

ผลของไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลสต่อสมบัติของแบทเทอร์แป้งข้าว



นางสาววรรดา อ่ำบุญ

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF HYDROXYPROPYLMETHYLCELLULOSE ON PROPERTIES OF  
RICE FLOUR-BASED BATTER



Miss Worada Amboon

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Food Technology  
Department of Food Technology  
Faculty of Science  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University


หัวข้อวิทยานิพนธ์      ผลของไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลสต่อสมบัติของแบทเทอร์แป็งข้าว  
โดย                              นางสาววรรดา อ่ำบุญ  
สาขาวิชา                      เทคโนโลยีทางอาหาร  
อาจารย์ที่ปรึกษา              รองศาสตราจารย์ ดร.วรรณา ตูลยธัญ  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม        ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรวัฒน์ ทัดติยกุล

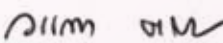
---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


  
..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รมณี สงวนดีกุล)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วรรณา ตูลยธัญ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรวัฒน์ ทัดติยกุล)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.ชนิษฐา ธนานวงค์)

บรรณานุกรม : ผลของไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลสต่อสมบัติของแป้งทอดข้าว.  
(EFFECTS OF HYDROXYPROPYLMETHYLCELLULOSE ON PROPERTIES OF RICE  
FLOUR-BASED BATTER) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.วรรณ ฤกษ์บุญ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.ดร.  
จิราวัฒน์ ทัดติยกุล จำนวนหน้า 97 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลการเติม HPMC ต่อลักษณะการไหลของแป้งทอดข้าว (rice flour-based batter; RFBB) ที่มีเกลือก 2.50 % และน้ำตาล 2.00 % และการดูดซับน้ำมันของแครอทชุบแป้งทอดสูตรรวมหลังทอดแบบน้ำมันท่วม โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ศึกษาผลของเกลือกและน้ำตาลต่อลักษณะการไหลของสารละลาย HPMC (1 % w/w) และ RFBB ส่วนที่ 2 ศึกษาผลของ HPMC ต่อลักษณะการไหลของแป้งทอดข้าวสูตรรวมและสมบัติเคมีกายภาพของก้อนแป้งทอดข้าวหลังทอด และส่วนที่ 3 ศึกษาการดูดซับน้ำมันของแครอทชุบแป้งทอดสูตรรวม ผลการวิจัยพบว่า เกลือกทำให้ค่า consistency index (K) ของ HPMC ทั้ง 2 ชนิดที่มีระดับการแทนที่ต่างกัน คือ E4M (D.S. 1.9) และ K4M (D.S. 1.4) ลดลง แต่น้ำตาลทำให้ค่า K เพิ่มขึ้น และทั้งเกลือกและน้ำตาลทำให้ค่า flow behavior index (n) ของ HPMC ทั้ง 2 ชนิดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ HPMC ที่เติมน้ำตาลอย่างเดียว สารละลาย HPMC มีลักษณะเป็น solid-like ที่มีค่า storage modulus (G') สูงกว่าค่า loss modulus (G'') ที่ความถี่ต่ำกว่า 1 Hz การเติมน้ำตาลทำให้ค่า G' ตัดกับค่า G'' ที่ความถี่สูงขึ้น (0.75-1.00 Hz) และการเติมทั้งเกลือกและน้ำตาลมีผลให้จุดตัดของค่า G' และค่า G'' อยู่ระหว่าง 0.50-0.75 Hz RFBB มีค่า yield stress สูงกว่าแป้งทอดควบคุม และพบว่าเกลือกหรือน้ำตาลมีผลต่อค่า K และค่า n โดยการเติมทั้งเกลือกและน้ำตาลทำให้ RFBB มีจุดตัดของค่า G' และค่า G'' ที่ 1.00 Hz และมีลักษณะเป็น solid-like น้อยกว่าแป้งทอดที่เติมน้ำตาลเพียงอย่างเดียวซึ่งมีการตัดกันของค่า G' และ G'' ที่ 6.00 Hz ผลการเติม HPMC ในแป้งทอดข้าวสูตรรวมทำให้ค่า yield stress, K และ hysteresis loop เพิ่มขึ้น แต่มีค่า n ลดลง และพบว่า การเติม HPMC ทำให้ค่า G', G'' สูงกว่า RFBB ก้อนแป้งทอด (3.75 x 2.00 เซนติเมตร) หลังทอด (170±5 องศาเซลเซียส เวลา 10±1 นาที) มีร้อยละความชื้นที่แปรผันตรงกับค่าความเข้มข้นของ HPMC และมีร้อยละน้ำมันดูดซับที่แปรผกผันกับความเข้มข้นของ HPMC เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นเท่ากันพบว่า ก้อนแป้งทอดหลังทอดที่เติม E4M (0.25-0.50 % w/w) จะมีร้อยละน้ำมันดูดซับต่ำกว่าก้อนแป้งทอดหลังทอดที่เติม K4M โดยก้อนแป้งทอดที่เติม E4M 0.50 % w/w มีร้อยละน้ำมันดูดซับลดลง 44.64 เมื่อเทียบกับ RFBB แครอทชุบแป้งทอดที่เติม E4M 0.50 % w/w มีร้อยละการเกาะติดมากที่สุด มีร้อยละความชื้นสูงที่สุดแต่มีร้อยละน้ำมันดูดซับต่ำที่สุด ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่า ผู้บริโภคให้การยอมรับแครอทชุบแป้งทอดที่เติม E4M 0.25-0.50 % w/w

ภาควิชา.....เทคโนโลยีทางอาหาร.....  
สาขาวิชา.....เทคโนโลยีทางอาหาร.....  
ปีการศึกษา.....2550.....

ลายมือชื่อนิสิต.....อรดา อ้ายสุข.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

##4872448223 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY

KEY WORD : CARROT STICK/DEEP FAT FRYING/OIL ABSORPTION/ RHEOLOGY

WORADA AMBOON : EFFECTS OF HYDROXYPROPYLMETHYLCELLULOSE ON  
PROPERTIES OF RICE FLOUR-BASED BATTER. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. VANN/  
TULYATHAN, Ph.D., THESIS COADVISOR : ASST. PROF. JIRARAT TATTIYAKUL, Ph.D., 97  
pp.

The objectives of this research were to investigate the effects of HPMC on rheological properties of rice flour-based batters (RFBB) containing salt (2.4 % of dry solid) and sugar (1.9 % of dry solid) and oil absorption of rice batter coating on deep-fat frying carrot sticks. The research divided into three parts: (1) studying the effects of salt and sugar on rheology of HPMC 1 % w/w and RFBB, (2) studying the rheological properties of the RFBB containing HPMC and chemical and physical properties of the fried batters, and (3) oil absorption of batter coated deep-fat fried carrot sticks. The results showed that salt caused a decrease in consistency index (K) of solution of E4M (D.S. 1.9) and K4M (D.S. 1.4) while sugar caused an increase in K. Addition of salt and sugar increased flow behavior index (n) of both type of HPMC as compared to HPMC containing only sugar. All HPMC showed solid-like characteristic with storage modulus ( $G'$ ) higher than loss modulus ( $G''$ ) at less than 1 Hz. Salt and sugar lower the crossover point of  $G'$  and  $G''$  to 0.50-0.75 Hz as compared to 0.75-1.00 Hz for sugar. RFBB showed higher yield stress than the control. Salt or sugar significantly affected K and n. Addition of both salt and sugar decreased the crossover point of  $G'$  and  $G''$  to 1 Hz while showed less solid-like characteristic than the batter contained only sugar (crossover point at 6 Hz). In the composite batters, HPMC caused an increase in yield stress, K and hysteresis loop but decrease in flow behavior index. HPMC increased both  $G'$  and  $G''$  of the RFBB. The moisture content of fried RFBB-HPMC batters (3.75 x 2.00 cm.) was positively correlated with the concentration of HPMC added, while oil absorbed was negatively correlated. Fried batter containing E4M showed lower oil absorbed than the fried batters containing K4M at the same concentration. Addition of 0.50 % E4M (based on 100 g of rice flour) decreased oil absorbed in fried batter by 44.64 % as compared to the control. Fried carrot stick coated with RFBB containing E4M 0.50 % w/w showed highest batter coating pick up and moisture content but lowest in oil absorbed. Sensor analysis showed that the fried carrot sticks coated with RFBB containing E4M 0.25-0.50 % w/w were highly accepted.

Department.....Food Technology.....

Field of study.....Food Technology.....

Academic year.....2007.....

Student's signature...*Horada Amboon*.....

Advisor's signature...*V. Tulyathan*.....

Co-advisor's signature...*J. Tattiyakul*.....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. วรรรณา ตูลยธัญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิรารัตน์ ทัดติยกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม เป็นอย่างสูงที่เสนอแนวคิดริเริ่มของงานวิจัยนี้ ให้ความรู้และคำแนะนำ รวมทั้งคอยให้ความช่วยเหลือทั้งด้านวิชาการและอื่นๆ ที่มีประโยชน์อย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ คุณอานันท์ ผลวัฒน์ นักวิชาการเกษตร 8ว. สถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร สำหรับการอนุเคราะห์ตัวอย่างข้าวที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณบริษัท Rama Production จำกัด และบริษัท Vicchi Enterprise จำกัด สำหรับการอนุเคราะห์ตัวอย่างไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลสทั้งชนิด E4M และ K4M ที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารและเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ระดับปริญญาโท ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รวมทั้งผู้ที่มีส่วนช่วยเหลือที่มีได้กล่าวนาม สำหรับกำลังใจและน้ำใจที่ให้

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และขอบคุณน้องชายและญาติพี่น้องทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจ ให้การสนับสนุน ให้คำปรึกษา และให้ความช่วยในทุกๆ ด้านแก่ข้าพเจ้าเป็นอย่างดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

## หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ซ
สารบัญภาพ.....	ฎ
สัญลักษณ์เฉพาะทางสมบัติการไหล.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์.....	3
บทที่ 3 วัตถุประสงค์และวิธีการทดลอง.....	19
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	26
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	72
รายการอ้างอิง.....	73
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.....	80
ภาคผนวก ข.....	89
ภาคผนวก ค.....	90
ภาคผนวก ง.....	93
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	97

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	องค์ประกอบทางเคมีของแป้งชนิดต่างๆ.....	3
3.1	รายละเอียดของ HPMC.....	20
3.2	ส่วนผสมของแบทเทอร์.....	22
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวเจ้า.....	26
4.2	ดรรรชนีการดูดซับน้ำของแป้งข้าวเจ้า.....	27
4.3	ร้อยละความชื้นและน้ำมันดูดซับในก้อนแบทเทอร์หลังทอด.....	28
4.4	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของสมบัติทางการไหลของสารละลาย HPMC เข้มข้น 1 % w/w.....	30
4.5	ค่า flow behavior index (n) ของสารละลาย HPMC เข้มข้น 1 % w/w.....	31
4.6	สมบัติการไหลของแบทเทอร์ที่ไม่ผสม HPMC ที่ shear rate 1-100 (1/s) อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	37
4.7	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของสมบัติการไหลของแบทเทอร์ ที่ไม่ผสม HPMC.....	38
4.8	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติสมบัติการไหลของแบทเทอร์ที่ผสม HPMC.....	48
4.9	ค่า yield stress ของแบทเทอร์เมื่อความเข้มข้นของ HPMC เพิ่มขึ้น.....	48
4.10	ค่า consistency index (K) ของแบทเทอร์เมื่อความเข้มข้นของ HPMC เพิ่มขึ้น.....	49
4.11	ค่า flow behavior index (n) ของแบทเทอร์เมื่อความเข้มข้นของ HPMC เพิ่มขึ้น.....	51
4.12	ค่า hysteresis loop ของแบทเทอร์เมื่อความเข้มข้นของ HPMC เพิ่มขึ้น.....	52
4.13	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของดรรรชนีการดูดซับน้ำของแป้งข้าว ที่ผสม HPMC.....	57
4.14	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของร้อยละความชื้นและน้ำมันดูดซับ ในก้อนแบทเทอร์ที่ผสม HPMC หลังทอด.....	58



4.15	ร้อยละความชื้นในก้อนแบทเทอร์หลังทอดเมื่อความเข้มข้นของ HPMC เพิ่มขึ้น.....	59
4.16	ร้อยละน้ำมันดูดซับในก้อนแบทเทอร์หลังทอดเมื่อความเข้มข้นของ HPMC เพิ่มขึ้น.....	60
4.17	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของลักษณะเนื้อสัมผัสของก้อนแบทเทอร์ที่ผสม HPMC หลังทอด.....	61
4.18	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของร้อยละการเกาะติดของแบทเทอร์.....	62
4.19	ร้อยละการเกาะติดของแบทเทอร์เมื่อความเข้มข้นของ HPMC เพิ่มขึ้น.....	63
4.20	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของร้อยละความชื้นและน้ำมันดูดซับในเปลือกแข็งหลังทอด.....	64
4.21	ร้อยละความชื้นในเปลือกแข็งหลังทอดเมื่อความเข้มข้นของ HPMC เพิ่มขึ้น.....	65
4.22	ร้อยละน้ำมันดูดซับในเปลือกแข็งหลังทอดเมื่อความเข้มข้นของ HPMC เพิ่มขึ้น.....	66
4.23	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของร้อยละความชื้นและน้ำมันดูดซับในชิ้นแครอทหลังทอด.....	67
4.24	ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของแครอทชุบแข็งทอด.....	69
ค.1	ร้อยละความชื้นและน้ำมันดูดซับในก้อนแบทเทอร์ทางการค้าหลังทอด.....	91
ค.2	ส่วนประกอบของแบทเทอร์แต่ละสูตร.....	92
ง.1	สมบัติการไหลของสารละลาย HPMC เข้มข้น 1% w/w ที่ shear rate 1-100 (1/s) อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	93
ง.2	สมบัติการไหลของแบทเทอร์ที่ผสม HPMC ที่ shear rate 1-100 (1/s) อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	93
ง.3	ดรชนึการดูดซับน้ำของแข็งขาวที่ผสม HPMC.....	94
ง.4	ร้อยละความชื้นและน้ำมันดูดซับในก้อนแบทเทอร์ที่ผสม HPMC หลังทอด.....	94
ง.5	ความแข็งของก้อนแบทเทอร์ที่ผสม HPMC หลังทอด.....	95
ง.6	ร้อยละการเกาะติดของแบทเทอร์ที่ผสม HPMC.....	95
ง.7	ร้อยละความชื้นและน้ำมันดูดซับในเปลือกแข็งหลังทอด.....	96

ง.8 ร้อยละความชื้นและน้ำมันดูดซับในชั้นแคโรทหลังทอด..... 96



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	กระบวนการทอดแบบต่างๆ.....	6
2.2	ภาพตัดขวางของอาหารที่ทอดแบบน้ำมันท่วม.....	6
2.3	รูปแบบการทอดของอาหารชุบแป้งทอด.....	7
2.4	น้ำมันที่ถูกดูดซับในโครงสร้างของอาหารหลังจากกระบวนการทอด.....	8
2.5	ภาพตัดขวางของมันฝรั่งทอดที่ถ่ายด้วย CLSM.....	9
2.6	โครงสร้างโมเลกุลของไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลส.....	11
2.7	สมบัติ thermal gelation ของ HPMC.....	11
2.8	ลักษณะการไหลของของไหลประเภท time-independent ของ Non-Newtonian fluid.....	14
2.9	ลักษณะการไหลของของไหลประเภท time-dependent ของ Non-Newtonian fluid.....	15
2.10	การตอบสนองต่อ strain ของของไหลที่แสดงให้เห็นช่วงที่เป็น LVR.....	16
2.11	moduli spectrum ของสารละลายพอลิเมอร์เมื่อทดสอบลักษณะการไหล แบบ dynamic test.....	17
3.1	แผนผังการเตรียมแป้งข้าวอย่างคร่าวๆ.....	22
4.1	กราฟ Amplitude sweep test ของ HPMC (A) E4M และ (B) K4M เข้มข้น 1% w/w สูตรควบคุม เติมเกลือเพียงอย่างเดียว เติมน้ำตาลเพียง อย่างเดียว และเติมทั้งเกลือและน้ำตาล.....	32
4.2	กราฟ Frequency sweep test แสดงค่า $G'$ (◆) ค่า $G''$ (◇) และค่า $G^*$ (▲) ของ E4M (1 % w/w).....	34
4.3	กราฟ Frequency sweep test แสดงค่า $G'$ (◆) ค่า $G''$ (◇) และค่า $G^*$ (▲) ของ K4M (1 % w/w).....	35
4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลง shear rate กับความหนืด ของแบบเทอร์ที่ไม่ผสม HPMC.....	37

4.5	Amplitude sweep test ของแบทเทอร์ที่ไม่เติม HPMC สูตรควบคุม เติมเกลือเพียงอย่างเดียว เติมน้ำตาลเพียงอย่างเดียว และเติมทั้งเกลือและน้ำตาล.....	39
4.6	กราฟ Frequency sweep test แสดงค่า $G'$ (◆) ค่า $G''$ (◇) และค่า $G^*$ (▲) ของแบทเทอร์ที่ไม่ผสม HPMC.....	41
4.7	กราฟ Frequency sweep test แสดงค่า $G'$ (◆) ค่า $G''$ (◇) และค่า $G^*$ (▲) ของแบทเทอร์ที่เติม E4M 0.25 %.....	42
4.8	กราฟ Frequency sweep test แสดงค่า $G'$ (◆) ค่า $G''$ (◇) และค่า $G^*$ (▲) ของแบทเทอร์ที่เติม E4M 0.50 %.....	43
4.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลง shear rate กับความหนืดของแบทเทอร์.....	45
4.10	กราฟ time dependent ของแบทเทอร์.....	46
4.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า yield stress ของแบทเทอร์กับความเข้มข้นของ HPMC ที่เพิ่มขึ้น.....	48
4.12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า consistency index (K) ของแบทเทอร์กับความเข้มข้นของ HPMC ที่เพิ่มขึ้น.....	49
4.13	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า flow behavior index (n) ของแบทเทอร์กับความเข้มข้นของ HPMC ที่เพิ่มขึ้น.....	51
4.14	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า hysteresis loop ของแบทเทอร์กับความเข้มข้นของ HPMC ที่เพิ่มขึ้น.....	52
4.15	กราฟ amplitude sweep test ของแบทเทอร์ที่ผสม HPMC.....	53
4.16	กราฟ Frequency sweep test แสดงค่า $G'$ (◆) และค่า $G''$ (◇) ของแบทเทอร์ที่ผสม HPMC.....	55
4.17	กราฟ Frequency sweep test แสดงค่า $G^*$ (▲) ของแบทเทอร์ที่ผสม HPMC.....	56
4.18	ตรวจเช็คการดูดซับน้ำของแป้งข้าวที่ผสม HPMC.....	57
4.19	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความชื้นในก้อนแบทเทอร์หลังทอดกับความเข้มข้น ของ HPMC ที่เพิ่มขึ้น.....	59
4.20	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละน้ำมันดูดซับในก้อนแบทเทอร์หลังทอดกับความเข้มข้นของ HPMC ที่เพิ่มขึ้น.....	60

4.21	ความแข็ง (hardness) ของก้อนแบทเทอร์ที่ผสม HPMC หลังทอด.....	61
4.22	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกาะติดของแบทเทอร์กับความเข้มข้น ของ HPMC ที่เพิ่มขึ้น.....	63
4.23	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความชื้นในเปลือกแข็งหลังทอดกับความ เข้มข้นของ HPMC ที่เพิ่มขึ้น.....	65
4.24	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละน้ำมันดูดซับในเปลือกแข็งหลังทอดกับ ความเข้มข้นของ HPMC ที่เพิ่มขึ้น.....	66
4.25	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความชื้นในเปลือกแข็งทอดกับความกรอบ ของแครอทชุบแป้งทอด.....	70
ก.1	กราฟแอมิโลสมาตรฐาน.....	84
ก.2	กราฟ Frequency sweep test ของแบทเทอร์.....	88

## สัญลักษณ์เฉพาะทางสมบัติการไหล

- $\sigma$  คือ shear stress (Pa)
- $\dot{\gamma}$  คือ shear rate ( $s^{-1}$ )
- $\sigma_0$  คือ yield stress (Pa)
- $K$  คือ consistency index ( $Pa \cdot s^n$ )
- $n$  คือ flow behavior index
- $G'$  คือ storage modulus (Pa)
- $G''$  คือ loss modulus (Pa)
- $G^*$  คือ complex modulus (Pa)



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 1

### บทนำ

ประเทศไทยมีปริมาณการผลิตข้าวที่สูง โดยสามารถผลิตข้าวเปลือกได้ปีละประมาณ 21 ล้านตัน (มลศิริ วิโรทัย และปาริฉัตร หงสประภาส, 2542) นอกจากการนำข้าวไปบริโภคโดยตรงแล้ว ข้าวยังสามารถนำไปทำเป็นแป้งข้าวแล้วแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ก๋วยเตี๋ยว เส้นหมี่ ก๋วยจั๊บ และแผ่นแป้ง เป็นต้น (นิตยา กอบกัยกิจ, 2532) หรือใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ประเภท extrude แพนเค้ก วอฟเฟิล และอาหารเด็ก นอกจากนี้ยังมีการนำแป้งข้าวไปใช้ทดแทนแป้งสาลี บางส่วนในการผลิตผลิตภัณฑ์ขนมอบ เช่น ขนมปัง คุกกี้ เค้ก เป็นต้นรวมถึงการนำไปทำเป็นส่วนผสมของเบทเทอร์ (batter) สำหรับอาหารทอด เพื่อช่วยเพิ่มมูลค่าให้ข้าวและช่วยเพิ่มขอบเขตการใช้แป้งข้าวให้กว้างขวางยิ่งขึ้น

จากการศึกษาทางการแพทย์ในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยการทดสอบอาการแพ้โปรตีนของผู้ป่วยจำนวน 700 คน พบว่ามีผู้ป่วยน้อยกว่าร้อยละ 1 ที่มีอาการแพ้โปรตีนจากข้าวเจ้า และมีการรายงานน้อยมากที่พบว่า เด็กมีอาการแพ้โปรตีนจากข้าวเจ้า (Helm และ Burks, 1996) ดังนั้นข้าวจึงเป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกสำหรับการพัฒนาอาหารที่ไม่ทำให้เกิดอาการแพ้ เนื่องจากข้าวมีคุณสมบัติไม่ทำให้เกิดการแพ้ (hypoallergenic) มีโซเดียม โปรตีน ไขมัน และใยอาหารต่ำ แต่มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงและย่อยได้ง่าย การเตรียมเบทเทอร์จากแป้งข้าวจะเป็นการเพิ่มทางเลือกในการบริโภคผลิตภัณฑ์อาหารทอดให้กับผู้ที่เป็น celiac disease (CD) ซึ่งเกิดจากการแพ้กลูเตน (gluten) ในแป้งสาลี มีผลทำให้ลำไส้เล็กมีการดูดซึมสารอาหารช้าลง การบริโภคอาหารที่ไม่มีกลูเตนจะช่วยลดความเสี่ยงของการเกิดโรคแทรกซ้อนที่อาจเป็นอันตรายถึงชีวิตได้ เบทเทอร์แป้งข้าวจะดูดซับน้ำและกักเก็บน้ำได้น้อยกว่าเบทเทอร์แป้งสาลีทำให้มีความเหนียวต่ำ เนื่องจากไม่มีโปรตีนกลูเตน นอกจากนี้ปริมาณแอมิโลสก็มีผลต่อสมบัติของเบทเทอร์แป้งข้าว โดยเบทเทอร์ที่มีปริมาณแอมิโลสสูงจะมีปริมาตรจำเพาะหรือการพองตัวของเบทเทอร์หลังทอดต่ำกว่า แต่มีความกรอบมากกว่าเบทเทอร์ที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ (จามรี จันทรวินเมลิอง และ นารี ไตอุส่าห์, 2526) การเติมไฮโดรคอลลอยด์บางชนิดจะช่วยปรับปรุงความเหนียว ช่วยดูดซับน้ำและกักเก็บน้ำของเบทเทอร์ ส่งผลให้เบทเทอร์มีการเกาะติดดีขึ้น เบทเทอร์หลังทอดมีการพองตัวและมีปริมาตรสูงขึ้น

เบทเทอร์จะช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับอาหารด้วยการปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัส กลิ่นรส น้ำหนัก ปริมาตรและคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสเช่น ความกรอบ ของอาหารชุบทอด ในการปรับปรุงสมบัติของเบทเทอร์แป้งข้าวนิยมใช้ไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ เช่น แชนแทนกัม

(Xanthan gum) กัวร์กัม (Guar gum) เมทิลเซลลูโลส (Methylcellulose ; MC) คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethylcellulose ; CMC) ไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลส (Hydroxypropyl methylcellulose ; HPMC) เป็นต้น เป็นส่วนผสมเพื่อช่วยปรับปรุงความหนืด การดูดซับน้ำ เพิ่มความสามารถในการเกาะติด ทำให้แบทเทอริมีสมบัติดีขึ้น นอกจากนี้ MC และ HPMC ยังมีสมบัติที่สำคัญคือ เกิดเจลได้ในขณะร้อน (thermal gelation) จึงทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวกั้นการซึมผ่านของน้ำมันจากการทอดเข้าสู่ชิ้นอาหาร แบทเทอริหลังทอดจึงมีการดูดซับน้ำมันลดลง (Balasubramaniam และคณะ, 1997) อย่างไรก็ตาม ข้อมูลเกี่ยวกับผลขององค์ประกอบที่ละลายน้ำได้เช่น เกลือและน้ำตาลต่อสมบัติของแบทเทอริแป้งข้าวยังมีน้อย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะศึกษาถึงผลของการเติมเกลือและน้ำตาลต่อสมบัติการไหลของสารละลาย HPMC และแบทเทอริแป้งข้าว และผลของการทอดแบบน้ำมันท่วมต่อการดูดซับน้ำมันของแบทเทอริหลังทอด เพื่อที่จะนำไปสู่การพัฒนาแบทเทอริแป้งข้าวที่มีคุณภาพดีและมีปริมาณน้ำมันดูดซับน้อยหลังทอด



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

#### 2.1 แป้งข้าวเจ้า (rice flour)

แป้งข้าวเจ้า หมายถึง แป้งที่ได้จากข้าวขาว ซึ่งเป็นข้าวเต็มเมล็ด ข้าวต้น ข้าวหักใหญ่ ข้าวหักหรือปลายข้าว ที่ได้จากการสีข้าวเปลือกเจ้าของพืชที่มีทางพฤกษศาสตร์ว่า *Oryza sativa* L. ( กระทรวงอุตสาหกรรม, 2529)

แป้งประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 44.40 ไฮโดรเจนร้อยละ 6.20 และออกซิเจนร้อยละ 49.40 ของน้ำหนักมวลโมเลกุล โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป  $\alpha$ -D-Glucose นอกจากนี้จะเป็นโปรตีน ไขมัน ฟอสฟอรัส และเถ้า ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งชนิดต่างๆ

ชนิดของแป้ง	ความชื้น (ร้อยละ)	เถ้า (ร้อยละ)	โปรตีน (ร้อยละ)	ไขมัน (ร้อยละ)	เส้นใย (ร้อยละ)	คาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ)
ข้าวเจ้า	9.88	0.51	6.64	0.65	0.39	81.93
ข้าวสาลี	-	0.42	14.2	0.90	-	-
ข้าวเหนียว	9.57	0.12	7.33	1.37	0.41	81.02
ข้าวฟ่าง	6.08	2.24	8.45	5.68	2.14	75.41

ที่มา : Whistler และ Smart (1953)

แป้งสาลีและแป้งข้าวเจ้าจะมีปริมาณโปรตีนที่ต่างกัน จึงทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารที่ผลิตจากแป้งทั้ง 2 ชนิดมีลักษณะที่ต่างกันด้วย โดยทั่วไปแล้วโปรตีนจะแบ่งได้เป็น 4 ชนิดตามความสามารถในการละลาย (Osborne, 1907) ดังนี้

- ก. albumins เป็นโปรตีนที่ละลายน้ำ และตกตะกอนด้วยความร้อน
- ข. globulins เป็นโปรตีนที่ไม่ละลายน้ำ และสารละลายเกลือเข้มข้นแต่ละลายในสารละลายเกลือเจือจาง
- ค. prolamins เป็นโปรตีนที่ละลายใน ethyl alcohol 70 %
- ง. glutelins เป็นโปรตีนที่ละลายในสารละลายกรดหรือด่างเจือจาง

แป้งสาลีจะมีโปรตีนเฉพาะที่ต่างจากแป้งธัญพืชชนิดอื่น คือ เมื่อนำแป้งมานวดกับน้ำจะเกิดโปรตีนกลูเตนซึ่งเป็น water compatible และพองตัวในน้ำ โปรตีนกลูเตนเกิดจากการรวมกันของโปรตีน gliadin (prolamin) และ glutenin (glutelin) ระหว่างการนวดแป้งกับน้ำจนได้โด โดยทั่วไปโปรตีนกลูเตนจะมี prolamin ประมาณร้อยละ 50 (Gallagher, Gormley และ Arendt, 2004) โปรตีนกลูเตนมีช่วยช่วยในการพัฒนาความเหนียว มีสมบัติ viscoelastic มีความสามารถในการกักเก็บก๊าซ และทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ขนมปัง อย่างไรก็ตาม มีผู้บริโภคบางกลุ่มที่ไม่สามารถบริโภคผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากแป้งสาลีได้ เนื่องจากแพ้โปรตีนกลูเตนในแป้งสาลี

โปรตีนในแป้งข้าวประกอบไปด้วย glutelins ร้อยละ 80 albumins และ globulins ร้อยละ 15 และมี prolamins ร้อยละ 5 (Helm และ Burks, 1996) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับโปรตีนในแป้งถั่วเหลือง เมื่อนำแป้งข้าวไปนวดกับน้ำจะไม่สามารถเกิดเป็นโดได้ จะมีลักษณะเหลว มีความเหนียวต่ำ จึงต้องมีการเติม thickening agent หรือ gel-forming เข้าไปช่วย (Kohlwey, Kendall, และ Mohindra, 1995) ทั้งนี้เนื่องจากแป้งข้าวไม่มีโปรตีนกลูเตนคอยทำหน้าที่ช่วยในการดูดซับน้ำ และกักเก็บน้ำ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์อาหารที่ผลิตจากแป้งข้าวมีลักษณะไม่เป็นที่พึงพอใจของผู้บริโภค ดังนั้นการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารที่ไม่มีกลูเตนจึงเป็นสิ่งที่ท้าทาย

## 2.2 แปทเทอร์ (batter)

แปทเทอร์หรือแป้งผสมสำหรับอาหารทอด หมายถึง แป้งที่ผสมกับส่วนประกอบอื่นใช้ในการชุบอาหารก่อนนำไปทอด เพื่อให้กรอบ (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2534)

### 2.2.1 ส่วนผสมของแปทเทอร์

ส่วนผสมทั่วไปของแปทเทอร์แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ตามปริมาณและหน้าที่ คือ ส่วนผสมหลักและส่วนผสมรอง

2.2.1.1 ส่วนผสมหลัก ได้แก่ แป้ง ที่นิยมใช้คือ แป้งสาลีเอนกประสงค์ซึ่งมีโปรตีนประมาณร้อยละ 10-11 และแป้งขนมปังซึ่งมีโปรตีนประมาณร้อยละ 12-14 นอกจากนี้แป้งสาลีแล้วยังสามารถใช้แป้งชนิดอื่นๆ ได้อีก เช่น แป้งข้าวโพด (โปรตีนร้อยละ 4-14) แป้งข้าวเจ้า (โปรตีนร้อยละ 4-9) นอกจากนี้อาจใช้แป้งมันสำปะหลังหรือแป้งข้าวเหนียว ปริมาณแป้งทั้งหมดที่ใช้เตรียมแปทเทอร์มีค่าประมาณร้อยละ 80-90 ของส่วนผสมทั้งหมด (Suderman, 1983) น้ำนับเป็นส่วนผสมหลักที่ใช้ในปริมาณที่ใกล้เคียงกับแป้ง น้ำจะมีส่วนช่วยปรับปรุงความชื้นเหนียวและทำให้เกิดเจลลาตินไนเซชันของเม็ดสตาร์ช

(Klup และ Loewe, 1990) ในสูตรของแบทเทอร์จะมีอัตราส่วนของของแข็ง 1 ส่วนต่อน้ำ 1-2 ส่วน (Suderman, 1983)

2.2.1.2 ส่วนผสมรอง ได้แก่ นม หางนมหรือเวย์ (whey) แป้งถั่วเหลือง ไข่ ผงฟู สตาร์ช เกลือ น้ำตาล กัม (gum) และเครื่องเทศ เป็นต้น ซึ่งส่วนผสมเหล่านี้จะทำหน้าที่ให้กลิ่นรส ปรับปรุงสมบัติเชิงหน้าที่ของแบทเทอร์และ/หรือเสริมคุณค่าทางอาหาร

## 2.2.2 การให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์อาหารทอด (Fellow, 1990)

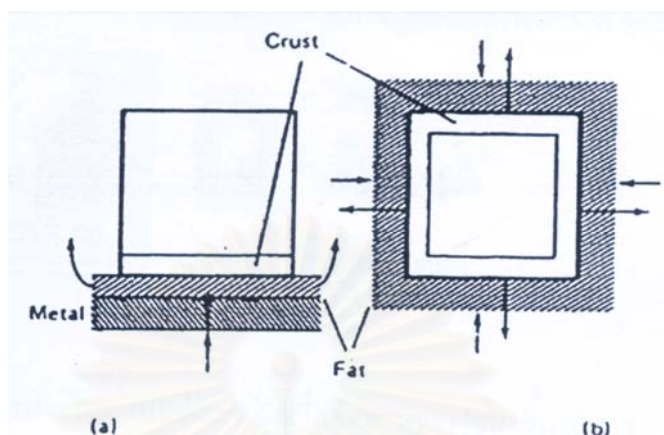
การให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์อาหารทอดแบ่งได้ 2 วิธี ดังนี้

2.2.2.1 การทอดแบบน้ำมันน้อย (shallow หรือ contact frying) วิธีนี้เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง เช่น เบคอน ไข่ ความร้อนจะเคลื่อนที่สู่อาหารด้วยการนำความร้อนจากผิวหน้าของกระทะที่ร้อนผ่านไปยังน้ำมัน (รูปที่ 2.1a) ซึ่งจะมีปริมาณน้อยและไม่ท่วมชิ้นอาหาร อาหารจึงได้รับความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีน้ำตาลที่ไม่สม่ำเสมอ

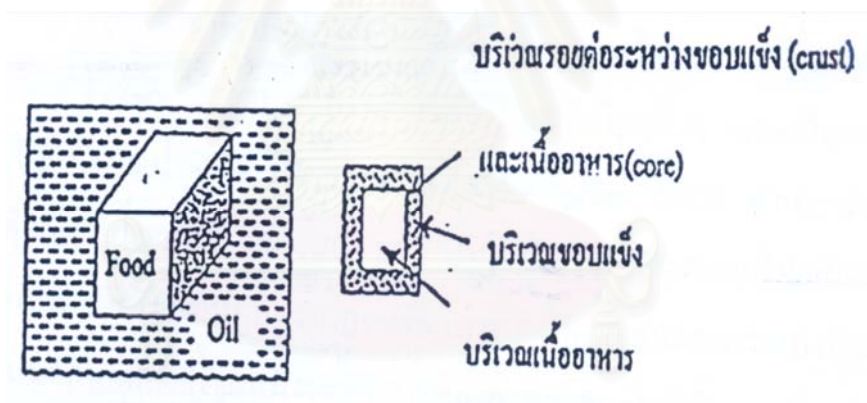
2.2.2.2 การทอดแบบน้ำมันท่วม (deep-fat frying) น้ำมันที่ใช้ทอดจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนให้แก่ชิ้นอาหารโดยที่ทุกๆ ผิวหน้าของอาหารจะได้รับความร้อนที่สม่ำเสมอ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีและลักษณะปรากฏเหมือนกัน (รูปที่ 2.1b) การทอดวิธีนี้เหมาะสำหรับอาหารที่มีรูปร่างต่างๆ รวมถึงอาหารชุบแป้งทอดซึ่งจะใช้อุณหภูมิสูงในการทอดประมาณ 150-220 องศาเซลเซียส (Thorner, 1973) ดังนั้นน้ำมันที่นำมาใช้ทอดต้องมีความเหมาะสมคือ มีจุดเกิดควัน (smoke point) สูง นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงคุณค่าทางโภชนาการด้วย ในงานวิจัยนี้เลือกใช้น้ำมันปาล์มเนื่องจากมีความคงทนต่อการเกิดออกซิเดชันได้ดี มีปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวสูง จุดเกิดควันสูงและเกิดฟองน้อยเวลาทอด (Faur, 1975)

