



4.1 ผลของชนิดและปริมาณน้ำตาลต่อสมบัติของโฟมไข่ขาวพาสเจอร์ไรซ์

4.1.1 สมบัติด้านการเกิดโฟมของไข่ขาว

ผลการวิเคราะห์สมบัติด้านการเกิดโฟมของไข่ขาวพาสเจอร์ไรซ์ที่ไม่เติมน้ำตาลและเติมน้ำตาลซูโครส กลูโคส และฟรุกโตสปริมาณ 10, 20, 30 และ 40% (w/v) แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมบัติด้านการเกิดโฟมของไข่ขาวพาสเจอร์ไรซ์ที่ไม่เติมน้ำตาลและเติมน้ำตาลซูโครส กลูโคส และฟรุกโตสในปริมาณต่างกัน

ชนิดและปริมาณน้ำตาล (%,w/v)	ความสามารถในการเกิดโฟม (%)	ความคงตัวของโฟม (นาที)
ไม่เติมน้ำตาล	579.33 ^h ± 5.03	64.17 ^a ± 8.04
น้ำตาลซูโครส 10%	520.00 ^g ± 0.58	93.33 ^b ± 10.41
น้ำตาลซูโครส 20%	434.00 ^{cd} ± 3.46	114.17 ^{cde} ± 14.65
น้ำตาลซูโครส 30%	420.00 ^c ± 10.58	135.00 ^f ± 18.03
น้ำตาลซูโครส 40%	346.67 ^a ± 11.55	168.33 ^g ± 16.07
น้ำตาลกลูโคส 10%	494.00 ^{fg} ± 15.10	100.00 ^{bc} ± 10.00
น้ำตาลกลูโคส 20%	461.33 ^{de} ± 24.44	101.67 ^{bcd} ± 2.89
น้ำตาลกลูโคส 30%	433.33 ^{cd} ± 23.44	105.00 ^{bcd} ± 9.01
น้ำตาลกลูโคส 40%	420.00 ^c ± 22.27	120.83 ^{def} ± 12.33
น้ำตาลฟรุกโตส 10%	512.00 ^g ± 6.93	90.00 ^b ± 8.66
น้ำตาลฟรุกโตส 20%	478.67 ^{ef} ± 26.63	97.50 ^{bc} ± 2.50
น้ำตาลฟรุกโตส 30%	438.67 ^{cd} ± 12.22	126.67 ^{ef} ± 7.64
น้ำตาลฟรุกโตส 40%	389.33 ^b ± 23.09	130.00 ^{ef} ± 5.00

ตัวเลขในตารางเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

a,b,c,... ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในสดมภ์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

จากตารางที่ 4.1 พบว่าการเติมน้ำตาลลงในไข่ขาวทำให้ไข่ขาวมีค่าความสามารถในการเกิดโฟมลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับไข่ขาวที่ไม่เติมน้ำตาล ($p \leq 0.05$) (ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน ข.1) โดยเมื่อเติมน้ำตาลซูโครสลงในไข่ขาวปริมาณ 10% (w/v) มีผลให้

ไซข้าวมีค่าความสามารถในการเกิดโฟมลดลงจาก 579.33% เป็น 520.00% ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับไซข้าวที่ไม่เติมน้ำตาล และเมื่อระดับความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสในไซข้าวเพิ่มขึ้นจาก 10% เป็น 40% (w/v) ไซข้าวจะมีค่าความสามารถในการเกิดโฟมลดลงเหลือเพียง 346.67% ในขณะที่การเติมน้ำตาลลงในไซข้าวมีผลต่อความคงตัวของโฟมไซข้าวในทางตรงกันข้าม การเติมน้ำตาลลงในไซข้าวช่วยให้โฟมไซข้าวมีความคงตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโฟมไซข้าวที่ไม่เติมน้ำตาลอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลในไซข้าวเพิ่มขึ้น โฟมไซข้าวมีความคงตัวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่งจะเห็นผลได้ชัดในไซข้าวที่เติมน้ำตาลซูโครสปริมาณ 40% (w/v) โฟมไซข้าวมีความคงตัวสูงขึ้นไปถึง 1.8 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับไซข้าวที่เติมน้ำตาลซูโครสปริมาณ 10% (w/v) ทั้งนี้ไซข้าวที่เติมน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตสที่ระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นต่างก็ให้ผลของค่าความสามารถในการเกิดโฟมและค่าความคงตัวของโฟมไปในทิศทางเดียวกันกับไซข้าวที่เติมน้ำตาลซูโครสเช่นกัน

การเติมน้ำตาลลงในไซข้าวทำให้ไซข้าวมีค่าความสามารถในการเกิดโฟมลดลง เนื่องจากเมื่อผสมน้ำตาลลงในไซข้าวจะทำให้ไซข้าวมีความหนืดสูงขึ้น ไซข้าวจึงกักเก็บอากาศไว้ในโครงสร้างได้น้อยลง (Raikos et al., 2007a) อีกทั้งโมเลกุลน้ำตาลยังสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโปรตีน และขัดขวางการคลายเกลียวของสายพอลิเพปไทด์ภายในโครงสร้างของโปรตีน ส่งผลให้โปรตีนมีสมบัติด้านการเป็น surface active ลดลง (Antipova and Semenova, 1995; Antipova et al., 1999) อย่างไรก็ตามการเติมน้ำตาลลงในไซข้าวจะช่วยให้ไซข้าวมีความคงตัวของโฟมสูงขึ้น เป็นผลจากการที่น้ำตาลทำให้ระบบมีความหนืดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ชั้นของน้ำในฟิล์มไซข้าวที่ล้อมรอบฟองอากาศ (lamella water) มีความหนืดเพิ่มขึ้นด้วย การเติมน้ำตาลลงในไซข้าวจึงช่วยลดการ drainage ของของเหลวออกจากชั้นฟิล์มอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงได้ นอกจากนี้การที่น้ำตาลไปขัดขวางการคลายเกลียวของโปรตีนจะมีผลให้โปรตีนสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนด้วยตัวเองได้น้อยลง ทำให้มีปริมาณโปรตีนไปจัดเรียงตัวที่บริเวณพื้นผิวรอยต่อเพื่อสร้างฟิล์มโปรตีนเพิ่มขึ้น ชั้นฟิล์มโปรตีนที่ล้อมรอบฟองอากาศจึงหนามากขึ้น ส่งผลให้ระบบโฟมไซข้าวมีความคงตัว (Patino et al., 1995)

ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการเกิดโฟมและความคงตัวของโฟมไซข้าวที่ได้ (ตารางที่ 4.1) สอดคล้องกับรายงานของ Lua และ Dickinson (2005) ที่พบว่าการเติมสารละลายน้ำตาลอินเวิร์ตลงในไซข้าวจะทำให้ความสามารถในการเกิดโฟมของไซข้าวลดลง โดยไซข้าวที่เติมสารละลายน้ำตาลอินเวิร์ตเข้มข้น 50 °Brix มีค่า %overrun สูงที่สุด คือ 530% รองลงมา คือ ไซข้าวที่เติมน้ำตาลสารละลายน้ำตาลอินเวิร์ตเข้มข้น 70 และ 82 °Brix ซึ่งมีค่า %overrun คิดเป็น 310% และ 50% ตามลำดับ ในขณะที่ความคงตัวของโฟมจะให้ผลในทางตรงกันข้าม การเติมสารละลายน้ำตาลอินเวิร์ตลงในไซข้าวจะทำให้โฟมไซข้าวมีความคงตัวลดลง โดยไซข้าวที่เติมสารละลายน้ำตาลอินเวิร์ตเข้มข้น 60 °Brix มีค่าครึ่งชีวิตของการเกิดโฟมสูงที่สุดโดยมีค่า

มากกว่า 42 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับโฟมไซ้ขาวที่ไม่เติมสารละลายน้ำตาลอินเวิร์ตที่มีค่าครึ่งชีวิตของการเกิดโฟมน้อยกว่า 1 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาผลของชนิดน้ำตาลต่อสมบัติด้านการเกิดโฟมของไซ้ขาว จะเห็นได้ว่าที่ปริมาณน้ำตาลน้อยกว่า 40% (w/v) ชนิดของน้ำตาลไม่มีผลต่อความสามารถในการเกิดโฟมและความคงตัวของโฟมไซ้ขาวอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) แต่ที่ปริมาณน้ำตาล 40% (w/v) ไซ้ขาวที่เติมน้ำตาลซูโครสจะมีค่าความสามารถในการเกิดโฟมน้อยที่สุด คือ 346.67% เมื่อเปรียบเทียบกับไซ้ขาวเติมน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตสที่มีค่าความสามารถในการเกิดโฟมเท่ากับ 420% และ 389.33% ตามลำดับ อย่างไรก็ตามไซ้ขาวที่เติมน้ำตาลซูโครสปริมาณ 40% (w/v) มีค่าความคงตัวของโฟมสูงที่สุด คือ 168.33 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับไซ้ขาวเติมน้ำตาลฟรุกโตสและกลูโคสที่มีค่าความคงตัวของโฟมรองลงมา คือ 130 และ 120.83 นาที ตามลำดับ

สมบัติการเกิดโฟมที่ดีที่สุดของไซ้ขาวที่เติมน้ำตาลแต่ละชนิดจะพิจารณาจากความสามารถในการเกิดโฟมและความคงตัวของโฟมไซ้ขาว จากตารางที่ 4.1 พบว่าไซ้ขาวที่เติมน้ำตาลฟรุกโตสปริมาณ 30% (w/v) มีความคงตัวของโฟมไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับไซ้ขาวที่เติมน้ำตาลฟรุกโตสปริมาณ 40% (w/v) ($p > 0.05$) ในขณะที่ไซ้ขาวที่เติมน้ำตาลฟรุกโตสปริมาณ 30% (w/v) มีค่าความสามารถในการเกิดโฟมสูงกว่าไซ้ขาวที่เติมน้ำตาลฟรุกโตสปริมาณ 40% (w/v) อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้ไซ้ขาวที่เติมน้ำตาลกลูโคสมีค่าความสามารถในการเกิดโฟมและความคงตัวของโฟมไซ้ขาวไปในทิศทางเดียวกันกับไซ้ขาวที่เติมน้ำตาลฟรุกโตสเช่นกัน ถึงแม้ไซ้ขาวที่เติมน้ำตาลซูโครสปริมาณ 30% (w/v) จะมีค่าความคงตัวของโฟมน้อยกว่าไซ้ขาวที่เติมน้ำตาลซูโครสปริมาณ 40% (w/v) อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แต่ไซ้ขาวที่เติมน้ำตาลซูโครสปริมาณ 30% (w/v) ก็มีค่าความสามารถในการเกิดโฟมสูงกว่าไซ้ขาวที่เติมน้ำตาลซูโครสปริมาณ 40% (w/v) อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ดังนั้นจึงเลือกภาวะที่เติมน้ำตาลปริมาณ 30% (w/v) ลงในไซ้ขาวเป็นภาวะที่ดีที่สุดในการเกิดโฟมของน้ำตาลแต่ละชนิดเพื่อนำข้อมูลไปใช้ศึกษาในขั้นตอนต่อไป

4.1.2 ลักษณะฟองอากาศภายในโฟมไซ้ขาว

ผลการพิจารณาลักษณะฟองอากาศภายในโฟมไซ้ขาวโดยวิเคราะห์จากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของฟองอากาศ และพื้นที่หน้าตัดโดยเฉลี่ยของฟองอากาศภายในโฟมไซ้ขาวพาสเจอร์ไรซ์ที่ไม่ผสมน้ำตาลและผสมน้ำตาลซูโครส กลูโคสและฟรุกโตสแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของฟองอากาศ และพื้นที่หน้าตัดโดยเฉลี่ยของฟองอากาศภายในโฟมไข่ขาวพาสเจอร์ไรซ์ที่ภาวะต่าง ๆ

ชนิดและปริมาณ น้ำตาล (% w/v)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ย ของฟองอากาศ ¹ (มิลลิเมตร)	พื้นที่หน้าตัดโดยเฉลี่ย ของฟองอากาศ ¹ (ตารางมิลลิเมตร)
ไม่เติมน้ำตาล	0.78 ^g ± 0.06	2.28 ^f ± 0.21
น้ำตาลซูโครส 10%	0.64 ^{ef} ± 0.04	1.97 ^e ± 0.20
น้ำตาลซูโครส 20%	0.55 ^{bcd} ± 0.05	1.56 ^d ± 0.08
น้ำตาลซูโครส 30%	0.48 ^a ± 0.02	1.28 ^{bc} ± 0.04
น้ำตาลซูโครส 40%	0.47 ^a ± 0.01	1.08 ^{ab} ± 0.06
น้ำตาลกลูโคส 10%	0.67 ^f ± 0.05	2.12 ^{ef} ± 0.18
น้ำตาลกลูโคส 20%	0.60 ^{de} ± 0.02	1.59 ^d ± 0.12
น้ำตาลกลูโคส 30%	0.48 ^{ab} ± 0.02	1.24 ^{bc} ± 0.07
น้ำตาลกลูโคส 40%	0.47 ^a ± 0.02	0.98 ^a ± 0.05
น้ำตาลฟรุกโตส 10%	0.67 ^f ± 0.03	2.19 ^f ± 0.17
น้ำตาลฟรุกโตส 20%	0.57 ^{cd} ± 0.03	1.70 ^d ± 0.14
น้ำตาลฟรุกโตส 30%	0.51 ^{ab} ± 0.01	1.31 ^c ± 0.03
น้ำตาลฟรุกโตส 40%	0.46 ^a ± 0.05	1.00 ^a ± 0.04

ตัวเลขในตารางเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

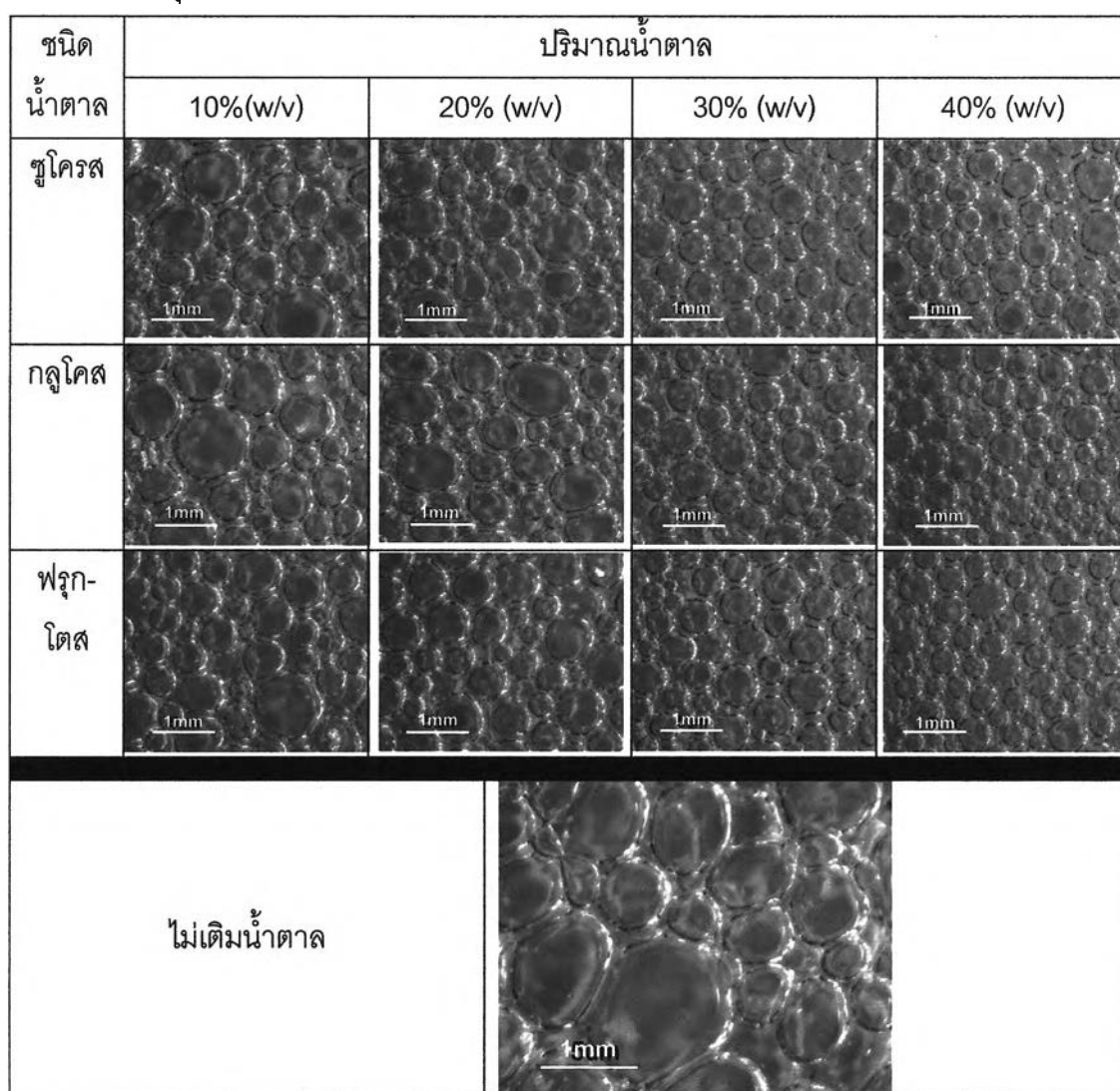
a,b,c,... ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในสดมภ์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

¹คำนวณจากฟองอากาศจำนวน 20 ฟอง

จากตารางที่ 4.2 พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของฟองอากาศภายในโฟมไข่ขาวที่ผสมน้ำตาลมีขนาดน้อยกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของฟองอากาศภายในโฟมไข่ขาวที่ไม่ผสมน้ำตาลอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน ข.2) และเมื่อผสมน้ำตาลลงในไข่ขาวปริมาณเพิ่มขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยฟองอากาศภายในโฟมไข่ขาวจะมีขนาดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่เดียวกันผลของปริมาณน้ำตาลต่อพื้นที่หน้าตัดโดยเฉลี่ยของฟองอากาศภายในโฟมไข่ขาวก็ให้ผลไปในทิศทางเดียวกันกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของฟองอากาศเช่นกัน โดยเมื่อผสมน้ำตาลลงในไข่ขาวปริมาณ 20% (w/v) ขึ้นไป พื้นที่หน้าตัดโดยเฉลี่ยของฟองอากาศภายในโฟมไข่ขาวจะมีขนาดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับโฟมไข่ขาวที่ไม่ผสมน้ำตาล ทั้งนี้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศและพื้นที่หน้าตัดของฟองอากาศภายในโฟมไข่ขาวนั้นจะแสดงถึง

ปริมาณอากาศที่มีอยู่ภายในโฟมไซขาว ซึ่งการผสมน้ำตาลลงในไซขาวจะมีผลให้ไซขาวมีความหนืดสูงขึ้น ไซขาวจึงสามารถกักเก็บอากาศไว้ภายในโครงสร้างได้น้อย ฟองอากาศภายในโฟมไซขาวจึงมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่หน้าตัดโดยเฉลี่ยของฟองอากาศภายในโฟมไซขาวในแต่ละภาวะการทดลอง จะเห็นได้ว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่หน้าตัดโดยเฉลี่ยของฟองอากาศภายในโฟมไซขาวจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อผสมน้ำตาลลงในไซขาวปริมาณเพิ่มขึ้น บ่งบอกถึงการที่ฟองอากาศภายในโฟมไซขาวมีขนาดที่ใกล้เคียงกันมากขึ้น สอดคล้องกับภาพถ่ายแสดงลักษณะฟองอากาศภายในโฟมไซขาว (ภาพที่ 4.1) ที่พบว่าฟองอากาศภายในโฟมไซขาวที่ไม่ผสมน้ำตาลมีขนาดเล็กและมีลักษณะสม่ำเสมอมากกว่าฟองอากาศภายในโฟมไซขาวที่ไม่ผสมน้ำตาล

ภาพที่ 4.1 ฟองอากาศภายในโฟมไซขาวที่ไม่เติมน้ำตาล และเติมน้ำตาลซูโครส กลูโคส และฟรุคโตสในปริมาณต่างกัน



เมื่อพิจารณาผลของชนิดน้ำตาลต่อลักษณะฟองอากาศภายในโฟมไข่ขาว พบว่าที่ระดับความเข้มข้นของน้ำตาลเท่ากันตั้งแต่ระดับความเข้มข้น 20% (w/v) ขึ้นไป ชนิดของน้ำตาลไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของฟองอากาศ และพื้นที่หน้าตัดโดยเฉลี่ยของฟองอากาศภายในโฟม ไข่ขาวอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

4.2 ผลของชนิดและปริมาณน้ำตาลต่อสมบัติของไข่ขาวพาสเจอร์ไรซ์

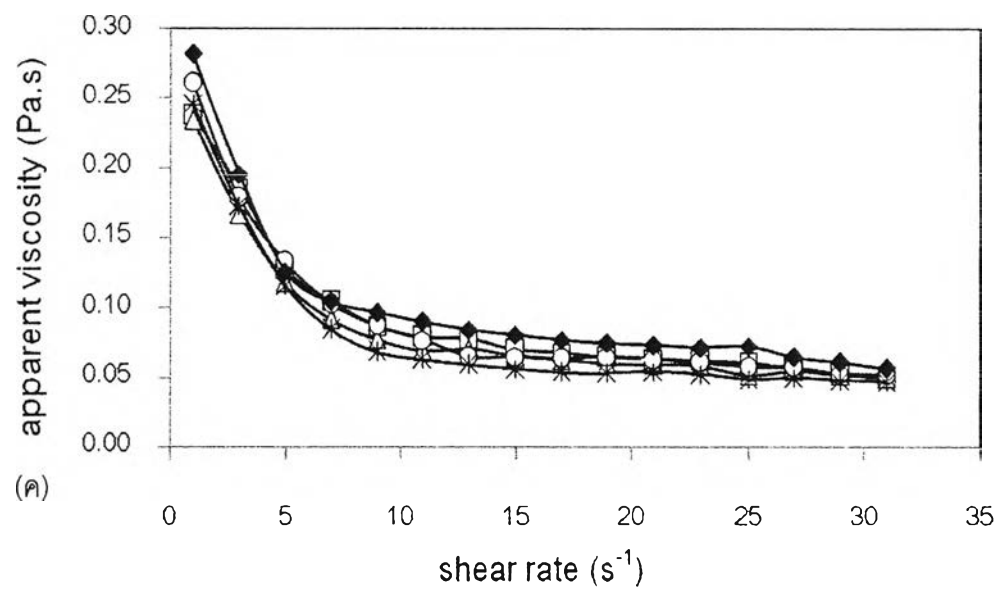
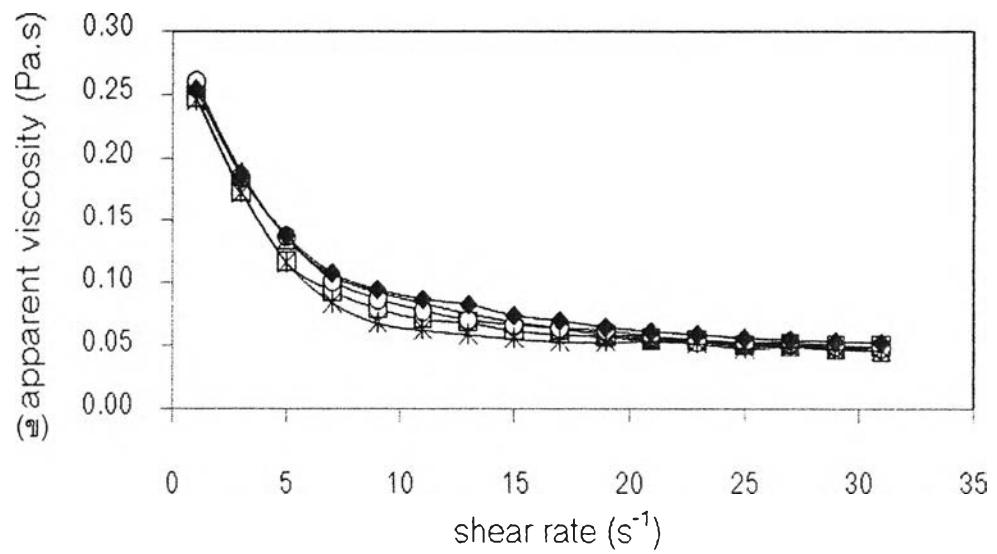
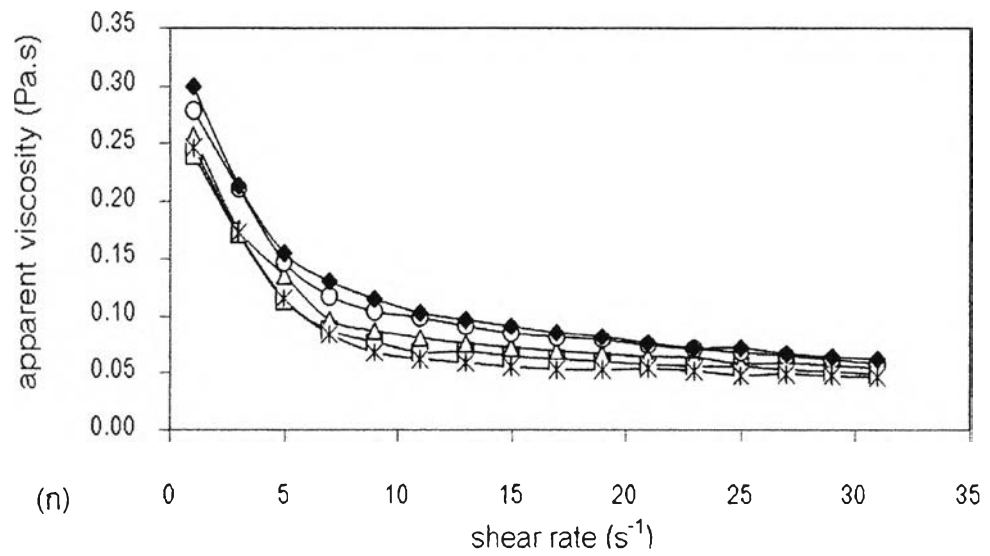
4.2.1 ค่าความหนืดของไข่ขาว

การเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของไข่ขาวพาสเจอร์ไรซ์ที่ไม่ผสมน้ำตาล และผสมน้ำตาลซูโครส กลูโคส และฟรุกโตสจะเลือกพิจารณาในช่วงอัตราเฉือน $1-30 \text{ s}^{-1}$ ซึ่งเป็นอัตราเฉือนที่ไข่ขาวในแต่ละภาวะมีค่าความหนืดปรากฏ (apparent viscosity) แตกต่างกันมากที่สุด (ภาพที่ ค.1) จากภาพที่ 4.2 ซึ่งให้เห็นว่าไข่ขาวที่ไม่ผสมน้ำตาล และผสมน้ำตาลที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ จัดเป็นของเหลวประเภท non-Newtonian โดยค่าความหนืดของไข่ขาวจะแปรตามอัตราเฉือน ไข่ขาวมีพฤติกรรมการไหลแบบ shear thinning เพราะเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้นไข่ขาวที่ทุกภาวะการทดลองมีค่าความหนืดปรากฏลดลง

