดยรวม	5.60 ^a	6.40 ^b

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a, b} ที่ต่างกันในแนวนอน แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

^{ns} = ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

1 = ไม่ชอบมากที่สุด 2 = ไม่ค่อยชอบค่อนข้างมาก 3 = ไม่ชอบปานกลาง

4 = ไม่ชอบเล็กน้อย 5 = เฉย ๆ 6 = ชอบเล็กน้อย

7 = ชอบปานกลาง 8 = ชอบค่อนข้างมาก 9 = ชอบมากที่สุด