เมื่ออาหารได้รับความร้อนน้ำที่มีอยู่ภายในจะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอระเหยออกมา การสูญเสียไอน้ำระหว่างการทอดจะทำให้เกิดรูพรุน (pore) ทั้งที่ผิวนอกและเนื้อในของอาหาร น้ำมันจึงแทรกซึมเข้าทางรูพรุนได้ และการสูญเสียความชื้นบริเวณผิวหน้าอาหารจะทำให้เกิดกลไกการสร้างเปลือกหรือครัสต์ (crust) อาหารจึงมีความกรอบ ซึ่งพบเห็นได้มากในอาหารที่มี

สตาร์ชในปริมาณสูง และเมื่อเวลาในการทอดนานขึ้นครัสต์จะมีความหนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ (Singh, 1998) ดังแสดงในรูปที่ 2.2

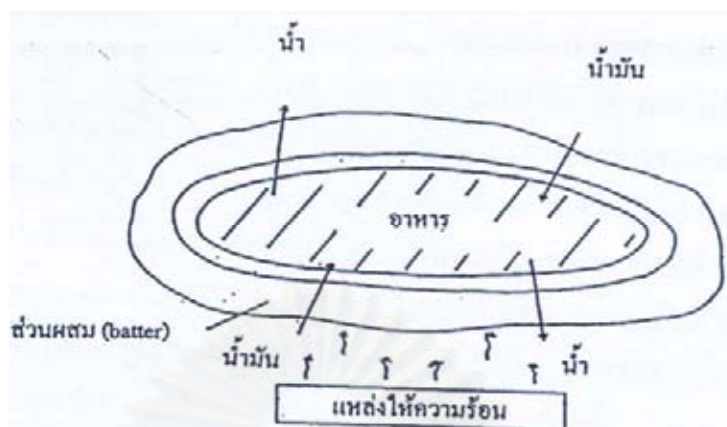


รูปที่ 2.1 กระบวนการทอดแบบต่างๆ (a) shallow frying (b) deep-fat frying  
ที่มา : Fellow (1990)



รูปที่ 2.2 ภาพตัดขวางของอาหารที่ทอดแบบน้ำมันท่วม  
ที่มา : Singh (1998)

สำหรับการทอดอาหารที่มีการชุบแป้งทอดนั้น เมื่ออาหารได้รับความร้อนจะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากน้ำมันสู่อาหารผ่านทางเปลือกแข็งที่หุ้มอยู่ น้ำที่อยู่ภายในเปลือกแข็งและอาหารจะระเหยกลายเป็นไอเคลื่อนที่สู่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์เกิดรูพรุนขึ้น จึงทำให้น้ำมันสามารถแทรกซึมเข้าสู่เปลือกแข็งได้ (Suderman, 1990) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และเปลือกแข็งด้านนอกจะเกิดการพองใสกว่าแป้งที่อยู่ด้านใน เมื่อความชื้นที่ผิวด้านนอกลดลงจะเกิดการพองกรอบและมีสีน้ำตาล (Robbin, 1976)



รูปที่ 2.3 รูปแบบการทอดของอาหารชุบแป้งทอด

ที่มา : Suderman (1990)

### 2.2.3 การอมน้ำมันของอาหารทอด

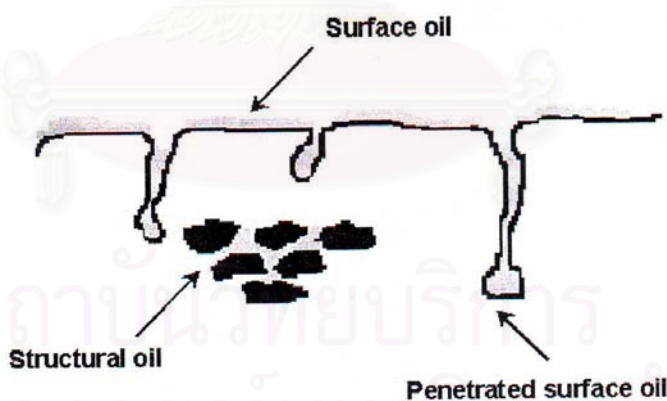
อาหารทอดมักมีปัญหาเรื่องการอมน้ำมัน เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่ทำให้สุกโดยการทอดในน้ำมัน การบริโภคผลิตภัณฑ์อาหารประเภทนี้จะทำให้ได้รับปริมาณไขมันเพิ่มขึ้น และทำให้เกิดโรคต่างๆ เช่น โรคหัวใจ โรคความดันโลหิตสูง คอเลสเตอรอลในเส้นเลือดสูง โรคอ้วน เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องเข้าใจกลไกต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทอด รวมถึงกลไกการซึมผ่านของน้ำมันเข้าไปภายในโครงสร้างของอาหาร เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาการลดการอมน้ำมันของอาหารทอด การทอดอาหารด้วยอุณหภูมิสูงทำให้โครงสร้างของอาหารทั้งที่ผิวหน้าและเนื้อด้านในเกิดการเปลี่ยนแปลง อาหารจึงมีความกรอบเพิ่มขึ้น และในระหว่างการทอดจะเกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลในเวลาเดียวกันส่งผลให้เกิดการระเหยของไอน้ำและการซึมผ่านของน้ำมัน (Bouchon, Aguilera และ Pyle, 2003) แต่ยังไม่มีความชัดเจนที่แน่นอนว่าการซึมผ่านของน้ำมันเกิดขึ้นเมื่อไหร่และเกิดขึ้นได้อย่างไร จึงมีงานวิจัยที่ศึกษาถึงการดูดซับน้ำมันในระหว่างการทอดอาหาร ดังนี้

Moreira, Sun และ Chen (1997) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับน้ำมันใน tortilla chips ระหว่างการทอดแบบน้ำมันท่วม พบว่าร้อยละ 20 ของปริมาณน้ำมันทั้งหมดจะถูกดูดซับโดย chips ระหว่างการทอด และร้อยละ 80 ของปริมาณน้ำมันทั้งหมดจะยังเหลืออยู่ที่ผิวหน้าของ chips ในขณะที่ chips เย็นตัวลงร้อยละ 64 ของปริมาณน้ำมันที่อยู่ผิวหน้าของ chips จะถูกดูดซับโดย chips และเหลือร้อยละ 36 ของปริมาณน้ำมันที่ยังคงอยู่ที่ผิวหน้า

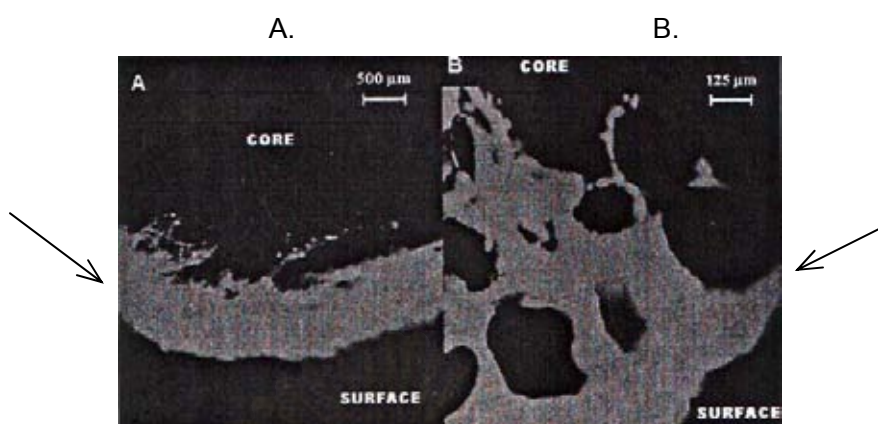
Bouchon, Aguilera และ Pyle (2000) อ้างถึงใน Bouchon และคณะ (2003) ศึกษาจุลศาสตร์ของการดูดซับน้ำมันระหว่างการทอด แล้วอธิบายถึงกลไกการดูดซับน้ำมันดังแสดงในรูปที่ 2.4 ว่าการดูดซับน้ำมันแบ่งได้เป็น 3 ส่วน คือ 1.structure oil (STO) ซึ่งเป็นการดูดซับน้ำมันระหว่างการทอด 2.penetrated surface oil (PSO) ซึ่งเป็นการซึมผ่านของน้ำมันเข้าไปในอาหารระหว่างทำให้เย็น และ 3.surface oil (SO) ซึ่งเป็นน้ำมันที่ถูกดูดซับอยู่ที่ผิวหน้าของอาหาร

Bouchon และคณะ (2001) ศึกษาการกระจายตัวของน้ำมันในมันฝรั่งทอดด้วยเทคนิค infrared microspectroscopy (IR) พบว่าการกระจายตัวของน้ำมันภายในเปลือกด้านนอกหรือครัสต์ (crust) จะสะท้อน anisotropic nature ของรูพรุนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต

Bouchon และคณะ (2003) ศึกษาความสัมพันธ์ของการดูดซับน้ำมันในระหว่างการทอดมันฝรั่งแบบน้ำมันท่วม ที่อุณหภูมิ 185 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ด้วยเทคนิค Confocal laser scanning microscopy (CLSM) พบว่าโครงสร้างภายในของมันฝรั่งทอดจะมีลักษณะเป็นรูพรุนซึ่งเกิดจากการถ่ายเทความร้อนในระหว่างการทอด โดยน้ำมันส่วนใหญ่จะถูกดูดซับอยู่ที่ผิวหน้าของมันฝรั่งทอดและภายในรูพรุน (รูปที่ 2.5) ซึ่งสอดคล้องกับการอธิบายของ Bouchon และคณะ (2000)



รูปที่ 2.4 น้ำมันที่ถูกดูดซับในโครงสร้างของอาหารหลังจากกระบวนการทอด  
ที่มา : Bouchon และคณะ (2003)



รูปที่ 2.5 ภาพตัดขวางของมันฝรั่งทอดที่ถ่ายด้วย CLSM น้ำมันคือตำแหน่งที่ถูกครีซี A. น้ำมันจะถูกดูดซับอยู่ที่ผิวหน้าหรือครีซี (crust) และ B. น้ำมันที่อยู่ภายในรูพรุน  
ที่มา : Bouchon และคณะ (2003)

ในการทอดอาหารแบบน้ำมันท่วมถ้ามีการควบคุมปัจจัยต่างๆ ไม่เหมาะสมจะทำให้อาหารนั้นเกิดการอมน้ำมันได้ โดยทั่วไปอาหารชุบแป้งทอดจะอมน้ำมันประมาณร้อยละ 25 (Meyers, 1990) ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น คุณภาพและองค์ประกอบของน้ำมัน อุณหภูมิและเวลาในการทอด องค์ประกอบของแป้งที่เป็นส่วนผสม ความชื้นของอาหาร รูปร่าง แรงตึงผิวระหว่างผิวหน้าอาหารกับน้ำมัน ความพรุนของอาหาร และการสร้างครีซีของอาหาร (Blumenthal, 1991; Saguy และ Pinthus, 1995) งานวิจัยที่ศึกษาผลขององค์ประกอบของแป้งที่เป็นส่วนผสมต่อการอมน้ำมันของแบทเทอร์มีดังนี้

Mohamed, Hamid และ Hamid (1998) ศึกษาส่วนประกอบของอาหารที่มีผลต่อการดูดซับน้ำมันและความกรอบของอาหาร โดยการแทนที่แป้งข้าวด้วยแป้งข้าวเหนียว (waxy rice flour) ตั้งแต่ 0-500 กรัม พบว่าแบทเทอร์ที่มีการแทนที่แป้งข้าวเจ้าด้วยแป้งข้าวเหนียว 50 กรัมต่อแบทเทอร์ 1 กิโลกรัม จะมีลักษณะที่น่าพอใจ มีการอมน้ำมันน้อยและมีความกรอบมากกว่าแบทเทอร์ที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียว นอกจากนี้ยังพบว่าแบทเทอร์ที่มีการแทนที่แป้งข้าวเหนียวมากกว่า 50 กรัมต่อแบทเทอร์ 1 กิโลกรัม จะทำให้แบทเทอร์มีปริมาณแอมิโลเพคตินสูงซึ่งส่งผลให้แบทเทอร์หลังทอดนุ่ม ซึ่งเป็นผลมาจากการที่โมเลกุลของแอมิโลเพคตินเกิด interaction กับน้ำมัน

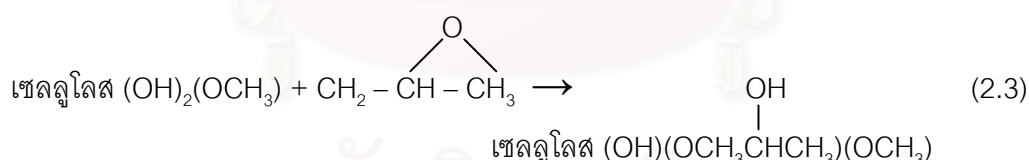
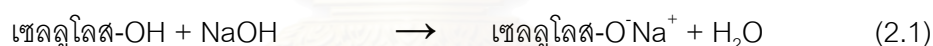
Shih และ Daigle (1999) รายงานว่าแบทเทอร์ที่เตรียมจากแป้งข้าวเจ้าจะมีการอมน้ำมันน้อยกว่าแบทเทอร์ที่เตรียมจากแป้งสาลี เนื่องจากแป้งข้าวเจ้ามีปริมาณแอมิโลสสูงกว่าแป้งสาลี นอกจากนี้ผู้วิจัยยังศึกษาถึงการอมน้ำมันของแบทเทอร์ที่เตรียมจากแป้งข้าวเจ้า

เมล็ดยาว (long grain rice flour) และแป้งข้าวเหนียว พบว่าแบทเทอร์ที่เตรียมจากแป้งข้าวเจ้า เมล็ดยาวจะมีการอมน้ำมันน้อยกว่าแบทเทอร์ที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียว เนื่องจากแป้งข้าวเจ้า เมล็ดยาวจะมีสัดส่วนของแอมิโลสต่อแอมิโลเพคตินเป็น 80 ต่อ 20 ในขณะที่แป้งข้าวเหนียวจะมี สัดส่วนของแอมิโลสต่อแอมิโลเพคตินเป็น 2 ต่อ 98

### 2.3 ไฮโดรคอลลอยด์ (hydrocolloid)

การเติมไฮโดรคอลลอยด์จะช่วยปรับปรุงความหนืดของแป้ง โดยเฉพาะกลุ่มเซลลูโลส อีเทอร์ (cellulose ether) ซึ่งเป็นเซลลูโลสที่ถูกดัดแปรด้วยปฏิกิริยาอีเทอร์ฟิเคชัน เช่น เมทิล เซลลูโลส (Methylcellulose ; MC) และไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลส (Hydroxypropyl methylcellulose ; HPMC) เพราะเซลลูโลสทั้ง 2 ชนิดนี้มีสมบัติในการเกิดเจลขณะร้อน (thermal gelation) ที่เป็นสมบัติเด่น และสามารถละลายได้ในน้ำเย็น สารละลายที่ได้จะมีความหนืดและเสถียร จึงนิยมนำเซลลูโลสอีเทอร์ไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อาหาร ยา และเครื่องสำอาง

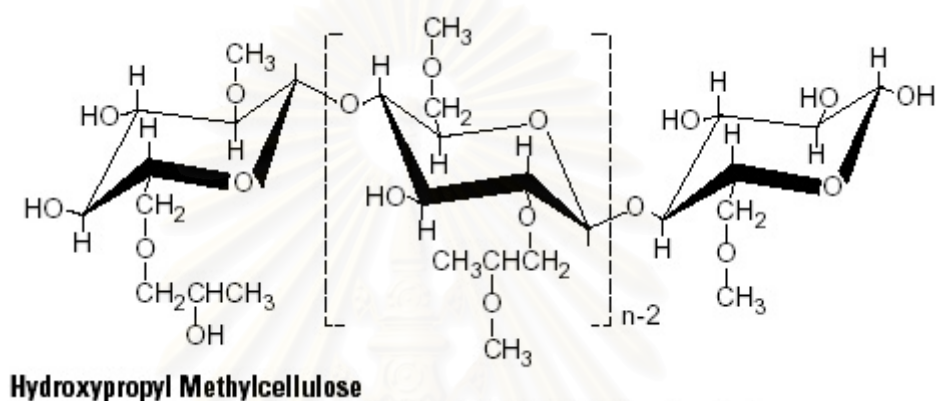
HPMC เป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลสอีเทอร์ที่เกิดจากการดัดแปร alkaline cellulose 2 ขั้นตอน โดยในขั้นตอนแรก alkaline cellulose จะทำปฏิกิริยากับ methyl chloride ได้เป็น MC และในขั้นตอนที่สองเป็นการนำ MC มาดัดแปรอีกครั้งด้วยการทำปฏิกิริยากับ propylene oxide ได้เป็น HPMC ดังปฏิกิริยาที่ (2.1)-(2.3) (วรรณฯ ตูลย์ธัญ, 2549)



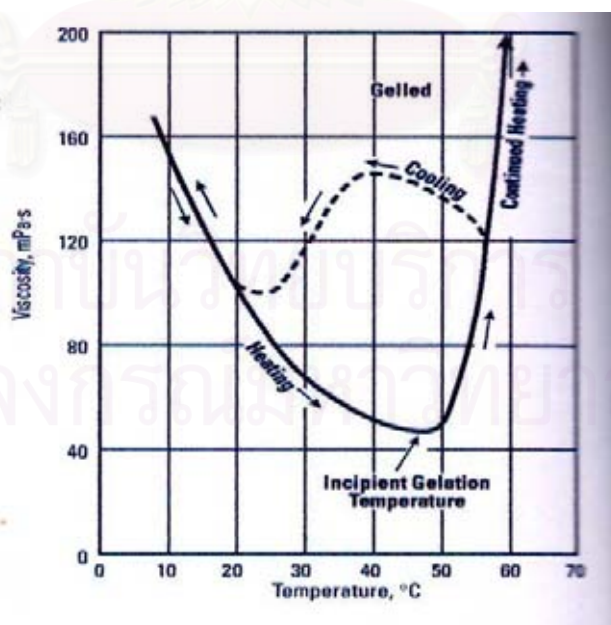
ดังนั้นโมเลกุลของ HPMC จึงมีหมู่อีเทอร์ 2 ชนิดในสายโมเลกุลดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่ง อัตราส่วนระหว่าง methyl และ hydroxypropyl group จะทำให้ HPMC มีสมบัติต่างกัน จุดเด่นของ HPMC คือสามารถเกิดเจลเมื่อได้รับความร้อน (thermal gelation) มีโครงสร้างเป็นร่างแหสามมิติที่สามารถกักเก็บน้ำไว้ในเจลได้ ซึ่ง HPMC มีคุณสมบัติในการเกิดเจลประมาณ 60-90 องศาเซลเซียส (Balasubramaniam และคณะ, 1997) เนื่องจาก HPMC ไม่สามารถละลายในน้ำร้อนได้จึงเกิดเป็นเจลแต่เมื่อเย็นตัวลงก็จะกลับคืนเป็นสารละลายที่มีความหนืดอีกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ถ้าโมเลกุลของ HPMC มี methyl group มาก เจลที่เกิดขึ้นจะค่อนข้างแน่น แต่ถ้ามี hydroxypropyl group เพิ่มขึ้น เจลก็จะนุ่มขึ้น จากสมบัติต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นโดยเฉพาะ



สมบัติ thermal gelation จะมีความสำคัญกับอาหารทอด โดย HPMC จะมีส่วนช่วยลดการอมน้ำมันในอาหารทอดได้ นอกจากนี้ยังมีการใช้ HPMC ในอาหารเพื่อวัตถุประสงค์แตกต่างกันไป เช่น เพื่อเพิ่มความคงตัวของอิมัลชันในน้ำสลัด ลดการสูญเสียความชื้นและเพิ่มความสามารถในการกักเก็บก๊าซให้กับผลิตภัณฑ์ขนมอบ เป็นสารเชื่อมและช่วยหล่อลื่นในผลิตภัณฑ์ประเภท extrude และช่วยควบคุมขนาดของผลึกน้ำแข็งในอาหารแช่แข็ง (Grover, 1993) สำหรับงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของ HPMC 2 ชนิดต่อสมบัติของเบทเทอร์แบ่งข้าว



รูปที่ 2.6 โครงสร้างโมเลกุลของไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลส  
ที่มา : Dow Chemical (2007)



รูปที่ 2.7 สมบัติ thermal gelation ของ HPMC  
ที่มา : Dow Chemical (2007)

Priya, Singhal และ Kulkarni (1996) รายงานว่า HPMC สามารถลดการอมน้ำมันใน boondis ทอด ซึ่งเป็นอาหารทอดชนิดหนึ่งของประเทศอินเดียที่ผลิตจากแป้ง bengal gram โดย HPMC ที่ความเข้มข้น 1 % สามารถลดปริมาณน้ำมันของ boondis ทอดลงได้ร้อยละ 22.7 เมื่อเทียบกับสูตรควบคุมที่ไม่ได้เติม HPMC ซึ่งเป็นผลมาจากการที่โมเลกุลของ HPMC มีความชอบน้ำ (hydrophilic) เพิ่มมากขึ้น และสมบัติ thermal gelation ส่งผลให้ boondis หลังทอดจึงมีน้ำมันลดลงและดูดซับน้ำไว้ได้ นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มแรงตึงผิวระหว่างน้ำกับน้ำมันทำให้ boondis อมน้ำมันน้อยลงด้วย

Williams และ Mittal (1999) ศึกษาการใช้ edible films ซึ่งได้แก่ เจลแลน กัม (gellan gum) เมทิลเซลลูโลส (Methyl cellulose; MC) และ HPMC เพื่อลดการดูดซับน้ำมันของอาหารทอด พบว่าฟิล์มทั้ง 3 ชนิดสามารถลดการดูดซับน้ำมันในอาหารได้ประมาณร้อยละ 50-91 และพบว่าอาหารที่เคลือบด้วยฟิล์มทั้ง 3 ชนิดจะมีปริมาณน้ำสูงกว่าอาหารที่ไม่ได้เคลือบฟิล์ม โดย MC และ HPMC ช่วยลดการสูญเสียในอาหารได้ร้อยละ 30 ในขณะที่เจลแลน กัม จะเพิ่มการสูญเสียน้ำจึงทำให้น้ำและน้ำมันแพร่ผ่านฟิล์มชนิดนี้ได้มากขึ้น

Holownia และคณะ (2000) ศึกษาคุณภาพของ edible films จาก MC และ HPMC ที่ใช้เคลือบขึ้นไก่ พบว่าเนื้อด้านในของขึ้นไก่ที่เคลือบด้วยฟิล์มจะมีร้อยละความชื้นและน้ำมันอยู่ในช่วง 70.0-71.3 และ 3.4-4.5 ตามลำดับ ในขณะที่เปลือกแป้งที่หุ้มขึ้นไก่จะมีร้อยละความชื้นและน้ำมันอยู่ในช่วง 31.0-35.9 และ 36.2-40.7 ตามลำดับ แสดงว่าฟิล์มที่เคลือบขึ้นไก่มีส่วนช่วยในการควบคุมการสูญเสียความชื้นและการกักเก็บการดูดซับน้ำมัน นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำมันที่ใช้ทอดขึ้นไก่ที่เคลือบด้วยฟิล์ม HPMC (D.S. 1.9) มีการเสื่อมสลายลดลงเมื่อเทียบกับน้ำมันที่ใช้ทอดขึ้นไก่ที่ไม่ได้เคลือบฟิล์ม

Naruenartwongsakul และคณะ (2004) ได้ศึกษาผลของชนิดของเซลลูโลสอีเทอร์ (MC ชนิด A4M HPMC ชนิด E4M (D.S. 1.9) และ HPMC ชนิด K4M (D.S. 1.4) ต่อการดูดซับน้ำมันของมันฝรั่งชุบแป้งทอด พบว่าขึ้นมันฝรั่งชุบแป้งทอดจะมีการกักเก็บน้ำสูงกว่าขึ้นมันฝรั่งควบคุม ซึ่งเป็นผลมาจากสมบัติ thermal gelation ของเซลลูโลสอีเทอร์ เปลือกแป้งชุบทอดที่เติมเซลลูโลสอีเทอร์จะมีร้อยละน้ำมันน้อยกว่าเปลือกแป้งชุบทอดควบคุม ซึ่งเป็นผลมาจากสมบัติการกักเก็บน้ำผ่านน้ำมันของเซลลูโลสอีเทอร์และความหนาของเปลือกแป้ง นอกจากนี้ยังพบว่า HPMC มีประสิทธิภาพในการลดการดูดซับน้ำมันได้ดีกว่า MC

## 2.4 สมบัติการไหล (Rheological properties)

การศึกษาและการตรวจสอบคุณสมบัติการไหลของของเหลว ทั้งในเทอมของปริมาณและคุณภาพ ไม่ว่าจะเป็น viscoelastic การไหลแบบ Newtonian การไหลแบบ Non-Newtonian อัตราการเปลี่ยนความหนืดตามเวลา (thixotropic) มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ เช่น อาหาร ยา สี เครื่องสำอางพลาสติกหรือพอลิเมอร์เป็นอย่างมาก (Labtoday, 2004) ดังนั้น การศึกษาสมบัติการไหลของแบทเทอรีจึงมีความสำคัญต่อการทำนายพฤติกรรมของแบทเทอรีในระหว่างกระบวนการแปรรูป

การแบ่งประเภทของของเหลวสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลักคือ ของเหลวที่มีลักษณะเป็น Newtonian fluid และของเหลวที่มีลักษณะเป็น Non-Newtonian fluid ซึ่งอาหารส่วนใหญ่จัดเป็นของเหลวประเภทนี้

### 2.4.1 ประเภทของของเหลว

2.4.1.1 Newtonian fluid คือ ของเหลวที่มีความหนืดไม่ขึ้นกับอัตราเฉือน (shear rate) ความหนืดของของเหลวประเภทนี้จะขึ้นกับอุณหภูมิและองค์ประกอบของของเหลว ดังสมการที่ (2.4) (Vliet, 1999)

$$\sigma = \eta \dot{\gamma} \quad (2.4)$$

โดย  $\sigma$  คือ shear stress ( $\text{N/m}^2$ )  
 $\eta$  คือ coefficient of viscosity ( $\text{N.s/m}^2$ )  
 $\dot{\gamma}$  คือ shear rate ( $1/\text{s}$ )

2.4.1.2 Non-Newtonian fluid คือ ของเหลวที่มีความหนืดเปลี่ยนแปลงตามอัตราเฉือน (shear rate) ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นประเภทต่างๆ ดังนี้

#### ก. Time-independent non-Newtonian fluids

Bingham plastic ของเหลวชนิดนี้ต้องได้รับความเค้นเฉือน (shear stress) มากกว่า yield stress ถึงจะเกิดการไหล และความหนืดจะไม่ขึ้นกับ shear rate โดยค่า shear stress จะสัมพันธ์กับค่า shear rate ตาม Bingham model ดังสมการที่ (2.5) (Vliet, 1999)

$$\sigma = \sigma_0 + \eta \dot{\gamma} \quad (2.5)$$

โดย  $\sigma_0$  คือ ค่า yield stress ( $\text{N/m}^2$ )

Shear thinning fluid หรือ Pseudoplastic fluid ความหนืดของของเหลวจะลดลงเมื่อ Shear rate เพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.8)

Shear thickening fluid หรือ Dilatant fluid ความหนืดของของเหลวจะเพิ่มขึ้นเมื่อ Shear rate เพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.8)

ทั้ง Shear thinning fluid และ Shear thickening fluid จะมีค่า shear stress สัมพันธ์กับ shear rate ตาม Power law model ดังสมการที่ (2.6) และถ้าของเหลวทั้ง 2 ชนิดมี yield stress ก็จะมีค่า shear stress สัมพันธ์กับ shear rate ตาม Herschel-Bulkley model ดังสมการที่ (2.7) (Vliet, 1999)

$$\sigma = K\dot{\gamma}^n \quad (2.6)$$

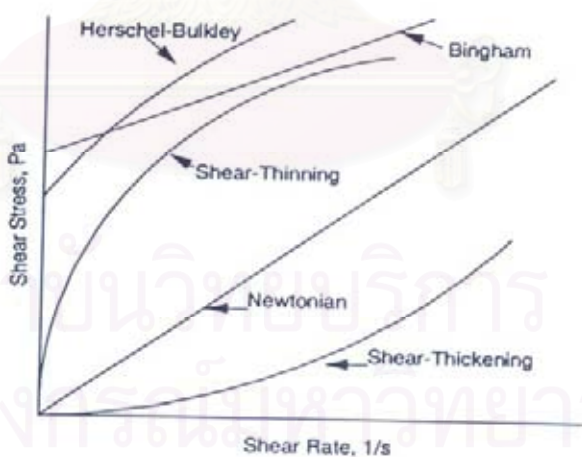
$$\sigma = \sigma_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (2.7)$$

โดย K คือ consistency index

n คือ flow behavior index ซึ่งเป็นค่าที่บ่งชี้ลักษณะการไหล

เมื่อ  $n > 1$  คือ ของเหลวที่มีลักษณะเป็น Shear thickening fluid

$n < 1$  คือ ของเหลวที่มีลักษณะเป็น Shear thinning fluid

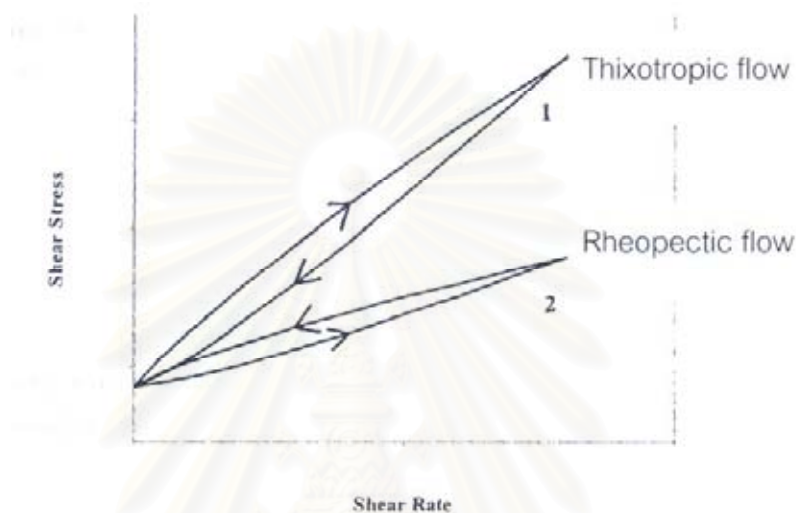


รูปที่ 2.8 ลักษณะการไหลของของไหลประเภท time-independent ของ Non-Newtonian fluid  
ที่มา : Steffe (1992)

### ข. Time-dependent non-Newtonian fluids

Thixotropic fluid ความหนืดของของเหลวจะลดลงเมื่อได้รับ Shear rate คงที่ในเวลาที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.9)

Rheopectic fluid ความหนืดของของเหลวจะเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับ Shear rate คงที่ในเวลาที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.9)



รูปที่ 2.9 ลักษณะการไหลของของไหลประเภท time-dependent ของ Non-Newtonian fluid  
ที่มา : Steffe (1992)

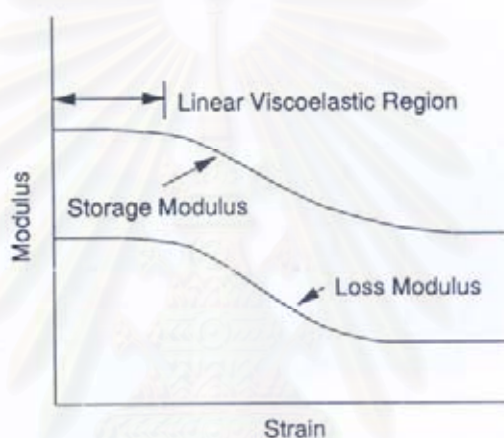
## 2.4.2 การประเมินลักษณะการไหล

2.4.2.1 การประเมินแบบ flow test เป็นการทดสอบเพื่อประเมินลักษณะการไหลของของเหลวว่าเป็น Newtonian หรือ Non-Newtonian fluid โดยแบ่งการวิเคราะห์ผลการทดสอบ flow test ได้เป็น 2 ประเภทคือ

ก. การวิเคราะห์ลักษณะการไหล ซึ่งมักจะทดสอบโดยแปรค่า shear rate จากน้อยไปมากและวัดค่า shear stress หรือความหนืด แล้ววิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง shear rate และ shear stress

ข. การวิเคราะห์ Time dependent ซึ่งมักจะทดสอบโดยแปรค่า shear rate จากน้อยไปมากแล้วลด shear rate จากมากไปน้อย วัดค่า shear stress หรือความหนืดตอบสนองความแตกต่างระหว่าง shear stress ที่ shear rate เดียวกัน ถ้าโครงสร้างของของไหลสามารถฟื้นกลับได้หลังจากได้รับ shear rate และมี shear stress เท่ากันที่ shear rate เท่ากัน ของเหลวนั้นจะไม่แสดงสมบัติ time dependent

2.4.2.2 การประเมินแบบ dynamic test เป็นการทดสอบสมบัติ viscoelastic คือ พฤติกรรมของของไหลที่แสดงออกทั้งลักษณะที่เป็นของเหลวหนืดและของแข็งยืดหยุ่นพร้อมกัน ซึ่งอาจแสดงลักษณะแบบของเหลวหนืดมากกว่าหรือน้อยกว่าลักษณะแบบของแข็งยืดหยุ่นก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเวลา อุณหภูมิ และแรงที่ให้ การทดสอบแบบ dynamic test จะทดสอบสมบัติ viscoelastic ในช่วงที่ยังไม่สูญเสียโครงสร้างได้โดยการค้นหาช่วง linear viscoelastic range (LVR) ซึ่งเป็นช่วงที่ของไหลไม่เสียโครงสร้างระหว่างการทดสอบประเภท amplitude sweep test ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การตอบสนองต่อ strain ของของไหลที่แสดงให้เห็นช่วงที่เป็น LVR  
ที่มา : Steffe (1992)

การทดสอบแบบ dynamic test แบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

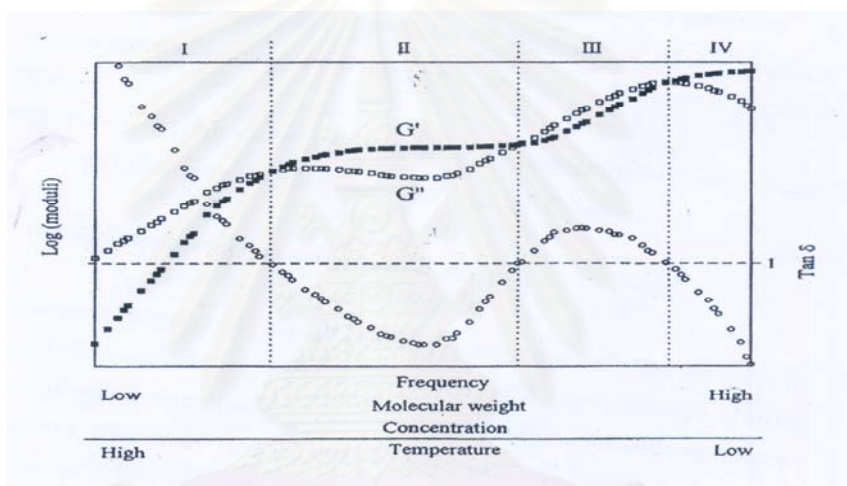
ก. frequency sweep test จะแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองต่อความถี่ในการให้แรงของของไหลต่างชนิดกันในรูปแบบของค่า elastic modulus (storage modulus;  $G'$ ) และค่า viscous modulus (loss modulus;  $G''$ ) พอลิเมอร์โดยทั่วไปจะตอบสนองต่อความถี่ที่ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 2.11 ซึ่งสามารถแบ่งช่วงความสัมพันธ์ระหว่าง moduli และความถี่ที่ใช้ในการทดสอบเป็น 4 ช่วง (Kasapis, 1998) ดังนี้

Terminal zone เป็นช่วงการทดสอบที่ใช้ความถี่ต่ำ เมื่อให้แรงแก่ของไหลอย่างช้าๆ จะสามารถเห็นการไหลได้ (viscous flow) เนื่องจากการกระจายพลังงานและการคลายตัวของสายโมเลกุลเกิดได้เต็มที่ ค่า  $G'$  จะต่ำกว่าค่า  $G''$  โดยทั้งค่า  $G'$  และค่า  $G''$  จะเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่ใช้ในการทดสอบแล้วตัดกันที่จุดสิ้นสุดของช่วงนี้

Plateau zone เป็นช่วงการทดสอบที่ใช้ความถี่ที่สูงขึ้น ค่า  $G'$  และค่า  $G''$  จะตัดกันแล้วค่า  $G'$  จะสูงกว่าค่า  $G''$  ซึ่งแสดงพฤติกรรมการไหลในช่วง rubbery state เนื่องจากโครงร่างตาข่ายที่เกิดขึ้นในของไหลสามารถรับแรงกระทำและไม่กระจายพลังงาน