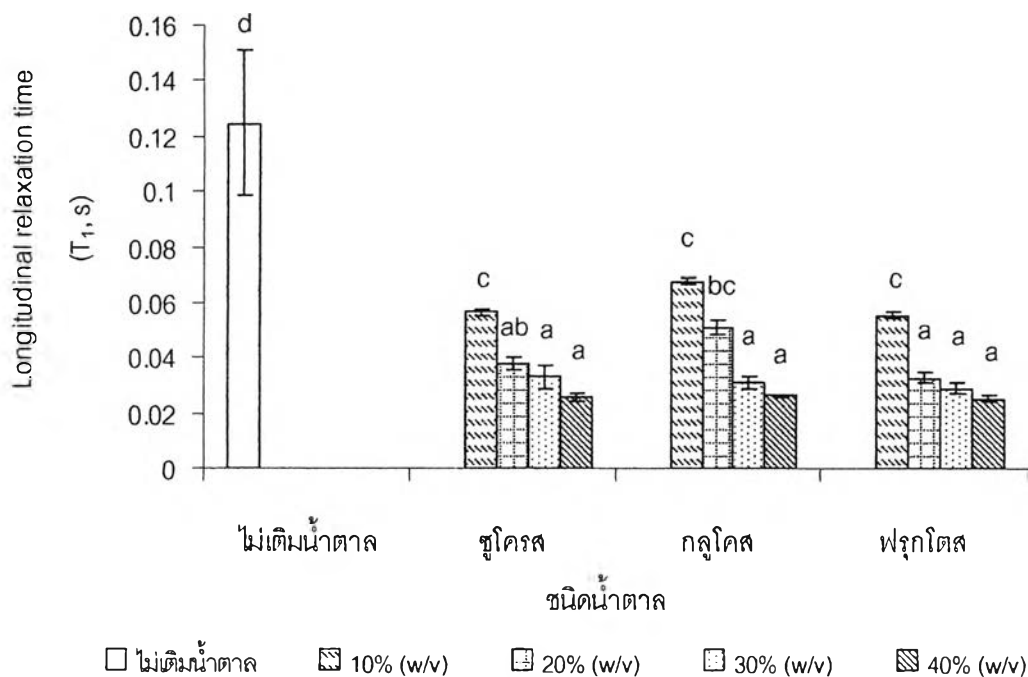
การเติมน้ำตาลลงไข่ขาวมีผลต่อการลดลงของค่าความหนืดของไข่ขาวไปในทิศทางเดียวกัน โดยไข่ขาวที่เติมน้ำตาลมีค่าความหนืดสูงกว่าไข่ขาวที่ไม่เติมน้ำตาล และเมื่อเติมน้ำตาลลงไข่ขาวปริมาณเพิ่มขึ้น ค่าความหนืดของไข่ขาวมีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งผลของการเพิ่มขึ้นของค่าความหนืดเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของน้ำตาลจะเกิดขึ้นในไข่ขาวที่ผสมน้ำตาลทั้งสามชนิดที่ใช่ทดลอง ซึ่งการผสมน้ำตาลลงในไข่ขาวทำให้ไข่ขาวมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น Padua และ Schmidt (1992) อธิบายว่าเป็นเพราะโมเลกุลน้ำตาลมีความสามารถในการจับกับโมเลกุลน้ำ ทำให้ระบบมีปริมาณน้ำอิสระลดลง และยังทำให้น้ำที่อยู่ล้อมรอบโมเลกุลน้ำตาลลดลงด้วย ส่งผลให้โมเลกุลน้ำตาลเกิดการรวมตัวกัน ดังนั้นโมเลกุลน้ำตาลจึงเคลื่อนที่ได้ช้าลง ระบบมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้การที่ไข่ขาวมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นนั้นจะทำให้ไข่ขาวมีความสามารถในการกักเก็บอากาศลดลงซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการเกิดโฟมที่ลดลงด้วย (ตารางที่ 4.1)

4.2.2 ค่า Longitudinal relaxation time (T_1) ของโปรตอนของโมเลกุลน้ำ

ผลการติดตามความอิสระของน้ำ (availability of water) ในไข่ขาวพาสเจอร์ไรซ์ที่ไม่ผสมน้ำตาล และผสมน้ำตาลซูโครส กลูโคส และฟรุกโตสในปริมาณต่างกัน โดยใช้เทคนิค NMR ซึ่งสามารถติดตามได้จากค่า longitudinal relaxation time (T_1) ของโปรตอน (^1H) ของโมเลกุลน้ำ แสดงดังภาพที่ 4.3 โดยค่า T_1 เป็นค่าที่บอกถึงเวลาที่โปรตอนของโมเลกุลน้ำใช้ในการส่งถ่ายพลังงานไปยังโมเลกุลข้างเคียง (Schmidt, 2004)



ภาพที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของไซขาวเติมน้ำตาล(ก) ชูโครส (ข) กลูโคส และ(ค) ฟรุคโตส ปริมาณ 0 (✱), 10 (□), 20 (△), 30 (o) และ 40 (◆) % (w/v) ที่อุณหภูมิ 25 °C



ภาพที่ 4.3 ค่า Longitudinal relaxation time (T_1 , s) ของโปรตอนของโมเลกุลน้ำในไซข้าวพาสเจอร์ไรส์ที่ภาวะต่าง ๆ

จากภาพที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าการผสมน้ำตาลลงในไซข้าวมีผลทำให้ความอิสระของน้ำในไซข้าวลดลง โดยเมื่อผสมน้ำตาลซูโครสลงในไซข้าวปริมาณ 10% (w/v) ไซข้าวมีค่า T_1 ของโปรตอนของโมเลกุลน้ำลดลงถึง 2.2 เท่า ($p \leq 0.05$) (ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน ข.3) และเมื่อระดับความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสในไซข้าวเพิ่มขึ้นจาก 10% เป็น 40% (w/v) ไซข้าวจะมีค่า T_1 ของโปรตอนของโมเลกุลน้ำลดลง 2.2 เท่าเช่นกัน ผลของการลดลงของค่า T_1 ของโปรตอนของโมเลกุลน้ำในไซข้าวเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของน้ำตาลจะเกิดขึ้นในไซข้าวที่ผสมน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตสด้วย การผสมน้ำตาลลงในไซข้าวทำให้น้ำในไซข้าวมีความอิสระลดลง เนื่องจากน้ำตาลมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลน้ำตาลมีสมบัติในการเกิดปฏิสัมพันธ์กับโมเลกุลน้ำ เมื่อผสมน้ำตาลลงในไซข้าวจึงทำให้น้ำที่เป็นอิสระในระบบลดลง (Mora-Gutierrez and Baianu, 1989) และเมื่อผสมน้ำตาลลงในไซข้าวปริมาณเพิ่มขึ้น น้ำในไซข้าวจะยิ่งมีความอิสระลดลง ซึ่งการที่น้ำในไซข้าวเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลน้ำตาลนั้นจะเป็นการช่วยลดการ drainage ของน้ำออกจากชั้นฟิล์มโปรตีนอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงได้ ทำให้อิมไซข้าวที่ผสมน้ำตาลมีความคงตัวเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.1)

ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำตาลเท่ากัน ชนิดของน้ำตาลไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า T_1 ของโปรตอนของโมเลกุลน้ำอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เนื่องจากน้ำตาลแต่ละชนิดมีสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับรูปแบบโครงสร้าง และหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลน้ำตาล โดยหมู่

ไฮดรอกซิลของคาร์โบไฮเดรต 1 หมู่จะสามารถจับกับโมเลกุลน้ำได้ 2 โมล น้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตสมีหมู่ไฮดรอกซิล 5 หมู่สามารถจับโมเลกุลน้ำได้ 10 โมล ในขณะที่น้ำตาลซูโครสมีหมู่ไฮดรอกซิล 8 หมู่จึงสามารถจับโมเลกุลน้ำได้ 16 โมล เมื่อคิดเทียบจากโมลเป็นน้ำหนักน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตส 1 กรัมสามารถจับโมเลกุลน้ำได้ประมาณ 1 กรัม ส่วนน้ำตาลซูโครส 1 กรัมจะสามารถจับโมเลกุลน้ำได้ประมาณ 0.84 กรัม (Hills, 1991) ซึ่งจะเห็นได้ว่าโมเลกุลของน้ำตาลซูโครส กลูโคส และฟรุกโตสมีความสามารถในการจับโมเลกุลน้ำได้ใกล้เคียงกัน ดังนั้นไซขาวที่ผสมน้ำตาลชนิดต่างกันจึงมีความอิสระของน้ำใกล้เคียงกัน

4.3 ผลของระยะเวลาการเก็บไซขาวพาสเจอร์ไรซ์ต่อสมบัติของโฟมไซขาว

4.3.1 สมบัติด้านการเกิดโฟมของไซขาว

ผลการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการเกิดโฟม และความคงตัวของโฟมของไซขาวพาสเจอร์ไรซ์ที่ไม่เติมน้ำตาลและเติมน้ำตาลซูโครส กลูโคส และฟรุกโตสตามปริมาณที่คัดเลือกได้จากการทดลองข้อที่ 4.1.1 (30% (w/v)) ตลอดช่วงเวลาการเก็บไซขาวนาน 7 วัน แสดงดังตารางที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ความสามารถในการเกิดโฟมของไซขาวพาสเจอร์ไรซ์ที่ไม่เติมน้ำตาล และเติมน้ำตาลซูโครส กลูโคส และฟรุกโตสหลังจากเก็บไซขาวไว้เป็นเวลา 7 วัน

ชนิดน้ำตาล (%, w/v)	ความสามารถในการเกิดโฟม (%)		
	เก็บ 1 วัน	เก็บ 4 วัน	เก็บ 7 วัน
ไม่เติมน้ำตาล ^{ns}	552.00 ± 18.33	561.33 ± 2.31	556.66 ± 18.15
ซูโครส 30% ^{ns}	424.67 ± 23.17	392.67 ± 7.56	432.00 ± 21.17
กลูโคส 30% ^{ns}	424.00 ± 18.33	428.00 ± 22.26	423.32 ± 26.10
ฟรุกโตส 30% ^{ns}	438.67 ± 18.04	444.00 ± 14.41	422.67 ± 21.01

ตัวเลขในตารางเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ns ข้อมูลในแถวเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

จากตารางที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าระยะเวลาการเก็บไซขาวไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการเกิดโฟม และความคงตัวของโฟมไซขาวที่ไม่เติมน้ำตาล และเติมน้ำตาลชนิดต่าง ๆ อย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) (ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน ข.4 และ ข.5 ตามลำดับ) จึงอาจกล่าวได้ว่าตลอดระยะเวลาการเก็บไซขาวนาน 7 วัน การจัดเรียงตัวของสายพอลิเพปไทด์ภายในโครงสร้างของโปรตีนไซขาวยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากพอที่จะส่งผลให้ไซขาวมีสมบัติเชิงหน้าที่ในด้านการเกิดโฟมเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัด

ตารางที่ 4.4 ความคงตัวของโฟมไข่ขาวพาสเจอร์ไรซ์ที่ไม่เติมน้ำตาล และเติมน้ำตาลซูโครส กลูโคส และฟรุกโตสหลังจากเก็บไข่ขาวไว้เป็นเวลา 7 วัน

ชนิดน้ำตาล (%, w/v)	ความคงตัวของโฟม (นาที)		
	เก็บ 1 วัน	เก็บ 4 วัน	เก็บ 7 วัน
ไม่เติมน้ำตาล ^{ns}	67.50 ± 9.01	59.17 ± 3.82	53.33 ± 2.89
ซูโครส 30% ^{ns}	141.67 ± 2.89	136.67 ± 7.64	138.33 ± 7.64
กลูโคส 30% ^{ns}	136.67 ± 5.77	123.33 ± 5.77	132.50 ± 10.90
ฟรุกโตส 30% ^{ns}	133.33 ± 7.64	131.67 ± 11.55	123.33 ± 7.64

ตัวเลขในตารางเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ns ข้อมูลในแถวเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

4.3.2 ลักษณะฟองอากาศภายในโฟมไข่ขาว

ผลการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของฟองอากาศ และพื้นที่หน้าตัดโดยเฉลี่ยของฟองอากาศภายในโฟมไข่ขาวตลอดช่วงเวลาการเก็บไข่ขาวนาน 7 วันแสดงดังตารางที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของฟองอากาศภายในโฟมไข่ขาวพาสเจอร์ไรซ์ที่ภาวะต่าง ๆ หลังจากเก็บไข่ขาวไว้ในช่วงเวลา 7 วัน

ชนิดน้ำตาล (%, w/v)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของฟองอากาศ ¹ (มิลลิเมตร)		
	เก็บ 1 วัน	เก็บ 4 วัน	เก็บ 7 วัน
ไม่เติมน้ำตาล ^{ns}	0.77 ± 0.06	0.76 ± 0.04	0.74 ± 0.01
ซูโครส 30% ^{ns}	0.53 ± 0.02	0.55 ± 0.01	0.55 ± 0.03
กลูโคส 30% ^{ns}	0.58 ± 0.01	0.54 ± 0.04	0.55 ± 0.02
ฟรุกโตส 30% ^{ns}	0.60 ± 0.03	0.54 ± 0.03	0.58 ± 0.01

ตัวเลขในตารางเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ns ข้อมูลในแถวเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

¹คำนวณจากฟองอากาศจำนวน 20 ฟอง

ตารางที่ 4.6 พื้นที่หน้าตัดโดยเฉลี่ยของฟองอากาศภายในโฟมไข่ขาวพาสเจอร์ไรซ์ที่ภาวะต่าง ๆ หลังจากเก็บไข่ขาวไว้ในช่วงเวลา 7 วัน

ชนิดน้ำตาล (%, w/v)	พื้นที่หน้าตัดโดยเฉลี่ยของฟองอากาศ ¹ (ตารางมิลลิเมตร)		
	เก็บ 1 วัน	เก็บ 4 วัน	เก็บ 7 วัน
ไม่เติมน้ำตาล ^{ns}	2.36 ± 0.25	2.33 ± 0.18	2.29 ± 0.05
ซูโครส 30% ^{ns}	1.10 ± 0.04	1.19 ± 0.04	1.13 ± 0.08
กลูโคส 30% ^{ns}	1.17 ± 0.01	1.11 ± 0.12	1.12 ± 0.05
ฟรุคโตส 30% ^{ns}	1.15 ± 0.02	1.19 ± 0.04	1.20 ± 0.04

ตัวเลขในตารางเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ns ข้อมูลในแถวเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