Glass transition zone เป็นช่วงที่ค่า  $G'$  จะตัดกับค่า  $G''$  อีกครั้งและค่า  $G'$  จะต่ำกว่าค่า  $G''$  เนื่องจากการคลายตัวของสายโมเลกุลบางส่วนในโครงร่างตาข่ายก่อนเข้าสู่ glassy zone

Glassy zone เป็นช่วงที่ของไหลไม่สามารถเกิดการคลายตัวและตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ ค่า  $G'$  จะสูงกว่าค่า  $G''$  และค่า  $G''$  จะลดลง



รูปที่ 2.11 moduli spectrum ของสารละลายพอลิเมอร์เมื่อทดสอบลักษณะการไหลแบบ dynamic test

ที่มา : Kasapis (1998)

ข. temperature sweep test เป็นการตรวจสอบผลของอุณหภูมิต่อสมบัติ viscoelastic ของของไหล ซึ่งเครื่อง Rheometer สามารถตั้งโปรแกรมในการทดสอบลักษณะการไหลของของไหลเมื่อมีการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิได้ในลักษณะเช่นเดียวกับเครื่อง Visco-amylograph แต่มีข้อดีกว่าคือสามารถทราบ shear rate ที่แน่นอนจากการทดสอบที่ไม่ทำลายโครงสร้างของตัวอย่าง

ก. time sweep test เป็นการทดสอบเพื่อดูผลของเวลาซึ่งมักใช้ในการติดตามปฏิกิริยาหรือหาเวลาในการเกิดปฏิกิริยาของของไหล

การวัดสมบัติการไหลของแบทเทอร์ทำให้สามารถทำนายสมบัติของแบทเทอร์เมื่อนำไปใช้ชุปอาหารได้ โดยสมบัติทางการไหลของแบทเทอร์และการเปลี่ยนแปลงจากลักษณะที่เป็นของเหลวหนืดไปเป็นของแข็งยืดหยุ่นจะมีอิทธิพลต่อคุณภาพของแบทเทอร์ที่เกาะติดกับอาหาร (Xue และ Ngadi, 2006) ดังงานวิจัยต่อไปนี้

Hsia, Smith และ Steffe (1992) ศึกษาผลของไฮโดรคอลลอยด์ 3 ชนิดคือ กัวร์กัม แชนแทนกัม และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ต่อสมบัติการไหลและลักษณะการเกาะติดของแบทเทอร์สำหรับนักเก็ตไก่ พบว่าแบทเทอร์ทุกสูตรมีลักษณะการไหลแบบ thixotropic การเติมไฮโดรคอลลอยด์จะช่วยเพิ่มการเกาะติดและความหนืดปรากฏของแบทเทอร์ โดยแบทเทอร์ที่เติมแชนแทนกัมจะมีความหนืดปรากฏสูงสุด และพบว่าความหนืดปรากฏมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับลักษณะการเกาะติดของแบทเทอร์ โดยแบทเทอร์ที่มีความหนืดปรากฏสูงก็จะมีความสามารถในการเกาะติดกับนักเก็ตไก่สูงตามไปด้วย

Mukprasirt, Herais และ Flores (2000) ศึกษาผลกระทบจากการแปรสัดส่วนของแป้งข้าวต่อแป้งข้าวโพด และอุณหภูมิ ต่อลักษณะการไหลของแบทเทอร์แป้งข้าวที่มี แป้งข้าว แป้งข้าวโพด และสตาร์ชออกซิไดซ์ เป็นส่วนประกอบหลัก พบว่าลักษณะการไหลของแบทเทอร์แป้งข้าวขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของแป้งที่ใช้ (สัดส่วนของแป้งข้าวต่อแป้งข้าวโพด และปริมาณของสตาร์ชออกซิไดซ์และเมทิลเซลลูโลส (methylcellulose; MC)) อุณหภูมิ และ shear rate นอกจากนี้ยังอธิบายลักษณะการไหลแบทเทอร์แป้งข้าวโดยใช้สมการ Herschel-Bulkley

Salvador, Sanz และ Fiszman (2005) ศึกษาผลของการเติมส่วนผสมที่แตกต่างกันต่อสมบัติทางการไหลและลักษณะการเกาะติดของแบทเทอร์แป้งสาลี พบว่าแบทเทอร์มีลักษณะทางการไหลแบบ shear thinning ซึ่งใช้สมการ Ostwald-de Waele ในการอธิบาย และพบว่าแบทเทอร์ที่มีความหนืดปรากฏสูง และมีค่า consistency index (K) สูง จะมีความสามารถในการเกาะติดกับชิ้นปลาหมึกสูงขึ้นด้วย

Dogan, Sahin และ Sumnu (2005) ศึกษาผลของการเติมแป้งถั่วเหลืองและแป้งข้าวต่อสมบัติการไหลและคุณภาพของนักเก็ตไก่ที่ทอดแบบน้ำมันท่วม โดยการแทนที่แป้งสาลีด้วยแป้งถั่วเหลืองและแป้งข้าวร้อยละ 5 พบว่าแบทเทอร์ทุกสูตรมีลักษณะการไหลแบบ thixotropic ที่มีความหนืดลดลงเมื่อเวลาในการผสมนานขึ้น และพบว่าความสามารถในการเกาะติดของแบทเทอร์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนืดของแบทเทอร์ โดยแบทเทอร์ที่เติมแป้งถั่วเหลืองจะมีความหนืดสูงและมีความสามารถในการเกาะติดสูงที่สุด



### บทที่ 3

#### วัตถุประสงค์และวิธีการทดลอง

##### 3.1 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาผลของปริมาณแอมิโลสของแป้งข้าวเจ้าต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของก้อนแบทเทอร์หลังทอด
2. ศึกษาผลของเกลือและน้ำตาลต่อไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลส (Hydroxypropyl methylcellulose ; HPMC) และแบทเทอร์แป้งข้าว
3. ศึกษาผลของ HPMC ต่อแบทเทอร์แป้งข้าวและสมบัติทางเคมีกายภาพของก้อนแบทเทอร์หลังทอด
4. ประเมินคุณภาพของแครอทชุบแป้งทอด โดยใช้แบทเทอร์แป้งข้าวจากข้อ 4

##### 3.2 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ได้รับความอนุเคราะห์จากสถาบันวิจัยข้าว มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งเป็นข้าวที่ปลูกในปี พ.ศ.2549 จัดเป็นข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ (12.1-20.0 %)
2. ข้าวเจ้าพันธุ์ชัยนาท 1 ได้รับความอนุเคราะห์จากสถาบันวิจัยข้าว มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งเป็นข้าวที่ปลูกในปี พ.ศ.2549 จัดเป็นข้าวที่มีปริมาณ แอมิโลสสูง (มากกว่า 25.1 %)

องค์ประกอบอื่นๆ ได้แก่ แป้งสาลี (ตราว่าว บริษัท ยูไนเต็ลฟลาวมิลล์ จำกัด (มหาชน)) เกลือ (ตราปวงทิพย์ บริษัท สหพัฒนพิบูล จำกัด) น้ำตาลทราย (ตรามิตรผล บริษัท รวมเกษตรอุตสาหกรรม จำกัด) น้ำมันปาล์ม (ตราโอลีน บริษัท โอลีน จำกัด) และแครอทสด

##### 3.3 สารเคมีและอุปกรณ์

###### 3.3.1 สารเคมี

- |                                 |          |
|---------------------------------|----------|
| 1. กรดบอริกเข้มข้น (boric acid) | AR grade |
| 2. กรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ )    | AR grade |
| 3. กรดอะซิติก (acetic acid)     | AR grade |
| 4. กรดไฮโดรคลอริก (HCl)         | AR grade |
| 5. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)        | AR grade |
| 6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)     | AR grade |

7. ปีโตรเลียมอีเทอร์ (petroleum ether) AR grade
8. โปแตสเซียมไอโอไดด์ (KI) AR grade
9. เอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol) 95 % AR grade
10. แอมิโลสบริสุทธิ์ (pure amylose) (lot 1217001, Fluka; UK)
11. ไอโอดีน (I<sub>2</sub>) AR grade
12. HPMC รายละเอียดแสดงในตารางที่ 3.1
  - HPMC E4M (Methocel E4M, The Dow Chemical Co.) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท Rama Production จำกัด
  - HPMC K4M (Methocel K4M, The Dow Chemical Co.) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท Vicchi Enterprise จำกัด
13. selenium reagent mixture AR grade

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของ HPMC

สมบัติ	HPMC E4M	HPMC K4M
Methoxyl (%)	29.4	22.0
D.S.*	1.9	1.4
Hydroxylpropyl (%)	8.8	8.1
M.S.**	0.23	0.21
ความหนืด (mPa.s)***	4795	4000

\* Degree of Substitution ของหมู่ methoxyl

\*\* Molar Substitution ของหมู่ hydroxylpropyl

\*\*\* สารละลายเข้มข้นร้อยละ 2 ในน้ำที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

ที่มา : Dow Chemical (2007)

### 3.3.2 อุปกรณ์

1. เครื่องโม่แป้ง (Pin mill รุ่น NSB-6, ประเทศไทย)
2. ตู้อบลมร้อน (Tray dry) (บริษัท เขียวเฮง จำกัด รุ่น HA-100s, ประเทศไทย)
3. ตู้อบลมร้อน (hot air over) (Memmert รุ่น model 600, Germany)
4. Buchi digestion unit (รุ่น K-424, Switzerland)
5. Buchi distillation unit (รุ่น B-324, Switzerland)

6. Bohlin Rheometer (C-VOR, Bohlin Instrument Ltd., UK)
7. Centrifuge (Thermo IEC, USA)
8. Cryogenic Freezer (Tayler-Wharton รุ่น XL-55 HP, New York,U.S.A.)
9. Instron Texturometer (Instron® 5565, USA)
10. Soxhlet apparatus
11. Spectrophotometer (Spectronic® 20, USA)
12. Water bath

### 3.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ

#### 3.4.1 การเตรียมแป้งข้าวและการวิเคราะห์สมบัติเคมีกายภาพ

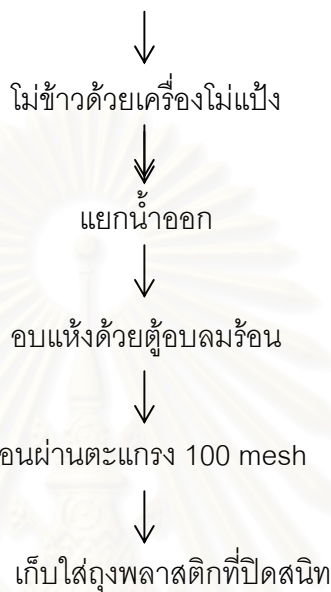
เตรียมแป้งข้าว โดยการนำข้าวมาคัดสิ่งสกปรกออก แช่วข้าวในอัตราส่วนข้าว 1 ส่วนต่อน้ำ 2 ส่วน จากนั้นจึงนำไปโม่ด้วยเครื่องโม่แป้ง (Pin mill รุ่น NSB-6, ประเทศไทย) แยกน้ำออกจากแป้ง แล้วจึงนำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Tray dry) (รุ่น HA-100s, ประเทศไทย) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง นำแป้งที่แห้งแล้วมาร้อนผ่านตะแกรง 100 mesh เก็บแป้งที่ได้ในถุงพลาสติกที่ปิดสนิท ส่วนแป้งที่ร้อนไม่ผ่านตะแกรงในครั้งแรกให้นำไปบดด้วยเครื่องบด ก่อนนำมา ร้อนอีกครั้งหนึ่ง ขั้นตอนแสดงในรูปที่ 3.1 วิเคราะห์แป้งข้าวที่ได้ดังต่อไปนี้

- 3.4.1.1 วิเคราะห์ร้อยละความชื้น ตามวิธีของ AOAC (1995) (ภาคผนวก ก.1)
- 3.4.1.2 วิเคราะห์ปริมาณโปรตีน ตามวิธีของ AOAC (1995) (ภาคผนวก ก.3)
- 3.4.1.3 วิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส ตามวิธีของ Juliano (1971) (ภาคผนวก ก.4)
- 3.4.1.4 วิเคราะห์ดรรชนีการดูดซับน้ำ ตามวิธีของ Anderson และคณะ (1969) (ภาคผนวก ก.5)

จากนั้นนำแป้งทั้ง 3 ชนิดคือ แป้งสาลี แป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 และแป้งข้าวชัยนาท 1 มาผสมกับเกลือและน้ำตาลตามสูตรที่ดัดแปลงจาก Mukprasirt, Herald และ Seib (2002) ดังแสดงในตารางที่ 3.2 เพื่อเตรียมเป็นแบทเทอร์ โดยการผสมแป้งด้วยเครื่องปั่นผสมยี่ห้อ Panasonic ใช้ความเร็วเบอร์ 1 เป็นเวลา 1 นาที เติมน้ำลงไปผสมในอัตราส่วนส่วนผสมแห้ง 1 ส่วนต่อน้ำ 1.5 ส่วน (Mukprasirt และคณะ, 2002; Xue และ Ngadi, 2006) ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่นผสม ใช้ความเร็วเบอร์ 1 เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นตวงแบทเทอร์ปริมาตร 5

มิลลิลิตร เทใส่ลงในพิมพ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.75 เซนติเมตร นำไปทอดโดยใช้หม้อทอดควบคุมอุณหภูมิ ทอดแบบเทอร์ที่อุณหภูมิ  $170 \pm 5$  องศาเซลเซียส ในน้ำมันปาล์ม 1 ลิตร ครั้งละ 4 ชิ้น เป็นเวลา  $10 \pm 1$  นาที ตักขึ้นให้สะเด็ดน้ำมันและผึ่งให้เย็นเป็นเวลา 20 นาที

ข้าวสาร (ข้าว 1 ส่วน : น้ำ 2 ส่วน)



รูปที่ 3.1 แผนผังการเตรียมแป้งข้าวอย่างคร่าวๆ

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมของแบทเทอร์

ส่วนผสม	น้ำหนัก (กรัม)
แป้งสาลี	100.00
เกลือ	2.50
น้ำตาล	2.00

นำตัวอย่างแบทเทอร์ที่ทอดแล้วมาแช่แข็งด้วยเครื่อง cryogenic freezer ยี่ห้อ Tayler-Wharton รุ่น XL-55 HP (New York, USA) ตามวิธีที่ดัดแปลงจาก Shih และคณะ (2001) โดยใช้ไนโตรเจนเหลวควบคุมอุณหภูมิภายในเป็น  $-40$  องศาเซลเซียส แช่แข็งเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นบดตัวอย่างจนละเอียดด้วยข้อนันท์ที่ออกจากเครื่อง แล้วนำแบทเทอร์หลังทอดไปวิเคราะห์ ดังนี้

- 3.4.1.5 วิเคราะห์ร้อยละความชื้น ตามวิธีของ AOAC (1995) (ภาคผนวก ก.1)
- 3.4.1.6 วิเคราะห์ร้อยละน้ำมันดูดซับ ตามวิธีของ AOAC (1995) (ภาคผนวก ก.2)
- 3.4.1.7 วิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส ตามวิธีของ Mohamed และคณะ (1998) (ภาคผนวก ก.6)

วางแผนการทดลองแบบ Completely randomized design (CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และหาความแตกต่างด้วย Duncan' s new multiple range test

### 3.4.2 การลดการดูดซับน้ำมันของแบทเทอร์หลังทอด

เตรียม HPMC ทั้ง 2 ชนิด คือ E4M และ K4M เข้มข้น 1 % w/w ด้วยวิธี hot/cold technique (Dow Chemical, 2007) กล่าวคือนำน้ำ 1/3 ของปริมาณน้ำทั้งหมดมาให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิสูงกว่า 90 องศาเซลเซียส แล้วจึงเติม HPMC เกลือ 2.5 % และน้ำตาล 2.0 % จากนั้นเติมน้ำส่วนที่เหลือ (น้ำเย็น) ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่อง magnetic stirrer เป็นเวลา 30 นาที ตั้งสารละลายทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง และเตรียมแบทเทอร์แป้งข้าวตามสูตรในตารางที่ 3.2 ใช้แป้งข้าวแทนแป้งสาลี ผสมส่วนผสมแห้งด้วยเครื่องผสมที่ความเร็วเบอร์ 1 เวลา 30 วินาที จากนั้นเติมน้ำแล้วผสมด้วยเครื่องผสมเป็นเวลา 1 นาที ตั้งแบทเทอร์ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง แล้วนำสารละลาย HPMC และแบทเทอร์แป้งข้าวมาวิเคราะห์สมบัติ ดังนี้

- 3.4.2.1 วิเคราะห์สมบัติทางการไหลด้วยเครื่อง Bohlin Rheometer C-VOR รายละเอียดดังภาคผนวก ก.7
- 3.4.2.2 วิเคราะห์สมบัติ viscoelastic ด้วยเครื่อง Bohlin Rheometer C-VOR รายละเอียดดังภาคผนวก ก.8

และเตรียมแบทเทอร์ตามสูตรในตารางที่ 3.2 แต่ใช้แป้งข้าวแทนแป้งสาลีทั้งหมดเติม HPMC ในปริมาณที่ต่างกัน 3 ระดับคือ 0.00 %, 0.25 % และ 0.50 % w/w ผสมส่วนผสมแห้งด้วยเครื่องผสมที่ความเร็วเบอร์ 1 เวลา 30 วินาที จากนั้นเติมน้ำแล้วผสมด้วยเครื่องผสมเป็นเวลา 1 นาที ตั้งแบทเทอร์ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์สมบัติ ดังนี้

- 3.4.2.3 วิเคราะห์สมบัติทางการไหลด้วยเครื่อง Bohlin Rheometer C-VOR รายละเอียดดังภาคผนวก ก.7

3.4.2.4 วิเคราะห์สมบัติ viscoelastic ด้วยเครื่อง Bohlin Rheometer C-VOR รายละเอียดยัดตั้งภาคผนวก ก.8

จากนั้นนำแบทเทอร์แป้งข้าวที่มีปริมาณ HPMC ต่างกัน (0.00, 0.25 และ 0.50 % w/w) มาทดสอบตามข้อ 3.4.1 แล้วนำก้อนแบทเทอร์หลังทอดมาวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ดังนี้

3.4.2.5 วิเคราะห์ครรชนีการดูดซับน้ำ ตามวิธีของ Anderson และคณะ (1969) (ภาคผนวก ก.5)

3.4.2.6 วิเคราะห์ร้อยละความชื้น ตามวิธีของ AOAC (1995) (ภาคผนวก ก.1)

3.4.2.7 วิเคราะห์ร้อยละน้ำมันดูดซับ ตามวิธีของ AOAC (1995) (ภาคผนวก ก.2)

3.4.2.8 วิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส ตามวิธีของ Mohamed และคณะ (1998) (ภาคผนวก ก.6)

วางแผนการทดลองแบบ Factorial Design 2x3 (2 คือชนิดของ HPMC และ 3 คือปริมาณของ HPMC) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ยกเว้นการวิเคราะห์สมบัติการไหลของ HPMC เข้มข้น 1 % w/w ที่วางแผนการทดลองแบบ Factorial Design 2x2x2 (2 คือชนิดของ HPMC ปริมาณของเกลือ และปริมาณของน้ำตาล) และการวิเคราะห์สมบัติการไหลของแบทเทอร์แป้งข้าวที่ไม่ผสม HPMC ที่วางแผนการทดลองแบบ Factorial Design 2x2 (2 คือปริมาณของเกลือ และปริมาณของน้ำตาล) ข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และหาความแตกต่างด้วย Duncan's new multiple range test

### 3.4.3 การประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์แครอทชุบแป้งทอด

ผสมแบทเทอร์ตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ในข้อ 3.4.2 แล้วพักไว้ 10 นาที จากนั้นนำชิ้นแครอทขนาด 1x1x6 เซนติเมตร<sup>3</sup> มาชุบลงในแบทเทอร์เป็นเวลา 30 วินาที แล้วตั้งขึ้นทิ้งไว้ให้สะเด็ดแบทเทอร์เป็นเวลา 10 วินาที หลังจากนั้นนำไปทอดด้วยหม้อทอดควบคุมอุณหภูมิในน้ำมันปาล์ม 1 ลิตร โดยทอดที่อุณหภูมิ 170±5 องศาเซลเซียสครั้งละ 4 ชิ้น และทอดเป็นเวลา 2±1 นาที ตักขึ้นให้สะเด็ดน้ำมันและผึ่งให้เย็นเป็นเวลา 10 นาที วิเคราะห์สมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.4.3.1 วิเคราะห์ความสามารถในการเกาะติด ( % Coating pick up) ของแบทเทอร์ ตามวิธีของ Dogan และคณะ (2005) (ภาคผนวก ก.9)

- 3.4.3.2 วิเคราะห์ร้อยละความชื้นในเปลือกแป้งหลังทอด ตามวิธีของ AOAC (1995) (ภาคผนวก ก.1)
- 3.4.3.3 วิเคราะห์ร้อยละน้ำมันดูดซับในเปลือกแป้งหลังทอด ตามวิธีของ AOAC (1995) (ภาคผนวก ก.2)
- 3.4.3.4 วิเคราะห์ร้อยละความชื้นในชิ้นแครอทหลังทอด ตามวิธีของ AOAC (1995) (ภาคผนวก ก.1)
- 3.4.3.5 วิเคราะห์ร้อยละน้ำมันดูดซับในชิ้นแครอทหลังทอด ตามวิธีของ AOAC (1995) (ภาคผนวก ก.2)
- 3.4.3.6 ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส เช่น ความกรอบ (crispness) ความมัน (oiliness) ลักษณะปรากฏ และความชอบโดยรวม โดยใช้ Hedonic Scale 7 ระดับ กับผู้ชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝน 30 คน (ภาคผนวก ข)

วางแผนการทดลองแบบ Factorial Design 2x3 (2 คือชนิดของ HPMC และ 3 คือปริมาณของ HPMC) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ยกเว้นการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสที่วางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) ทำการทดลอง 2 ซ้ำ ข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และหาความแตกต่างด้วย Duncan's new multiple range test

## บทที่ 4

### ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 สมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวเจ้า

##### 4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวเจ้า

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของแป้ง พบว่าแป้งทั้ง 3 ชนิดจะมีร้อยละโปรตีนที่แตกต่างกัน ( $p \leq 0.05$ ) ดังตารางที่ 4.1 โดยแป้งสาลีจะมีร้อยละโปรตีนมากกว่าแป้งข้าวเจ้าทั้ง 2 ชนิด เนื่องจากในแป้งสาลีจะมีโปรตีนกลูเตน ซึ่งโปรตีนชนิดนี้จะไม่มีในแป้งข้าวเจ้า โปรตีนกลูเตนจะมีส่วนช่วยในการดูดซับน้ำของแป้งและเป็นโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ แต่อาจมีผู้บริโภคนานกลุ่มที่แพ้โปรตีนกลูเตนจึงทำให้ไม่สามารถบริโภคอาหารที่มีแป้งสาลีเป็นส่วนประกอบได้ ดังนั้นงานนี้จึงได้วิจัยนำแป้งข้าวเจ้ามาเตรียมแบบเทอร์แทนแป้งสาลี เนื่องจากโปรตีนข้าวจะไม่ทำให้เกิดการแพ้ (Helm และ Burks, 1996) แป้งข้าวเจ้าที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 ชนิดคือ แป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 และแป้งข้าวชัณนาท 1 ซึ่งแป้งข้าวเจ้าทั้ง 2 ชนิดจะมีปริมาณแอมิโลสแตกต่างกัน ( $p \leq 0.05$ ) โดยแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 จะมีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 18.93 ส่วนแป้งข้าวชัณนาท 1 จะมีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 29.85 ดังนั้นแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 จะจัดเป็นข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ (12.1-20.0 %) และแป้งข้าวชัณนาท 1 จัดเป็นข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูง (มากกว่า 25.1 %) (Juliano, 1972)

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวเจ้า \*

แป้ง	ความชื้น <sup>1</sup> (%)	โปรตีน <sup>2</sup> (%)	แอมิโลส <sup>2</sup> (%)
ข้าวสาลี	11.78 <sup>a</sup> ±0.09	10.72 <sup>c</sup> ±0.07	25.59 <sup>b</sup> ±0.78
ข้าวขาวดอกมะลิ 105	16.39 <sup>c</sup> ±0.64	6.62 <sup>b</sup> ±0.07	18.93 <sup>a</sup> ±1.30
ข้าวชัณนาท 1	12.91 <sup>b</sup> ±0.31	6.11 <sup>a</sup> ±0.05	29.85 <sup>c</sup> ±0.55

\* ค่า mean±SD <sup>1</sup> น้ำหนักเปียก (wet basis) <sup>2</sup> น้ำหนักแห้ง (dry basis)

<sup>a-c</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแถวตั้งแต่ละคอลัมน์แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )



#### 4.1.2 ธรรมชาติการดูดซับน้ำของแป้งข้าวเจ้า

แป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 และแป้งข้าวชัยนาท 1 มีค่าธรรมชาติการดูดซับน้ำ (Water Absorption Index; WAI) ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.2 WAI จะมีผลต่อความหนืด ดังนั้นแบทเทอร์ที่ผลิตจากแป้งต่างชนิดกันก็必将มีความหนืดและความสามารถในการเกาะติดของแบทเทอร์ที่ต่างกันด้วย แป้งทั้ง 3 ชนิดมี WAI ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) กล่าวคือแป้งสาลีจะมี WAI สูงสุดคือ 2.23 กรัมต่อกรัมแป้งแห้ง รองลงมาคือแป้งข้าวชัยนาท 1 (2.04 กรัมต่อกรัมแป้งแห้ง) และแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 (1.78 กรัมต่อกรัมแป้งแห้ง) ตามลำดับ โดยทั่วไปแล้วแป้งจากธัญพืชจะสามารถดูดซับน้ำได้ประมาณร้อยละ 30 (น้ำหนักแห้ง) ซึ่งทำให้มีปริมาตรเพิ่มขึ้นร้อยละ 5 (Hoseney, 1994)

ตารางที่ 4.2 ธรรมชาติการดูดซับน้ำของแป้งข้าวเจ้า\*

แป้ง	ธรรมชาติการดูดซับน้ำ (กรัมต่อกรัมแป้งแห้ง)
ข้าวสาลี	2.23 <sup>a</sup> ±0.03
ข้าวขาวดอกมะลิ 105	1.78 <sup>c</sup> ±0.02
ข้าวชัยนาท 1	2.04 <sup>b</sup> ±0.02

\* ค่า mean±SD

<sup>a-c</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

#### 4.1.3 ร้อยละความชื้นและน้ำมันดูดซับในก้อนแบทเทอร์หลังทอด

เมื่อนำแบทเทอร์ทั้ง 3 ชนิดที่เตรียมได้จากแป้งสาลีและแป้งข้าวทั้ง 2 พันธุ์ (ตารางที่ 3.2) ไปทอด ที่อุณหภูมิ 170±5 องศาเซลเซียส เวลา 10±1 นาทีแล้วนำมาวิเคราะห์ร้อยละความชื้นและน้ำมันในก้อนแบทเทอร์หลังทอด พบว่ามีร้อยละน้ำมันดูดซับแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) ดังตารางที่ 4.3 โดยก้อนแบทเทอร์ที่เตรียมจากแป้งสาลี (wheat flour-based batter ; WFBB) หลังทอดมีร้อยละน้ำมันดูดซับมากกว่าก้อนแบทเทอร์ที่เตรียมจากแป้งข้าวเจ้า (rice flour-based batter ; RFBB) ทั้ง 2 ชนิด เนื่องจากโปรตีนกลูเตนที่มีอยู่ในแป้งสาลีมีความสัมพันธ์กับน้ำมันได้ดีกว่าแป้งข้าวเจ้า และ WFBB มีการพองตัวสูงจึงมีรูพรุนของแบทเทอร์มาก น้ำมันสามารถแทรกซึมผ่านรูพรุนได้มากส่งผลให้เกิดการดูดซับน้ำมันมากกว่า RFBB

Shih และ Daigle (1999) ได้ศึกษาสมบัติการอมน้ำมันของแบทเทอร์ทอดที่เตรียมจากแป้งข้าวเปรียบเทียบกับแป้งสาลี พบว่าแบทเทอร์แป้งข้าวจะมีปริมาณน้ำมัน 27.6 % ในขณะที่แบทเทอร์แป้งสาลีจะมีปริมาณน้ำมัน 49.3 % แสดงว่าแป้งข้าวทนต่อการซึมผ่านของน้ำมันได้ดีกว่าและเหมาะสำหรับนำไปผลิตแบทเทอร์ไขมันต่ำ

ตารางที่ 4.3 ร้อยละปริมาณความชื้นและน้ำมันดูดซับ\* ในก้อนแบทเทอร์หลังทอด

ชนิดของแบทเทอร์	ความชื้น <sup>1</sup> (%)	น้ำมัน <sup>2</sup> (%)	Hardness (kg force)
WFBB ข้าวสาลี	23.29 <sup>a</sup> ±0.54	27.53 <sup>a</sup> ±0.34	3.52 <sup>c</sup> ±0.22
RFBB ข้าวขาวดอกมะลิ 105	5.73 <sup>c</sup> ±0.82	18.87 <sup>b</sup> ±0.93	5.36 <sup>b</sup> ±0.27
ข้าวชัยนาท 1	9.15 <sup>b</sup> ±0.16	16.32 <sup>c</sup> ±1.12	7.75 <sup>a</sup> ±0.55

\* ค่า mean±SD <sup>1</sup> น้ำหนักเปียก (wet basis) <sup>2</sup> น้ำหนักแห้ง (dry basis)

<sup>a-c</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p≤0.05)

ในขณะที่ก้อนแบทเทอร์ที่เตรียมจากแป้งข้าว (RFBB) ทั้ง 2 ชนิดหลังทอดมีร้อยละความชื้นและน้ำมันดูดซับแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p≤0.05) โดยก้อนแบทเทอร์ที่เตรียมจากแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 จะมีร้อยละน้ำมันดูดซับมากกว่าก้อนแบทเทอร์ที่เตรียมจากแป้งข้าวชัยนาท 1 เนื่องจากก้อนแบทเทอร์ที่เตรียมจากแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 หลังทอดมีร้อยละความชื้นน้อยกว่าก้อนแบทเทอร์ที่เตรียมจากแป้งข้าวชัยนาท 1 หลังทอด แป้งข้าวทั้ง 2 ชนิดยังมีปริมาณแอมิโลสที่ต่างกันคือ แป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 18.93 ส่วนแป้งข้าวชัยนาท 1 มีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 29.85 (ตารางที่ 4.1) แป้งข้าวเจ้าที่มีปริมาณแอมิโลสสูงจะมี interaction ระหว่างสายโมเลกุลของสตาร์ชมาก ซึ่งส่งผลทำให้การดูดซับน้ำมันของก้อนแบทเทอร์หลังทอดลดลง (Mohamed และคณะ, 1998) นอกจากนี้ปริมาณแอมิโลสยังมีส่วนต่อความแข็ง (hardness) ของก้อนแบทเทอร์หลังทอดทั้ง 2 ชนิด โดยก้อนแบทเทอร์ที่เตรียมจากแป้งข้าวชัยนาท 1 ซึ่งมีปริมาณแอมิโลสสูงจะมีความกรอบแข็งมากกว่าก้อนแบทเทอร์ที่เตรียมจากแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 เพราะปริมาณแอมิโลสที่สูงทำให้ก้อนแบทเทอร์มีการพองตัวต่ำและจะเกิดฟิล์มที่แข็งแรงจึงทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งมาก ดังนั้นจึงเลือกใช้แป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 เพื่อใช้เตรียมแบทเทอร์ในการทดลองขั้นต่อไป

Mohamed และคณะ (1998) รายงานว่า ปริมาณแอมิโลสจะมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับความแข็ง (hardness) แต่จะแปรผกผันกับการดูดซับน้ำมัน โดยแบทเทอร์ที่มีประกอบด้วยแป้งข้าวที่มีสัดส่วนของแอมิโลสต่อแอมิโลเพคติน 18:67 จะทำให้แบทเทอร์หลังทอดมีความกรอบที่ดี

## 4.2 การลดการอมน้ำมันในแบทเทอร์หลังทอด

เนื่องจากแบทเทอร์จากแป้งข้าวมีความเหนียวที่ต่ำจึงมีปัญหาในเรื่องการเกาะติดกับชิ้นอาหาร การเติมไฮโดรคอลลอยด์จะช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้ นอกจากนี้ยังมีส่วนช่วยในการลดการดูดซับน้ำมันของแบทเทอร์ได้อีกด้วย จึงเลือกใช้ไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลส 2 ชนิด (E4M และ K4M) ที่มีระดับการแทนที่ (D.S.) และความเข้มข้นต่างกัน การทดลองในส่วนนี้จึงได้ศึกษาผลของเกลือและน้ำตาลในสูตรต่อ HPMC ทั้ง 2 ชนิดและแบทเทอร์แป้งข้าวที่ไม่ผสม HPMC แล้วจึงศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของ HPMC ต่อแบทเทอร์แป้งข้าวที่ผสม HPMC และการดูดซับน้ำมันของก้อนแบทเทอร์หลังทอด

### 4.2.1 สมบัติการไหลของไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลส (Hydroxypropyl methylcellulose ; HPMC)

ผลการทดสอบผลของเกลือและน้ำตาลต่อสมบัติทางการไหลของสารละลาย HPMC ความเข้มข้น 1 % w/w แสดงในตารางภาคผนวกที่ ง.1 พบว่า สารละลาย HPMC ทั้ง 2 ชนิด คือ E4M และ K4M เป็นของเหลวที่มีพฤติกรรมการไหลแบบ shear thinning เพราะมีค่า flow behavior index (n) น้อยกว่า 1 แสดงว่าเมื่อ shear rate เพิ่มขึ้นความหนืดของสารละลาย HPMC ทั้ง 2 ชนิดลดลง ซึ่งพบได้ทั่วไปสำหรับพอลิเมอร์ที่ละลายและอุ้มน้ำได้และมีความหนืดสูงเมื่อให้แรงที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่จะทำให้โมเลกุลจัดเรียงตัวกันใหม่โดยเรียงตัวไปตามทิศทางการไหล ความต้านทานภายในจะลดลง อัตราเร็วในการเคลื่อนที่จึงเพิ่มขึ้น (วราภรณ์ สุวกุล, 2525) ส่งผลให้ความหนืดลดลงเมื่อ shear rate เพิ่มขึ้น

Krumel และ Sarkar (1975) ศึกษาสมบัติการไหลของเมทิลเซลลูโลส (methylcellulose ; MC) และไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลสที่มีระดับการแทนที่ของ methoxyl group ตั้งแต่ 20-32 % และ hydroxylpropyl group ตั้งแต่ 0-12 % ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.5 – 2.0 % พบว่าสารละลาย MC เป็นสารละลายประเภท pseudoplastic กล่าวคือเมื่อมี shear rate เพิ่มขึ้นสารละลาย MC จะมีความหนืดลดลง

ก. ปัจจัยที่มีผลต่อค่า consistency index (K)

เนื่องจากค่า K มีความสัมพันธ์แปรผันตรงกับความหนืด จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ตารางที่ 4.4) พบว่าเกลือมีผลต่อค่า K ของสารละลาย E4M และ K4M โดยเกลือจะทำให้ค่า K ( $0.12-0.14 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ ) ลดลงเมื่อเทียบกับสารละลายควบคุม ( $0.20-0.21 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ ) (ตารางภาคผนวกที่ ง.1) แสดงว่าสารละลายทั้ง 2 ชนิดจะมีความหนืดลดลงด้วย นอกจากนี้ น้ำตาลก็มีผลต่อค่า K ของสารละลาย E4M และ K4M โดยสารละลายจะมีค่า K อยู่ในช่วง  $0.24-0.25 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$  ซึ่งเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสารละลายควบคุม แสดงว่าน้ำตาลจะช่วยเพิ่มความหนืดให้กับสารละลาย E4M และ K4M ทั้งนี้เนื่องจากน้ำตาลสามารถละลายน้ำได้ดีกว่า E4M และ K4M โดยน้ำตาล 1 กรัมจะละลายในน้ำ 0.5 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (Budavari, 2001) ดังนั้นจึงทำให้ระบบมีน้ำอิสระลดลง สารละลาย HPMC ทั้ง 2 ชนิดจึงมีความหนืดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าชนิดของ HPMC ไม่มีผลต่อค่า K แสดงว่าระดับของการแทนที่ของ methoxyl และ hydroxylpropyl group ของ E4M และ K4M ไม่มีผลต่อค่า K

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของสมบัติทางการไหลของสารละลาย HPMC เข้มข้น 1 % w/w

SOV	df	K	n
Salt	1	*	*
Sugar	1	**	NS
Type	1	NS	*
Salt*Sugar	1	NS	NS
Salt*Type	1	NS	NS
Sugar*Type	1	NS	NS
Salt*Sugar*Type	1	NS	*

\* แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

\*\* แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

NS แสดงถึงไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

Coffey, Bell และ Henderson (1995) รายงานว่า สารละลาย HPMC ชนิด E4M (D.S. 1.9), F4M (D.S. 1.8 ) และ K4M (D.S. 1.4) เป็นของไหลประเภท pseudoplastic ระดับการแทนที่ของหมู่แทนที่ที่ไม่มีผลต่อพฤติกรรมทางการไหล แต่จะขึ้นอยู่กับมวลโมเลกุลของ HPMC มากกว่า

ข. ปัจจัยที่มีผลต่อค่า flow behavior index (n)

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ระหว่างเกลือ น้ำตาล และชนิดของ HPMC ต่อค่า n (ตารางที่ 4.4) โดยทั้งเกลือและน้ำตาลมีผลต่อค่า n ของสารละลาย E4M และ K4M สารละลาย E4M ที่เติมทั้งเกลือและน้ำตาล ค่า n มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสารละลาย E4M ที่เติมน้ำตาลอย่างเดียว (ตารางที่ 4.5) แต่มีค่าไม่แตกต่างจากสารละลาย E4M ควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) โดยสารละลาย E4M ที่เติมทั้งเกลือและน้ำตาลจะมีค่า n เท่ากับ 0.95 ในขณะที่สารละลาย E4M ควบคุมจะมีค่า n เท่ากับ 0.93 ส่วนสารละลาย K4M ที่เติมทั้งเกลือและน้ำตาล ค่า n จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับสารละลาย E4M ที่เติมน้ำตาลอย่างเดียว ผลโดยรวมของการเติมทั้งเกลือ 2.5 % และน้ำตาล 2.0 % มีผลรวมที่ทำให้โมเลกุลของ E4M หรือ K4M เคลื่อนที่ได้ยากขึ้นเมื่อมีแรงกระทำ ส่งผลให้เกิดแรงต้านภายในสูง ค่า n จึงเพิ่มขึ้นและเข้าใกล้ 1 สารละลายนี้จึงมีความหนืดที่แปรตาม shear rate ลดลง และเมื่อพิจารณาสารละลาย HPMC ควบคุม พบว่าสารละลาย E4M ควบคุมมีค่า n น้อยกว่าสารละลาย K4M ควบคุม (ตารางที่ 4.5) เนื่องจาก E4M มีค่า D.S. มากกว่า K4M การจัดเรียงตัวของโมเลกุล E4M จึงมี entanglement มากกว่า K4M

ตารางที่ 4.5 ค่า flow behavior index (n)\* ของสารละลาย HPMC เข้มข้น 1 % w/w

HPMC	Treatment	n
E4M	ควบคุม	0.93 <sup>bc</sup> ± 0.01
	เกลือ 2.5 %	0.93 <sup>bc</sup> ± 0.00
	น้ำตาล 2.0 %	0.92 <sup>c</sup> ± 0.01
	เกลือและน้ำตาล	0.95 <sup>ab</sup> ± 0.00
K4M	ควบคุม	0.96 <sup>a</sup> ± 0.03
	เกลือ 2.5 %	0.96 <sup>a</sup> ± 0.03
	น้ำตาล 2.0 %	0.94 <sup>bc</sup> ± 0.01
	เกลือและน้ำตาล	0.95 <sup>ab</sup> ± 0.00

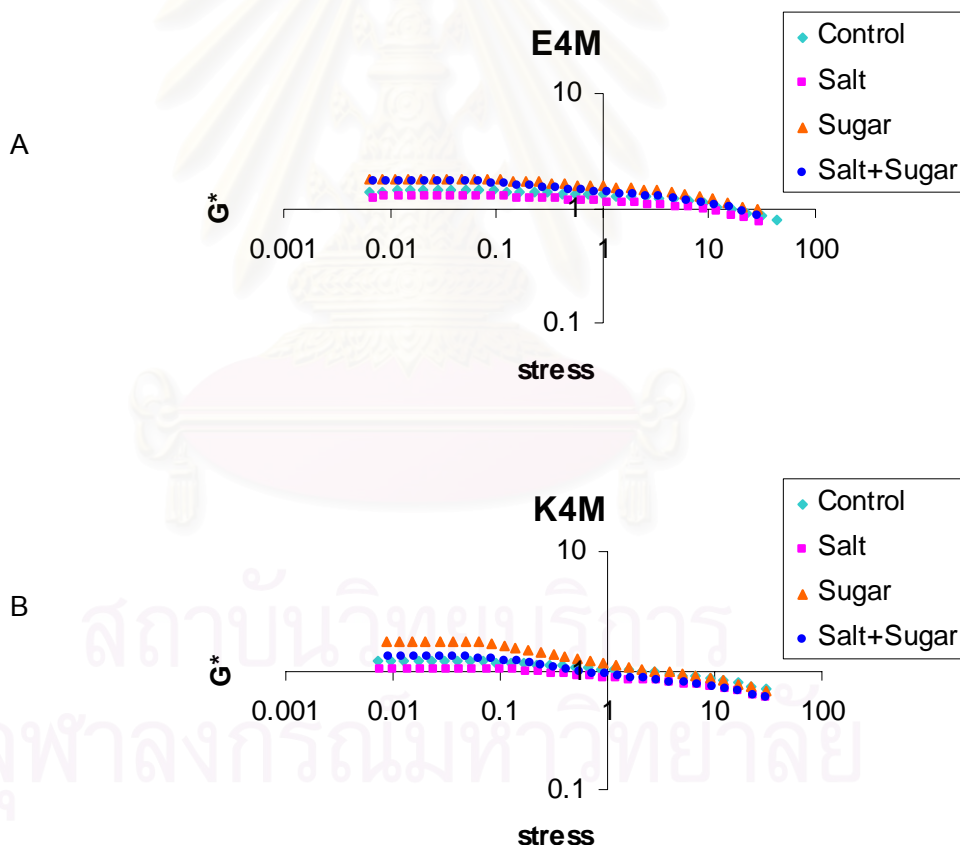
\* ค่า mean ± SD

<sup>a-c</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

## 4.2.2 การทดสอบสมบัติ viscoelastic ของ HPMC

### 4.2.2.1 การทดสอบ Amplitude sweep test

การหา Linear Viscoelastic Range (LVR) เป็นการหาช่วง stress ที่มีค่า modulus คงที่ก่อนที่จะลดลงเมื่อเกิดการเสียโครงสร้างของสารละลาย HPMC ซึ่งในการทดลองนี้เลือกใช้สารละลาย HPMC 2 ชนิดคือ E4M และ K4M เข้มข้น 1.00 % w/w ควบคุม เติมเกลือเพียงอย่างเดียว เติมน้ำตาลเพียงอย่างเดียว และเติมทั้งเกลือและน้ำตาล จากรูปที่ 4.1 พบว่าสารละลาย E4M และ K4M จะมีค่า  $G^*$  คงที่ตลอดช่วง stress 0.01-0.1 และเริ่มลดลงเมื่อ stress มีค่าสูงขึ้น ซึ่งแสดงว่าสารละลาย HPMC ทั้ง 2 ชนิดยังคงมีเสถียรภาพเมื่อมีการให้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างในช่วง stress ไม่เกิน 0.01 Pa จึงนำค่า stress 0.01 Pa ไปใช้ในการทดสอบ Frequency sweep test ต่อไป

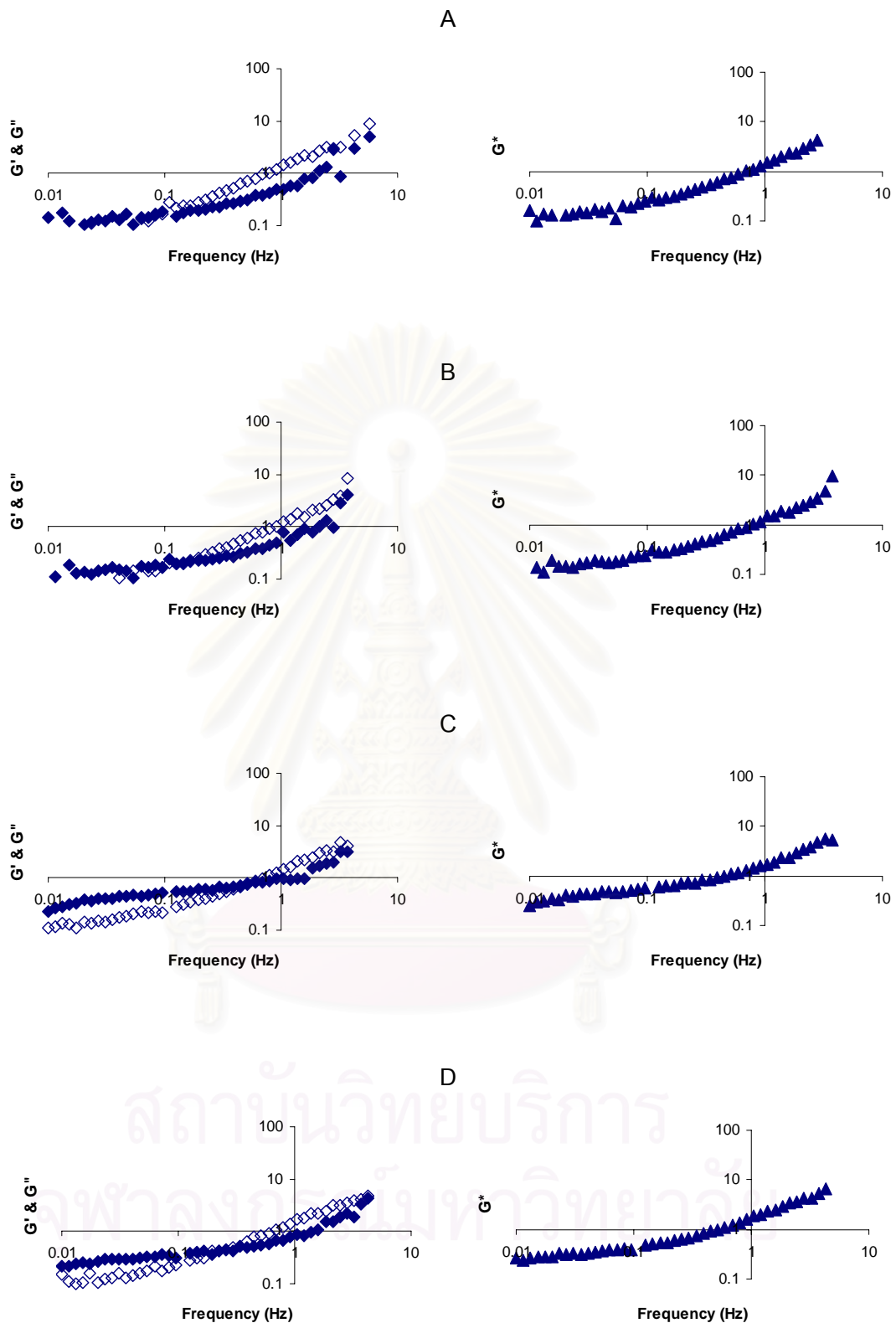


รูปที่ 4.1 กราฟ Amplitude sweep test ของ HPMC (A) E4M และ (B) K4M เข้มข้น 1% w/w สูตรควบคุม เติมเกลือเพียงอย่างเดียว เติมน้ำตาลเพียงอย่างเดียว และเติมทั้งเกลือและน้ำตาล

#### 4.2.2.2 การทดสอบ Frequency sweep test

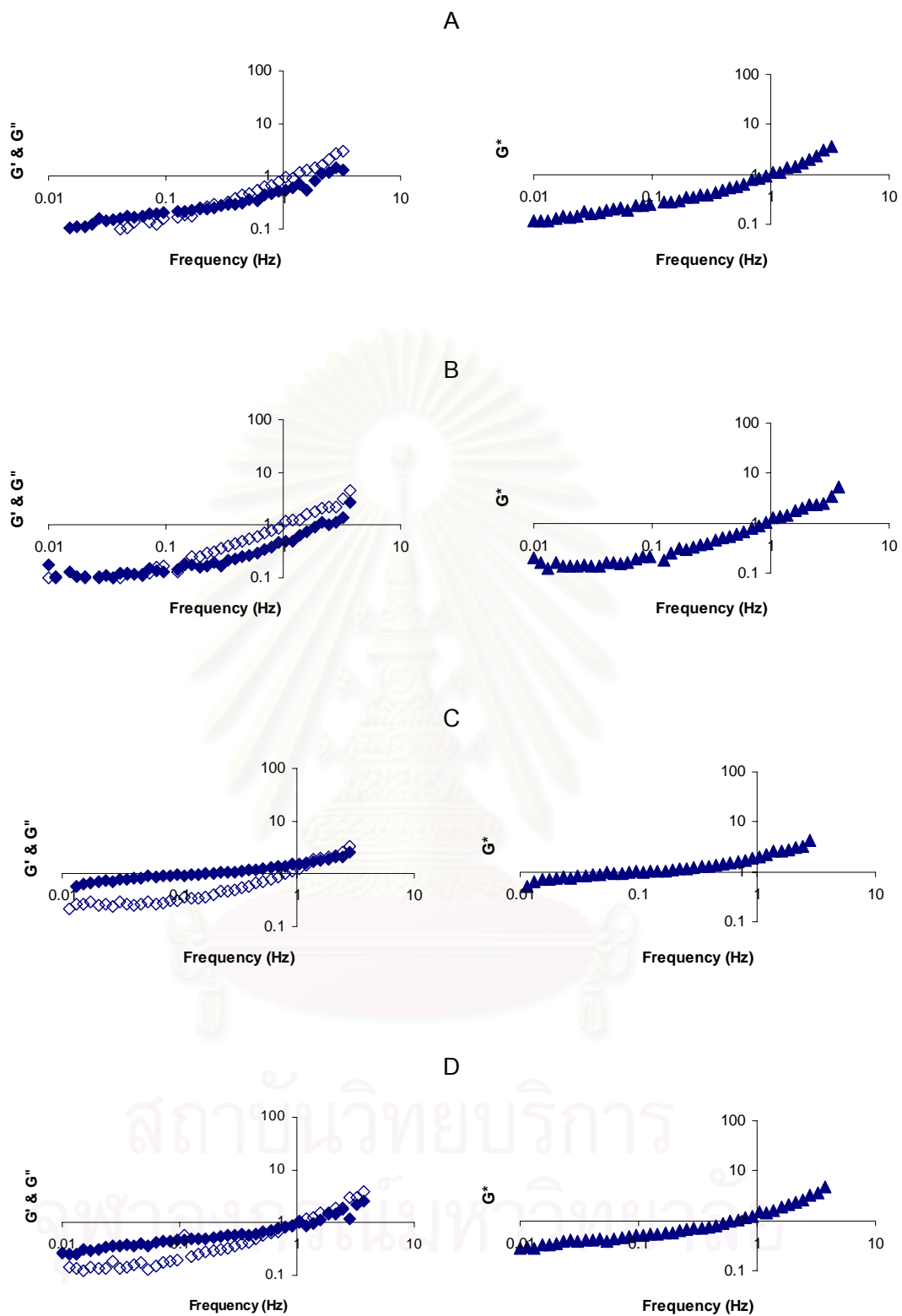
จากการศึกษาผลของชนิดของ HPMC (E4M และ K4M) และการเติมเกลือและน้ำตาลต่อลักษณะการไหลของสารละลาย HPMC ที่ความเข้มข้น 1.00 % w/w พบว่าสารละลาย E4M ควบคุม (รูปที่ 4.2A) และเติมเกลือเพียงอย่างเดียว (รูปที่ 4.2B) จะมี moduli ที่แปรตามความถี่โดยสารละลายจะแสดงค่า  $G'$  ที่สูงกว่าค่า  $G''$  และค่า  $G'$  จะตัดกับค่า  $G''$  ที่ความถี่ประมาณ 0.1 Hz ซึ่งเป็นผลมาจากโครงร่างตาข่าย (network) ที่เกิดขึ้นในสารละลายที่ไม่สามารถรับแรงกระทำและกระจายพลังงาน สารละลายในช่วงนี้จึงแสดงลักษณะเป็น solid-like และสามารถคงรูปร่างได้ดี แต่เมื่อมีความถี่สูงกว่า 0.1 Hz ค่า  $G'$  จะมาตัดกับค่า  $G''$  และค่า  $G'$  จะมีค่าต่ำกว่าค่า  $G''$  ซึ่งเป็นช่วงที่โมเลกุลของ HPMC บางส่วนในโครงร่างตาข่ายที่เกี่ยวข้องกันในตอนแรกเกิดการคลายตัว สารละลายสามารถไหลได้เมื่อมีแรงกระทำ สำหรับสารละลาย E4M ที่เติมน้ำตาลเพียงอย่างเดียว (รูปที่ 4.2C) ค่า  $G'$  จะสูงกว่าค่า  $G''$  ในช่วงความถี่ต่ำและค่า  $G'$  จะตัดกับค่า  $G''$  ที่ความถี่ประมาณ 0.75 Hz จากนั้นค่า  $G'$  ก็จะมีค่าต่ำกว่าค่า  $G''$  ส่วนสารละลาย E4M ที่เติมทั้งเกลือและน้ำตาล (รูปที่ 4.2D) ค่า  $G'$  จะสูงกว่าค่า  $G''$  ในช่วงความถี่ 0.01-0.5 Hz แล้วค่า  $G'$  จะตัดกับค่า  $G''$  ที่ความถี่ประมาณ 0.5 Hz แสดงว่าการเติมทั้งเกลือและน้ำตาลทำให้มี entanglement ลดลงเมื่อเทียบกับสารละลาย E4M ที่เติมน้ำตาลเพียงอย่างเดียว และเมื่อมีความถี่สูงกว่า 0.5 Hz ค่า  $G'$  จะมีค่าต่ำกว่าค่า  $G''$  จากการประเมินลักษณะการไหลของสารละลาย E4M พบว่าการเติมเกลือไม่มีผลต่อลักษณะการไหลแต่การเติมน้ำตาลจะมีผลต่อลักษณะการไหล เพราะน้ำตาลสามารถละลายน้ำได้ดี (1 กรัมต่อน้ำ 0.5 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) (Budavari, 2001) จึงทำให้น้ำอิสระในระบบจึงลดลง สารละลาย HPMC จึงมีความหนืดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้น้ำตาลยังมีผลต่อระดับค่า  $G^*$  ด้วย โดยสารละลาย E4M ที่มีน้ำตาลเป็นส่วนผสมจะมีค่า  $G^*$  สูงกว่าสารละลาย E4M ที่ไม่มีน้ำตาลผสมอยู่ ซึ่งสอดคล้องกับผลของการทดสอบสมบัติทางการไหล (4.2.1 ก) ที่แสดงว่า สารละลายจะมีค่า  $K$  สูงขึ้นเมื่อเติมน้ำตาล

สารละลาย K4M ควบคุม (รูปที่ 4.3A) และเติมเกลือเพียงอย่างเดียว (รูปที่ 4.3B) จะมีค่า  $G'$  จะสูงกว่าค่า  $G''$  ในช่วงความถี่ 0.01-0.1 Hz จากนั้นค่า  $G'$  จะตัดกับค่า  $G''$  สารละลายจะแสดงลักษณะ solid-like และสามารถคงรูปอยู่ได้ แต่เมื่อมีความถี่สูงกว่า 0.1 Hz สารละลายจะแสดงค่า  $G'$  ที่ต่ำกว่าค่า  $G''$  ซึ่งเป็นช่วงที่โมเลกุลบางส่วนในโครงร่างตาข่ายเกิดการคลายตัว สารละลาย K4M ที่เติมน้ำตาลเพียงอย่างเดียว (รูปที่ 4.3C) มีค่า  $G'$  จะสูงกว่าค่า  $G''$  ในช่วงความถี่ต่ำและค่า  $G'$  จะตัดกับค่า  $G''$  ที่ความถี่ประมาณ 1.00 Hz และเมื่อมีความถี่มากกว่า 1.00 Hz ค่า  $G'$  จะมีค่าเท่ากับค่า  $G''$



รูปที่ 4.2 กราฟ Frequency sweep test แสดงค่า  $G'$  ( $\blacklozenge$ ) ค่า  $G''$  ( $\diamond$ ) และค่า  $G^*$  ( $\blacktriangle$ ) ของ E4M (1 % w/w) (A) ควบคุม, (B) เติมเกล็ด 2.5 %, (C) เติมน้ำตาล 2.0 % และ (D) เติมเกล็ด 2.5 % และน้ำตาล 2.0 %





รูปที่ 4.3 กราฟ Frequency sweep test แสดงค่า  $G'$  (◆) ค่า  $G''$  (◇) และค่า  $G^*$  (▲) ของ K4M (1 % w/w) (A) ควบคุม, (B) เติมเกลือ 2.5 %, (C) เติมน้ำตาล 2.0 % และ (D) เติมเกลือ 2.5 % และน้ำตาล 2.0 %

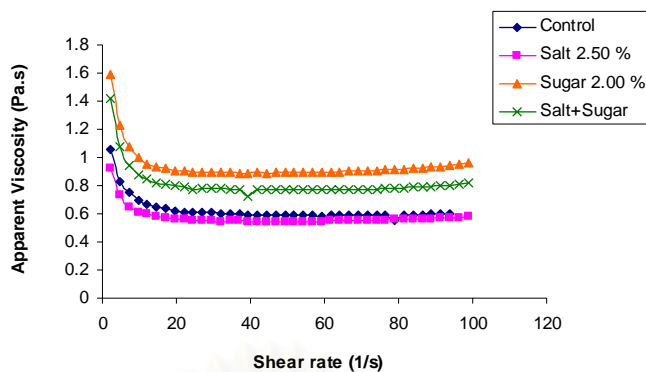
สำหรับสารละลาย K4M ที่เติมทั้งเกลือและน้ำตาล (รูปที่ 4.3D) นั้นในช่วงความถี่ 0.01-0.75 Hz สารละลายจะมี  $G'$  จะสูงกว่าค่า  $G''$  และค่า  $G'$  จะตัดกับค่า  $G''$  ที่ความถี่ประมาณ 0.75 Hz แล้วจากนั้นค่า  $G'$  จะมีค่าเท่ากับค่า  $G''$  จากการประเมินลักษณะการไหลของสารละลาย K4M พบว่า การเติมเกลือไม่มีผลต่อลักษณะการไหลแต่การเติมน้ำตาลจะมีผลต่อลักษณะการไหลเช่นเดียวกับสารละลาย E4M แต่การเติมน้ำตาลจะมีผลต่อลักษณะการไหลและมีผลต่อระดับค่า  $G^*$  โดยสารละลาย K4M ที่มีน้ำตาล เป็นส่วนผสมจะมีค่า  $G^*$  สูงกว่าสารละลาย K4M ที่ไม่มีน้ำตาลผสมอยู่

จะเห็นได้ว่าลักษณะการไหลของสารละลาย HPMC ทั้ง 2 ชนิดจะมีรูปแบบคล้ายกัน แสดงว่าชนิดของ HPMC ที่เลือกศึกษา (E4M และ K4M) ไม่มีผลต่อลักษณะการไหลและน้ำตาลจะมีผลต่อลักษณะการไหลกล่าวคือ สารละลาย HPMC ทั้ง 2 ชนิดที่มีน้ำตาลเป็นส่วนผสมอยู่จะมีการตัดกันของค่า  $G'$  และ  $G''$  ที่ความถี่สูงกว่าและมีค่า  $G^*$  สูงกว่าสารละลาย HPMC ควบคุม สารละลาย HPMC ทั้ง 2 ชนิดที่จะมีลักษณะเป็น solid-like

#### 4.2.3 สมบัติการไหลของแบทเทอร์ที่ไม่ผสม HPMC

แบทเทอร์ที่ประกอบด้วยแป้งข้าว เกลือ 2.50 % w/w และน้ำตาล 2.00 % w/w จัดเป็นของเหลวประเภท non-Newtonian คือของเหลวที่มีความหนืดแปรตาม shear rate ซึ่งสังเกตได้จากกราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่อมี shear rate เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.5 ที่มีพฤติกรรมการไหลแบบ shear thickening เพราะมีค่า flow behavior index (n) มากกว่า 1 เล็กน้อย (ตารางที่ 4.6) แบทเทอร์ทุกสูตรจะมีความหนืดปรากฏ (apparent viscosity) ลดลงเมื่อมี shear rate เพิ่มขึ้น โดยแบทเทอร์ที่เติมเกลือจะมีความหนืดต่ำที่สุด เนื่องจากเกลือสามารถแทรกเข้าไปในเม็ดสตาร์ชได้ (Takahashi และ Wada, 1992; Tulyathan, Laokuldilok และ Jongkaewwattana, 2007) จึงมีผลต่อการดูดซับน้ำของเม็ดสตาร์ช ยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ช และแบทเทอร์ที่เติมน้ำตาลจะมีความหนืดสูงสุด แสดงว่าน้ำตาลจะช่วยเพิ่มความหนืดให้กับแบทเทอร์ ทั้งนี้เนื่องจากน้ำตาลสามารถละลายน้ำได้ดีกว่าแป้งข้าว (Budavari, 2001) ดังนั้นจึงทำให้ระบบมีน้ำอิสระลดลง แบทเทอร์ที่เติมน้ำตาลจึงมีความหนืดสูงขึ้น แต่เมื่อพิจารณาแบทเทอร์ที่เติมทั้งเกลือและน้ำตาลพบว่า แบทเทอร์นี้จะมีค่าความหนืดต่ำกว่าแบทเทอร์ที่เติมน้ำตาล แต่จะมีความหนืดสูงกว่าแบทเทอร์ควบคุม (รูปที่ 4.4)

Xue และ Ngadi (2006) ศึกษาสมบัติการไหลของแบทเทอร์ที่เตรียมจากแป้งผสมจากแป้งข้าวกับแป้งสาลี แป้งข้าวกับแป้งข้าวโพด และแป้งข้าวโพดกับแป้งสาลีในสัดส่วนที่ต่างกัน พบว่า การเติมเกลือจะทำให้แบทเทอร์มีความหนืดลดลง เนื่องจากเกลือจะจับกับน้ำแน่นมากและเพิ่ม water-holding capacity ของแบทเทอร์



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลง shear rate กับความหนืดของ  
 แบทเทอร์ที่ไม่ผสม HPMC

ตารางที่ 4.6 สมบัติทางการไหล\* ของแบทเทอร์ที่ไม่ผสม HPMC ที่ shear rate 1-100 (1/s)  
 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Treatment	Yield stress; $\sigma_0$ (Pa)	K (Pa.s <sup>n</sup> )	n
ควบคุม	2.31 <sup>c</sup> ±0.06	0.42 <sup>b</sup> ±0.02	1.14 <sup>ab</sup> ±0.01
เกลือ 2.5 %	2.16 <sup>c</sup> ±0.01	0.35 <sup>c</sup> ±0.01	1.16 <sup>a</sup> ±0.01
น้ำตาล 2.0 %	3.87 <sup>a</sup> ±0.03	0.48 <sup>a</sup> ±0.02	1.10 <sup>c</sup> ±0.01
เกลือและน้ำตาล	3.43 <sup>b</sup> ±0.06	0.45 <sup>ab</sup> ±0.03	1.13 <sup>b</sup> ±0.00

\* ค่า mean±SD

<sup>a-c</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

ก. ปัจจัยที่มีผลต่อค่า yield stress

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังตารางที่ 4.7 พบว่ามีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างเกลือและน้ำตาลต่อค่า yield stress ของแบทเทอร์ โดยแบทเทอร์ที่เติมทั้งเกลือและน้ำตาลจะมีค่า yield stress เท่ากับ 3.43 Pa และมีค่าแตกต่างจากแบทเทอร์ควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) (ตารางที่ 4.6) โดยแบทเทอร์ควบคุมมีค่า yield stress เท่ากับ 2.31 Pa ผลโดยรวมของการเติมเกลือ 2.50 % และน้ำตาล 2.00 % มีผลทำให้แบทเทอร์มีค่า yield stress เพิ่มขึ้น ส่งผลให้แบทเทอร์สูตรนี้จะมีร้อยละการเกาะติดดีกว่าแบทเทอร์ควบคุม แต่การเติมเกลือเพียงอย่างเดียวกลับทำให้แบทเทอร์มีค่า yield stress ต่ำที่สุด (2.16 Pa) เพราะเกลือทำให้ สตาร์ชของตัวได้อย่าง

จำกัด แบทเทอร์สูตรนี้จึงมีความหนืดต่ำ ส่วนการเติมน้ำตาลทำให้แบทเทอร์มีความหนืดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แบทเทอร์ที่เติมน้ำตาลเพียงอย่างเดียวมีค่า yield stress สูงที่สุด (3.87 Pa)

ข. ปัจจัยที่มีผลต่อค่า consistency index (K)

จากตารางที่ 4.7 พบว่าทั้งเกลือและน้ำตาลมีผลต่อค่า K ของแบทเทอร์ เกลือทำให้ค่า K ( $0.35 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ ) ลดลงและแตกต่างจากแบทเทอร์ควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) (ตารางที่ 4.6) แสดงว่าแบทเทอร์ที่เติมเกลือเพียงอย่างเดียวจะมีความหนืดลดลงด้วย ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนืดปรากฏ (รูปที่ 4.4) ส่วนน้ำตาลทำให้ค่า K ( $0.48 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ ) เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับแบทเทอร์ควบคุม ( $0.42 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ ) ส่งผลให้แบทเทอร์ที่เติมน้ำตาลเพียงอย่างเดียวจึงมีความหนืดเพิ่มขึ้น ส่วนแบทเทอร์ที่เติมทั้งเกลือและน้ำตาลจะมีค่า K เท่ากับ  $0.45 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$  ซึ่งต่ำกว่าแบทเทอร์ที่เติมน้ำตาลเพียงอย่างเดียว ( $p > 0.05$ ) เนื่องจากมีเกลือในระบบด้วย

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของสมบัติการไหลของแบทเทอร์ที่ไม่ผสม HPMC

SOV	df	Yield stress; $\sigma_0$ (Pa)	K ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ )	n
Salt	1	*	*	*
Sugar	1	**	**	**
Salt*Sugar	1	*	NS	NS

\* แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

\*\* แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

NS แสดงถึงไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ค. ปัจจัยที่มีผลต่อค่า flow behavior index (n)

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ตารางที่ 4.7) พบว่าเกลือมีผลต่อค่า n ของแบทเทอร์ โดยเกลือทำให้ค่า n เพิ่มขึ้น แบทเทอร์ที่เติมเกลือเพียงอย่างเดียวจะมีความหนืดที่แปรตาม shear rate มากกว่าแบทเทอร์ควบคุม เนื่องจากมีค่า n เท่ากับ 1.16 ในขณะที่แบทเทอร์ควบคุมมีค่า n เท่ากับ 1.14 (ตารางที่ 4.6) แต่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำตาลก็มีผลต่อค่า n ของแบทเทอร์ แบทเทอร์ที่เติมน้ำตาลเพียงอย่างเดียวจะมีค่า n (1.10) ลดลงเมื่อเทียบกับแบทเทอร์ควบคุม แสดงว่าเมื่อ shear rate เพิ่มขึ้น แบทเทอร์ที่เติมน้ำตาลเพียงอย่างเดียวจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นน้อยกว่าแบทเทอร์ควบคุม แต่เมื่อเติมทั้งเกลือและน้ำตาลทำให้

แบทเทอร์มีค่า  $n$  เท่ากับ 1.13 ซึ่งอยู่ระหว่างแบทเทอร์ที่เติมเกลือเพียงอย่างเดียวกับแบทเทอร์ที่เติมน้ำตาลเพียงอย่างเดียว แต่ไม่แตกต่างจากแบทเทอร์ควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ )

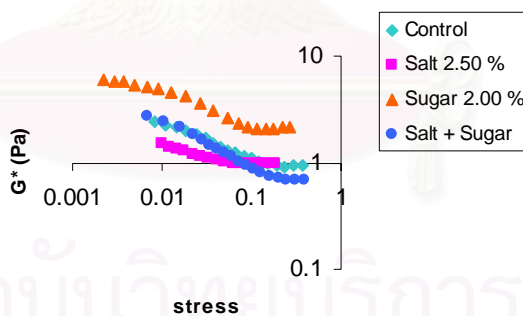
Changalg, Susheelamma และ Tharanathan (1989) รายงานว่าการเติมเกลือ 2.5 % ใน flour dispersion ของทั้ง native flour และ fermented flour จาก black gram มีผลต่อค่า  $K$  และ  $n$  โดย flour dispersion ทั้ง 2 ชนิดจะมีค่า  $K$  ลดลง แต่ค่า  $n$  จะเพิ่มขึ้น

#### 4.2.4 การทดสอบสมบัติ viscoelastic ของแบทเทอร์ที่ไม่ผสม HPMC

ในการทดลองนี้จะศึกษาผลของเกลือ 2.50 % w/w และน้ำตาล 2.00 % w/w ต่อสมบัติทางการไหลของแบทเทอร์แป้งข้าว และผลของการเติม HPMC (E4M) ความเข้มข้น 0.25 และ 0.50 % w/w ต่อสมบัติทางการไหลของแบทเทอร์แป้งข้าว

##### 4.2.4.1 การทดสอบ Amplitude sweep test

จากรูปที่ 4.5 พบว่าแบทเทอร์ทุกสูตรจะมีค่า  $G^*$  คงที่ตลอดช่วง stress 0.001-0.01 Pa และเริ่มลดลงเมื่อ stress มีค่าสูงขึ้น ซึ่งแสดงว่าแบทเทอร์ทุกสูตรจะไม่สูญเสียโครงสร้างเมื่อมีการให้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างในช่วง stress ไม่เกิน 0.01 Pa จึงนำค่า stress 0.01 Pa ไปใช้ในการทดสอบ Frequency sweep test ต่อไป



รูปที่ 4.5 กราฟ Amplitude sweep test ของแบทเทอร์ที่ไม่เติม HPMC สูตรควบคุม เติมเกลือเพียงอย่างเดียว เติมน้ำตาลเพียงอย่างเดียว และเติมทั้งเกลือและน้ำตาล

##### 4.2.4.2 การทดสอบ Frequency sweep test ของแบทเทอร์ที่ไม่ผสม HPMC

จากการศึกษาผลของเกลือและน้ำตาลต่อลักษณะการไหลของแบทเทอร์ พบว่าแบทเทอร์ทุกสูตรจะมีค่า  $G'$  สูงกว่าค่า  $G''$  ที่ความถี่ประมาณ 0.01-6.00 Hz แบทเทอร์จะ

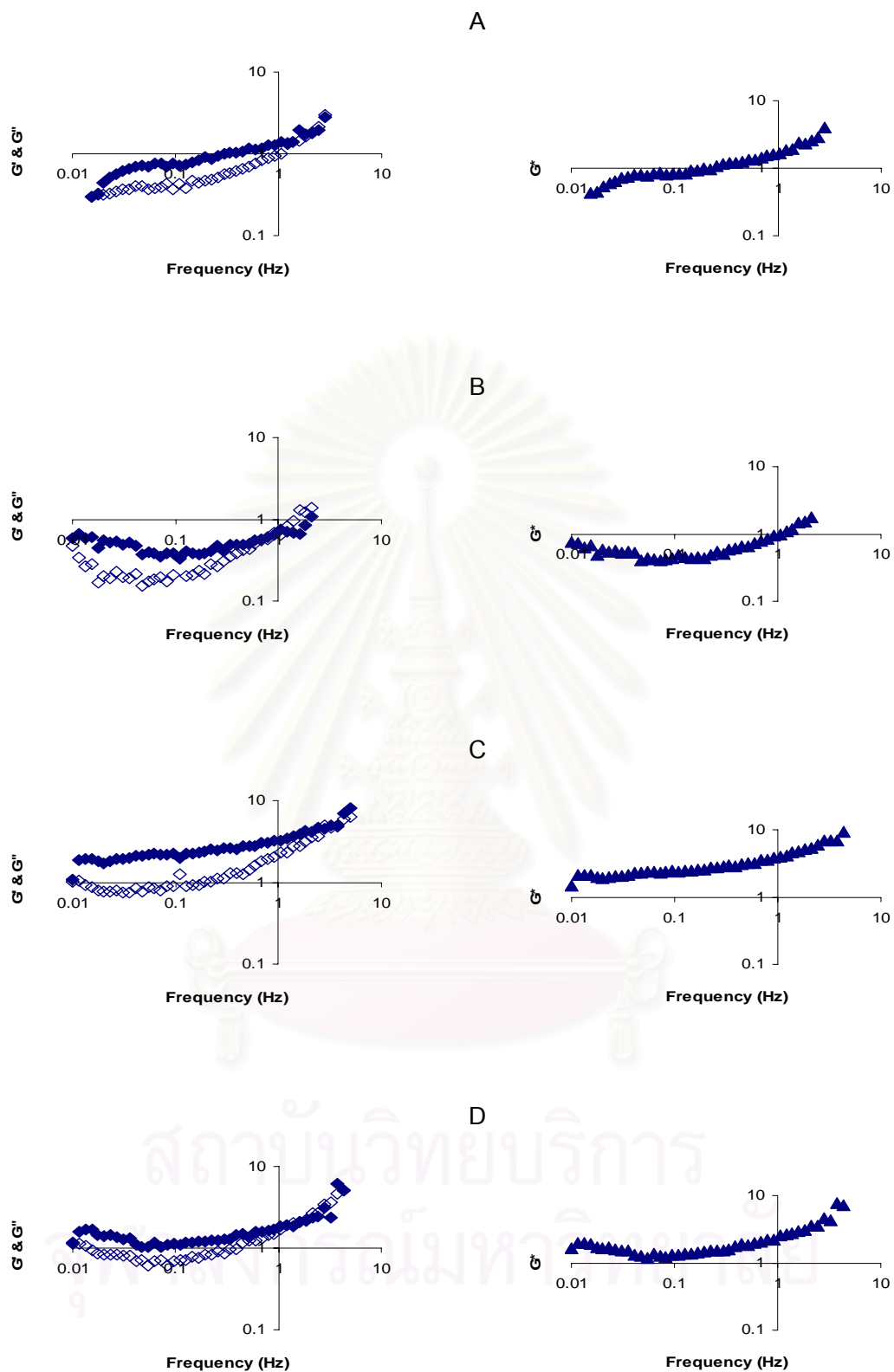
แสดงลักษณะเป็น solid-like จากนั้นค่า  $G'$  จะตัดกับค่า  $G''$  แบบเทอร์สตรควบคุม (รูปที่ 4.6A) มีค่า  $G'$  ตัดกับค่า  $G''$  ที่ความถี่ประมาณ 1.00 Hz แบบเทอร์ที่เติมเกลือเพียงอย่างเดียว (รูปที่ 4.6B) จะมีค่า  $G'$  จะตัดกับค่า  $G''$  ที่ความถี่ประมาณ 0.90 Hz สำหรับแบบเทอร์ที่เติมน้ำตาลเพียงอย่างเดียว (รูปที่ 4.6C) ค่า  $G'$  จะตัดกับค่า  $G''$  ที่ความถี่ประมาณ 6.00 Hz และแบบเทอร์ที่เติมทั้งเกลือและน้ำตาล (รูปที่ 4.6D) มีการตัดกันของค่า  $G'$  กับค่า  $G''$  ที่ความถี่ประมาณ 1.00 Hz แสดงว่าการเติมทั้งเกลือและน้ำตาลทำให้แบบเทอร์มีลักษณะเป็น solid-like น้อยกว่าแบบเทอร์ที่เติมน้ำตาลเพียงอย่างเดียว

จากการประเมินลักษณะการไหลของแบบเทอร์ที่ไม่ผสม HPMC พบว่าเกลือและน้ำตาลมีผลต่อลักษณะการไหล เกลือทำให้มี entanglement ในระบบน้อยลงเมื่อเทียบกับแบบเทอร์สตรควบคุม ส่งผลให้แบบเทอร์ที่เติมเกลือเพียงอย่างเดียวมีค่า  $G'$ ,  $G''$  และ  $G^*$  ต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนืดปรากฏ (ข้อ 4.2.3) ส่วนน้ำตาลทำให้มี entanglement ในระบบมากขึ้นและช่วยเพิ่มความหนืด แบบเทอร์ที่เติมน้ำตาลเพียงอย่างเดียวจึงมีค่า  $G^*$  สูงที่สุด และแบบเทอร์ที่เติมทั้งเกลือและน้ำตาลจะมีค่า  $G'$  และค่า  $G''$  ต่ำกว่าแบบเทอร์ที่เติมน้ำตาลเพียงอย่างเดียว แต่มีค่าสูงกว่าแบบเทอร์ที่เติมเกลือเพียงอย่างเดียว

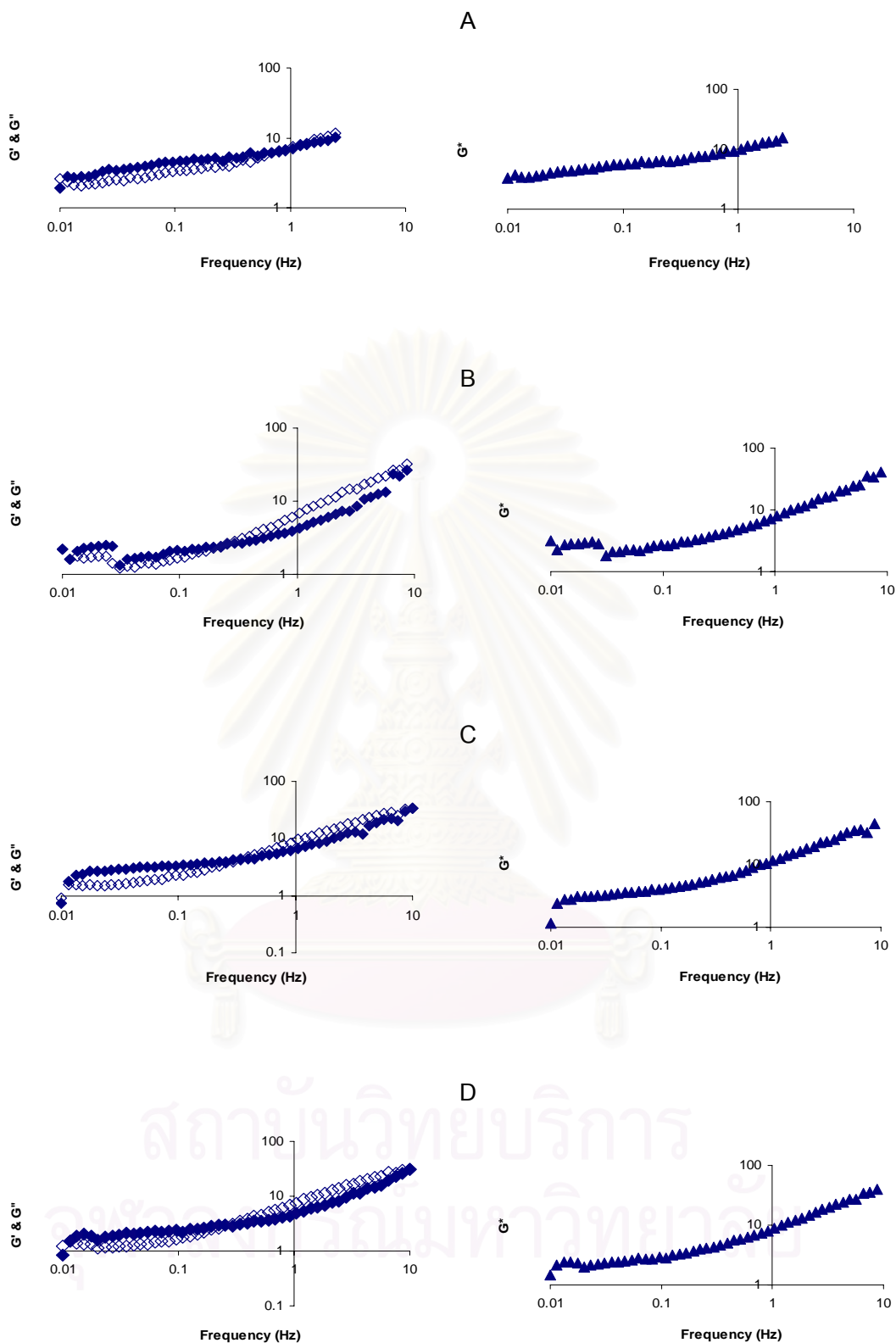
Xue และ Ngadi (2006) รายงานว่าเกลือทำให้แบบเทอร์ที่เตรียมจากแป้งผสมระหว่างแป้งข้าวกับแป้งสาลี แป้งข้าวกับแป้งข้าวโพด และแป้งข้าวโพดกับแป้งสาลีในสัดส่วนที่ต่างกันคือ 0:100 30:70 50:50 70:30 และ 100:0 มีค่า  $G'$  และ  $G''$  ของแบบเทอร์ทุกสูตรลดลง ส่งผลให้แบบเทอร์ที่เติมเกลือมีลักษณะเป็น solid-like น้อยกว่าแบบเทอร์ที่ไม่เติมเกลือ

#### 4.2.4.3 การทดสอบ Frequency sweep test ของแบบเทอร์ที่เติม E4M 0.25 และ 0.50 %

ทดสอบ Frequency sweep test ของแบบเทอร์ที่เติม E4M 0.25 และ 0.50 % ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 0.01-10 Hz และใช้ strain 1 Pa ผลการทดสอบพบว่า แบบเทอร์ทุกสูตรมีลักษณะเป็น solid-like ซึ่งมีค่า  $G'$  สูงกว่าค่า  $G''$  ที่ความถี่ต่ำกว่า 1 Hz (รูปที่ 4.7-4.8) การเติม E4M ทำให้แบบเทอร์มีค่า  $G'$  และค่า  $G''$  สูงกว่าแบบเทอร์ที่ไม่เติม E4M (รูปที่ 4.6) เนื่องจาก E4M ทำหน้าที่เสมือน binding agent ทำให้ระบบดูดซับน้ำได้มาก แบบเทอร์จึงมีความหนืดสูงขึ้น และพบว่าค่า  $G'$  และ  $G''$  นี้จะสูงขึ้นตามความเข้มข้นของ E4M โดยแบบเทอร์ที่เติม E4M 0.25 % ทุกสูตร (รูปที่ 4.7 A-D) มีค่า  $G'$  และ  $G''$  ต่ำกว่าแบบเทอร์ที่เติม E4M 0.50 % ทุกสูตร (รูปที่ 4.8 A-D)

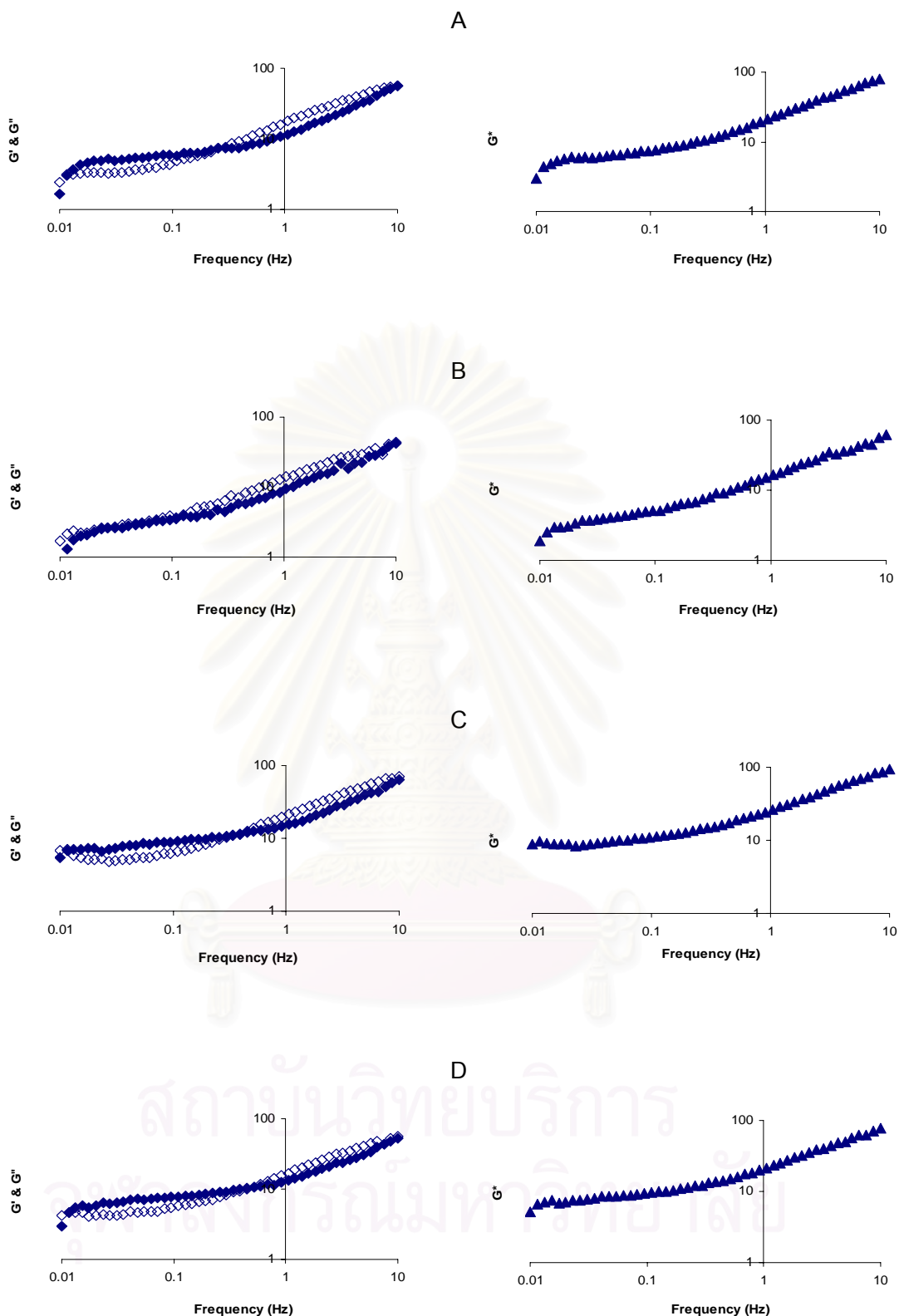


รูปที่ 4.6 กราฟ Frequency sweep test แสดงค่า  $G'$  ( $\blacklozenge$ ) ค่า  $G''$  ( $\diamond$ ) และค่า  $G^*$  ( $\blacktriangle$ ) ของ  
 แบบเทอร์ที่ผสม HPMC (A) ควบคุม, (B) เต็มเกลือ 2.5 %, (C) เต็มน้ำตาล 2.0 %  
 และ (D) เต็มเกลือ 2.5 % และน้ำตาล 2.0 %



รูปที่ 4.7 กราฟ Frequency sweep test แสดงค่า  $G'$  (◆) ค่า  $G''$  (◇) และค่า  $G^*$  (▲) ของแบบเทอร์ที่เติม E4M 0.25 % (A) ควบคุม, (B) เติมเกลือ 2.5 %, (C) เติมน้ำตาล 2.0 % และ (D) เติมเกลือ 2.5 % และน้ำตาล 2.0 %





รูปที่ 4.8 กราฟ Frequency sweep test แสดงค่า  $G'$  (◆) ค่า  $G''$  (◇) และค่า  $G^*$  (▲) ของแบบเทอร์ที่เติม E4M 0.50 % (A) ความคุม, (B) เติมเกลือ 2.5 %, (C) เติมน้ำตาล 2.0 % และ (D) เติมเกลือ 2.5 % และน้ำตาล 2.0 %

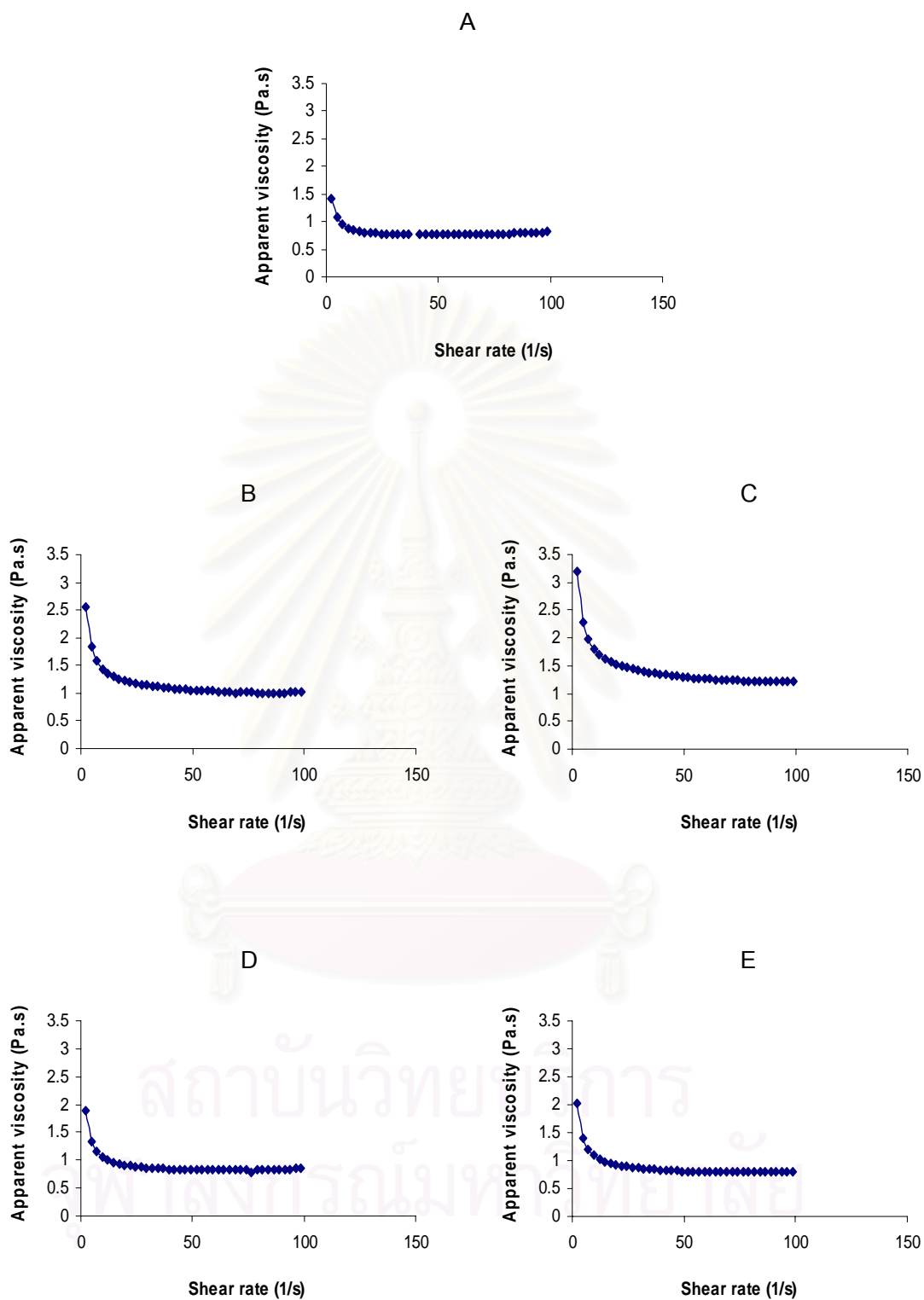
Sivaramakrisnan, Senge และ Chattopadhyay (2004) ศึกษาสมบัติทางการไหลของโดแบ่งข้าวพบว่า โดแบ่งข้าวมี moduli สูงกว่าและแสดงลักษณะ solid-like มากกว่าโดแบ่งสาาลี เพราะแบ่งข้าวดูดซับน้ำได้น้อย การเติม HPMC ทำให้ค่า  $G'$  และ  $G''$  สูงขึ้น เนื่องจาก HPMC ทำหน้าที่เป็น binding agent ส่งผลให้โดแบ่งข้าวดูดซับน้ำได้มากขึ้น

#### 4.2.5 สมบัติการไหลของแบทเทอร์ที่ผสม HPMC

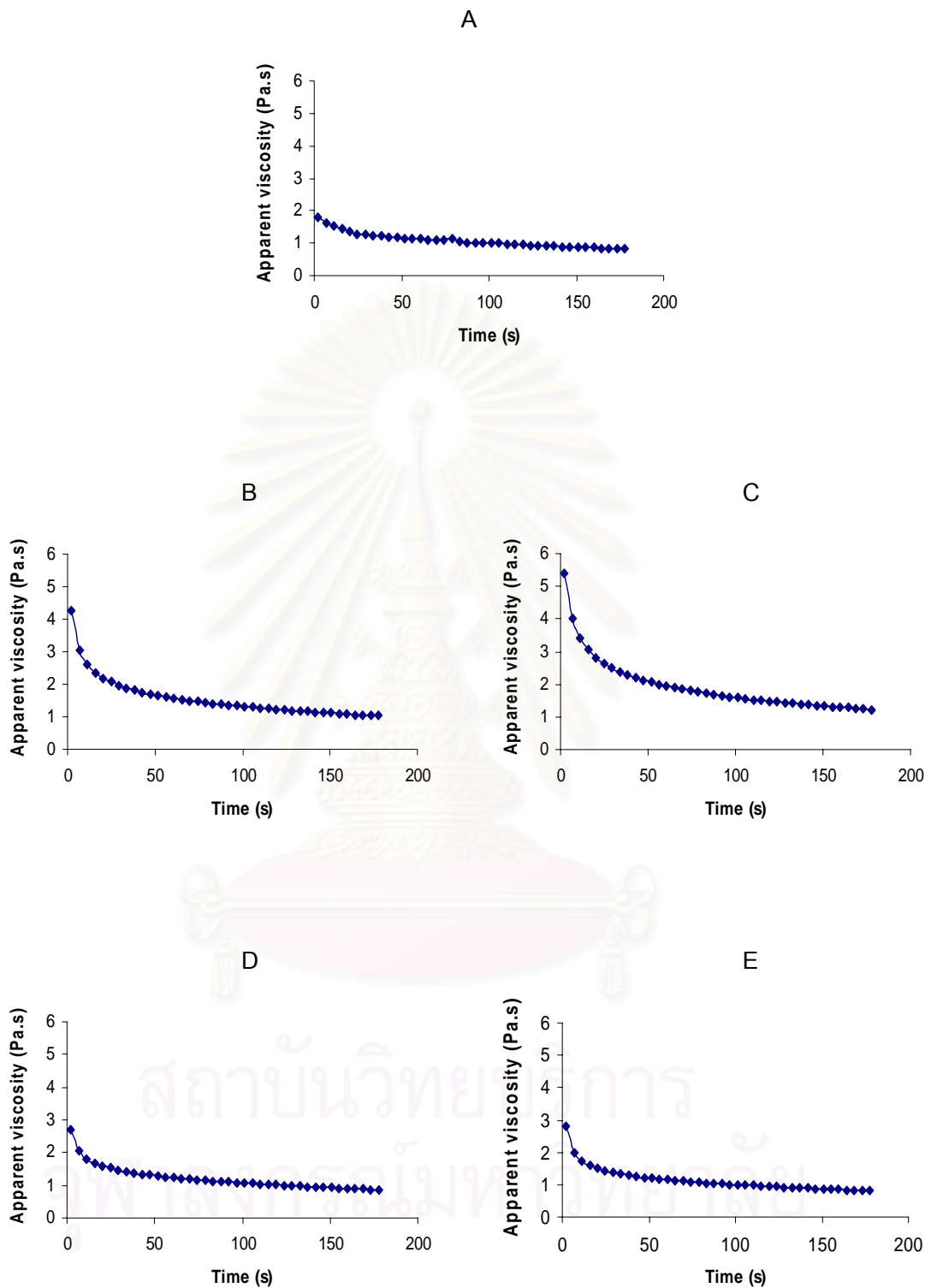
แบทเทอร์ทุกสูตร (ตารางภาคผนวกที่ ค.2) จัดเป็นของเหลวประเภท Non-Newtonian คือของเหลวที่มีความหนืดแปรตาม shear rate ซึ่งสังเกตได้จากกราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่อมี shear rate เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.9 แบทเทอร์ทุกสูตรจะมีความหนืดปรากฏ (apparent viscosity) ลดลงเมื่อมี shear rate เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณา time dependent ของแบทเทอร์ทุกสูตร (รูปที่ 4.10) พบว่าแบทเทอร์ทุกสูตรจะมีลักษณะเป็น thixotropic คือความหนืดของแบทเทอร์จะลดลงเมื่อเวลาในการผสมเพิ่มขึ้น โดยแบทเทอร์ที่เติม E4M 0.50 % (รูปที่ 4.10C) จะมีความหนืดเริ่มต้นสูงสุด รองลงมาคือแบทเทอร์ที่เติม E4M 0.25% (รูปที่ 4.10B), K4M 0.50 % (รูปที่ 4.10C), K4M 0.25% (รูปที่ 4.10D) และควบคุม (รูปที่ 4.10A) ตามลำดับ

Dogan และคณะ (2005) ได้ศึกษาผลของการเติมแป้งข้าวและแป้งถั่วเหลืองต่อสมบัติทางการไหลของแบทเทอร์ที่มีแป้งข้าวสาาลีและแป้งข้าวโพดเป็นส่วนประกอบหลัก พบว่าแบทเทอร์ทุกสูตรจะมีลักษณะเป็น thixotropic โดยแบทเทอร์ที่มีการแทนที่แป้งผสม (แป้งสาาลีและแป้งข้าวโพด) ด้วยแป้งข้าวเจ้าร้อยละ 5 จะมีความหนืดต่ำที่สุด

แบทเทอร์ทุกสูตรจะมีพฤติกรรมการไหลแบบ shear thickening เล็กน้อย เพราะมีค่า flow behavior index ( $n$ ) มากกว่า 1 เล็กน้อย (ตารางภาคผนวกที่ ง.2) ยกเว้นแบทเทอร์ที่มีการเติม E4M เข้มข้น 0.50 % ที่มีพฤติกรรมการไหลแบบ shear thinning เพราะมีค่า  $n$  อยู่ในช่วง 0.95 - 0.97 ซึ่งน้อยกว่า 1 เล็กน้อย การที่แบทเทอร์นี้มีพฤติกรรมการไหลแบบ shear thickening แสดงว่าเมื่อมี shear rate เพิ่มขึ้นแบทเทอร์ก็จะมี ความหนืดเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งพฤติกรรมการไหลแบบนี้มักพบในตัวอย่างแป้งดิบที่มีความเข้มข้นมาก แบทเทอร์ทุกสูตรจะมีปริมาณของแข็งประมาณ 66.67 % จึงทำให้แป้ง, HPMC และส่วนผสมอื่นๆ เรียงตัวกันแน่นทำให้มีช่องว่างระหว่างอนุภาค (interparticular volume) หรือปริมาตรของช่องว่าง (void volume) น้อย ปริมาณน้ำที่มีอยู่เพียงพอที่จะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ได้ แต่เมื่อมีแรงที่ใช้ในการเคลื่อนที่ทำให้ระบบเกิดการ



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลง shear rate กับความหนืดของแบบเทอร์ (A) Control, (B) E4M 0.25 %, (C) E4M 0.50 %, (D) K4M 0.25 % และ (E) K4M 0.50 %



รูปที่ 4.10 กราฟ time dependent ของแบคทีเรีย (A) Control, (B) E4M 0.25 %, (C) E4M 0.50 %, (D) K4M 0.25 % และ (E) K4M 0.50 %

ขยายตัว ปริมาตรช่องว่างเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำจึงไม่เพียงพอสำหรับช่องว่างที่เพิ่มขึ้น จึงเกิดการต้านทานการไหลความหนืดจึงเพิ่มขึ้น (วรารภรณ์ สุวกุล, 2525)

### ก. ปัจจัยที่มีผลต่อค่า yield stress

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังตารางที่ 4.8 พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดและความเข้มข้นของ HPMC โดยการเติม E4M และ K4M มีแนวโน้มทำให้ค่า yield stress ของแบทเทอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งค่า yield stress ที่เพิ่มขึ้นนี้จะแปรผันตามความเข้มข้นของ E4M และ K4M ที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.11) แบทเทอร์ที่เติม E4M 0.25 % จะมีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของค่า yield stress มาก แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ E4M เป็น 0.50 % กลับพบว่าค่า yield stress เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และมีค่า yield stress ไม่แตกต่างจากแบทเทอร์ที่เติม E4M 0.25 % อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) (ตารางที่ 4.9) สำหรับแบทเทอร์ที่เติม K4M จะมีค่า yield stress ที่แปรผันตามความเข้มข้นของ K4M เช่นกัน และมีแนวโน้มว่าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามความเข้มข้นของ K4M แสดงว่า K4M จะมีผลต่อค่า yield stress มากกว่า E4M เมื่อมีความเข้มข้นมากกว่า 0.25 % แต่เมื่อมีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.25 % กลับพบว่า E4M จะมีผลต่อค่า yield stress มากกว่า ซึ่งสังเกตได้จากความชันของเส้นกราฟในรูปที่ 4.11 จะมีความชันมากกว่า เนื่องจาก E4M มีค่า D.S. (1.9) ซึ่งมากกว่า K4M (D.S. 1.4) จึงอาจมีผลทำให้โมเลกุลสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่า ส่งผลให้ในระบบมีน้ำอิสระน้อยลง อนุภาคของเม็ดแป้งจึงเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น แบทเทอร์จึงมีความหนืดเพิ่มขึ้น ค่า yield stress จึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสูงกว่าแบทเทอร์ที่เติม K4M 0.25 % อย่างไรก็ตามทั้ง E4M และ K4M มีส่วนช่วยในการเพิ่มค่า yield stress ของแบทเทอร์ เพราะมีค่า yield stress สูงกว่าแบทเทอร์ควบคุม แบทเทอร์ควบคุมจะมีค่า yield stress ต่ำสุดคือ 2.72 Pa (ตารางที่ 4.9) เนื่องจากแบทเทอร์ควบคุมมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้น้อยจึงมีปริมาณน้ำอิสระในระบบค่อนข้างมาก อนุภาคของเม็ดแป้งจึงเคลื่อนที่ได้ง่าย แบทเทอร์จึงค่อนข้างเหลวและมีความหนืดน้อย แต่เมื่อมีการเติม E4M และ K4M ในแบทเทอร์ด้วย จึงทำให้ปริมาณน้ำอิสระในระบบลดลง เพราะ E4M และ K4M จะมีสมบัติในการดูดซับน้ำได้ดีจึงช่วยเพิ่มความหนืด ค่า yield stress จึงสูงขึ้น ดังนั้นการเติม HPMC น่าจะมีแนวโน้มทำให้ค่าการเกาะติดของแบทเทอร์เพิ่มมากขึ้น

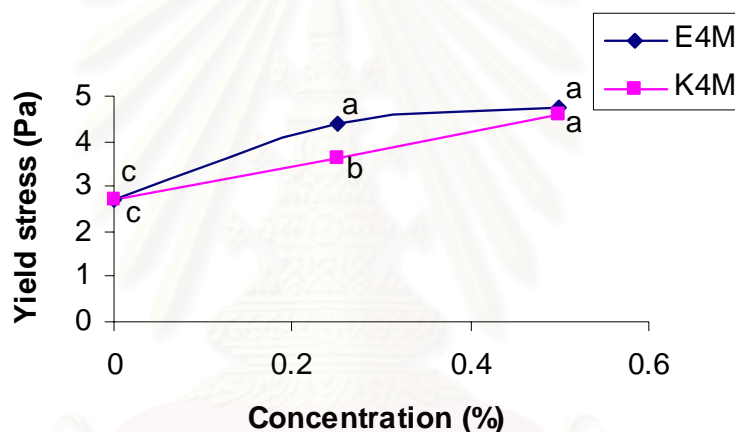
Gencer (1985) อ้างถึงใน Mukprasirt, Heraid และ Flores (2000) ได้กล่าวไว้ว่าค่า yield stress ของสารแขวนลอย polysaccharides จะมีความสัมพันธ์กับพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลและความซับซ้อนของโมเลกุล นอกจากนี้อาจขึ้นกับส่วนผสมอื่นๆ ด้วย

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของสมบัติการไหลของแบทเทอร์ที่ผสม HPMC

SOV	df	Yield stress; $\sigma_0$ (Pa)	K (Pa.s <sup>n</sup> )	n	Hysteresis loop (Pa.s <sup>-1</sup> )
Type	1	*	**	**	**
Concentration	2	**	**	**	**
Type* Concentration	2	*	**	**	**

\* แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

\*\* แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า yield stress ของแบทเทอร์กับความเข้มข้นของ HPMC ที่เพิ่มขึ้น

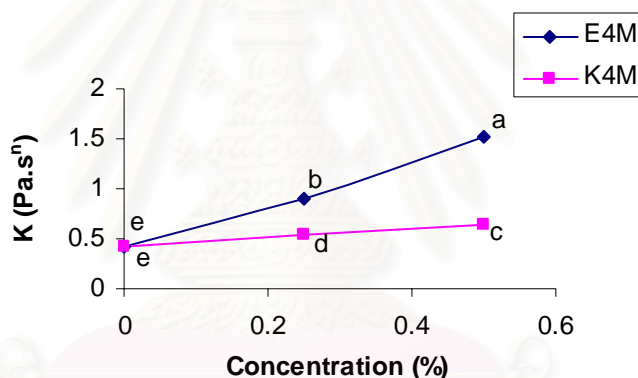
ตารางที่ 4.9 ค่า yield stress ของแบทเทอร์เมื่อความเข้มข้นของ HPMC เพิ่มขึ้น

ความเข้มข้น (%)	Yield stress; $\sigma_0$ (Pa)	
	E4M	K4M
0.00	2.72 <sup>c</sup>	2.72 <sup>c</sup>
0.25	4.37 <sup>a</sup>	3.64 <sup>b</sup>
0.50	4.75 <sup>a</sup>	4.58 <sup>a</sup>

<sup>a-c</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

ข. ปัจจัยที่มีผลต่อค่า consistency index (K)

จากตารางที่ 4.8 พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดและความเข้มข้นของ HPMC ในแบบเทอร์ต่อค่า K แบบเทอร์ที่เติม E4M มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่า K มากกว่า แบบเทอร์ที่เติม K4M (รูปที่ 4.12) ซึ่งสังเกตจากความชันของเส้นกราฟ E4M ที่มีความชันมากกว่า และค่า K ที่เพิ่มขึ้นนี้จะแปรผันตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้แบบเทอร์มีความหนืดสูงขึ้นด้วย แบบเทอร์ที่เติม E4M และ K4M จะมีค่า K แตกต่างจากแบบเทอร์ควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) โดยแบบเทอร์ที่เติม E4M 0.50 % จะมีค่า K มากที่สุดคือ  $1.52 \text{ Pa.s}^n$  (ตารางที่ 4.10) แสดงว่า E4M ช่วยเพิ่มความหนืดของแบบเทอร์ได้มากกว่า K4M เนื่องจากสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่า เพราะมี D.S. สูงกว่านั่นเอง และเนื่องจาก HPMC เป็นพอลิเมอร์ที่ละลายน้ำแล้ว จะเริ่มพองตัวและดูดซับน้ำ และยังกระจายในส่วนผสมอื่นได้ง่ายจึงช่วยปรับความคงตัวและความเสถียรของแบบเทอร์ (Dow Chemical, 2007) ซึ่งสอดคล้องกับค่า yield stress ที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อเติม HPMC



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า consistency index (K) ของแบบเทอร์กับความเข้มข้นของ HPMC ที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.10 ค่า consistency index (K) ของแบบเทอร์เมื่อความเข้มข้นของ HPMC เพิ่มขึ้น

ความเข้มข้น (%)	K (Pa.s <sup>n</sup> )	
	E4M	K4M
0.00	0.43 <sup>e</sup>	0.43 <sup>e</sup>
0.25	0.90 <sup>b</sup>	0.53 <sup>d</sup>
0.50	1.52 <sup>a</sup>	0.64 <sup>c</sup>

<sup>a-d</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

Hsia และคณะ (1992) รายงานว่าค่า  $K$  ของแบทเทอร์จะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นของกัวร์กัม (guar gum) และแซนแทนกัม (xanthan gum) เพิ่มขึ้น

Mukprasirt และคณะ (2000) ศึกษาผลของ MC ต่อสมบัติการไหลของแบทเทอร์แป้งข้าวที่มี แป้งข้าวและออกซีไดซ์สตาร์ช เป็นส่วนประกอบ พบว่า MC จะช่วยเพิ่มความหนืดและค่า  $K$  ของแบทเทอร์ นอกจากนี้การแทนที่แป้งข้าวบางส่วนด้วยออกซีไดซ์สตาร์ชจะลดค่า yield stress เพราะในระบบจะมีน้ำอิสระมากขึ้นเนื่องจากออกซีไดซ์สตาร์ชดูดซับน้ำได้น้อยกว่าแป้ง

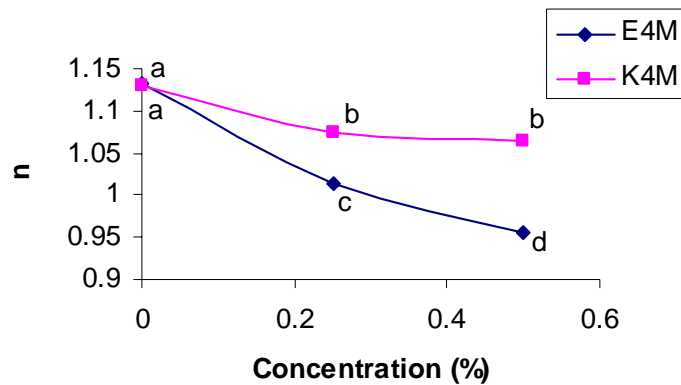
#### ค. ปัจจัยที่มีผลต่อค่า flow behavior index ( $n$ )