¹คำนวณจากฟองอากาศจำนวน 20 ฟอง

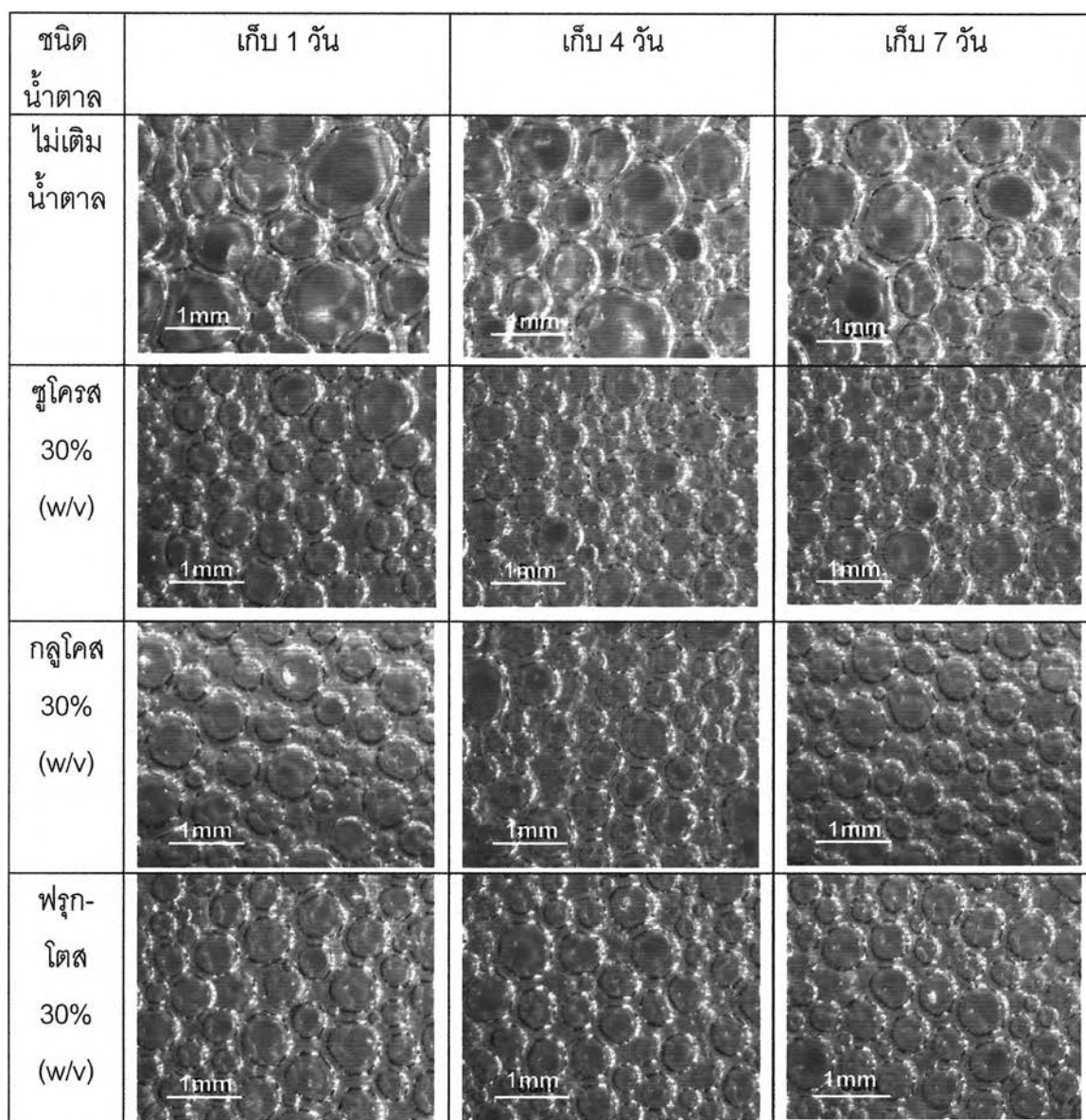
จากตารางจะเห็นได้ว่าระยะเวลาการเก็บไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของฟองอากาศ และพื้นที่หน้าตัดโดยเฉลี่ยของฟองอากาศภายในโฟมไข่ขาวที่ไม่เติมน้ำตาลและที่เติมน้ำตาลชนิดต่าง ๆ อย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) (ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน ข.6 และ ข.7 ตามลำดับ) ภาพถ่ายแสดงลักษณะฟองอากาศภายในโฟมไข่ขาวแสดงในภาพที่ 4.4 ให้ผลที่สอดคล้องกับการวิเคราะห์ความสามารถในการเกิดโฟมและความคงตัวของโฟมไข่ขาว (ตารางที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ) ที่พบว่าตลอดช่วงเวลาการเก็บไข่ขาวนาน 7 วัน ไข่ขาวที่ไม่เติมน้ำตาลและเติมน้ำตาลชนิดต่าง ๆ มีค่าความสามารถในการเกิดโฟมและความคงตัวของโฟมไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับไข่ขาวที่เก็บไว้เป็นเวลา 1 วัน

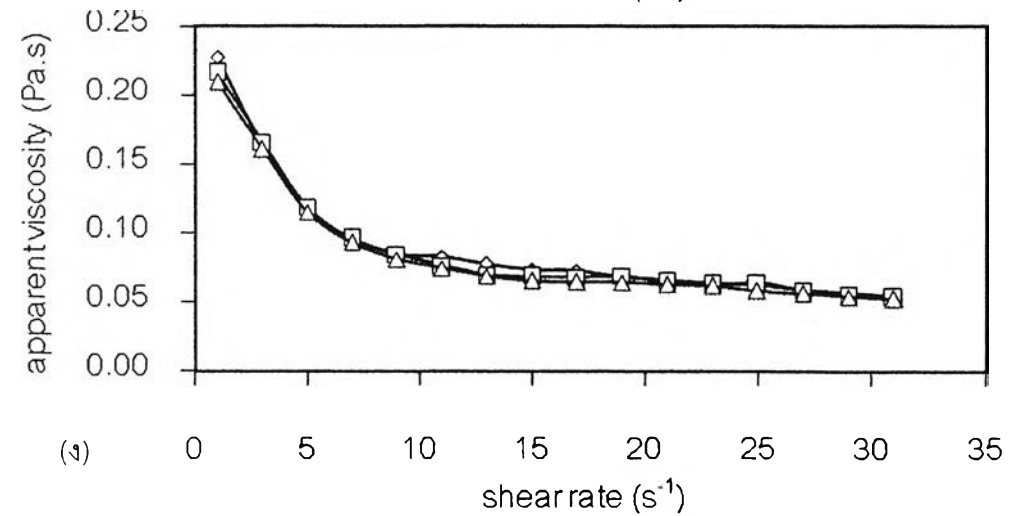
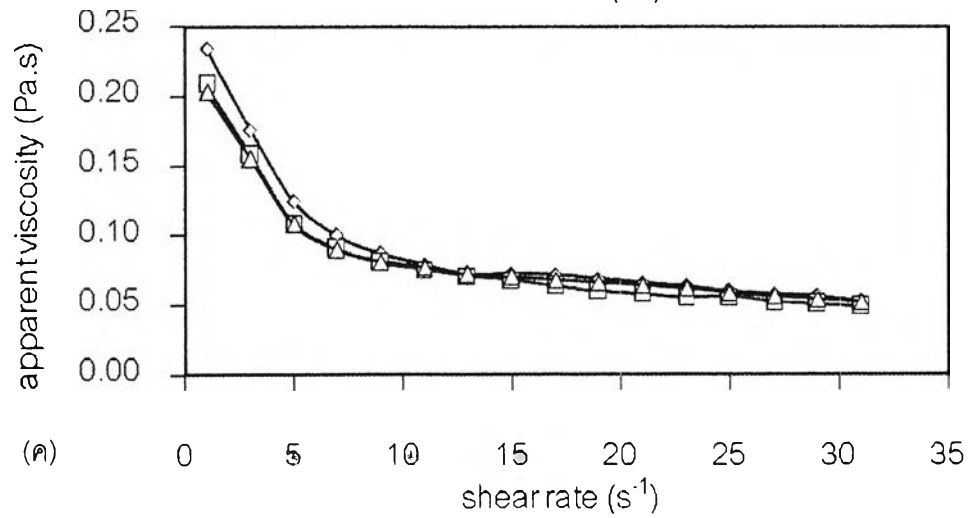
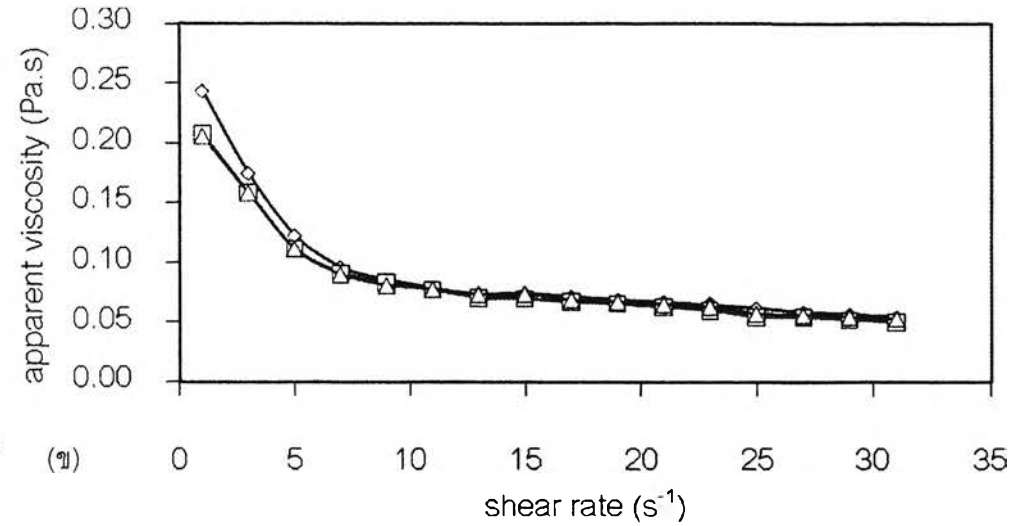
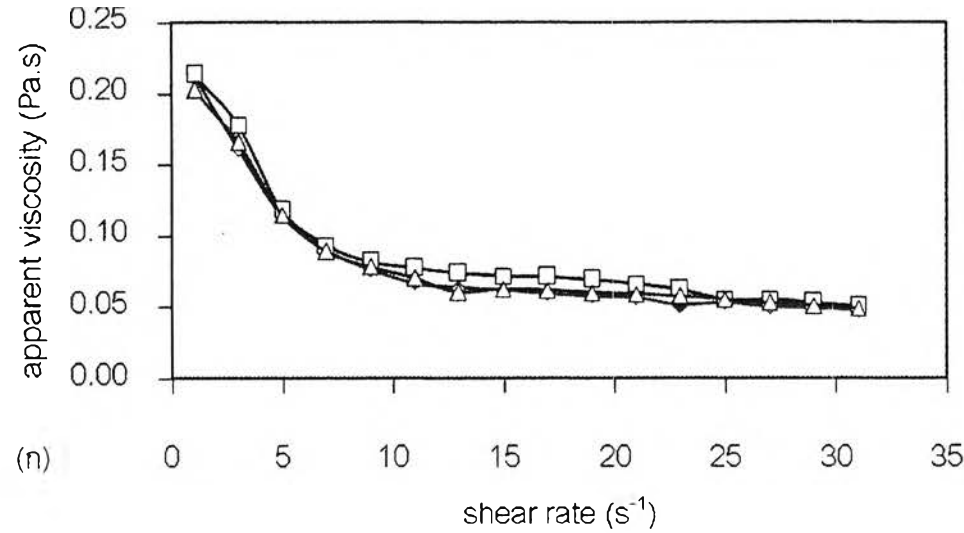
4.4 ผลของระยะเวลาการเก็บไข่ขาวพาสเจอร์ไรซ์ต่อสมบัติของไข่ขาว

4.4.1 ค่าความหนืดของไข่ขาว

การเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของไข่ขาวพาสเจอร์ไรซ์ที่ภาวะต่าง ๆ ตลอดช่วงเวลาในการเก็บไข่ขาวนาน 7 วัน แสดงดังภาพที่ 4.5 จากรูปจะเห็นได้ว่าระยะเวลาการเก็บไข่ขาวไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของไข่ขาวที่ไม่เติมน้ำตาล และเติมน้ำตาลชนิดต่าง ๆ ผลที่ได้สอดคล้องกับค่าความสามารถในการเกิดโฟมและความคงตัวของโฟมไข่ขาว (ตารางที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ) ที่พบว่าตลอดระยะเวลาการเก็บไข่ขาวนาน 7 วัน ไข่ขาวที่ไม่เติมน้ำตาล และเติมน้ำตาลชนิดต่าง ๆ มีค่าความสามารถในการเกิดโฟม และความคงตัวของโฟมไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับไข่ขาวที่เก็บไว้เป็นเวลา 1 วัน

ภาพที่ 4.4 ฟองอากาศภายในโพลีไซชาวพาสเจอร์ไรซ์ที่ไม่เติมน้ำตาล และเติมน้ำตาลซูโครส กลูโคส และฟรุกโตสหลังจากเก็บไซชาวไว้ในช่วงเวลา 7 วัน





ภาพที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของไซขาวพาสเจอร์ไรซ์ (ก) ที่ไม่เติมน้ำตาล และ (ข) เติมน้ำตาลซูโครส (ค) กลูโคส และ (ง) ฟรุกโตส ปริมาณ 30 % (w/v) หลังจากเก็บไซขาวไว้ในช่วงเวลา 1 (\diamond), 4 (Δ) และ 7 (\square) วัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

4.4.2 ปริมาณโปรตีนเอส-โอวัลบูมิน

ผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนเอส-โอวัลบูมินในไข่ขาวพาสเจอร์ไรซ์ตลอดช่วงเวลาในการเก็บไข่ขาวนาน 7 วัน แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ปริมาณโปรตีนเอส-โอวัลบูมินในไข่ขาวพาสเจอร์ไรซ์ที่ไม่เติมน้ำตาล และเติมน้ำตาลซูโครสหลังจากเก็บไว้ไข่ขาวในช่วงเวลา 7 วัน

ชนิดน้ำตาล (%, w/v)	ปริมาณโปรตีนเอส-โอวัลบูมิน (%)		
	เก็บ 1 วัน	เก็บ 4 วัน	เก็บ 7 วัน
ไม่เติมน้ำตาล ^{ns}	61.85 ± 2.89	63.78 ± 5.20	65.11 ± 3.87
ซูโครส 30% ^{ns}	58.67 ± 2.31	57.05 ± 3.16	57.80 ± 3.77

ตัวเลขในตารางเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ns ข้อมูลในแถวเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

จากตารางที่ 4.7 พบว่าระยะเวลาการเก็บไข่ขาวไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนเอส-โอวัลบูมินในไข่ขาวที่ไม่เติมน้ำตาล และเติมน้ำตาลซูโครสอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) (ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน ข.8) ซึ่งขัดแย้งกับรายงานของ Alleoni และ Antunes (2004) ที่พบว่าเมื่อเก็บไข่ไก่ไว้เป็นเวลา 28 วัน ไข่ขาวของไข่ไก่ที่เปลือกไม่ได้เคลือบด้วย WPC มีค่า pH สูงขึ้น และไข่ขาวมีปริมาณโปรตีนเอส-โอวัลบูมินเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ส่งผลให้โฟมไข่ขาวมีความคงตัวลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับไข่ขาวในไข่ไก่ที่เปลือกเคลือบด้วย WPC ซึ่งฟิล์ม WPC ช่วยป้องกันการสูญเสียก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากเปลือกไข่ได้ ทั้งนี้การที่ไข่ขาวพาสเจอร์ไรซ์มีปริมาณโปรตีนเอส-โอวัลบูมินไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเก็บไข่ขาวไว้เป็นเวลา 7 วัน อาจเป็นเพราะไข่ขาวพาสเจอร์ไรซ์มีค่า pH อยู่ในช่วง 8-9 ตั้งแต่ขั้นตอนการแปรรูป และตลอดช่วงเวลาการเก็บ 7 วัน ไข่ขาวมีค่า pH ไม่เปลี่ยนแปลง (ข้อมูลในตารางที่ ค.1) ส่งผลให้โปรตีนโอวัลบูมินในไข่ขาวยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็นเอส-โอวัลบูมิน

ผลการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนเอส-โอวัลบูมินในไข่ขาวที่ได้สอดคล้องกับค่าความคงตัวของโฟมไข่ขาว (ตารางที่ 4.4) ที่พบว่าระยะเวลาการเก็บไข่ขาวไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความคงตัวของโฟมไข่ขาวที่ไม่เติมน้ำตาลและเติมน้ำตาลชนิดต่าง ๆ เนื่องจากไข่ขาวพาสเจอร์ไรซ์มีค่า pH ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงเวลาในการเก็บไข่ขาวนาน 7 วัน ทำให้ไม่เกิดการสลายตัวของเส้นใยมิวซินที่มีอยู่ในไข่ขาว (Silversides and Budgell, 2004) ไข่ขาวจึงมีค่าความหนืดไม่เปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ไข่ขาวมีความคงตัวของโฟมเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ไข่ขาวที่เติมน้ำตาลกลูโคสและฟรุคโตสจะไม่สามารถวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีนเอส-โอวัลบูมินได้

เนื่องจากน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตสเป็นน้ำตาลรีดิวซ์สามารถรีดิวซ์คอปเปอร์ (II) ไอออน (Cu^{2+}) ในสารละลายไบยูเรตเป็นคอปเปอร์ (I) ออกไซด์ (Cu_2O) เกิดเป็นตะกอนสีแดงอิฐ (Peris-Tortajada, 1996) ทำให้ไม่สามารถวัดค่าการดูดกลืนแสงเพื่อหาปริมาณโปรตีนได้

4.4.3 ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด

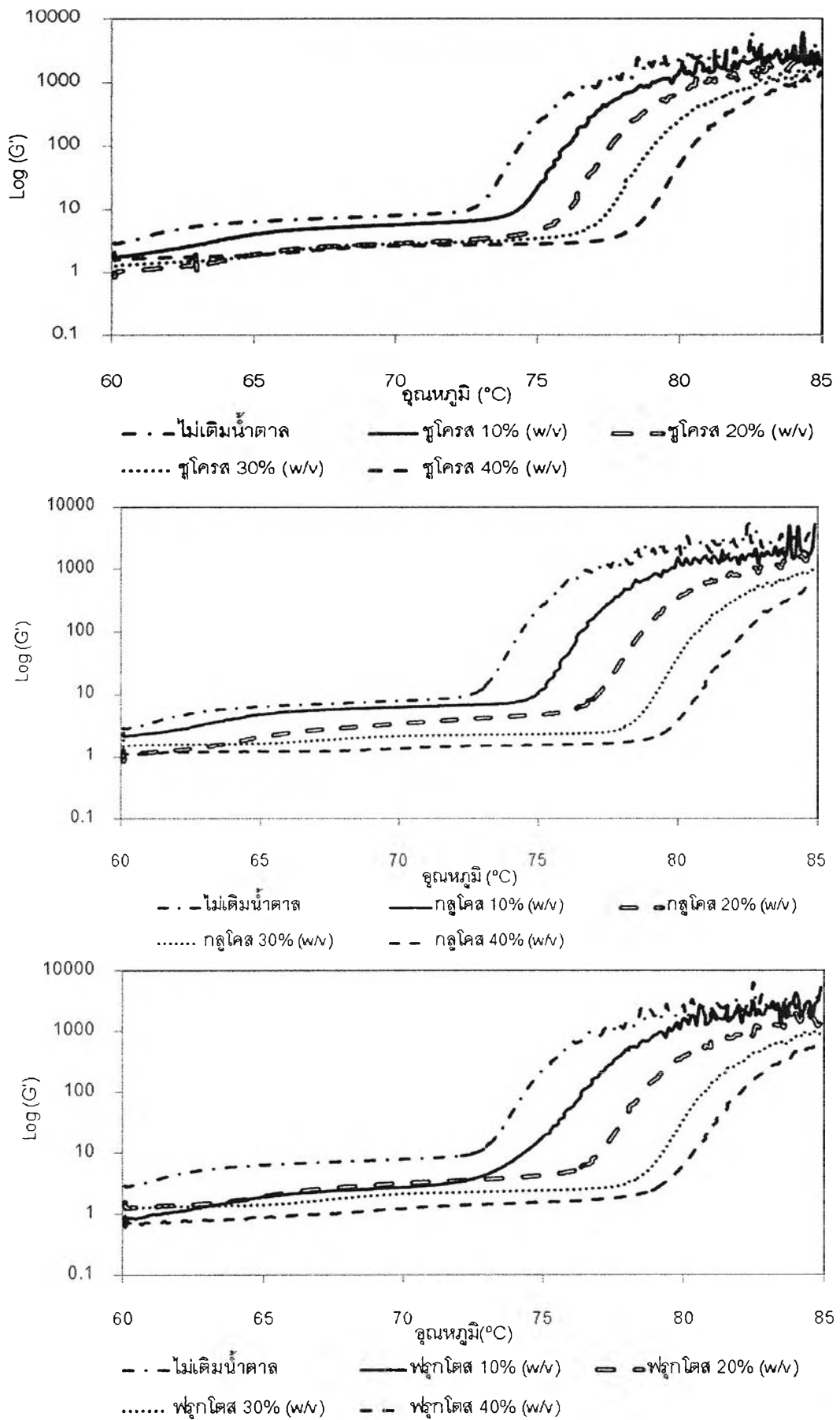
จากการวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมดในไซข้าวพาสเจอร์ไรซ์ พบว่าตลอดช่วงระยะเวลาการเก็บไซข้าว 7 วัน ไซข้าวพาสเจอร์ไรซ์ที่ไม่เติมน้ำตาลและเติมน้ำตาลซูโครส กลูโคส และฟรุกโตสปริมาณ 30% (w/v) มีปริมาณแบคทีเรียทั้งหมดน้อยกว่า 300 CFU/ml เนื่องจากไซข้าวพาสเจอร์ไรซ์ที่ใช้ในการทดลองผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที มีผลทำให้ปริมาณแบคทีเรียที่มีอยู่ในไซข้าวลดลง ซึ่งตามข้อกำหนดของมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติของไซไก่ไม่ได้กำหนดปริมาณแบคทีเรียทั้งหมดไว้ (มาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2548) ผลการทดลองที่ได้จึงเป็นการแสดงให้เห็นว่าตลอดช่วงระยะเวลาในการเก็บไซข้าวานาน 7 วัน ไซข้าวพาสเจอร์ไรซ์มีคุณภาพทางด้านจุลชีววิทยาไม่เปลี่ยนแปลง เหมาะแก่การนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์อาหาร

4.5 ผลของชนิดและปริมาณน้ำตาลต่อสมบัติของเจลไซข้าวพาสเจอร์ไรซ์

4.5.1 อุณหภูมิในการเกิดเจล

อุณหภูมิในการเกิดเจลของไซข้าวพาสเจอร์ไรซ์ที่ไม่เติมน้ำตาล และเติมน้ำตาลซูโครส กลูโคส และฟรุกโตสปริมาณ 10, 20, 30 และ 40% (w/v) จะพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิในการให้ความร้อนกับค่า $\text{Log}(G')$ (ภาพที่ 4.6) เมื่อไซข้าวได้รับความร้อน ไซข้าวจะเกิดการเปลี่ยนสถานะจาก viscoelastic fluid ไปเป็น viscoelastic solid อุณหภูมิที่ไซข้าวมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจะแสดงถึงอุณหภูมิในการเกิดเจลของไซข้าว (Hsieh et al., 1993; Raikos et al., 2007b)

อุณหภูมิในการเกิดเจลของไซข้าวแสดงดังในตารางที่ 4.8 จากตารางพบว่า การเติมน้ำตาลลงในไซข้าวมีผลทำให้ไซข้าวมีอุณหภูมิในการเกิดเจลสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับไซข้าวที่ไม่เติมน้ำตาล ($p \leq 0.05$) (ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน ข.9) โดยไซข้าวที่เติมน้ำตาลซูโครสที่ระดับความเข้มข้น 10, 20, 30 และ 40% (w/v) มีอุณหภูมิในการเกิดเจลสูงกว่าไซข้าวที่ไม่เติมน้ำตาลประมาณ 1, 3, 4 และ 5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทั้งนี้อุณหภูมิในการเกิดเจลของไซข้าวที่เติมน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตสที่ระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้นก็มีผลไปในทิศทางเดียวกับไซข้าวที่เติมน้ำตาลซูโครสเช่นกัน



ภาพที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของไซขาวพาสเจอร์ไรซ์ที่ไม่เติมน้ำตาล และ เติมน้ำตาลซูโครส กลูโคส และฟรุคโตสในปริมาณต่างกัน

ตารางที่ 4.8 อุณหภูมิในการเกิดเจลของไข่ขาวพาสเจอร์ไรซ์ที่ภาวะต่าง ๆ

ชนิดและปริมาณน้ำตาล (%, w/v)	อุณหภูมิในการเกิดเจล (°C)
ไม่เติมน้ำตาล	72.58 ^a ± 0.32
น้ำตาลซูโครส 10%	73.62 ^b ± 0.61
น้ำตาลซูโครส 20%	75.53 ^{cd} ± 0.20
น้ำตาลซูโครส 30%	76.72 ^{ef} ± 0.26
น้ำตาลซูโครส 40%	77.78 ^{gh} ± 0.13
น้ำตาลกลูโคส 10%	74.67 ^c ± 0.89
น้ำตาลกลูโคส 20%	77.22 ^{fg} ± 0.74
น้ำตาลกลูโคส 30%	78.33 ^{hi} ± 0.80
น้ำตาลกลูโคส 40%	79.05 ⁱ ± 0.32
น้ำตาลฟรุกโตส 10%	73.48 ^{ab} ± 0.50
น้ำตาลฟรุกโตส 20%	75.82 ^{de} ± 0.37
น้ำตาลฟรุกโตส 30%	77.08 ^{fg} ± 0.80
น้ำตาลฟรุกโตส 40%	78.25 ^{hi} ± 0.44

ตัวเลขในตารางเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

a,b,c,... ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในสดมภ์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

การเติมน้ำตาลลงในไข่ขาวทำให้ไข่ขาวมีอุณหภูมิในการเกิดเจลสูงขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากการที่หมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลน้ำตาลมีสมบัติในการเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลน้ำ โปรตีนจึงสามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลน้ำได้น้อยลง ส่งผลให้โปรตีนเกิดอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนด้วยกันเองเพิ่มขึ้นด้วยแรงยึดเหนี่ยวแบบ hydrophobic interaction (Dickinson and Merino, 2002; Taravati et al., 2007) นอกจากนี้หมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลน้ำตาลยังสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโปรตีนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของสายพอลิเพปไทด์ภายในโครงสร้างของโปรตีน ส่งผลให้โปรตีนมีโครงรูปที่เสถียรยิ่งขึ้น (Antipova and Semenova, 1995; Semenova et al., 2002) ดังนั้นโปรตีนจึงมีความคงทนต่อการเสียสภาพธรรมชาติด้วยความร้อน ทำให้อุณหภูมิในการเกิดเจลของไข่ขาวสูงขึ้น ซึ่งผลที่ได้เป็นไปในทำนองเดียวกับรายงานของ Kulmyrzaev และคณะ (2000) ที่พบว่า การเติมน้ำตาลซูโครสลงในสารละลายเวย์โปรตีนเข้มข้น 10% (w/v) มีผลทำให้อุณหภูมิในการเกิดเจลของเวย์โปรตีนสูงขึ้น โดยสารละลายเวย์โปรตีนที่เติมน้ำตาลซูโครสปริมาณ 40% (w/v) มีอุณหภูมิในการเกิดเจลสูงที่สุด คือ 85.5 องศาเซลเซียส เมื่อ

เปรียบเทียบกับสารละลายเวย์โปรตีนที่ไม่เติมน้ำตาลซึ่งมีอุณหภูมิในการเกิดเจล เท่ากับ 76.2 องศาเซลเซียส Christ และคณะ (2005) ศึกษาผลของน้ำตาลซูโครสต่ออุณหภูมิในการเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีนไข่ขาวโดยใช้เทคนิค DSC พบว่าการเติมน้ำตาลซูโครสลงในสารละลายไข่ขาวเข้มข้น 15% (w/v) มีผลทำให้อุณหภูมิในการเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีนโอโวทรานส์-เฟอร์รินและโอวัลบูมินในไข่ขาวสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน ($p \leq 0.05$) โดยเมื่อเติมน้ำตาลซูโครสลงในไข่ขาวปริมาณ 40% (w/v) โปรตีนโอโวทรานส์เฟอร์รินและโอวัลบูมินมีอุณหภูมิในการเสียสภาพธรรมชาติเพิ่มขึ้นจาก 59.1 และ 76.8 องศาเซลเซียส เป็น 68.6 และ 86.8 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับโปรตีนโอโวทรานส์เฟอร์รินและโอวัลบูมินในไข่ขาวที่ไม่เติมน้ำตาล