จากตารางที่ 4.8 พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดและความเข้มข้นของ HPMC ต่อค่า  $n$  โดย HPMC จะทำให้ค่า  $n$  ลดลงแต่แบทเทอร์ทุกสูตรก็ยังมีพฤติกรรมการไหลแบบ shear thickening (ตารางภาคผนวกที่ ง.2) คือเมื่อมี shear rate เพิ่มขึ้นความหนืดของ แบทเทอร์ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ค่า  $n$  ของแบทเทอร์นี้จะแปรผกผันกับความเข้มข้นของ HPMC คือเมื่อ HPMC มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นค่า  $n$  จะมีค่าลดลง (รูปที่ 4.13) แสดงว่าความหนืดจะแปรตาม shear rate น้อยลง แบทเทอร์ที่เติม E4M จะมีแนวโน้มการลดลงของค่า  $n$  มากกว่าแบทเทอร์ที่เติม K4M สำหรับ แบทเทอร์ที่เติม K4M จะพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 0.25 % เป็น 0.50 % ค่า  $n$  ของแบทเทอร์จะลดลงเพียงเล็กน้อย และค่า  $n$  ของแบทเทอร์ที่เติม K4M 0.50 % จะไม่แตกต่างจากแบทเทอร์ที่เติม K4M 0.25 % อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) แสดงว่าเมื่อเติม K4M ที่ความเข้มข้นมากกว่า 0.25 % จะไม่มีผลต่อค่า  $n$  และแบทเทอร์ที่เติม E4M หรือ K4M จะมีค่า  $n$  ลดลงและแตกต่างจากแบทเทอร์ควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) (ตารางที่ 4.11)

Mukprasit และคณะ (2000) รายงานว่า MC เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อค่า  $n$  ของแบทเทอร์แป้งข้าว เนื่องจาก MC มี methyl group เกาะอยู่กับกับสายโมเลกุลจึงทำให้โมเลกุลของเซลลูโลสไฮดรอกซีเทอร์มีกึ่งมีผลให้เกิด intermolecular association ของโมเลกุลลดลง ทำให้เกิดลักษณะการไหลแบบ shear thinning ส่งผลให้แบทเทอร์แป้งข้าวมีค่า  $n$  ลดลง

Krumel และ Lindsay (1976) รายงานว่า MC ทำให้สารละลายมีลักษณะใสเนียนและแสดงสมบัติแบบ pseudoplastic ที่อุณหภูมิห้อง





รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า flow behavior index (n) ของแบทเทอร์กับความเข้มข้นของ HPMC ที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.11 ค่า flow behavior index (n) ของแบทเทอร์เมื่อความเข้มข้นของ HPMC เพิ่มขึ้น

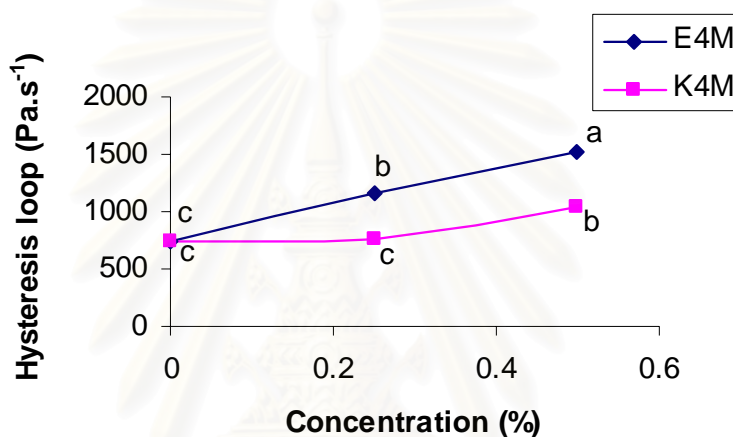
ความเข้มข้น (%)	n	
	E4M	K4M
0.00	1.13 <sup>a</sup>	1.13 <sup>a</sup>
0.25	1.01 <sup>c</sup>	1.07 <sup>b</sup>
0.50	0.95 <sup>d</sup>	1.06 <sup>b</sup>

<sup>a-d</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

#### ง. ปัจจัยที่มีผลต่อค่า hysteresis loop

แบทเทอร์ทุกสูตรเป็นของเหลวประเภท time dependent ประเภท thixotropic (รูปที่ 4.10) แสดงว่าเมื่อผสมแบทเทอร์ทิ้งไว้เป็นระยะเวลาสั้นขึ้นความหนืดของแบทเทอร์จะลดลง แบทเทอร์มีความเหลวมากขึ้น นอกจากนี้ค่า hysteresis loop ยังแสดงถึงการไหลย้อนของแบทเทอร์ในกรณีที่ชุปขึ้นอาหารทิ้งไว้ก่อนทอด จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ตารางที่ 4.8) พบว่ามีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างชนิดและความเข้มข้นของ HPMC ต่อค่า hysteresis loop คือแบทเทอร์ที่เติม E4M หรือ K4M จะมีค่า hysteresis loop ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ E4M และ K4M (รูปที่ 4.14) แสดงว่าเมื่อเติม E4M และ K4M เพิ่มขึ้นแบทเทอร์จะมีลักษณะการไหลย้อนเพิ่มขึ้นเมื่อชุปขึ้นอาหารและตั้งทิ้งไว้ (time dependency เพิ่มขึ้น) แบทเทอร์ที่เติม E4M จะมีลักษณะการไหลย้อนมากกว่า K4M ซึ่งสังเกตได้จากความชันของเส้นกราฟที่มากกว่า (รูปที่ 4.14) เนื่องจาก E4M มีค่า D.S. (1.9) มากกว่า K4M (D.S. 1.4) จึงมีหมู่แทนที่เกาะอยู่กับสายโมเลกุล

ของเซลลูโลส มากกว่าส่งผลให้ intermolecular association ระหว่างสายโมเลกุลเซลลูโลสลดลง เพราะหมู่แทนที่จะขัดขวางการเกิด interaction ของสายโมเลกุล แต่โครงสร้างที่เกิดขึ้นนี้จะสามารถกักเก็บน้ำไว้ภายในได้มาก แบทเทอร์ที่เติม E4M จึงมีลักษณะการไหลย่อยได้มากเมื่อชุปขึ้นอาหารทิ้งไว้ สำหรับแบทเทอร์ที่เติม K4M 0.25 % จะมีค่า hysteresis loop ไม่แตกต่างจากแบทเทอร์ควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ ) (ตารางที่ 4.12) แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ K4M เป็น 0.50 % กลับทำให้ค่า hysteresis loop มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากกว่า แสดงว่าแบทเทอร์ที่เติม K4M เข้มข้นมากกว่า 0.25 % จะมีค่า hysteresis loop ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น การไหลย่อยของแบทเทอร์จะเกิดมากขึ้น



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า hysteresis loop ของแบทเทอร์กับความเข้มข้นของ HPMC ที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.12 ค่า hysteresis loop ของแบทเทอร์เมื่อความเข้มข้นของ HPMC เพิ่มขึ้น

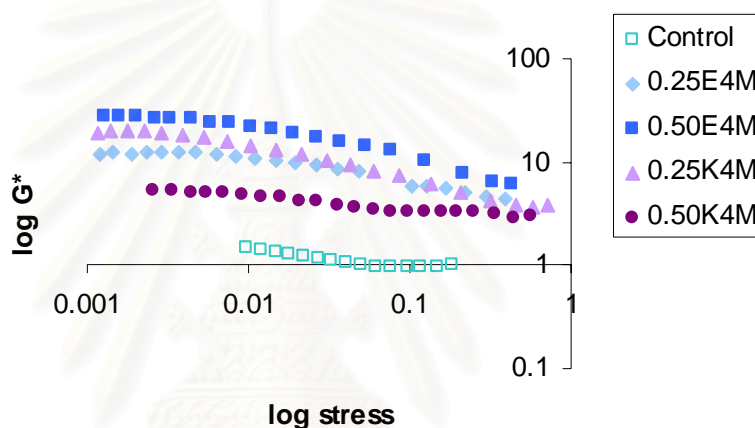
ความเข้มข้น (%)	Hysteresis loop (Pa.s <sup>-1</sup> )	
	E4M	K4M
0.00	745.33 <sup>c</sup>	744.10 <sup>c</sup>
0.25	1162.92 <sup>b</sup>	757.75 <sup>c</sup>
0.50	1522.69 <sup>a</sup>	1031.44 <sup>b</sup>

<sup>a-c</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

#### 4.2.6 การทดสอบสมบัติ viscoelastic ของแบทเทอร์ที่ผสม HPMC

##### 4.2.6.1 การทดสอบ Amplitude sweep test

ในการทดลองนี้เลือกใช้แบทเทอร์ที่มีการแปรชนิดและความเข้มข้นของ HPMC ที่ใช้ดังนี้ E4M และ K4M ความเข้มข้น 0.00, 0.25 และ 0.50 % จากรูปที่ 4.15 พบว่าแบทเทอร์ทุกสูตรจะมีค่า  $G^*$  คงที่ตลอดช่วง stress 0.001-0.01 Pa และเริ่มลดลงเมื่อ stress มีค่าสูงขึ้น ซึ่งแสดงว่าแบทเทอร์ทุกสูตรจะไม่สูญเสียโครงสร้างเมื่อมีการให้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างในช่วง stress ไม่เกิน 0.01 Pa จึงนำค่า stress 0.01 Pa ไปใช้ในการทดสอบ Frequency sweep test ต่อไป



รูปที่ 4.15 กราฟ amplitude sweep test ของแบทเทอร์ที่ผสม HPMC

##### 4.2.6.2 การทดสอบ Frequency sweep test

จากการศึกษาสมบัติ viscoelastic ของแบทเทอร์ที่เติม HPMC โดยแปรชนิดของ HPMC เป็น 2 ชนิดคือ E4M และ K4M แล้วแปรความเข้มข้นของ HPMC เป็น 3 ระดับคือ 0.00, 0.25 และ 0.50 % w/w พบว่าแบทเทอร์ที่เติม E4M 0.25 (รูปที่ 4.16B) และ 0.50 % (รูปที่ 4.16C) และ K4M 0.25 % (รูปที่ 4.16D) จะมีค่า  $G'$  สูงกว่าค่า  $G''$  ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 0.01-0.75 Hz จากนั้นค่า  $G'$  จะตัดกับค่า  $G''$  โดยแบทเทอร์ที่เติม E4M 0.25 % และ K4M 0.25 % ค่า  $G'$  และ  $G''$  จะตัดกันที่ความถี่ประมาณ 0.5 Hz และแบทเทอร์ที่เติม E4M 0.50 % มีค่า  $G'$  ตัดกับค่า  $G''$  ที่ความถี่ประมาณ 0.75 Hz สำหรับแบทเทอร์ที่เติม K4M 0.50 % (รูปที่ 4.16E) จะมีค่า  $G'$  สูงกว่าค่า  $G''$  ค่อนข้างมากในช่วงความถี่ตั้งแต่ 0.01-1 Hz และจะเกิดการตัดกันของค่า  $G'$  และ  $G''$  ที่ความถี่ประมาณ 1 Hz จากนั้นค่า  $G'$  จะเท่ากับค่า  $G''$  เมื่อพิจารณาถึงค่า  $G^*$  พบว่าแบทเทอร์ที่เติม E4M และ K4M ที่ความเข้มข้น 0.25 % (รูปที่ 4.17B และ 4.17D) จะมีค่า  $G^*$  ต่ำกว่าแบทเทอร์

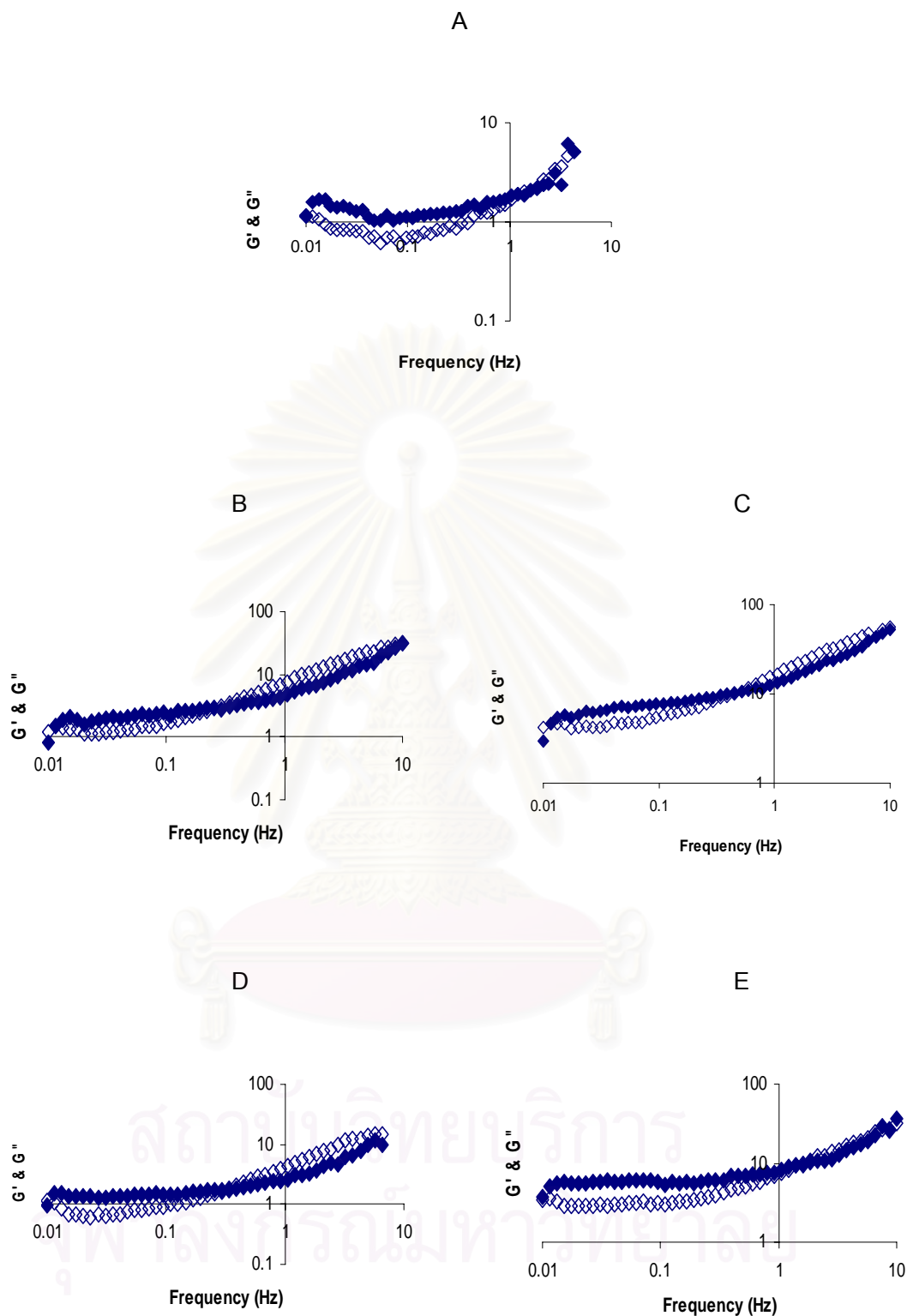
ที่เติม E4M และ K4M ที่ความเข้มข้น 0.50 % (รูปที่ 4.17C และ 4.17E) โดยแบทเทอร์ที่เติม E4M 0.50 % จะมีค่า  $G^*$  สูงสุด และแบทเทอร์ที่เติม K4M 0.25 % จะมีค่า  $G^*$  ต่ำสุด

การเติม HPMC จะทำให้กราฟของค่า  $G'$  และ  $G''$  สูงกว่ากราฟของแบทเทอร์ควบคุม (รูปที่ 4.16A) และมีความหนืดเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาถึงชนิดของ HPMC พบว่าไม่มีผลต่อสมบัติ viscoelastic ของแบทเทอร์ เพราะแบทเทอร์ที่เติม E4M (รูปที่ 4.16B-C) หรือ K4M (รูปที่ 4.17D-E) จะมีกราฟของค่า  $G'$  และ  $G''$  ที่มีลักษณะคล้ายกันคือแบทเทอร์จะมีลักษณะเป็น solid-like ที่สามารถคงรูปร่างได้ ในช่วงความถี่ต่ำกว่า 1 Hz สำหรับความเข้มข้นของ E4M และ K4M นั้นจะมีผลต่อสมบัติ viscoelastic ของแบทเทอร์ โดยเมื่อ E4M และ K4M มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แบทเทอร์มีค่า  $G^*$  สูงขึ้นด้วย (รูปที่ 4.16B-E และ 4.17B-E) และสูงกว่าแบทเทอร์ควบคุม (รูปที่ 4.16A และ 4.17A) เนื่องจากเมื่อ HPMC มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นก็จะเพิ่มจำนวน entanglement ในแบทเทอร์ ทำให้มีช่องว่างระหว่างอนุภาคในระบบลดลง interaction ในระบบจึงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สายโมเลกุลของ HPMC เคลื่อนที่อย่างอิสระได้ยากขึ้น แบทเทอร์จึงมีค่า  $G^*$  สูงขึ้น จากผลการประเมินสมบัติ viscoelastic ของแบทเทอร์ทุกสูตร พบว่าแบทเทอร์ทุกสูตรจะแสดงลักษณะเป็น solid-like ที่ช่วงความถี่ต่ำกว่า 1 Hz

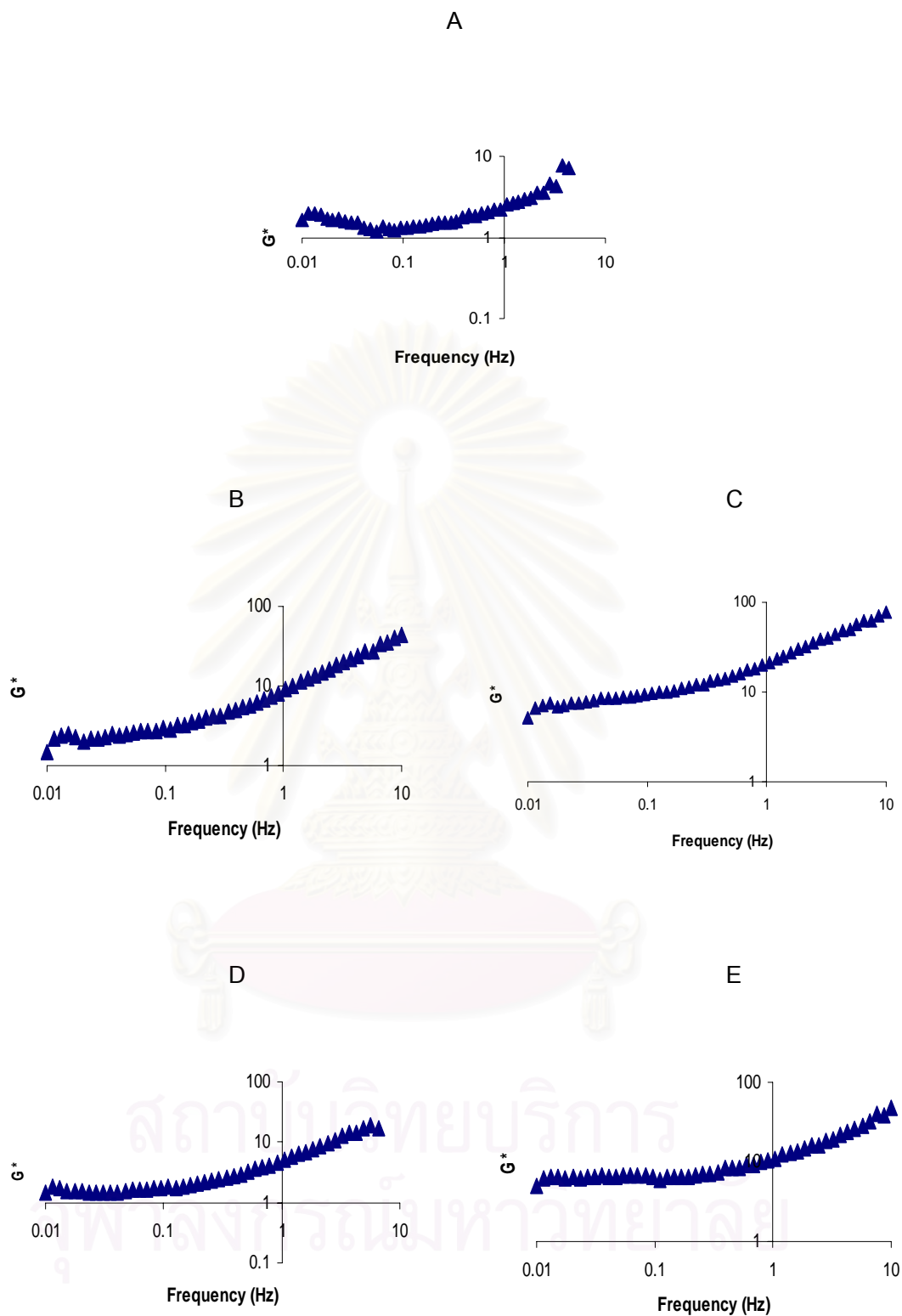
Sanz และคณะ (2005) ศึกษาผลของเมทิลเซลลูโลส (methylcellulose; MC) ต่อสมบัติทางการไหลของแบทเทอร์ที่มีแป้งสาลี สตาร์ชแป้งสาลี เป็นส่วนผสมหลัก ที่อุณหภูมิ 15 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิทั้ง 2 ค่า  $G'$  และค่า  $G''$  จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ MC แต่ความเข้มข้นของ MC (1-2 %) จะไม่มีผลต่อสมบัติ viscoelastic behavior การเปลี่ยนอุณหภูมิจาก 15 องศาเซลเซียสเป็น 60 องศาเซลเซียส แบทเทอร์จะเปลี่ยนจากลักษณะ fluid-like ไปเป็น soft gel-like โดยมีค่า  $G'$  สูงกว่า  $G''$

#### 4.2.7 ดรรชนีการดูดซับน้ำ (Water Absorption Index; WAI) ของแป้งข้าวที่ผสม HPMC

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงในตารางที่ 4.13 พบว่าความเข้มข้นของ HPMC (0.00 – 0.50 % w/w) มีผลต่อ WAI ของแป้งข้าว โดย WAI ของแป้งข้าวจะแปรตามความเข้มข้นของ E4M และ K4M แป้งข้าวที่เติม E4M หรือ K4M จึงมี WAI (2.21-2.26 กรัมต่อกรัมแป้งแห้ง) มากกว่าแป้งข้าวควบคุม (1.78-1.81 กรัมต่อกรัมแป้งแห้ง) ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ ง.3 การเติม E4M และ K4M มีส่วนช่วยในการดูดซับน้ำของแป้งข้าว เนื่องจากทั้ง E4M และ K4M เป็น



รูปที่ 4.16 กราฟ Frequency sweep test แสดงค่า  $G'$  ( $\blacklozenge$ ) และค่า  $G''$  ( $\diamond$ ) ของแบทเทอร์ที่ผสม HPMC (A) Control, (B) E4M 0.25 %, (C) E4M 0.50 %, (D) K4M 0.25 % และ (E) K4M 0.50 %



รูปที่ 4.17 กราฟ Frequency sweep test แสดงค่า  $G^*$  ( $\blacktriangle$ ) ของแบทเทอร์ที่ผสม HPMC (A) Control, (B) E4M 0.25 %, (C) E4M 0.50 %, (D) K4M 0.25 % และ (E) K4M 0.50 %

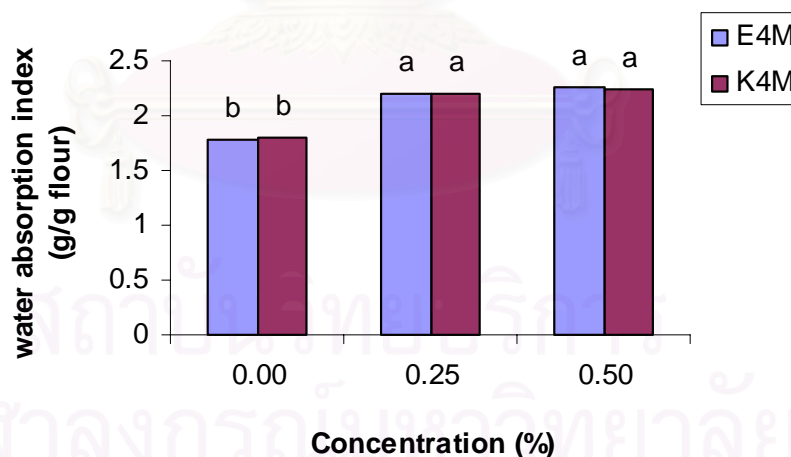
เซลลูโลสอีเทอร์ชนิดหนึ่งที่มีการแทนที่ด้วย methoxyl และ hydroxylpropyl group บนสายโมเลกุลจึงทำให้โมเลกุลมีกิ่งก้านมากขึ้น โมเลกุลจึงดูดซับน้ำได้มากขึ้น เมื่อผสมกับแป้งข้าวจึงส่งผลให้แป้งข้าวมี WAI เพิ่มขึ้น โดยแป้งข้าวที่เติม E4M 0.50 % จะมี WAI มากที่สุดคือ 2.26 กรัมต่อกรัมแป้งแห้ง (รูปที่ 4.18) เนื่องจาก E4M จะมีการแทนที่ (D.S.) เท่ากับ 1.9 จึงมี methoxyl และ hydroxylpropyl group เกาะอยู่กับสายโมเลกุลมากกว่า K4M (D.S. 1.4) โครงสร้างโมเลกุลของ E4M จะสามารถดูดซับน้ำได้ดี แป้งข้าวที่เติม E4M จึงมี WAI สูง

ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของดรรชนีการดูดซับน้ำของแป้งข้าวที่ผสม HPMC

SOV	df	WAI
Type	1	NS
Concentration	2	**
Type* Concentration	2	NS

\*\* แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

NS แสดงถึงไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %



รูปที่ 4.18 ดรรชนีการดูดซับน้ำของแป้งข้าวที่ผสม HPMC

#### 4.2.8 ร้อยละความชื้นและน้ำมันดูดซับในก้อนแบทเทอร์ที่ผสม HPMC หลังทอด

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงในตารางที่ 4.14 พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดและความเข้มข้นของ HPMC ต่อร้อยละความชื้นในก้อนแบทเทอร์หลังทอด ก้อนแบทเทอร์หลัง

ทอดที่เติม E4M และ K4M จะมีร้อยละความชื้นแตกต่างจากก้อนแบทเทอร์ควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) (ตารางที่ 4.15) คือมีร้อยละความชื้นมากกว่าก้อนแบทเทอร์ควบคุมเนื่องจาก E4M และ K4M มีสมบัติ thermal gelation ที่ดีจึงช่วยควบคุมการสูญเสียความชื้นและร้อยละความชื้นในก้อนแบทเทอร์หลังทอดนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ E4M และ K4M เพิ่มขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากกราฟในรูปที่ 4.19 ที่พบว่าเส้นกราฟจะมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยก้อนแบทเทอร์ที่เติม E4M จะมีร้อยละความชื้นมากกว่าก้อนแบทเทอร์ที่เติม K4M เนื่องจาก E4M มี D.S. มากกว่า K4M จึงทำให้เซลล์โอสตัดแปรชนิดนี้สามารถดูดซับน้ำได้มากกว่านั่นเอง นอกจากนี้ยังพบว่าก้อนแบทเทอร์หลังทอดที่เติม K4M 0.50 % จะมีร้อยละความชื้นไม่แตกต่างจากก้อนแบทเทอร์หลังทอดที่เติม E4M 0.25 % ( $p > 0.05$ ) (ตารางที่ 4.15) แสดงว่า E4M มีประสิทธิภาพในการควบคุมการสูญเสียความชื้นของแบทเทอร์ได้ดีกว่า K4M

ตารางที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของร้อยละความชื้นและน้ำมันดูดซับในก้อนแบทเทอร์ที่ผสม HPMC หลังทอด

SOV	df	Moisture	Oil absorbed
Type	1	**	NS
Concentration	2	**	**
Type* Concentration	2	**	*

\* แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

\*\* แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

NS แสดงถึงไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

เมื่อพิจารณาถึงการดูดซับน้ำมันของก้อนแบทเทอร์หลังทอด พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดและความเข้มข้นของ HPMC ดังแสดงในตารางที่ 4.14 ร้อยละน้ำมันดูดซับในก้อนแบทเทอร์หลังทอดจะลดลง เมื่อ E4M และ K4M มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.20) และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับก้อนแบทเทอร์หลังทอดควบคุม ( $p \leq 0.05$ ) (ตารางที่ 4.16) การเติม E4M จะสามารถช่วยลดการดูดซับน้ำมันของก้อนแบทเทอร์หลังทอดได้ดีกว่า K4M (รูปที่ 4.20) เส้นกราฟของ E4M มีความชันมากกว่า ก้อนแบทเทอร์หลังทอดที่เติม E4M 0.25 % จะมีร้อยละน้ำมันดูดซับไม่แตกต่างจากก้อนแบทเทอร์หลังทอดที่เติม K4M 0.25 % อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) (ตารางที่ 4.16) แต่เมื่อ E4M มีความเข้มข้นเป็น 0.50 % ร้อยละ

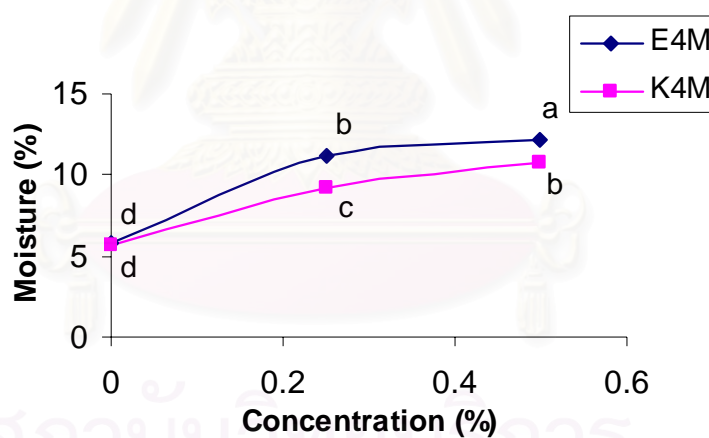


น้ำมันดูดซับในก้อนแบทเทอร์หลังทอดจะลดลงมากกว่าก้อนแบทเทอร์หลังทอดที่เติม K4M 0.50 % โดยก้อนแบทเทอร์หลังทอดที่เติม E4M 0.50 % และก้อนแบทเทอร์หลังทอดที่เติม K4M 0.50 % จะมีร้อยละน้ำมันดูดซับที่ลดลงคิดเป็นร้อยละ 44.64 และ 33.39 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.15 ร้อยละความชื้นในก้อนแบทเทอร์หลังทอดเมื่อความเข้มข้นของ HPMC เพิ่มขึ้น

ความเข้มข้น (%)	ร้อยละความชื้น	
	E4M	K4M
0.00	5.77 <sup>d</sup>	5.73 <sup>d</sup>
0.25	11.17 <sup>b</sup>	9.15 <sup>c</sup>
0.50	12.12 <sup>a</sup>	10.79 <sup>b</sup>

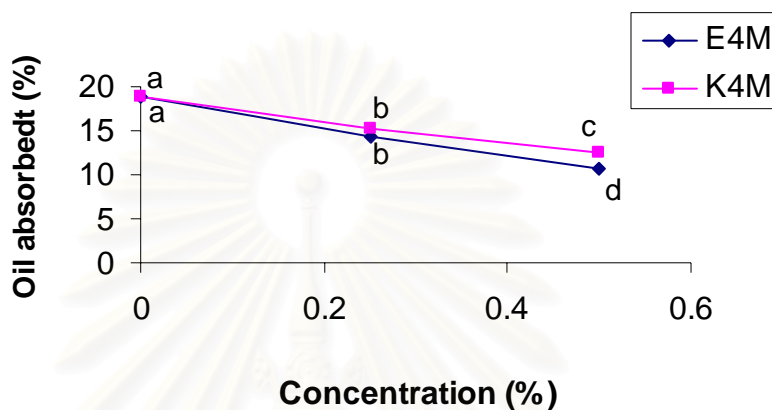
<sup>a-d</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p≤0.05)



รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความชื้นในก้อนแบทเทอร์หลังทอดกับความเข้มข้นของ HPMC ที่เพิ่มขึ้น

Priya และคณะ (1996) ศึกษาผลของ CMC และ HPMC ต่อการลดการอมน้ำมันใน boondis ทอด ซึ่งเป็นอาหารทอดชนิดหนึ่งของประเทศอินเดียที่ผลิตจากแป้ง bengal gram พบว่าเมื่อเติม CMC เข้มข้น 2 % และ HPMC เข้มข้น 1 % จะสามารถลดปริมาณน้ำมันได้ร้อยละ 26.2 และ 22.7 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับสูตรควบคุมที่มีปริมาณน้ำมันร้อยละ 41.16

จากผลการทดลองจะพบความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความชื้นกับการดูดซับน้ำมัน การเติม E4M และ K4M ในแบทเทอร์จะทำให้ก้อนแบทเทอร์หลังทอดมีการดูดซับน้ำมันน้อยลง โดย E4M และ K4M จะช่วยเพิ่มความสามารถในการกักเก็บความชื้นของแบทเทอร์ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding) ระหว่างโมเลกุลน้ำที่อยู่ในแบทเทอร์กับกัม (Akdeniz, Sahin และ Sumnu, 2006)



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละน้ำมันดูดซับในก้อนแบทเทอร์หลังทอดกับความเข้มข้นของ HPMC ที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.16 ร้อยละน้ำมันดูดซับ\* ในก้อนแบทเทอร์หลังทอดเมื่อความเข้มข้นของ HPMC เพิ่มขึ้น

ความเข้มข้น (%)	ร้อยละน้ำมันดูดซับ	
	E4M	K4M
0.00	18.84 <sup>a</sup>	18.84 <sup>a</sup>
0.25	14.27 <sup>b</sup>	15.15 <sup>b</sup>
0.50	10.43 <sup>d</sup>	12.55 <sup>c</sup>

\* น้ำหนักแห้ง (Dry basis)

<sup>a-c</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p≤0.05)

#### 4.2.9 ลักษณะเนื้อสัมผัสของก้อนแบทเทอร์หลังทอด

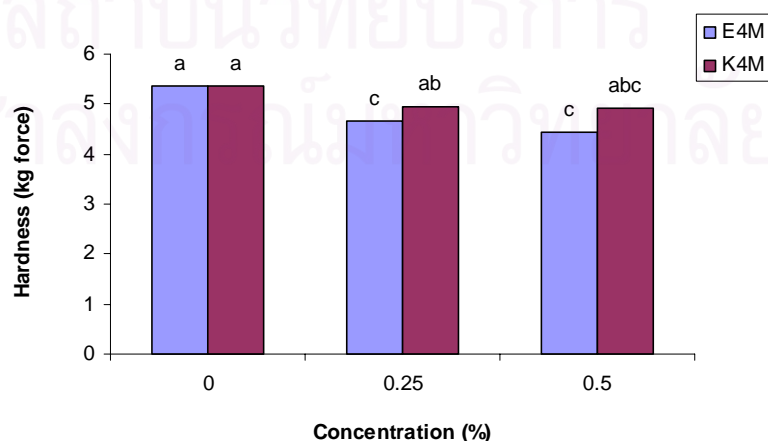
ลักษณะเนื้อสัมผัสของก้อนแบทเทอร์หลังทอดจะประเมินด้วยความแข็ง (hardness) จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ตารางที่ 4.17) พบว่าความเข้มข้นของ HPMC มีผลต่อความแข็งของก้อนแบทเทอร์หลังทอด โดยก้อนแบทเทอร์ที่ผสม E4M หรือ K4M หลังทอด จะมีความแข็งต่ำกว่าก้อนแบทเทอร์ควบคุมหลังทอด (ตารางภาคผนวกที่ ง.5 และรูปที่ 4.21) การเพิ่มความเข้มข้นของ HPMC จะส่งผลให้ความแข็งของก้อนแบทเทอร์หลังทอดลดลง น่าจะเป็นผลจาก HPMC ช่วยลดการสูญเสียความชื้นขณะทอดจึงทำให้ภายในก้อนแบทเทอร์มีความชื้นสูง นอกจากนี้ยังช่วยให้ก้อนแบทเทอร์มีความพองตัวได้มากกว่าก้อนแบทเทอร์ควบคุมด้วย ดังนั้นถ้านำแบทเทอร์แป้งข้าวที่เติม E4M หรือ K4M ไปชุปกับตัวอย่างอาหารควรเลือกใช้ความเข้มข้นของ E4M หรือ K4M ในปริมาณที่เหมาะสม เพราะถ้าใช้มากเกินไปอาจทำให้ผลิตภัณฑ์นั้นพองตัวและแตกได้