เมื่อพิจารณาผลของชนิดน้ำตาลต่ออุณหภูมิในการเกิดเจลของไข่ขาว จะเห็นได้ว่าที่ระดับความเข้มข้นของน้ำตาลน้อยกว่า 40% (w/v) ไข่ขาวที่เติมน้ำตาลกลูโคสมีอุณหภูมิในการเกิดเจลสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับไข่ขาวที่เติมน้ำตาลซูโครสและฟรุคโตส ($p \leq 0.05$)

4.5.2 ค่าสีของเจล

ค่าสีในระบบ CIELAB ของเจลไข่ขาวพาสเจอร์ไรซ์ที่ไม่ผสมน้ำตาล และผสมน้ำตาลที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.9 จากตาราง พบว่าเจลไข่ขาวที่ไม่ผสมน้ำตาลมีค่าความสว่างมากกว่าเจลไข่ขาวที่ผสมน้ำตาล และเมื่อผสมน้ำตาลลงในไข่ขาวปริมาณเพิ่มขึ้นเจลไข่ขาวมีค่าความสว่างลดลง ซึ่งผลของการลดลงของค่าความสว่างของเจลไข่ขาวเกิดขึ้นในไข่ขาวที่ผสมน้ำตาลซูโครส กลูโคส และฟรุคโตสในทิศทางเดียวกัน ในขณะที่การผสมน้ำตาลลงในไข่ขาวส่งผลต่อค่าสีแดงและค่าสีเหลืองของเจลไข่ขาวอย่างไม่เด่นชัด

เมื่อนำค่าจากการวัดสีมาคำนวณค่า ΔE^*_{ab} ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงสีของเจลไข่ขาวที่ผสมน้ำตาลเปรียบเทียบกับเจลไข่ขาวที่ไม่ผสมน้ำตาล พบว่าเมื่อผสมน้ำตาลลงในไข่ขาวปริมาณเพิ่มขึ้นมีผลทำให้เจลไข่ขาวมีค่าการเปลี่ยนแปลงสีสูงขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าการเปลี่ยนแปลงสีของเจลไข่ขาวเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของน้ำตาลจะเกิดขึ้นในไข่ขาวที่ผสมน้ำตาลทั้งสามชนิดที่ใช้ทดลอง โดยเมื่อผสมน้ำตาลลงในไข่ขาวปริมาณเพิ่มขึ้น เจลไข่ขาวที่ผสมน้ำตาลฟรุคโตสมีค่าการเปลี่ยนแปลงสีเพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเจลไข่ขาวที่ผสมน้ำตาลซูโครสและกลูโคส ซึ่งจะเห็นผลชัดที่ระดับความเข้มข้นของน้ำตาล 40% (w/v) เจลไข่ขาวที่ผสมน้ำตาลฟรุคโตสมีค่าการเปลี่ยนแปลงสีสูงกว่าเจลไข่ขาวที่ผสมน้ำตาลซูโครสและกลูโคสประมาณ 1.6 และ 1.3 เท่า ตามลำดับ (ตารางที่ 4.9) ในขณะที่เดียวกันเจลไข่ขาวที่ผสมน้ำตาลซูโครสและกลูโคสจะมีค่าการเปลี่ยนแปลงสีใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.9 ค่าสีและค่าการเปลี่ยนแปลงสีของเจลไข่ขาวพาสเจอร์ไรซ์ที่ไม่ผสมน้ำตาล และผสมน้ำตาลซูโครส กลูโคส และฟรุกโตสในปริมาณต่างกัน

ชนิดและปริมาณ น้ำตาล (%w/v)	ค่าความสว่าง (L*)	ค่าสีแดง (a*)	ค่าสีเหลือง (b*)	ค่าการเปลี่ยนแปลง สี (ΔE^*_{ab})
ไม่เติมน้ำตาล	90.09 ± 0.81	-4.42 ± 0.11	8.53 ± 0.46	-
น้ำตาลซูโครส 10%	86.29 ± 0.52	-4.78 ± 0.08	7.93 ± 0.78	3.87
น้ำตาลซูโครส 20%	83.18 ± 0.41	-4.90 ± 0.13	6.97 ± 0.76	7.10
น้ำตาลซูโครส 30%	79.68 ± 0.64	-5.06 ± 0.11	6.27 ± 1.53	10.67
น้ำตาลซูโครส 40%	78.39 ± 1.33	-4.69 ± 0.46	4.69 ± 1.12	13.78
น้ำตาลกลูโคส 10%	85.26 ± 1.53	-4.65 ± 0.23	9.99 ± 0.56	5.05
น้ำตาลกลูโคส 20%	81.47 ± 1.07	-4.69 ± 0.08	10.33 ± 0.32	8.82
น้ำตาลกลูโคส 30%	76.79 ± 1.12	-4.64 ± 0.39	10.04 ± 0.48	12.40
น้ำตาลกลูโคส 40%	73.93 ± 0.88	-4.28 ± 0.24	10.19 ± 0.72	16.25
น้ำตาลฟรุกโตส 10%	84.05 ± 0.50	-4.13 ± 0.40	11.82 ± 1.02	6.89
น้ำตาลฟรุกโตส 20%	76.86 ± 0.77	-3.35 ± 0.48	13.06 ± 1.53	12.60
น้ำตาลฟรุกโตส 30%	74.35 ± 0.12	-2.64 ± 0.25	14.18 ± 1.19	16.82
น้ำตาลฟรุกโตส 40%	69.34 ± 0.86	-1.40 ± 0.46	14.22 ± 0.97	21.73

ตัวเลขในตารางเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

การผสมน้ำตาลลงในไข่ขาวปริมาณเพิ่มขึ้นมีผลทำให้เจลไข่ขาวมีค่าความสว่างลดลง และมีค่าการเปลี่ยนแปลงสีสูงขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ที่เกิดขึ้นระหว่างขั้นตอนการให้ความร้อนแก่ไข่ขาว โดยปฏิกิริยาเมลลาร์ดเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์กับหมู่อะมิโนในไข่ขาว ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดจะขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำตาล น้ำตาลชนิดต่างกันจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ทั้งนี้กลูโคสและฟรุกโตสเป็นน้ำตาลรีดิวซ์จะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดสูงกว่าซูโครสซึ่งเป็นน้ำตาลนอนรีดิวซ์ อย่างไรก็ตามน้ำตาลฟรุกโตสจะสามารถเกิดปฏิกิริยานี้ได้ดีที่สุด (Sun et al., 2004; นิธิยา รัตนานนท์, 2549) ดังนั้นเมื่อผสมน้ำตาลลงในไข่ขาวปริมาณเพิ่มขึ้น เจลไข่ขาวที่ผสมน้ำตาลฟรุกโตสจึงมีค่าการเปลี่ยนแปลงสีมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเจลไข่ขาวที่ผสมน้ำตาลซูโครสและกลูโคส

4.5.3 เนื้อสัมผัสของเจลไข่ขาว

ผลการศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลไข่ขาวพาสเจอร์ไรซ์ที่ไม่เติมน้ำตาลและเติมน้ำตาลซูโครส กลูโคส และฟรุกโตสที่ภาวะต่าง ๆ โดยพิจารณาจากค่าแรงสูงสุดที่ทำให้เจลแตกและค่างานที่ทำให้เจลแตกแสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ค่าแรงสูงสุดที่ทำให้เจลแตก และค่างานที่ทำให้เจลแตกของเจลไข่ขาวพาสเจอร์ไรซ์ที่ภาวะต่าง ๆ

ชนิดและปริมาณน้ำตาล (%, w/v)	ค่าแรงสูงสุดที่ทำให้เจลแตก (g _r)	ค่างานที่ทำให้เจลแตก (g _r .mm)
ไม่เติมน้ำตาล	161.32 ^h ± 4.40	681.26 ^g ± 68.56
น้ำตาลซูโครส 10%	128.20 ^g ± 6.66	409.83 ^f ± 9.87
น้ำตาลซูโครส 20%	102.16 ^f ± 10.07	277.82 ^e ± 26.67
น้ำตาลซูโครส 30%	81.99 ^e ± 2.51	194.72 ^d ± 4.39
น้ำตาลซูโครส 40%	65.60 ^{cd} ± 3.12	141.88 ^{bc} ± 7.66
น้ำตาลกลูโคส 10%	99.22 ^f ± 9.01	300.01 ^e ± 34.93
น้ำตาลกลูโคส 20%	69.06 ^d ± 2.39	179.23 ^{cd} ± 7.30
น้ำตาลกลูโคส 30%	46.64 ^b ± 8.14	106.33 ^{ab} ± 15.39
น้ำตาลกลูโคส 40%	35.59 ^a ± 1.47	73.22 ^a ± 5.12
น้ำตาลฟรุกโตส 10%	120.12 ^g ± 4.90	425.70 ^f ± 26.34
น้ำตาลฟรุกโตส 20%	96.85 ^f ± 6.49	282.76 ^e ± 9.28
น้ำตาลฟรุกโตส 30%	75.47 ^{de} ± 5.01	205.38 ^d ± 25.85
น้ำตาลฟรุกโตส 40%	57.01 ^c ± 3.93	130.73 ^b ± 6.55

ตัวเลขในตารางเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

a,b,c,... ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในสดมภ์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

จากตารางที่ 4.10 พบว่าเจลไข่ขาวที่เติมน้ำตาลมีค่าแรงสูงสุดที่ทำให้เจลแตกน้อยกว่าเจลไข่ขาวที่ไม่เติมน้ำตาลอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน ข.10) โดยเมื่อเติมน้ำตาลซูโครสลงในไข่ขาวปริมาณ 10% (w/v) เจลไข่ขาวมีค่าแรงสูงสุดที่ทำให้เจลแตกลดลงจาก 161.32 เป็น 128.20 g_r เมื่อเปรียบเทียบกับเจลไข่ขาวที่ไม่เติมน้ำตาล และเมื่อระดับความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสในไข่ขาวเพิ่มขึ้นจาก 10% เป็น 40% (w/v) เจลไข่ขาวจะมีค่าแรงสูงสุดที่ทำให้เจลแตกลดลงถึง 2 เท่า นอกจากนี้การผสมน้ำตาลลงในไข่ขาวยังมีผลต่อค่างานที่ทำให้เจลแตกในทิศทางเดียวกันกับค่าแรงสูงสุดที่ทำให้เจลแตกเช่นกัน โดยเมื่อผสม

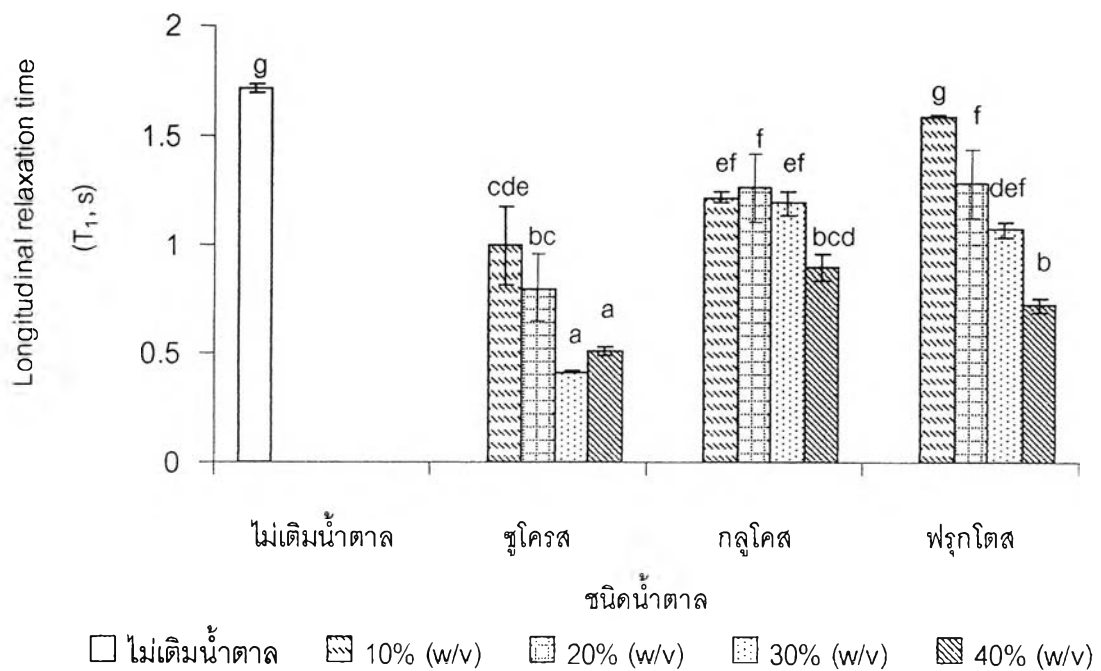
น้ำตาลซูโครสลงในไข่ขาวปริมาณเพิ่มขึ้นจาก 10% เป็น 40% (w/v) เจลไข่ขาวจะมีค่างานที่ทำให้ เจลแตกลดลงถึง 2.8 เท่า ซึ่งผลของการลดลงของค่าแรงสูงสุดที่ทำให้เจลแตกและค่างานที่ทำให้ เจลแตกเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของน้ำตาลจะเกิดขึ้นในเจลไข่ขาวที่ผสมน้ำตาลกลูโคส และฟรุกโตสด้วยเช่นกัน การผสมน้ำตาลลงในไข่ขาวมีผลทำให้เจลไข่ขาวมีค่าแรงสูงสุดที่ทำให้ เจลแตกและค่างานที่ทำให้เจลแตกลดลง เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำตาลสามารถเกิด พันธะไฮโดรเจนกับโปรตีน และขัดขวางการคลายเกลียวของสายพอลิเพปไทด์ภายในโครงสร้าง ของโปรตีน (Antipova and Semenova, 1995) อีกทั้งโมเลกุลน้ำตาลยังไปขัดขวางการเกาะ รวมตัวกันของสายพอลิเพปไทด์เพื่อที่จะสร้างเป็นโครงร่างสามมิติ (Boye et al., 1996) ส่งผลให้ โปรตีนไข่ขาวมีความสามารถในการที่จะสร้างเป็นโครงร่างเจลลดลง ดังนั้นเจลของไข่ขาวที่เติม น้ำตาลจึงมีค่าแรงสูงสุดที่ทำให้เจลแตกและค่างานที่ทำให้เจลแตกลดลง