ตารางที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของลักษณะเนื้อสัมผัสของก้อนแบทเทอร์ที่ผสม HPMC หลังทอด

SOV	df	Hardness
Type	1	NS
Concentration	2	*
Type* Concentration	2	NS

\* แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

NS แสดงถึงไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %



รูปที่ 4.21 ความแข็ง (hardness) ของก้อนแบทเทอร์ที่ผสม HPMC หลังทอด

### 4.3 คุณภาพของผลิตภัณฑ์แคโรทซูปแป้งทอด

การทดลองในส่วนนี้ได้ใช้แบทเทอร์แป้งข้าวที่ผสม HPMC ทั้ง 5 สูตร (ตารางภาคผนวก ค. 2) มาใช้ในการซูปขึ้นแคโรท วิเคราะห์คุณภาพของแคโรทซูปแป้งทอดดังรายละเอียดดังนี้

#### 4.3.1 ร้อยละการเกาะติดของแบทเทอร์ในผลิตภัณฑ์แคโรทซูปแป้งทอด

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4.18 พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดและความเข้มข้นของ HPMC ต่อร้อยละการเกาะติด (coating pick up) บนขึ้นแคโรท โดยการเติม E4M และ K4M มีแนวโน้มทำให้แบทเทอร์มีร้อยละการเกาะติดเพิ่มขึ้นและจะแปรผันตามความเข้มข้นของ E4M และ K4M (รูปที่ 4.22) แบทเทอร์ที่เติม E4M ที่ความเข้มข้นต่างกันจะมีร้อยละการเกาะติดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) โดยแบทเทอร์ที่เติม E4M 0.50 % จะมีร้อยละการเกาะติดมากที่สุด คือ 62.92 % (ตารางที่ 4.20) ส่วนแบทเทอร์ที่เติม K4M ที่ความเข้มข้นต่างกันจะมีร้อยละการเกาะติดที่มีแนวโน้มคล้ายกันกับแบทเทอร์ที่เติม E4M แต่ความชันของเส้นกราฟจะต่ำกว่า (รูปที่ 4.22) ที่เป็นเช่นนั้นเพราะ E4M มีค่า D.S. มากกว่าส่งผลให้แบทเทอร์มีความหนืดมากกว่า เมื่อนำขึ้นแคโรทลงไปซูปแบทเทอร์จึงเกาะติดกับขึ้นแคโรทได้ดีกว่านั่นเอง และเมื่อพิจารณาผลของค่า yield stress ของแบทเทอร์ (ข้อ 4.2.5ก) พบว่าร้อยละการเกาะติดของแบทเทอร์จะสอดคล้องกับค่า yield stress กล่าวคือเมื่อแบทเทอร์มีค่า yield stress สูงก็จะมีร้อยละการเกาะติดสูงขึ้นด้วย

ตารางที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของร้อยละการเกาะติดของแบทเทอร์

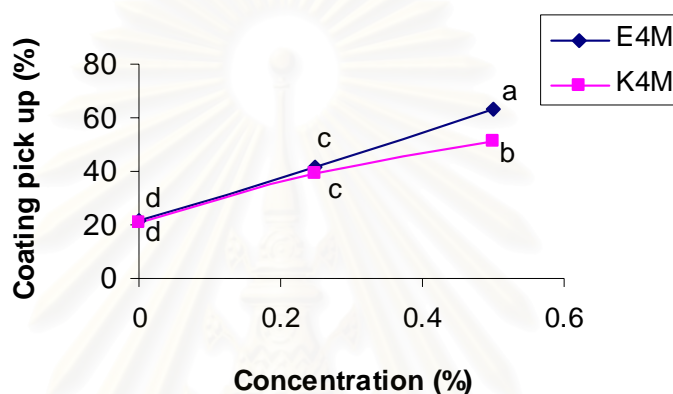
SOV	df	Coating pick up
Type	1	*
Concentration	2	**
Type* Concentration	2	*

\* แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

\*\* แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

เมื่อพิจารณาร้อยละการเกาะติดของแบทเทอร์หลังซูปขึ้นแคโรททิ้งไว้ 1 นาที พบว่า แบทเทอร์ทุกสูตรจะมีร้อยละการเกาะติดลดลง (ตารางภาคผนวกที่ ง.6) แบทเทอร์ที่เติม E4M 0.50 % จะมีร้อยละการเกาะติดที่ลดลง ( % reduction) มากที่สุดคือ 38.60 % เนื่องจาก

แบทเทอร์สูตรนี้มีความหนืดมากจึงทำให้แบทเทอร์เกาะติดกับชิ้นแครอทได้มากในตอนแรก แต่เมื่อตั้งทิ้งไว้แบทเทอร์ซึ่งมีน้ำหนักมากจะถูกแรงโน้มถ่วงของโลกดึงดูดทำให้เกิดการไหลย้อนของแบทเทอร์ส่วนเกิน ยิ่งแบทเทอร์มีปริมาณมากการไหลย้อนก็จะมีมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลของค่า hysteresis loop ของแบทเทอร์ (ตารางที่ 4.12) ที่พบว่า แบทเทอร์ที่มีค่า hysteresis loop มากจะเกิดการไหลย้อนมาก โดยแบทเทอร์ที่เติม E4M 0.50 % ซึ่งมีค่า hysteresis loop มากที่สุด ( $1522 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ ) ก็จะมีร้อยละการเกาะติดของแบทเทอร์หลังชุบชิ้นแครอทที่ทิ้งไว้ลดลงมากเช่นกัน



รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกาะติดของแบทเทอร์กับความเข้มข้นของ HPMC ที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.19 ร้อยละการเกาะติดของแบทเทอร์เมื่อความเข้มข้นของ HPMC เพิ่มขึ้น

ความเข้มข้น (%)	ร้อยละการเกาะติด (%)	
	E4M	K4M
0.00	21.23 <sup>d</sup>	20.56 <sup>d</sup>
0.25	41.67 <sup>c</sup>	39.27 <sup>c</sup>
0.50	62.82 <sup>a</sup>	51.02 <sup>b</sup>

<sup>a-d</sup> ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

#### 4.3.2 ร้อยละความชื้นและน้ำมันดูดซับในเปลือกแป้งหลังทอด

นำเปลือกแป้งหลังทอดที่ได้จากการแกะออกจากชิ้นแครอทมาวิเคราะห์ร้อยละความชื้นและน้ำมันดูดซับ พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดและความเข้มข้นของ HPMC ต่อร้อยละความชื้นในเปลือกแป้งหลังทอด (ตารางที่ 4.20) เปลือกแป้งที่มี E4M และ K4M ผสมอยู่จะมีร้อยละความชื้นเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ E4M และ K4M (รูปที่ 4.23) แต่เส้นกราฟของ E4M จะมีความชันมากกว่าเส้นกราฟของ K4M เนื่องจาก E4M มีค่า D.S. สูงกว่านั่นเอง และร้อยละความชื้นในเปลือกแป้งแต่ละสูตรยังมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) (ตารางที่ 4.21) แสดงว่าการเติม E4M และ K4M จะช่วยเพิ่มสมบัติในการดูดซับน้ำส่งผลให้สามารถกักเก็บความชื้นไว้ในแป้งชุบทอดได้ เนื่องจาก HPMC ทั้ง 2 ชนิดนี้มีสมบัติ thermal gelation เมื่อนำไปทอดความร้อนจะขับไล่น้ำออกจากสายโซ่ทำให้โมเลกุลของ HPMC เข้าใกล้กันได้ดี และเกิดเป็นเจล ซึ่งเจลที่เกิดขึ้นนี้จะกั้นไม่ให้น้ำระเหยออกจากเปลือกแป้งและขึ้นแครอทระเหยออกสู่ภายนอกได้ ส่งผลให้แบทเทอร์หลังทอดมีปริมาณความชื้นอยู่สูง โดยแบทเทอร์ที่เติม E4M 0.50 % จะมีร้อยละความชื้นในแบทเทอร์หลังทอดมากที่สุดคือ 31.61 (ตารางที่ 4.21)

ตารางที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของร้อยละความชื้นและน้ำมันดูดซับในเปลือกแป้งหลังทอด

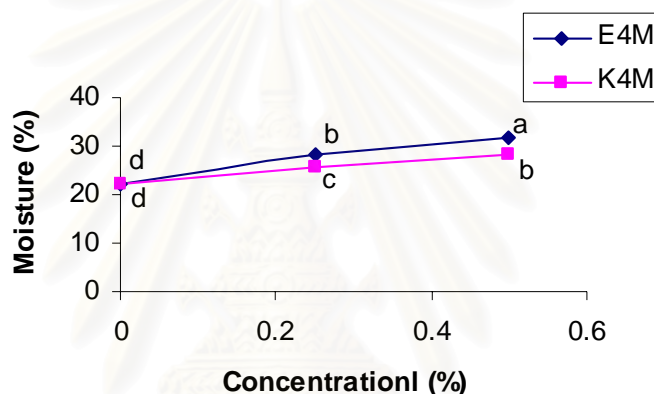
SOV	df	Moisture	Oil absorbed
Type	1	**	*
Concentration	2	**	**
Type* Concentration	2	**	*

\* แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

\*\* แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

สำหรับการดูดซับน้ำมันของเปลือกแป้งหลังทอด พบว่ามีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างชนิดและความเข้มข้นของ HPMC ต่อร้อยละน้ำมันดูดซับในเปลือกแป้งหลังทอด (ตารางที่ 4.20) ซึ่งร้อยละน้ำมันดูดซับในเปลือกแป้งหลังทอดจะแปรผกผันกับความเข้มข้นของ E4M และ K4M ที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.24) ฉะนั้นการเติม E4M และ K4M จะช่วยลดการดูดซับน้ำมันในเปลือกแป้งหลังทอดได้ เพราะเจลของ HPMC ที่เกิดขึ้นจะไม่ละลายในน้ำมันและกั้นการซึมผ่านของน้ำมันเข้าสู่พรุนที่ผิวหน้าของแบทเทอร์ เมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของร้อยละน้ำมันดูดซับในเปลือกแป้ง

หลังทอด (ตารางที่ 4.22) พบว่าเปลือกแป้งที่มี E4M 0.25 % จะมีร้อยละน้ำมันดูดซับในเปลือกแป้งหลังทอดไม่แตกต่างจากเปลือกแป้งควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p>0.05$ ) แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ E4M เป็น 0.50 % กลับทำให้เปลือกแป้งหลังทอดมีร้อยละน้ำมันดูดซับลดลงและแตกต่างจากเปลือกแป้งควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p\leq 0.05$ ) ส่วนเปลือกแป้งที่มี K4M จะมีร้อยละน้ำมันดูดซับในเปลือกแป้งหลังทอดที่มีแนวโน้มเช่นเดียวกับเปลือกแป้งที่มี E4M แต่ความชันของเส้นกราฟจะน้อยกว่า K4M (รูปที่ 4.24) โดยเปลือกแป้งที่มี K4M 0.50 % จะมีร้อยละน้ำมันดูดซับในเปลือกแป้งหลังทอดไม่แตกต่างจากเปลือกแป้งที่มี E4M 0.25 % อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p>0.05$ ) (ตารางที่ 4.22) เปลือกแป้งที่มี E4M 0.50 % ผสมอยู่จะลดน้ำมันได้ร้อยละ 28.88 ส่วนเปลือกแป้งที่มี K4M 0.50 % ผสมอยู่จะลดน้ำมันได้ร้อยละ 8.53



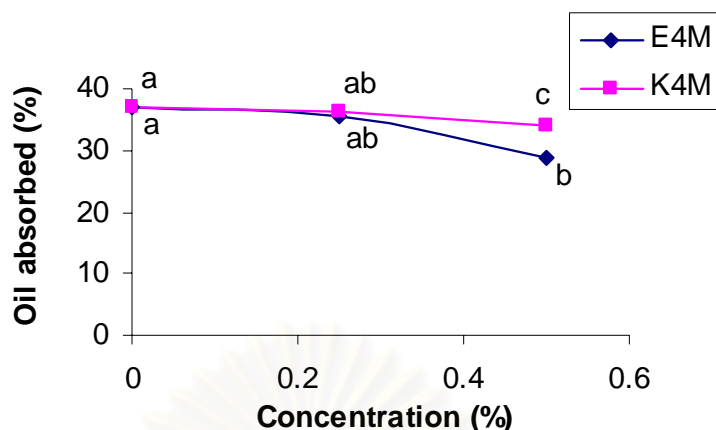
รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความชื้นในเปลือกแป้งหลังทอดกับความเข้มข้นของ HPMC ที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.21 ร้อยละความชื้น\* ในเปลือกแป้งหลังทอดเมื่อความเข้มข้นของ HPMC เพิ่มขึ้น

ความเข้มข้น (%)	ร้อยละความชื้น	
	E4M	K4M
0.00	22.22 <sup>d</sup>	22.22 <sup>d</sup>
0.25	28.28 <sup>b</sup>	25.61 <sup>c</sup>
0.50	31.61 <sup>a</sup>	28.20 <sup>b</sup>

\* น้ำหนักเปียก (Wet basis)

<sup>a-d</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p\leq 0.05$ )



รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละน้ำมันดูดซับในเปลือกแป้งหลังทอดกับความเข้มข้นของ HPMC ที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.22 ร้อยละน้ำมันดูดซับ\*ในเปลือกแป้งหลังทอดเมื่อความเข้มข้นของ HPMC เพิ่มขึ้น

ความเข้มข้น (%)	ร้อยละน้ำมันดูดซับ	
	E4M	K4M
0.00	37.15 <sup>a</sup>	37.15 <sup>a</sup>
0.25	35.38 <sup>ab</sup>	36.26 <sup>ab</sup>
0.50	28.88 <sup>c</sup>	34.00 <sup>b</sup>

\* น้ำหนักแห้ง (Dry basis)

<sup>a-c</sup> ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

จากผลการทดลอง พบว่า การเติม E4M และ K4M ช่วยให้เปลือกแป้งหลังทอดมีร้อยละความชื้นเพิ่มขึ้นและมีร้อยละน้ำมันดูดซับลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากแบทเทอร์มีความหนืดและร้อยละการเกาะติดเพิ่มขึ้น (ข้อ 4.3.1) เมื่อนำไปทอดจะเกิดโครงสร้างที่หนาขึ้นการระเหยของน้ำและการดูดซับน้ำมันในระหว่างทอดได้ นอกจากนี้ยังพบว่า HPMC ต่างชนิดกันที่มีค่า D.S. ต่างกันจะมีความสามารถในการลดการดูดซับน้ำมันต่างกันด้วย เพราะปริมาณหมู่แทนที่ที่ต่างกันนั้นมีความสำคัญกับการเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำแล้วเกิดเป็นเจลเมื่อนำไปทอด ดังนั้น



ยังมี หมู่แทนที่มากเจดที่เกดขึ้นก็ยังมีควมแข็งแรงมากขึ้นด้วย สงผลให้เปลือกแบ่งหลังทอดมีร้อยลควมขึ้นมากและน้ำมันดูดซับน้อย

#### 4.3.3 ร้อยลควมขึ้นและน้ำมันดูดซับในชั้นแครอทหลังทอด

นำชั้นแครอทซุบแบ่งทอดที่ลอกเปลือกแบ่งออกแล้วมาวิเคราะห์ร้อยลควมขึ้นและน้ำมันดูดซับ พบว่าชนิดของ HPMC มีผลต่อร้อยลควมขึ้นในชั้นแครอทหลังทอด (ตารางที่ 4.23) โดยชั้นแครอทที่ซุบแบ่งทอดที่มี E4M ผสมอยู่จะมีร้อยลควมขึ้นอยู่ในช่วง 86.22-86.75 (ตารางภาคผนวกที่ ง.8) ซึ่งมีค่ามากกว่าชั้นแครอทที่ซุบแบ่งทอดที่มี K4M ผสมอยู่ (85.40-85.84) เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจาก E4M มีค่า D.S. ที่มากกว่า K4M แบทเทอร์ที่มี E4M ผสมอยู่จึงมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้มากจึงมีความหนืดสูง สงผลให้มีความสามารถในการเกาะติดดี เมื่อนำไปทอดจึงเกิดโครงสร้างที่หนาทำให้อิน้ำไม่สามารถระเหยออกไปได้ ดังนั้นชั้นแครอทจึงยังมีร้อยลควมขึ้นสูง นอกจากนี้ความเข้มข้นของ HPMC ก็มีผลต่อร้อยลควมขึ้นในชั้นแครอทหลังทอด โดยร้อยลควมขึ้นในชั้นแครอทหลังทอดจะแปรตามความเข้มข้นของ E4M และ K4M กล่าวคือชั้นแครอทซุบแบ่งทอดที่มี E4M หรือ K4M 0.25 % ผสมอยู่จะมีร้อยลควมขึ้นอยู่ในช่วง 85.40-86.22 ซึ่งน้อยกว่าชั้นแครอทซุบแบ่งทอดที่มี E4M หรือ K4M 0.50 % ผสมอยู่ที่มีร้อยลควมขึ้นอยู่ในช่วง 85.84-86.75 (ตารางภาคผนวกที่ ง.8) แสดงว่ายิ่ง E4M และ K4M มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ชั้นแครอทหลังทอดมีความขึ้นสูงขึ้น

ตารางที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของร้อยลควมขึ้นและน้ำมันดูดซับในชั้นแครอทหลังทอด

SOV	Moisture	Oil absorbed
Type	*	NS
Concentration	**	**
Type* Concentration	NS	NS

\* แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

\*\* แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

NS แสดงถึงไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

เมื่อพิจารณาถึงการดูดซับน้ำมันในชั้นแคโรทหลังทอด พบว่าความเข้มข้นของ HPMC มีผลต่อร้อยละน้ำมันดูดซับในชั้นแคโรทหลังทอด (ตารางที่ 4.23) ชั้นแคโรทชุบแป้งทอดที่เติม E4M และ K4M จะมีร้อยละน้ำมันดูดซับน้อยกว่าชั้นแคโรทชุบแป้งทอดควบคุม โดยมีร้อยละน้ำมันดูดซับอยู่ในช่วง 7.02-8.08 และ 8.32-9.48 ตามลำดับ (ตารางภาคผนวกที่ ง.8) เนื่องจากชั้นแคโรทชุบแป้งทอดที่เติม E4M และ K4M จะมีร้อยละการเกาะติดดีกว่าชั้นแคโรทชุบแป้งทอดควบคุม เมื่อนำไปทอดโครงสร้างเจลที่เกิดขึ้นจึงทำให้น้ำมันจึงแทรกซึมผ่านรูพรุนได้น้อย ชั้นแคโรทจึงมีการดูดซับน้ำมันน้อยลงด้วย ส่วนชั้นแคโรทชุบแป้งทอดควบคุมที่ไม่ผสม HPMC ซึ่งมีร้อยละการเกาะติดน้อย เมื่อนำไปทอดน้ำมันสามารถแทรกซึมผ่านเข้าทางรูพรุนที่ผิวหน้าของเปลือกแป้งได้มากส่งผลให้น้ำมันอยู่ในช่องว่างระหว่างแบทเทอร์กับชั้นแคโรทมาก ชั้นแคโรทจึงดูดซับน้ำมันได้มากนั่นเอง

จากผลการทดลองนี้ พบว่าเปลือกแป้งที่มีร้อยละความชื้นสูงชั้นแคโรทก็จะมีร้อยละความชื้นสูงตามไปด้วย และถ้าเปลือกแป้งมีร้อยละน้ำมันดูดซับมากชั้นแคโรทก็จะมีร้อยละน้ำมันดูดซับมากเช่นกัน แสดงว่าชั้นแคโรทจะมีร้อยละความชื้นและน้ำมันดูดซับมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับคุณภาพของแบทเทอร์ที่ใช้ชุบนั่นเอง จะสังเกตได้ว่าชั้นแคโรทที่ชุบแบทเทอร์ที่ผสม E4M หรือ K4M จะมีร้อยละความชื้นสูงและมีร้อยละน้ำมันดูดซับต่ำ

Akdeniz และคณะ (2006) พบว่าผลิตภัณฑ์แคโรทชุบแป้งทอดที่เติม HPMC (มีการแทนที่ของ methoxyl group 28 % และ hydroxypropyl group 5 %) จะมีปริมาณน้ำมันต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ควบคุม และผลิตภัณฑ์แคโรทชุบแป้งทอดที่เติมแซนแทนกัน ทั้งนี้เป็นผลมาจากสมบัติ thermal gelation ของ HPMC นั่นเอง

#### 4.3.4 การทดสอบทางประสาทสัมผัสของแคโรทชุบแป้งทอด

การทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของแคโรทชุบแป้งทอดจะทำการเปรียบเทียบเชิงปริมาณ โดยผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝน พิจารณาลักษณะปรากฏ (ความชอบที่เห็นผลิตภัณฑ์ครั้งแรก) ความกรอบ (crispiness) ความมัน (oiliness) และความชอบโดยรวมของแคโรทชุบแป้งทอด โดย 1 คะแนนหมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด และ 7 คะแนนหมายถึง ชอบมากที่สุด แคโรทชุบแป้งทอดที่ได้รับคะแนนสูงสุดในแต่ละด้านแสดงถึงการยอมรับของผู้บริโภคในด้านนั้นๆ จากผลการวิเคราะห์พบว่า แคโรทชุบแป้งทอดที่เติม E4M และ K4M จะมีลักษณะปรากฏที่แตกต่างจากแคโรทชุบแป้งทอดสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) (ตารางที่ 4.24) ยกเว้นแคโรทชุบแป้งทอดที่เติม K4M 0.25 %

แครอทชุบแป้งทอดชุบแป้งทอดที่เติม E4M 0.50 % และแครอทชุบแป้งทอดชุบแป้งทอดที่เติม K4M 0.50 % จะมีความมัน (การดูดซับน้ำมัน) แตกต่างจากแครอทชุบแป้งทอดสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) โดยแครอทชุบแป้งทอดที่ไม่เติม E4M หรือ K4M (ควบคุม) จะได้รับคะแนนด้านความมันสูงสุดคือ 5.78 คะแนน และแครอทชุบแป้งทอดที่เติม E4M 0.50 % จะได้รับคะแนนด้านความมันต่ำสุดคือ 5.35 คะแนน (ตารางที่ 4.24) ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์หรือยล่น้ำมันดูดซับของเปลือกแป้งหลังทอด (ตารางที่ 4.22)

ตารางที่ 4.24 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของแครอทชุบแป้งทอด

ชนิดของ HPMC	ความเข้มข้น (%)	ลักษณะปรากฏ <sup>1</sup>	ความมัน <sup>2</sup>	ความกรอบ <sup>3</sup>	ความชอบโดยรวม <sup>4</sup>
E4M	0.00	5.81 <sup>c</sup> ±0.42	5.78 <sup>a</sup> ±0.61	2.42 <sup>e</sup> ±0.74	5.75 <sup>c</sup> ±0.41
	0.25	6.05 <sup>b</sup> ±0.34	5.62 <sup>abc</sup> ±0.67	5.95 <sup>a</sup> ±0.34	6.03 <sup>a</sup> ±0.36
	0.50	6.26 <sup>a</sup> ±0.34	5.35 <sup>c</sup> ±0.53	4.93 <sup>b</sup> ±0.38	5.85 <sup>abc</sup> ±0.38
K4M	0.00	5.81 <sup>c</sup> ±0.42	5.78 <sup>a</sup> ±0.61	2.42 <sup>e</sup> ±0.74	5.75 <sup>c</sup> ±0.41
	0.25	5.98 <sup>bc</sup> ±0.36	5.72 <sup>ab</sup> ±0.60	3.85 <sup>d</sup> ±0.67	5.81 <sup>bc</sup> ±0.39
	0.50	6.13 <sup>ab</sup> ±0.39	5.42 <sup>bc</sup> ±0.55	4.32 <sup>c</sup> ±0.62	5.98 <sup>ab</sup> ±0.33

<sup>a-e</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

<sup>1</sup> ลักษณะปรากฏ หมายถึง ความชอบเมื่อเห็นผลิตภัณฑ์ครั้งแรก

<sup>2</sup> ความมัน หมายถึง ความรู้สึกมันในปากเมื่อกัดผลิตภัณฑ์

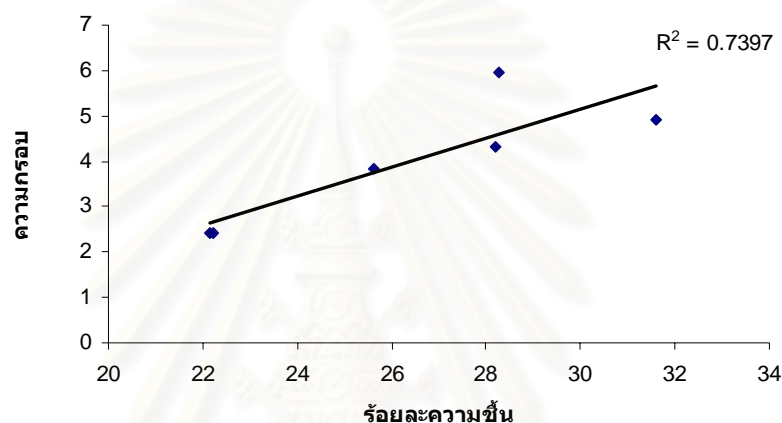
<sup>3</sup> ความกรอบ หมายถึง ความรู้สึกกรอบเมื่อกัดลงบนผลิตภัณฑ์ครั้งแรก

<sup>4</sup> ความชอบโดยรวม หมายถึง ความพึงพอใจของผู้บริโภคที่มีต่อคุณภาพโดยรวมของผลิตภัณฑ์

แครอทชุบแป้งทอดทุกสูตรจะมีความกรอบที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) โดยแครอทชุบแป้งทอดที่เติม E4M 0.25 % จะได้รับคะแนนด้านความกรอบสูงสุดคือ 5.95 คะแนน และแครอทชุบแป้งทอดที่ไม่เติม E4M หรือ K4M จะได้รับคะแนนด้านความกรอบต่ำสุดคือ 2.42 คะแนน (ตารางที่ 4.24) เนื่องจากแบทเทอร์ที่ไม่เติม E4M หรือ K4M จะมีร้อยละการเกาะติดต่ำกว่าสูตรอื่น (ตารางที่ 4.19) สำหรับแครอทชุบแป้งทอดที่เติม E4M 0.25 % จะได้รับคะแนนด้านความกรอบสูงกว่าแครอทชุบแป้งทอดที่เติม E4M 0.50 % และเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์หรือยล่น้ำมันดูดซับของเปลือกแป้งหลังทอด (ตารางที่ 4.21) พบว่าความกรอบของแครอท

ชุบแข็งทอดจะมีความสัมพันธ์กับร้อยละความชื้นในเปลือกแข็งหลังทอด ( $R^2 = 0.7397$ ) ดังรูป 4.25 แสดงว่าผู้บริโภคชอบแป้งชุบทอดที่มีความกรอบนอกและนุ่มใน

เมื่อพิจารณาความชอบโดยรวมของแครอทชุบแป้งทอดพบว่า แครอทชุบแป้งทอดที่เติม E4M และ K4M จะมีความแตกต่างจากแครอทชุบแป้งทอดที่ไม่เติม E4M หรือ K4M อย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ยกเว้นแครอทชุบแป้งทอดที่เติม K4M 0.25 % แครอทชุบแป้งทอดทุกสูตรได้รับคะแนนด้านความชอบโดยรวมอยู่ในช่วง 5.75 – 6.03 คะแนน โดยแครอทชุบแป้งทอดที่เติม E4M 0.25 % จะได้รับคะแนนด้านความชอบโดยรวมสูงสุดคือ 6.03 คะแนน



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความชื้นในเปลือกแข็งทอดกับความกรอบของแครอทชุบแป้งทอด

## สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวเจ้า

แป้งเทอร์ที่เตรียมจากแป้งข้าว (RFBB) จะมีร้อยละน้ำมันดูดซับต่ำกว่าแป้งเทอร์ที่เตรียมจากแป้งสาลี (WFBB) และปริมาณแอมิโลสในแป้งข้าวมีผลต่อร้อยละความชื้น น้ำมันดูดซับ และความแข็งของก้อนแป้งเทอร์หลังทอด โดยแป้งเทอร์ที่เตรียมจากแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งมีปริมาณแอมิโลสต่ำ (18.93 %) จะมีร้อยละความชื้นและความแข็งต่ำกว่า แต่จะมีร้อยละน้ำมันดูดซับสูงกว่าแป้งเทอร์ที่เตรียมจากแป้งข้าวชัยนาท 1 ซึ่งมีปริมาณแอมิโลสสูง (29.85 %)

### 5.2 การลดการอมน้ำมันในแป้งเทอร์หลังทอด

เกลือและน้ำตาลมีผลต่อค่า consistency index (K) ของสารละลาย HPMC 1% w/w โดยเกลือจะทำให้สารละลายมีค่า K ลดลง และน้ำตาลจะทำให้สารละลายมีค่า K เพิ่มขึ้น และยังพบว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างเกลือ น้ำตาล และชนิดของ HPMC ต่อค่า n โดยสารละลาย HPMC ทั้ง 2 ชนิด คือ E4M และ K4M ที่เติมเกลือและน้ำตาลจะมีค่า flow behavior index (n) เพิ่มขึ้นแต่ค่า n นี้จะไม่แตกต่างจากสารละลายควบคุม

เกลือและน้ำตาลมีผลต่อความหนืดของแป้งเทอร์ที่ไม่ผสม HPMC และผสม HPMC โดยเกลือทำให้แป้งเทอร์มีความหนืดลดลง ส่วนน้ำตาลทำให้ความหนืดของแป้งเทอร์เพิ่มขึ้น เมื่อวัดสมบัติ viscoelastic จะพบว่า แป้งเทอร์ที่เติมเกลือ 2.50 % จะมีการตัดกันของค่า  $G'$  และ  $G''$  ที่ความถี่ต่ำกว่าแป้งเทอร์ที่เติมน้ำตาล 2.00 % นอกจากนี้ยังพบว่า ชนิด (E4M และ K4M) และความเข้มข้น (0.00-0.50 %) ของ HPMC มีผลต่อค่า K, n, yield stress และ hysteresis loop ของแป้งเทอร์ โดยการเติม HPMC ทั้ง 2 ชนิดทำให้แป้งเทอร์มีค่า yield stress, K และ hysteresis loop เพิ่มขึ้น แต่จะมีค่า n ลดลง และพบว่า การเติม HPMC ทั้ง 2 ชนิดที่มีค่า D.S. ต่างกันมีผลทำให้ทำให้แป้งเทอร์มีค่า  $G'$  สูงกว่าค่า  $G''$  ในช่วงความถี่ต่ำกว่า 1 Hz โดยแป้งเทอร์จะมีลักษณะเป็น soft solid-like หรือ viscous mass

การเติม HPMC ทั้ง 2 ชนิดทำให้แป้งเทอร์มีอัตราการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ HPMC และมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิด (E4M และ K4M) และความเข้มข้น (0.00-0.50 %) ของ HPMC ต่อร้อยละความชื้นและน้ำมันดูดซับในก้อนแป้งเทอร์หลังทอด โดยก้อนแป้งเทอร์หลังทอดที่เติม E4M 0.05 % และก้อนแป้งเทอร์หลังทอดที่เติม K4M 0.50 % จะมีร้อยละน้ำมันดูดซับลดลง 44.64 และ 33.39 ตามลำดับ

### 5.3 คุณภาพของผลิตภัณฑ์แคโรทซูปแป้งทอด

แบบเทอร์ที่เติม E4M 0.50 % จะมีร้อยละการเกาะติดมากที่สุดคือ 62.82 เมื่อนำแคโรทไปชุบแล้วทอดจึงช่วยลดการสูญเสียความชื้นจากเปลือกแป้ง และมีร้อยละน้ำมันดูดซับในเปลือกแป้งและชั้นแคโรทน้อยที่สุดคือ 28.88 และ 7.02 ตามลำดับ แต่จะมีความแข็ง (hardness) ต่ำกว่าสูตรควบคุม เมื่อทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่า แคโรทซูปแป้งทอดที่เติม E4M 0.25 % จะได้รับคะแนนด้านความกรอบสูงสุดและได้รับการยอมรับมากที่สุด แต่ไม่แตกต่างจากแคโรทซูปแป้งทอดที่เติม E4M 0.50 %

สูตรแบบเทอร์ที่ดีที่สุดคือ สูตรที่ประกอบด้วย

แป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105	100 กรัม
เกลือ	2.50 กรัม
น้ำตาล	2.00 กรัม
HPMC ชนิด E4M (D.S. 1.9)	0.25-0.50 กรัม

### 5.4 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาผลอายุการเก็บของแบบเทอร์สูตรสำเร็จต่อสมบัติของแบบเทอร์ และศึกษาผลของการเติมส่วนผสมอื่น เช่น ไข่ เครื่องปรุงแต่งรส ฯลฯ ต่อสมบัติของแบบเทอร์

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- จามรี จันทรวิเมลียง และนารี โตอุส่าห์. 2526. ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวของแป้งชนิดต่างๆ. โครงการวิจัยปริญญาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นิตยา กอบกัยกิจ. 2532. การผลิตขนมปังจากแป้งข้าวเจ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มลศิริ วิโรทัย และปาริฉัตร หงสประภาส. 2542. ข้าวและผลิตภัณฑ์. ผลิตภัณฑ์จากพืช. [Online]. แหล่งที่มา : [http:// www.swu.ac.th/royal/book5/b5c3t1\\_1.html](http://www.swu.ac.th/royal/book5/b5c3t1_1.html). 7 มิถุนายน 2549.
- วรรณดา ตูลยธัญ. 2549. พอลิแซ็กคาไรด์. เคมีอาหารของคาร์โบไฮเดรต. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 138-139.
- วราภรณ์ สุวภูล. 2525. วิทยาศาสตร์การไหล. ภาควิชาเภสัชกรรม คณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2529. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแป้งข้าวเจ้า. มอก.ที่ 638-2529. กรุงเทพมหานคร. สำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2534. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแป้งผสมสำหรับประกอบอาหารทอด. มอก.ที่ 1028-2534. กรุงเทพมหานคร สำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.

### ภาษาอังกฤษ

- Akdeniz, N., Sahin, S., and Sumnu, G. 2006. Functionality of batters containing different gums for deep-fat frying of carrot slices. Journal of Food Engineering. 75:522-526.
- Anderson, R.a., Conway, H.F., Pfeife, F.F., and Griffin, E.L. 1969. Gelatinization of corn grits by rool- and extrusion-cooking. Cereal Science Today. 14:4-7, 11-12.
- AOAC. 1995. Official Method of Analysis, Association of Official Analytical Chemists. 16<sup>th</sup> ed. Washington D.C.:Association of Official Analytical Chemists.
- Balasubramaniam, V.M., Chinnan, M.S., Mallikarjunan, P., and Phillips, R.D. 1997. The effect of edible film fried poultry product. Journal of Food Processing and Engineering. 20:17-29.

- Blumenthal, M.M. 1991. A new look at the chemistry and physics of deep-fat frying. Food Technology. 45(2):68-71,94.
- Bouchon, R., Hollins, P., Pearson, M., Pylr, D.L., and Tobin, M.J. 2001. Oil distribution in fried potatoes monitored by infrared microspectroscopy. Journal of Food Science. 66(7):918-923.
- Bouchon, J.M., Aguilera, and Pyle, D.L. 2003. Structure oil-absorption relationships during deep-fat frying. Journal of food science. 68(9):2711-2716.
- Budavari, S. 2001. The Merck Index. 13<sup>th</sup> ed. New Jercey : Merck and Co., Inc.
- Changalg, R.G., Susheelamma, N.S., and Tharanathan, R.N. 1989. Viscosity pattern of native and fermented black gram flour and starch dispersions. Starch/Stärke. 41(3):84-88.
- Coffey, D.G., Bell, D.A., and Henderson, A. 1995. Cellulose and cellulose derivatives. In A.M. Stephen (ed.), Food Polysaccharides and Their Applications. New York : Marcel Dekker, Inc.
- Dogan, S.F., Sahin, S., and Sumnu, G. 2005. Effects of soy and rice flour addition on batter rheology and quality of deep-fat fried chicken nuggets. Journal of Food Engineering. 71:127-132.
- Dow Chemical, 2007. METHOCEL. METHOCEL Technical Handbook [Online]. Available from : <http://www.dow.com>. 12 January 2007.
- Faur, L. 1975. Plam oil in deep frying : comparative performance. Revue Francaidedes Corps Gras. 22(2):77-83.
- Fellow, P.J. 1990. Food processing technology : Principle and practice. West Sussex Ellis Horwood.
- Gallagher, E., Gormley, T.R., and Arendt, E.K. 2004. Recent advances in the formulation of gluten-free cereal-based product. Food Science and Technology. 15:143-152.
- Grover, J.A. 1993. Methylcellulose and its derivatives, In R.L. Whislyer and J.N. BeMiller, (eds.), Industrial gums. San diego : Academic Press.
- Helm, R.M., and Burks, A.W. 1996. Hypoallergenicity of rice protein. Cereal Foods World. 41(11)839-843.