เมื่อพิจารณาผลของชนิดน้ำตาลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลไข่ขาว พบว่าที่ระดับความเข้มข้นของน้ำตาลเท่ากัน เจลไข่ขาวที่เติมน้ำตาลกลูโคสมีค่าแรงสูงสุดที่ทำให้ เจลแตกและค่างานที่ทำให้เจลแตกน้อยกว่าเจลไข่ขาวที่เติมน้ำตาลซูโครสและฟรุกโตสอย่างมี นัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้ข้อมูลค่าแรงสูงสุดที่ทำให้เจลแตกและค่างานที่ทำให้เจลแตกสัมพันธ์ กับอุณหภูมิในการเกิดเจลของไข่ขาว โดยไข่ขาวที่เติมน้ำตาลกลูโคสมีอุณหภูมิในการเกิดเจลสูง ที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับไข่ขาวที่เติมน้ำตาลซูโครสและฟรุกโตส (ตารางที่ 4.8)

4.5.4 ค่า Longitudinal relaxation time (T_1) ของโปรตอนของโมเลกุลน้ำ

ผลการศึกษาความอิสระของน้ำภายในเจลไข่ขาวพาสเจอร์ไรซ์ซึ่งพิจารณาจากค่า T_1 ของ โปรตอนของโมเลกุลน้ำแสดงดังภาพที่ 4.7 จากภาพจะเห็นได้ว่าเจลไข่ขาวที่ผสมน้ำตาลซูโครส ปริมาณ 10% (w/v) มีค่า T_1 ของโปรตอนของโมเลกุลน้ำน้อยกว่าเจลไข่ขาวที่ไม่ผสมน้ำตาล ประมาณ 1.7 เท่า ($p \leq 0.05$) (ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน ข.11) และเมื่อผสมน้ำตาลซูโครส ลงในไข่ขาวปริมาณเพิ่มขึ้นจาก 10% เป็น 40% (w/v) เจลไข่ขาวมีค่า T_1 ของโปรตอนของโมเลกุล น้ำลดลงถึง 2 เท่า ($p \leq 0.05$) การลดลงของค่า T_1 ของโปรตอนของโมเลกุลน้ำในเจลไข่ขาวเมื่อ เพิ่มระดับความเข้มข้นของน้ำตาลจะเกิดขึ้นในไข่ขาวที่ผสมน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตสด้วยเช่นกัน ทั้งนี้การผสมน้ำตาลลงในไข่ขาวมีผลทำให้เจลไข่ขาวมีค่า T_1 ของโปรตอนของโมเลกุลน้ำลดลง เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำตาลสามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลน้ำได้ด้วยพันธะไฮโดรเจน (Mora-Gutierrez and Baianu, 1989; Padua and Schmidt, 1992) ดังนั้นเมื่อผสมน้ำตาลลงใน ไข่ขาว น้ำภายในเจลไข่ขาวจะแวดล้อมอยู่ด้วยโมเลกุลน้ำตาล ส่งผลให้น้ำภายในเจลไข่ขาวมี ความอิสระลดลง โปรตอนของโมเลกุลน้ำจึงสามารถปลดปล่อยพลังงานไปยังโมเลกุลข้างเคียงได้ อย่างรวดเร็ว ในขณะที่น้ำภายในเจลไข่ขาวที่ไม่ผสมน้ำตาล น้ำเป็นอิสระไม่ได้ถูกจับอยู่กับ โมเลกุลน้ำตาล โปรตอนของโมเลกุลน้ำภายในเจลไข่ขาวที่ไม่ผสมน้ำตาลจึงใช้เวลาในการ

ปลดปล่อยพลังงานนานกว่าโมเลกุลน้ำภายในเจลไข่ขาวที่ผสมน้ำตาล และเมื่อผสมน้ำตาลลงในไข่ขาวปริมาณเพิ่มขึ้น น้ำภายในเจลไข่ขาวถูกจับอยู่กับโมเลกุลน้ำตาลเพิ่มขึ้น ความอิสระของน้ำภายในเจลไข่ขาวจะยิ่งลดลง ซึ่งการที่น้ำในเจลไข่ขาวเกิดอันตรกิริยาอยู่กับโมเลกุลน้ำตาลจะมีผลให้โปรตีนสามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้ลดลง ส่งผลให้โปรตีนเกิดอันตรกิริยากับโปรตีนด้วยตัวเองเพิ่มขึ้น โปรตีนจะมีความคงทนต่อการเสียดสภาพด้วยความร้อนเพิ่มขึ้น (Dickinson and Merino, 2002)



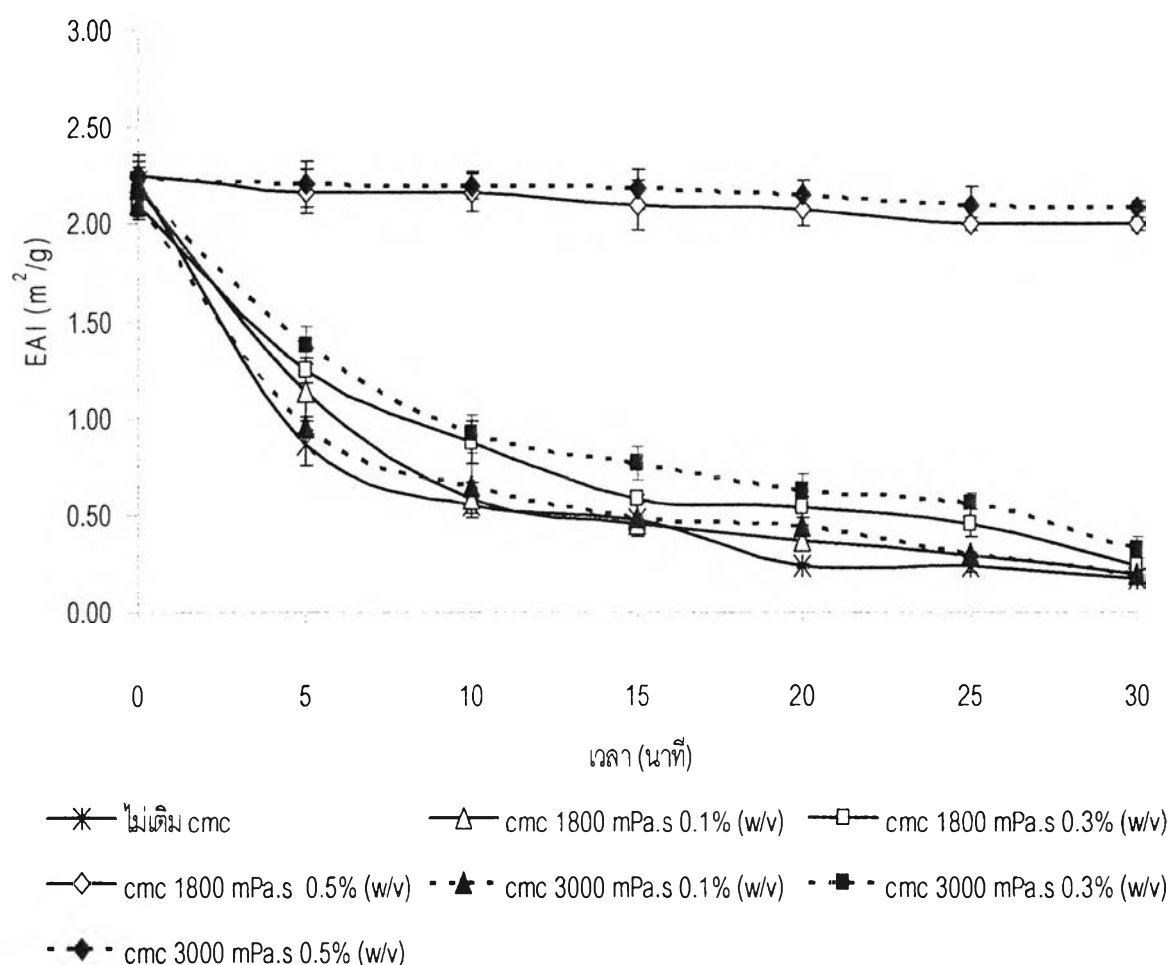
ภาพที่ 4.7 ค่า Longitudinal relaxation time (T_1 , s) ของโปรตอนของโมเลกุลน้ำภายในเจลของไข่ขาวพาสเจอร์ไรซ์ที่ภาวะต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาผลของชนิดน้ำตาลต่อค่า T_1 ของโปรตอนของโมเลกุลน้ำ พบว่าที่ปริมาณน้ำตาล 20% (w/v) ขึ้นไป เจลไข่ขาวที่ผสมน้ำตาลกลูโคสและฟรุคโตสมีค่า T_1 ของโปรตอนของโมเลกุลน้ำมากกว่าเจลไข่ขาวที่ผสมน้ำตาลซูโครสอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) อาจเป็นเพราะซูโครสเป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่กว่าน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ทำให้น้ำตาลซูโครสเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าน้ำตาลกลูโคสและฟรุคโตส ส่งผลให้โมเลกุลน้ำที่จับอยู่กับน้ำตาลซูโครสเคลื่อนที่ช้าด้วยเช่นกัน (Mora-Gutierrez and Baianu, 1989) ดังนั้นโปรตอนของโมเลกุลน้ำในเจลไข่ขาวที่ผสมน้ำตาลซูโครสจึงส่งถ่ายพลังงานไปยังโมเลกุลข้างเคียงได้เร็วกว่าโปรตอนของโมเลกุลน้ำในเจลไข่ขาวที่ผสมน้ำตาลกลูโคสและฟรุคโตส

4.6 ผลของชนิดและปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสต่อสมบัติการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ของไข่ขาวพาสเจอร์ไรซ์ในระบบอิมัลชัน

4.6.1 สมบัติด้านการเป็นอิมัลซิไฟเออร์

ค่า EAI ที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงระยะเวลาการตั้งอิมัลชันทิ้งไว้นาน 30 นาที แสดงดังภาพที่ 4.8 ทั้งนี้ค่า EAI เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณโปรตีนที่ดูดซับบริเวณผิวสัมผัสระหว่างหยดน้ำมันกับน้ำซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความเสถียรของอิมัลชัน โดยอิมัลชันที่มีเสถียรภาพดีจะต้องใช้เวลานานในการรอให้เกิดการแยกชั้น จากการทดลองเมื่อตั้งอิมัลชันไว้นาน 30 นาที อิมัลชันที่มีเสถียรภาพที่ดีกว่าจะมีความคงตัวต่อการแยกชั้นของน้ำมันมากกว่า ค่า EAI จึงมีปริมาณไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่อิมัลชันที่มีเสถียรภาพด้อยกว่าจะเกิดจากการที่โปรตีนที่ดูดซับบริเวณผิวสัมผัสระหว่างหยดน้ำมันกับน้ำมีปริมาณน้อยกว่า



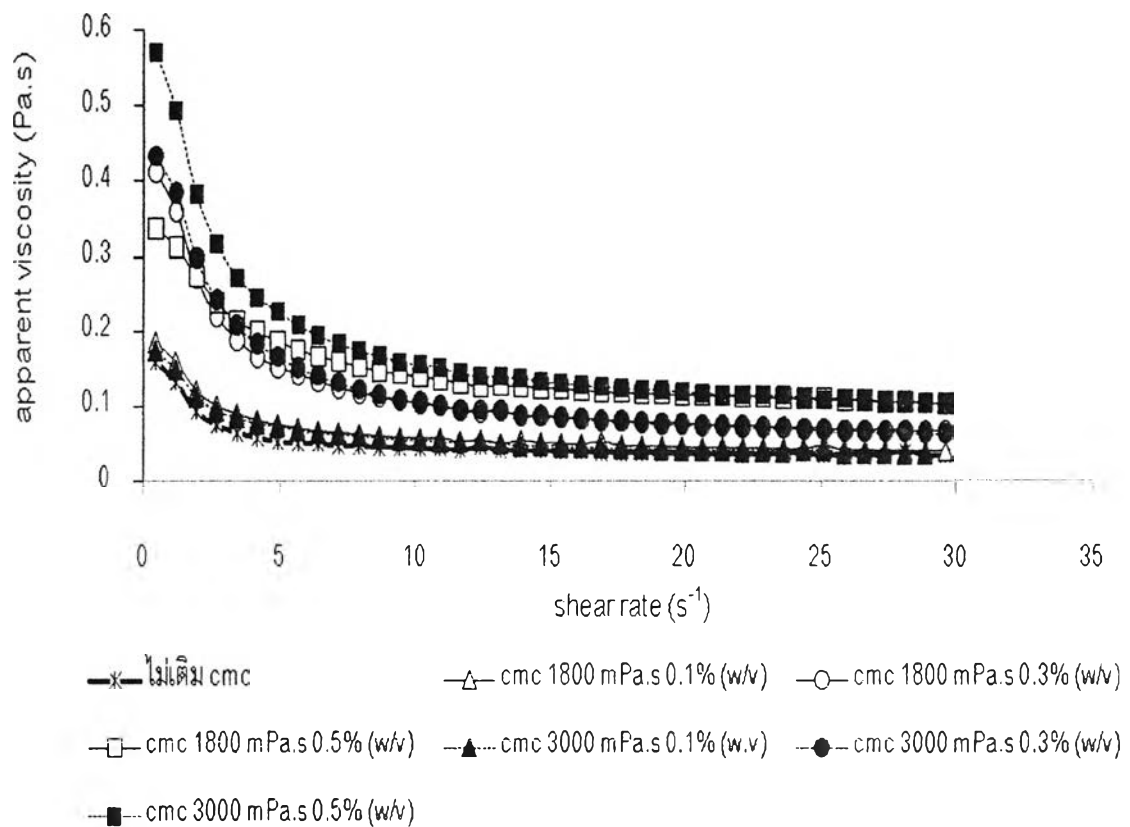
ภาพที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงค่า EAI ของอิมัลชันที่เติม CMC ชนิดที่มีความหนืด 1800 และ 3000 mPa.s ปริมาณ 0.1, 0.3 และ 0.5% (w/v) หลังจากตั้งอิมัลชันทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที

จากภาพที่ 4.8 พบว่าอิมัลชันที่ไม่เติม CMC เริ่มเกิดการแยกชั้นของน้ำมันเมื่อตั้งอิมัลชันไว้นานเพียง 5 นาที และเกิดการแยกชั้นของน้ำมันอย่างต่อเนื่องเมื่อตั้งอิมัลชันไว้ในช่วงเวลา 30 นาที ค่า EAI จึงมีปริมาณลดลง อาจเป็นผลเนื่องมาจากกรณีที่โปรตีนไข่ขาวมีสมบัติในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ต่ำ ซึ่งโปรตีนไข่ขาวเป็นไกลโคโปรตีนที่มีปริมาณหมู่ที่ไม่มีซัลฟิวไรต์จึงมีความสามารถในการดูดซับที่ผิวสัมผัสระหว่างหยดน้ำมันกับน้ำดีน้อยกว่าไลโปโปรตีนซึ่งเป็นโปรตีนที่พบในไข่แดง นอกจากนี้โปรตีนโอวัลบูมินในไข่ขาวมีปริมาณ cystein residues 4 หมู่ (Li-Chan et al., 1995; Mine, 1995) เมื่อโปรตีนไข่ขาวได้รับแรงเฉือนในระหว่างการโฮโมจีไนซ์ โปรตีนโอวัลบูมินจะคลายเกลียวจากการทับซ้อน และเกิดการจัดเรียงตัวที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างหยดน้ำมันกับน้ำดี โดยจะเผยหมู่ที่ไม่มีซัลฟิวไรต์มาด้านนอกหยดน้ำมัน ส่งผลให้หมู่ที่ไม่มีซัลฟิวไรต์ที่อยู่ด้านนอกหยดน้ำมันเกิดแรงดึงดูดกันด้วยแรงยึดเหนี่ยวแบบ hydrophobic interaction และเกิดการสร้างพันธะ disulphide bridge ขึ้นระหว่างหมู่ซัลไฟดริลของกรดอะมิโน cystein ของโปรตีนโอวัลบูมินที่อยู่ล้อมรอบหยดน้ำมัน ทำให้หยดน้ำมันเกิดการเกาะรวมตัวกัน ระบบอิมัลชันไข่ขาวจึงไม่เสถียร (Drakos and Kiosseoglou, 2006)

การเติม CMC ซึ่งเป็นไฮโดรคอลลอยด์ลงในอิมัลชันช่วยให้อิมัลชันไข่ขาวมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้นได้ จากภาพที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าอิมัลชันที่เติม CMC ปริมาณ 0.1 และ 0.3% (w/v) เกิดการแยกชั้นของน้ำมันเมื่อตั้งอิมัลชันทิ้งไว้นานเพียง 5 นาที และเกิดการแยกชั้นของน้ำมันอย่างต่อเนื่องเมื่อตั้งอิมัลชันไว้ในช่วงเวลา 30 นาที ส่งผลให้อิมัลชันมีค่า EAI ลดลงเช่นเดียวกับอิมัลชันที่ไม่เติม CMC อย่างไรก็ตามเมื่อเติม CMC ลงในอิมัลชันปริมาณเพิ่มขึ้นเป็น 0.5% (w/v) ปริมาณ CMC ที่เติมลงในอิมัลชันมีมากพอที่จะรักษาเสถียรภาพของระบบอิมัลชันไม่ให้เกิดการแยกชั้นของน้ำมันเมื่อตั้งอิมัลชันไว้นาน 30 นาที ค่า EAI จึงมีปริมาณไม่เปลี่ยนแปลง โดยชนิดของ CMC ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า EAI ของอิมัลชันที่ภาวะดังกล่าวอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) (ข้อมูลในตารางที่ ค.2 และตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน ข.12) ทั้งนี้ CMC ทำหน้าที่เปรียบเสมือนเป็นสารเพิ่มความคงตัว (stabilizer) ให้กับอิมัลชันไข่ขาว โดยหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุล CMC จะสามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้ด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้ CMC สามารถ hydrate น้ำได้ (Coffey et al., 1995; Nussinorith, 1997) ส่งผลให้ระบบอิมัลชันมีความหนืดเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการช่วยลดการเคลื่อนที่และการชนกันของหยดน้ำมัน ทำให้อิมัลชันไข่ขาวมีเสถียรภาพสูงขึ้น จึงอาจกล่าวได้ว่าการเติม CMC ปริมาณ 0.5% (w/v) ลงในอิมัลชันไข่ขาวจะช่วยปรับปรุงสมบัติการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ของไข่ขาวในระบบอิมัลชันได้ โดยช่วยให้อิมัลชันไข่ขาวมีเสถียรภาพต่อการแยกชั้นของน้ำมันเมื่อตั้งอิมัลชันไข่ขาวทิ้งไว้นาน 30 นาที

4.6.2 ค่าความหนืดของอิมัลชัน

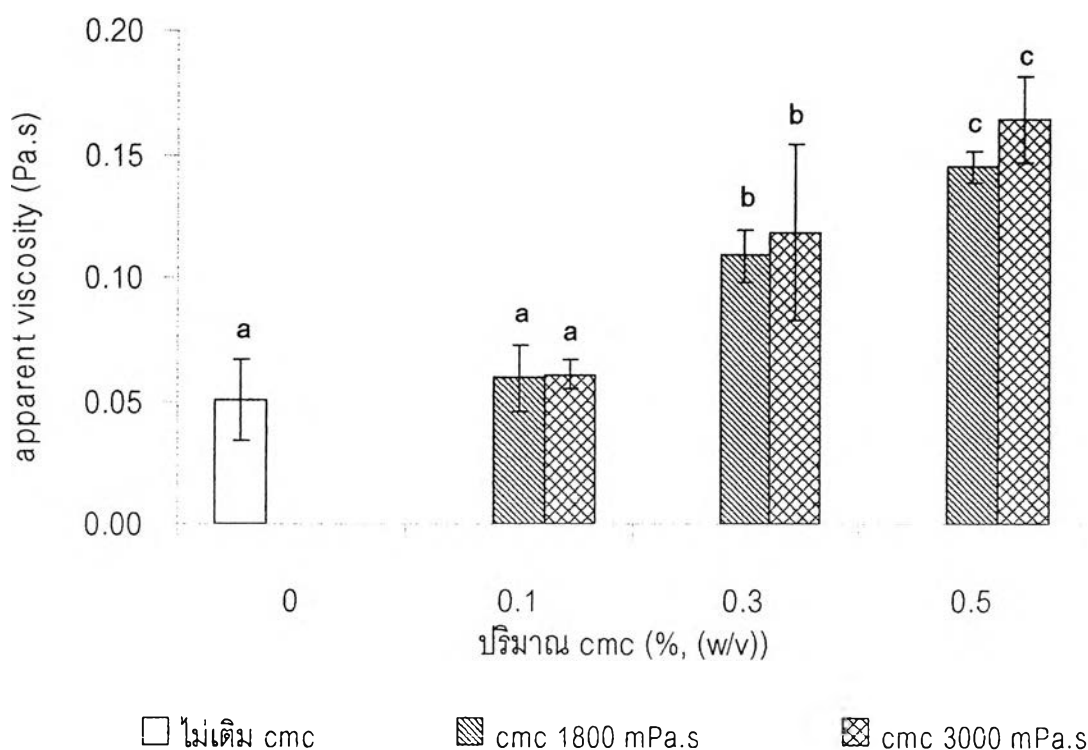
ผลการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของอิมัลชันไข่ขาวแสดงดังภาพที่ 4.9 จากภาพพบว่าค่าความหนืดของอิมัลชันจะแปรตามอัตราเฉือน ซึ่งเป็นลักษณะการไหลแบบ shear thinning เพราะเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น อิมัลชันที่ไม่เติม CMC และเติม CMC ปริมาณ 0.1, 0.3 และ 0.5% (w/v) มีค่าความหนืดปรากฏลดลง



ภาพที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของอิมัลชันที่ไม่เติม CMC และเติม CMC ชนิดที่มีความหนืด 1800 และ 3000 mPa.s ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาค่าความหนืดของอิมัลชันที่อัตราเฉือน 10 s^{-1} ซึ่งเป็นอัตราเฉือนที่อิมัลชันเริ่มมีค่าความหนืดคงที่ (ภาพที่ 4.10) พบว่าอิมัลชันที่เติม CMC ปริมาณ 0.3% (w/v) ขึ้นไปมีความหนืดมากกว่าอิมัลชันที่ไม่เติม CMC อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน ข.13) โดยอิมัลชันที่เติม CMC ปริมาณ 0.5% (w/v) มีค่าความหนืดสูงสุด รองลงมา คือ อิมัลชันที่เติม CMC ปริมาณ 0.3% (w/v) และอิมัลชันที่เติม CMC ปริมาณ 0.1% (w/v) มีค่าความหนืดต่ำที่สุด ($p \leq 0.05$) เมื่ออิมัลชันมีความหนืดสูงขึ้นจะมีผลให้ภูมิภาคต่อเนื่องของอิมัลชันมีความหนืดสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ทำให้หยดน้ำมันเคลื่อนที่ได้ช้าลง จึงช่วยลดการเกาะรวมตัวกันของหยดน้ำมัน ช่วยให้ระบบอิมัลชันมีความคงตัว (Herma et al., 2001; Drakos and Kiosseoglou,

2006) ดังนั้นอิมัลชันที่เติม CMC ที่ระดับความเข้มข้น 0.5% (w/v) ซึ่งเป็นอิมัลชันที่มีค่าความหนืดสูงที่สุดจึงมีความคงตัวต่อการแยกชั้นของน้ำมันเมื่อตั้งอิมัลชันทิ้งไว้นาน 30 นาที ในขณะที่อิมัลชันที่ไม่เติม CMC และผสม CMC ที่ระดับความเข้มข้น 0.1 และ 0.3 % (w/v) ไม่คงตัวต่อการแยกชั้นของน้ำมันเมื่อตั้งอิมัลชันทิ้งไว้นาน 30 นาที (ภาพที่ 4.8) ซึ่งจะใช้ลักษณะการกระจายตัวของหยदन้ำมันเพื่อสนับสนุนผลการทดลองดังกล่าว



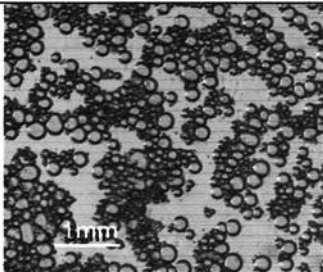
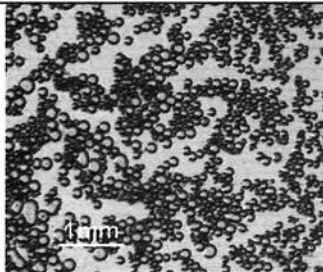
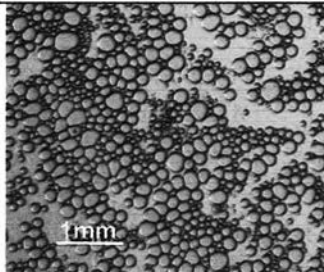
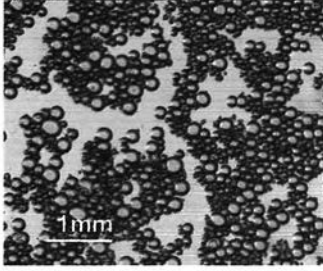
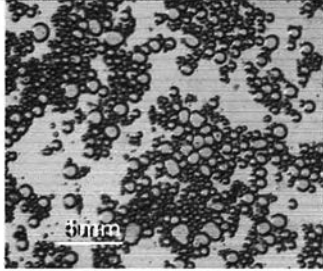
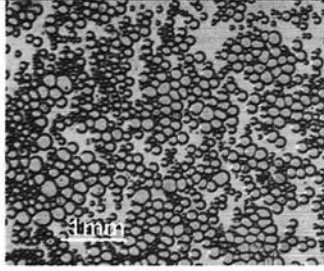
ภาพที่ 4.10 ค่าความหนืดของอิมัลชันที่ไม่เติม CMC และเติม CMC ที่ภาวะต่าง ๆ ที่อัตราเฉือน 10 s^{-1} ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

4.6.3 ลักษณะการกระจายตัวของหยदन้ำมันภายในอิมัลชัน

ภาพถ่ายหยदन้ำมันภายในอิมัลชันที่ไม่เติม CMC และเติม CMC ชนิดที่มีความหนืด 1800 และ 3000 mPa.s แสดงดังภาพที่ 4.11 เมื่อพิจารณาลักษณะการกระจายตัวของหยदन้ำมันภายในอิมัลชัน จะเห็นได้ว่าอิมัลชันที่ไม่เติม CMC และเติม CMC ที่ระดับความเข้มข้น 0.1 และ 0.3% (w/v) มีขนาดหยदन้ำมันไม่สม่ำเสมอ และเกิดการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอในภูมิภาคต่อเนื่องของอิมัลชัน ในขณะที่อิมัลชันที่ผสม CMC ที่ระดับความเข้มข้น 0.5% (w/v) มีขนาดหยदनน้ำมันค่อนข้างสม่ำเสมอ และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในภูมิภาคต่อเนื่อง ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับค่าความหนืดของอิมัลชัน (ภาพที่ 4.10) ที่พบว่าอิมัลชันที่ผสม CMC ปริมาณ 0.5% (w/v) มีค่าความหนืดสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอิมัลชันที่ภาวะอื่น ทั้งนี้การที่อิมัลชันมีความหนืดสูงขึ้นจะช่วยชะลอการเคลื่อนที่ของหยदन้ำมันภายในอิมัลชันที่จะมารวมตัว

กัน หยดน้ำมันภายในอิมัลชันที่เติม CMC ปริมาณ 0.5% (w/v) จึงสามารถกระจายตัวได้อย่าง
อย่างทั่วถึงในวัฏภาคต่อเนื่อง ส่งผลให้อิมัลชันมีเสถียรภาพดีขึ้น (ภาพที่ 4.8)

ภาพที่ 4.11 อิมัลชันที่ไม่เติม CMC และเติม CMC ชนิดที่มีความหนืด 1800 และ 3000 mPa.s
ปริมาณ 0.1, 0.3 และ 0.5% (w/v)

ชนิด CMC	ภาพถ่ายอิมัลชัน		
	CMC 0.1% (w/v)	CMC 0.3% (w/v)	CMC 0.5% (w/v)
1800 mPa.s			
3000 mPa.s			
ไม่เติม CMC		