- Holownia, K.I., Chinnan, M.S., Erickson, M.C., and Mallikarjunan, P. 2000. Quality evaluation of edible film-coated chicken strips and frying oils. Journal of Food Science. 65(6):1087-1090.
- Hoseney, R.C., and Rogers, D.E. 1990. The formation and properties of wheat flour doughs. Food science and Nutrition. 29(2):73-93.
- Hoseney, R.C. 1994. Starch. In R.C. Hoseney (ed), Principles of cereal science and technology. St. Paul, Minnesota : American Association of Cereal Chemists. P 40-45.
- Hsia, H.Y., Smith, D.M., and Steffe, J.F. 1992. Rheological properties and adhesion characteristics of flour-based batters for chicken nuggets as affected by three hydrocolloids. Journal of Food Science. 57(1):16-18, 24.
- Juliano, B.O. 1971. A simplified assay for milled rice amylose. Cereal Science Today. 16(10):334-338, 340, 360.
- Juliano, B.O. 1972. The rice caryopsis and its composition. In D.F. Houston (ed.), Rice Chemistry and Technology. St.Paul, Minnesota : American Association of Cereal Chemists.
- Kasapis, S. 1998. Structural properties of high solids biopolymer system. In S.E. Hill, D.A. Ledward and J.R. Mitchell (eds.), Functional of properties of food macromolecules. Maryland : Aspend Publishers, Inc., 227-251.
- Kohlway, D.E., Kendall, J.H. and Mohindra, R.B. 1995. Using the physical properties of rice as a guide to formulation. Cereal Food World. 40(10):728-732.
- Krumel, K.L. and Sarkar, N. 1975. Flow properties of gums useful to the food industry. Food Technology. 17:36-44.
- Krumal, K.L., and Lindsay, T.A. 1976. Nonionic cellulose ethers. Food Technology. 30:36-43.
- Kulp, K., and Loewe, R. 1990. Batters and breadings in food processing. St. Paul, Minnesota : American Association of Cereal Chemists.
- Labtoday. 2004. เลือก Rheometer แบบใดให้เหมาะกับการใช้งาน. [Online]. Available from : <http://www.thaiscience.com>. 9 August 2007.

- Meyers, M.a. 1990. Functionality of hydrocolloids in batter coating systems. In K. Kulp and R. Loewe (eds.), Batters and breadings, pp. 117-141. St. Paul, Minnesota : American Association of Cereal Chemists.
- Mohamed, S., Hamid, N.A., and Hamid, M.A. 1998. Food components affecting the oil absorption and crispness of fried batter. Journal of the Science of Food and Agriculture. 78:39-45.
- Moreira, R.G., Sun X., and Chen Y. 1997. Factors affecting oil uptake in tortilla chips in deep-fat frying. Journal of Food Engineering. 31(4):485-498.
- Mukprasirt, A., Herald, T.J., and Flores, R.A. 2000. Rheological characterization of rice flour-based batters. Journal of Food Science. 65(7):1194-1199.
- Mukprasirt, A., Herald, T.J., and Seib, P.A. 2002. Pasting characteristics of rice flour-based batter compared to wheat flour-based batter. Journal of Food Quality. 25:139-154.
- Naruenartwongsakul, S., Chinnan, M.S., Bhumiratana, S., and Yoovidhya, T. 2004. Influence of methylcellulose on oil absorption of wheat flour batter coated cut potatoes. Journal of Food Processing Preservation. 28:223-239.
- Osborne, T.B. 1907. The proteins of the wheat kernel. Washington, D.C. : Carnegie Institute of Washington.
- Priya, R., Singhal, R.S., and Kulkarni, P.R. 1996. Carboxymethylcellulose and hydroxyl propylmethylcellulose as additives in reduction of oil content in batter based deep-fat fried boondis. Carbohydrate Polymers. 29:333-335.
- Robbin, P.M. 1976. Convenient food : Recent technology. New Jersey : Data Corporation.
- Salvador, A., Sanz, T., and Fiszman, S.M. 2005. Effect of addition of different ingredients on the characteristics of a batter coating for fried seafood prepared without a pre-frying step. Food Hydrocolloids. 19:703-708.
- Sanz, T., Fernandez, M.A., Salvador, A., Munoz, J. and Fiszman, S.M. 2005. Thermogelation properties of methylcellulose (MC) and their effect on batter formula. Food Hydrocolloids. 19:141-147.
- Saguy, I.S., and Pinthus, E.J. 1995. Oil uptake during deep fat frying : Factors and mechanism. Food Technology. 49(4):142-145.

- Shih, F., and Daigle, K. 1999. Oil uptake properties of fried batters from rice flour. Journal of Agriculture Food Chemistry. 47:1611-1615.
- Shih, F.E., Daigle, K.W., and Clawson, E.L. 2001. Development of low oil-uptake donuts. Journal of Food Science. 65(1):141-144.
- Singh, R.P. 1998. Phase transition and transport phenomena in frying of food. In M.A. Rao and R.W. Hartel (eds.), Phase/State transition in food : Chemical, structural, and rheological changes, pp.369-390. New York : Marcel Dekker.
- Sivaramakrisnan, H.P., Senge, B., and Chattopadhyay, P.K. 2004. Rheological properties of rice dough for making rice bread. Journal of Food Engineering. 62:37-45.
- Steffe, J.F. 1992. Rheological Methods in Food Process Engineering. East Lansing, Michigan : Freeman Press.
- Suderman, D.R. 1983. Use of batters and breadings on food product : a review. In D.R. Suderman and F.E. Cunningham (eds.), Batter and breading technology. Westport, Connecticut : AVI Publishing.
- Suderman, D.R. 1990. Effective use of flavoring and seasonings in batter and breading systems. In K. Kulp and R. Loewe (eds.), Batter and breading technology. St. Paul, Minnesota : American Association of Cereal Chemists.
- Takahashi, K., and Wada, K. 1992. Reversibility of salt effects on the thermal stability of potato starch granules. Journal of Food Science. 57:1140-1143.
- Thorner, M.E. 1973. Deep frying in convenience and fast food handbook. Westport, Connecticut : AVI Publishing.
- Tulyathan, V., Laokuldilok, T., and Jongkaewwattana, S. 2007. Retention of iodine in justified parboiled rice and its pasting characteristics during storage. Journal of Food Biochemistry. 31:217-229.
- Vliet, T.V. 1999. Rheological classification of foods and instrumental techniques for their study. In A.J. Rosenthal (ed.), Food texture measurement and perception. Gaithersburg, Maryland : Aspen Publishers, Inc.
- Whistler, R.L., and Smart, C.L. 1953. Starch. Polysaccharide Chemistry. New York : Academic Press.

Williams, R., and Mittal, G.S. 1999. Water and fat transfer properties of polysaccharide films on fried pastry mix. Lebens-mittel-Wissenschaft und- Technologie. 32(7):440-445.

Xue, J., and Ngadi, M. 2006. Rheological properties of batter systems formulated using different flour combinations. Journal of Food Engineering. 77:334-341.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก.

## การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีและทางกายภาพ

## 1. การวิเคราะห์ร้อยละความชื้น ตามวิธีของ AOAC 1995

อุปกรณ์

1. ตู้อบลมร้อน (Memmert รุ่น model 600, Germany)
2. moisture can
3. desiccator

วิธีการทดลอง

1. ชั่งน้ำหนักแป้งข้าว 2 กรัมที่รู้น้ำหนักแน่นอน ใส่ลงใน moisture can ที่อบแห้งและชั่งน้ำหนักแล้ว
2. จากนั้นนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ โดยเปิดฝา moisture can ไว้
3. นำ moisture can ออกจากตู้อบ โดยปิดฝาลงและทิ้งให้เย็นใน desiccator แล้วชั่งน้ำหนัก
4. คำนวณหาร้อยละความชื้น จากสูตรต่อไปนี้

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \frac{(A - B) \times 100}{A}$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)

B คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (กรัม)

## 2. การวิเคราะห์ร้อยละน้ำมันดูดซับ ตามวิธีของ Shin และ Daigle (1999)

อุปกรณ์

1. ขวดก้นกลม
2. Soxhlet apparatus

วิธีการทดลอง

1. อบขวดก้นกลมที่ 100 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ทำให้อยู่ใน desiccator ชั่งน้ำหนักที่แน่นอน
2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 3 กรัมที่รู้น้ำหนักแน่นอน ห่อด้วยกระดาษกรองแล้วนำไปใส่ใน thimble บรรจุใน extraction tube ของ Soxhlet apparatus

3. เติมปิโตรเลียมอีเทอร์ ประมาณ 200 มิลลิลิตร ในขวดก้นกลม
4. ปรับให้มีอัตราการกลั่นของปิโตรเลียมอีเทอร์ ประมาณ 5-6 หยดต่อวินาที สกัดไขมันเป็นเวลา 4 ชั่วโมงต่อเนื่อง
5. ระเหยเอาปิโตรเลียมอีเทอร์ ออกจากขวดก้นกลมที่สกัดไขมัน ด้วย rotary evaporater
6. แล้วนำขวดก้นกลมไปอบที่ 100 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที
7. ทำให้เย็นใน desiccator แล้วชั่งน้ำหนักขวดก้นกลม คำนวณหาปริมาณน้ำมัน (ร้อยละ) จากสูตร ต่อไปนี้

$$\text{ร้อยละน้ำมัน} = \frac{\text{น้ำหนักขวดหลังสกัด (กรัม)} - \text{น้ำหนักขวดก่อนสกัด (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)}}$$

### 3. การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน ตามวิธีของ AOAC 1995

#### อุปกรณ์

1. Buchi digestion unit (รุ่น K-424, Switzerland)
2. Buchi distillation unit (รุ่น B-324, Switzerland)

#### สารเคมี

1. กรดซัลฟูริกเข้มข้น
2. กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 นอร์มัล ที่ standardized ด้วยโพแทสเซียมพาทาเลทเข้มข้น 0.1 นอร์มัล
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 35 %
4. กรดบอริกเข้มข้น 4 %
5. selenium reagent mixture
6. อินดิเคเตอร์ผสม (mixed indicator)

เตรียมโดย ละลายเมทิลเรดปริมาณ 0.125 กรัม และเมทิลลีนบลูปริมาณ 0.082 กรัมในเอทานอล 90 % ปริมาตร 100 มิลลิลิตร)

#### วิธีการทดลอง

1. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 2 กรัมที่รู้น้ำหนักแน่นอน ห่อด้วยกระดาษกรองใส่ลงในหลอดย่อยโปรตีน ตัวอย่างควบคุมคือ หลอดที่มีแต่กระดาษกรอง
2. เติม selenium reagent mixture ซึ่งใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยา ปริมาณ 5 กรัม และกรดซัลฟูริกเข้มข้น ปริมาตร 20 มิลลิลิตร
3. เตรียมขวดควบคุม (blank) โดยเติม selenium reagent mixture ปริมาณ 5 กรัม และกรดซัลฟูริกเข้มข้น ปริมาตร 20 มิลลิลิตร

4. นำสารละลายในข้อ 2 และ 3 ไปย่อยใน Kjeldahtherm โดยใช้ความร้อนเบอร์ 8 และปิดฝาด้านบนที่ต่อเข้ากับเครื่องดูดไอกรด ย่อยจนส่วนผสมในหลอดย่อยกลายเป็นสีเขียวใส แล้วทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
5. นำฟลาสก์ขนาด 500 มิลลิลิตร ที่หยดอินดิเคเตอร์ ประมาณ 2-3 หยด ต่อเข้ากับปลาย condenser ของเครื่องกลั่น
6. นำหลอดตัวอย่างที่ผ่านการย่อยต่อเข้ากับเครื่องกลั่น เลือกโปรแกรม distillation โดยตั้งโปรแกรม ดังนี้

โซเดียมไฮดรอกไซด์	30 มิลลิลิตร
กรดบอริก	40 มิลลิลิตร
น้ำ	25 มิลลิลิตร
เวลา	4 นาที

7. รอรับสารที่กลั่นตามระยะเวลาที่กำหนด
8. ล้างส่วนปลายของ condenser ด้วยน้ำกลั่นใส่ลงในฟลาสก์ที่รองรับสิ่งที่กลั่นได้
9. แล้วนำสารละลายที่กลั่นได้ทั้งหมดมาไตเตรตด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 นอร์มัล จนถึงจุดยุติซึ่งสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงแดง
10. บันทึกปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ไทเทรต แล้วคำนวณหาปริมาณโปรตีน (%) ดังนี้

$$\text{ปริมาณโปรตีน (\%)} = \frac{(V_a - V_b) \times N \times 1.4 \times \text{factor}}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)}}$$

เมื่อ  $V_a$  คือ ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

$V_b$  คือ ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ไทเทรต blank (มิลลิลิตร)

$N$  คือ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ไทเทรต (นอร์มัล)

factor สำหรับแป้งสาลีใช้ 6.25 และแป้งข้าวใช้ 5.75

#### 4. การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส ตามวิธีของ Juliano (1971)

##### อุปกรณ์

สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) (Spectronic® 20, USA)

##### สารเคมี

1. เอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol) 95 %
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1 นอร์มัล  
เตรียมโดย ชั่ง NaOH 40 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 800 มิลลิลิตร ทิ้งให้เย็น แล้วนำไปปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร

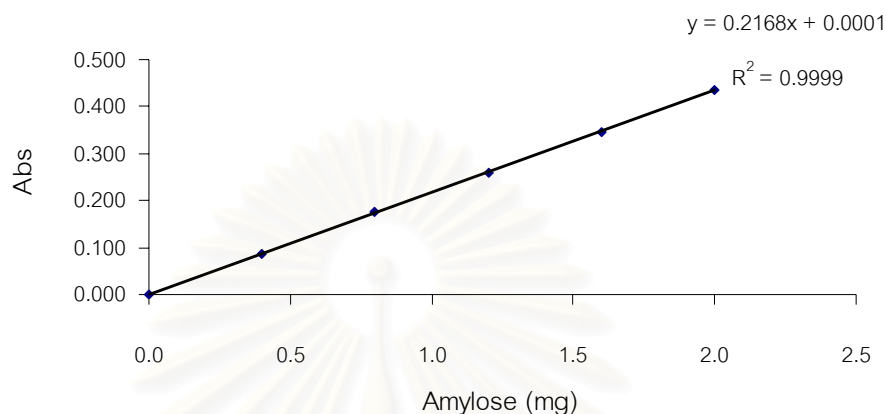


3. กรดอะซิติก (acetic acid) ความเข้มข้น 1 นอร์มัล  
เตรียมโดย ตวงกรดอะซิติกเข้มข้นปริมาณ 60 มิลลิลิตร ใส่ลงในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร
4. สารละลายไอโอดีน  
เตรียมโดย ชั่งไอโอดีน ( $I_2$ ) 0.2 กรัม และโปแตสเซียมไอโอไดด์ (KI) 2.0 กรัม ผสมสารทั้งสองให้เข้ากันแล้วละลายในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร ถ้าสารยังละลายไม่หมด อาจทิ้งไว้ค้างคืนในที่มืดแล้วค่อยนำมาปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตรควรเก็บสารนี้ไว้ในขวดสีชา
5. แอมิโลสบริสุทธิ์ (pure amylose)

#### การสร้างกราฟมาตรฐาน (Standard curve)

1. ชั่งแอมิโลสบริสุทธิ์ 0.0400 กรัม ใส่ในขวดแก้ว (volumetric flask) ขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วเติมเอทิลแอลกอฮอล์ 95 % ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 นอร์มัล ปริมาตร 9 มิลลิลิตร ได้เป็นสารละลายมาตรฐาน
2. เตรียมขวดควบคุม (blank) โดยเติมเอทิลแอลกอฮอล์ 95 % ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 นอร์มัล ปริมาตร 9 มิลลิลิตร ใส่ในขวดแก้วขนาด 100 มิลลิลิตร
3. นำสารละลายในข้อ 1 และ 2 ไปต้มในน้ำเดือด หรือ water bath ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 10 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
4. ปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น ปิดจุกขวดแก้ว
5. ปิเปตสารละลายมาตรฐานในข้อ 4 ปริมาตร 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จำนวน 5 ใบ ซึ่งแต่ละขวดจะมีความเข้มข้นของแอมิโลสเท่ากับ 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 และ 2.0 มิลลิกรัม ตามลำดับ ปิเปตกรดอะซิติกเข้มข้น 1 นอร์มัล ปริมาตร 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, และ 1.0 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรทั้ง 5 ใบตามลำดับ
6. แล้วเติมสารละลายไอโอดีนขวดละ 2 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรแต่ละใบ ปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 20 นาที
7. ปิเปตสารละลายควบคุมในข้อ 4 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร. เติมสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 1 นอร์มัล ปริมาตร 1.0 มิลลิลิตร และสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตร จากนั้นปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 20 นาที สารละลายในขวดนี้จะเป็น blank

8. นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน ด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับ blank
9. สร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่าปริมาณแอมิโลส (แกน X) กับค่าการดูดกลืนแสง (แกน Y)



รูปที่ ก.1 กราฟแอมิโลสมาตรฐาน

#### การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสในสารตัวอย่าง

1. ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของแป้งข้าวที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 mesh ปริมาณ 0.1000 กรัม ใส่ในขวดแก้ว ขนาด 100 มิลลิลิตร ที่แห้งสนิท พยายามไม่ให้แป้งติดบริเวณคอขวดแก้ว
2. เติมเอทิลแอลกอฮอล์ 95 % ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เขย่าเบาๆ เพื่อเกลี่ยให้แป้งกระจายออก อย่าเขย่าแรง เพราะจะทำให้แป้งขึ้นไปเกาะตามผนังขวดแก้ว
3. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 นอร์มัล ปริมาตร 9 มิลลิลิตร โดยในขณะที่เติมสารนี้ ทำการล้างแป้งที่อาจเกาะติดตามคอขวด และผนังขวดแก้ว
4. นำไปต้มในน้ำเดือด หรือ water bath ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 10 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
5. ปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น ปิดจุกเขย่าขวดแก้ว
6. ปิเปตสารละลายในข้อ 5 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมกรดอะซิติกเข้มข้น 1 นอร์มัล ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และสารละลายไอโอดีน ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตร จากนั้นปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 20 นาที
7. วัดค่าดูดกลืนแสงของสารละลายที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับ blank

8. นำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ ไปคำนวณหาค่าปริมาณแอมิโลสโดยจากกราฟมาตรฐาน แล้วคำนวณหาปริมาณแอมิโลส (ร้อยละ) จากสูตรต่อไปนี้

$$\text{ปริมาณแอมิโลส (ร้อยละ)} = \frac{\text{ค่าที่อ่านได้จากกราฟมาตรฐาน (กรัม)} \times 100 \times 20}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแป้งแห้ง (กรัม)}}$$

## 5. การวิเคราะห์ดรรชนีการดูดซับน้ำ ตามวิธีของ Anderson และคณะ (1969)

### อุปกรณ์

เครื่อง centrifuge (Thermo IEC, USA)

### วิธีการทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างแป้งที่ทราบน้ำหนักแน่นอนประมาณ 2.5 กรัม ใส่ลงในหลอด centrifuge ขนาด 50 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำกลั่นจำนวน 30 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันโดยใช้แท่งแก้วคนเบาๆ ทุกๆ 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที
3. จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงที่ 3000 x g ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ด้วยเครื่อง centrifuge
4. เทส่วนใสทิ้งแล้วชั่งน้ำหนักตะกอนหรือเจลที่อยู่ในหลอด centrifuge เพื่อคำนวณค่าดรรชนีการดูดซับน้ำ (Water Absorption Index ; WAI) จากสูตร

$$\text{ค่าดรรชนีการดูดซับน้ำ (กรัมต่อกรัมแป้งแห้ง)} = \frac{(W2 - W1) \times 100}{\text{น้ำหนักแป้ง (กรัม)}}$$

เมื่อ W1 คือ น้ำหนักของหลอด centrifuge (กรัม)

W2 คือ น้ำหนักตะกอนหรือเจลแป้งที่อยู่ในหลอด centrifuge หลังหมุนเหวี่ยง (กรัม)

## 6. การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสด้านความแข็งของแบทเทอร์หลังทอด ตามวิธีของ Mohamed และคณะ (1998)

### อุปกรณ์

เครื่อง Instron Texturometer (Instron® 5565, USA)

### วิธีการทดลอง

1. นำก้อนแบทเทอร์หลังทอดไปวัดลักษณะเนื้อสัมผัสด้านความแข็งด้วย Instron Texturometer โดยตั้งสภาวะในการทำงานของเครื่องดังนี้

- Load cell 5 กิโลกรัม
  - หัววัดเป็นหัววัดรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร
  - หัววัดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 5 เซนติเมตรต่อนาที
  - กดบริเวณกึ่งกลางของตัวอย่างลงไปร้อยละ 30 ของความหนา
2. จากนั้นนำตัวอย่างก้อนแบบเทอร์หลังทอดทรงครึ่งวงกลมซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.75 เซนติเมตร หนา 2.00 เซนติเมตร วางลงบน aluminum plate และเริ่มการทำงานของเครื่อง
  3. วัดตัวอย่างชิ้นละ 1 ครั้ง วัดซ้ำ 10 ชิ้น จะได้ค่าความแข็ง (Hardness) ในหน่วย kg force

## 7. การวิเคราะห์สมบัติทางการไหลของ HPMC 1 % w/w และแบบเทอร์

### อุปกรณ์

1. เครื่อง Bohlin Rheometer (C-VOR, Bohlin Instrument Ltd., UK)
2. หัววัด cone and plate ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm มุม 4 องศาเซลเซียส (CP 4/40)

### วิธีการทดลอง

1. เปิดเครื่อง Bohlin Rheometer, บั้ม, cooling และ thermostat ให้พร้อมต่อการใช้งาน
2. จากนั้นใส่หัววัด CP 4/40 แล้วทำการล๊อคเกลียว ตั้ง auto zero โดยตั้ง gap ที่ 150  $\mu\text{m}$
3. แล้วจึงเปิดโปรแกรมของเครื่อง เข้าไปที่ mode viscometry ตั้งสภาวะในการทำงานของเครื่องดังนี้

- Pre condition : controlled rate

Shear rate	10	1/s
Apply time	60.0	s
Equilibrium time	10.0	s

- Shear profile :

Start shear	1	1/s
End shear	100	1/s

Thixotropic analysis

- Isothermal : 25 องศาเซลเซียส

4. นำตัวอย่างใส่ลงบนแท่นแล้วกดหัววัดลงมายังตำแหน่ง gap ที่ตั้งไว้ แล้วเกลี่ยให้ขอบของตัวอย่างอยู่ในลักษณะโค้งนูน ก่อนทำการทดลองให้ปลดล๊อคหัววัด แล้วจึงกด start เพื่อเริ่มการทำงานของเครื่อง

5. คำนวณผลโดยใช้สมการ Power law model สำหรับ HPMC 1 % และสมการ Herschel-Bulkey model สำหรับแบทเทอร์ โดยใช้ least square error หา sum square error ที่น้อยที่สุด

$$\begin{array}{l} \text{Power law model} \quad \sigma = K\dot{\gamma}^n \\ \text{Herschel-Bulkey model} \quad \sigma = \sigma_0 + K\dot{\gamma}^n \end{array}$$

### 8. การวิเคราะห์สมบัติ viscoelastic ของ HPMC 1 % w/w และแบทเทอร์

#### อุปกรณ์

1. เครื่อง Bohlin Rheometer (C-VOR, Bohlin Instrument Ltd., UK)
2. หัววัด plate and plate ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm (PP 40)

#### วิธีการทดลอง

1. เปิดเครื่อง Bohlin Rheometer, บีม, cooling และ thermostat ให้พร้อมต่อการใช้งาน
2. จากนั้นใส่หัววัด PP 40 แล้วทำการล๊อคเกลียว ตั้ง auto zero โดยตั้ง gap ที่ 500  $\mu\text{m}$
3. แล้วจึงเปิดโปรแกรมของเครื่อง เข้าไปที่ mode oscillation ตั้งสภาวะในการทำงานของเครื่องดังนี้

#### 3.1 Amplitude sweep test

- a. Pre condition : controlled stress

Shear stress	12.5	Pa
Apply time	10.00	s
Equilibrium time	5.00	s

- b. Parameters :

Minimum stress	0.01	Pa
Maximum stress	10	Pa
Frequency	1	Hz

- c. Isothermal : 25 องศาเซลเซียส

#### 3.2 Frequency sweep test

- a. Pre condition :

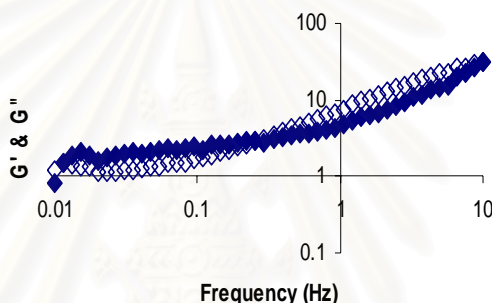
Shear rate	800	1/s
Apply time	5.0	s
Equilibrium time	1.0	s

- b. Parameters :

Minimum frequency	0.01	Hz
Maximum frequency	10	Hz
Strain	1	Pa

d. Isothermal : 25 องศาเซลเซียส

- นำตัวอย่างใส่ลงบนแท่นแล้วกดหัววัดลงมายังตำแหน่ง gap ที่ตั้งไว้ แล้วกดให้ขอบของตัวอย่างอยู่ในลักษณะโค้งงอ ก่อนทำการทดลองให้ปลดล็อคหัววัด แล้วจึงกด start เพื่อเริ่มการทำงานของเครื่อง
- สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า storage modulus (G') และค่า loss modulus (G'') กับการเปลี่ยนแปลงความถี่



รูปที่ ก.2 กราฟ Frequency sweep test แสดงค่า G' (◆) และค่า G'' (◇) ของแบทเทอร์

9. วิเคราะห์ความสามารถในการเกาะติดของแบทเทอร์ ตามวิธีของ Dogan และคณะ (2005)

วิธีการทดลอง

- นำชิ้นแครอทขนาด 1x1x6 เซนติเมตรมาชุบลงในแบทเทอร์เป็นเวลา 30 วินาที แล้วตั้งขึ้นให้สะเด็ดแบทเทอร์เป็นเวลา 10 วินาที
- จากนั้นชั่งน้ำหนักแล้วคำนวณการเกาะติดของแบทเทอร์จากสูตรต่อไปนี้

$$\text{การเกาะติดของแบทเทอร์ (\%)} = \frac{(C - I)}{I} \times 100$$

เมื่อ C = น้ำหนักของชิ้นแครอทชุบแบทเทอร์  
 I = น้ำหนักของชิ้นแครอทที่ไม่ชุบแบทเทอร์



## ภาคผนวก ค.

## สูตรของแป้งทอด

## 1. รายละเอียดของแป้งทอดกรอบ (tempura flour) ทางการค้า

ยี่ห้อที่ 1

## ส่วนผสม

แป้งสาลี	75 %	แป้งข้าวโพด	9 %
แป้งข้าวเจ้า	13 %	ผงฟู	3 %

ยี่ห้อที่ 2

## ส่วนผสม

แป้งสาลี		เกลือ	
แป้งข้าวเจ้า		ผงฟู	
แป้งข้าวโพด		ไม้ใส่ผงชูรส	

ยี่ห้อที่ 3

## ส่วนผสม

แป้งสาลีโปรตีนสูง	89 %	อื่นๆ	1 %
แป้งมันสำปะหลัง	6 %	ใช้ผงชูรส	
ผงฟู	4 %		

ยี่ห้อที่ 4

## ส่วนผสม

แป้งสาลี	85 %	เกลือ	1 %
แป้งข้าวเหนียว	5 %	ไม้ใส่วัตถุกันเสีย	
ผงฟู	9 %		



## ยี่ห่อที่ 5

### ส่วนผสม

แป้งสาลี	69 %	เบกิ้งโซดา	0.6 %
แป้งข้าวโพด	15 %	ผงกระเทียม	0.5 %
แป้งข้าวเจ้า	9 %	พริกไทย	0.3 %
น้ำตาล	3 %	ไข่ผงชูรส	
เกลือ	2.1 %		

จากนั้นนำเบทเทอร์ทั้ง 5 ยี่ห้อมาทอดในพิมพ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.75 เซนติเมตร ในน้ำมันปาล์ม 1 ลิตร ที่อุณหภูมิ  $170 \pm 10$  องศาเซลเซียส เวลา  $10 \pm 1$  นาที แล้วนำมาวิเคราะห์ ร้อยละความชื้นและน้ำมันดูดซึบ ดังแสดงในตารางที่ ค.1 พบว่าร้อยละน้ำมันดูดซึบจะมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับร้อยละความชื้นที่มีอยู่ในก้อนเบทเทอร์หลังทอด

ตารางที่ ค.1 ร้อยละความชื้นและน้ำมันดูดซึบ \* ในตัวอย่างเบทเทอร์หลังทอด 5 ยี่ห่อ

ตัวอย่าง	ความชื้น <sup>1</sup> (%)	น้ำมัน <sup>2</sup> (%)
ยี่ห่อที่ 1	15.14 $\pm$ 0.19	42.20 $\pm$ 2.14
ยี่ห่อที่ 2	26.50 $\pm$ 0.20	29.17 $\pm$ 0.14
ยี่ห่อที่ 3	25.81 $\pm$ 0.80	28.99 $\pm$ 1.71
ยี่ห่อที่ 4	26.60 $\pm$ 1.62	32.71 $\pm$ 0.90
ยี่ห่อที่ 5	34.76 $\pm$ 1.12	15.23 $\pm$ 1.29

\* ค่า mean $\pm$ SD

<sup>1</sup> น้ำหนักเปียก (wet basis)

<sup>2</sup> น้ำหนักแห้ง (dry basis)

## 2. สูตรแบทเทอร์แป้งข้าวเจ้า

ตารางที่ ค.2 ส่วนประกอบของแบทเทอร์แต่ละสูตร

สูตรของแบทเทอร์	น้ำหนัก (กรัม)			HPMC (กรัม)	
	แป้งข้าว	เกลือ	น้ำตาล	E4M	K4M
Control	100.00	2.50	2.00	-	-
E4M 0.25 %	100.00	2.50	2.00	0.25	-
E4M 0.50 %	100.00	2.50	2.00	0.50	-
K4M 0.25 %	100.00	2.50	2.00	-	0.25
K4M 0.50 %	100.00	2.50	2.00	-	0.50

## ภาคผนวก ง.

## ตารางผลการทดลอง

ตารางภาคผนวกที่ ง.1 สมบัติการไหล\* ของ HPMC เข้มข้น 1% ที่ shear rate 1-100 (1/s)  
อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

HPMC	Treatment	K (Pa.s <sup>n</sup> )	n	R <sup>2</sup>
E4M	ควบคุม	0.21±0.02	0.93±0.01	1.00±0.00
	เกลือ 2.5 %	0.14±0.01	0.93±0.00	1.00±0.00
	น้ำตาล 2.0 %	0.25±0.02	0.92±0.01	1.00±0.00
	เกลือและน้ำตาล	0.17±0.01	0.95±0.00	1.00±0.00
K4M	ควบคุม	0.20±0.01	0.96±0.03	1.00±0.00
	เกลือ 2.5 %	0.12±0.02	0.96±0.03	1.00±0.00
	น้ำตาล 2.0 %	0.24±0.00	0.94±0.01	1.00±0.00
	เกลือและน้ำตาล	0.16±0.00	0.95±0.00	1.00±0.00

\* ค่า Mean± SD

ตารางภาคผนวกที่ ง.2 สมบัติการไหล\* ของแบทเทอร์ที่ผสม HPMC ที่ shear rate 1-100 (1/s)  
อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

HPMC	ความเข้มข้น (%)	Yield stress; $\sigma_0$ (Pa)	K (Pa.s <sup>n</sup> )	n	Hysteresis loop (Pa.s <sup>-1</sup> )
E4M	0.00	2.72±0.01	0.43±0.02	1.13±0.03	745.33±35.99
	0.25	4.37±0.03	0.90±0.01	1.01±0.02	1162.92±20.99
	0.50	4.75±0.01	1.52±0.02	0.95±0.01	1522.69±18.67
K4M	0.00	2.72±0.03	0.43±0.01	1.13±0.03	744.10±30.11
	0.25	3.64±0.02	0.53±0.02	1.07±0.03	757.75±97.08
	0.50	4.59±0.01	0.64±0.03	1.06±0.01	1031.44±10.14

\* ค่า Mean± SD

ตารางภาคผนวกที่ ง.3 ดรรชนีการดูดซับน้ำ\* ของแป้งข้าวที่ผสม HPMC

ชนิดของ HPMC	ความเข้มข้น (%)	ดรรชนีการดูดซับน้ำ (กรัมต่อกรัมสตาร์ชแห้ง)
E4M	0.00	1.78±0.02
	0.25	2.21±0.03
	0.50	2.26±0.02
K4M	0.00	1.81±0.01
	0.25	2.21±0.03
	0.50	2.24±0.02

\* ค่า Mean±SD

ตารางภาคผนวกที่ ง.4 ร้อยละความชื้นและน้ำมันดูดซับ\* ในก้อนแบทเทอร์ที่ผสม HPMC หลังทอด

ชนิดของ HPMC	ความเข้มข้น (%)	ความชื้น <sup>1</sup> (%)	น้ำมัน <sup>2</sup> (%)
E4M	0.00	5.77±0.01	18.84±0.01
	0.25	11.17±0.05	14.27±0.03
	0.50	12.12±0.03	10.43±0.01
K4M	0.00	5.73±0.01	18.84±0.01
	0.25	9.15±0.02	15.15±0.02
	0.50	10.79±0.02	12.55±0.03

\* ค่า Mean± SD

<sup>1</sup> น้ำหนักเปียก (wet basis)

<sup>2</sup> น้ำหนักแห้ง (dry basis)

ตารางภาคผนวกที่ ง.5 ความแข็ง\* ของก้อนแบทเทอร์ที่ผสม HPMC หลังทอด

ชนิดของ HPMC	ความเข้มข้น (%)	ความแข็ง <sup>1</sup> (kg force)
E4M	0.00	5.36±2.66
	0.25	4.65±1.43
	0.50	4.45±2.39
K4M	0.00	5.36±2.66
	0.25	4.95±2.44
	0.50	4.90±3.13

\* ค่า Mean± SD

<sup>1</sup> peck สูงสุด

ตารางภาคผนวกที่ ง.6 ร้อยละการเกาะติด\* ของแบทเทอร์ที่ผสม HPMC

ชนิดของ HPMC	ความเข้มข้น (%)	Coating pick up (%)		Reduction (%)
		0 วินาที	60 วินาที	
E4M	0.00	21.23±0.01	17.51±0.01	17.52
	0.25	41.67±0.05	28.19±0.02	32.35
	0.50	62.82±0.03	38.57±0.02	38.60
K4M	0.00	20.56±0.04	17.34±0.03	15.66
	0.25	39.27±0.09	29.35±0.04	25.26
	0.50	51.02±0.04	33.76±0.02	33.83

\* ค่า Mean± SD

ตารางภาคผนวกที่ ง.7 ร้อยละความชื้นและน้ำมันดูดซับ\* ในเปลือกแป้งหลังทอด

ชนิดของ HPMC	ความเข้มข้น (%)	ความชื้น <sup>1</sup> (%)	น้ำมัน <sup>2</sup> (%)
E4M	0.00	22.22±0.02	37.15±0.07
	0.25	28.28±0.05	35.38±0.02
	0.50	31.61±0.02	28.28±0.11
K4M	0.00	22.16±0.02	37.15±0.07
	0.25	25.61±0.03	36.26±0.09
	0.50	28.20±0.03	33.98±0.17

\* ค่า Mean± SD

<sup>1</sup> น้ำหนักเปียก (wet basis)

<sup>2</sup> น้ำหนักแห้ง (dry basis)

ตารางภาคผนวกที่ ง.8 ร้อยละความชื้นและน้ำมันดูดซับ\* ในชิ้นแครอทหลังทอด

ชนิดของ HPMC	ความเข้มข้น (%)	ความชื้น <sup>1</sup> (%)	น้ำมัน <sup>2</sup> (%)
E4M	0.00	83.72±0.02	13.72±0.12
	0.25	86.22±0.05	8.08±0.09
	0.50	86.75±0.02	7.02±0.08
K4M	0.00	84.06±0.02	13.63±0.10
	0.25	85.40±0.03	9.48±0.05
	0.50	85.84±0.03	8.32±0.12

\* ค่า Mean± SD

<sup>1</sup> น้ำหนักเปียก (wet basis)

<sup>2</sup> น้ำหนักแห้ง (dry basis)

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววรรดา อำนวย เกิดวันที่ 16 กรกฎาคม พ.ศ.2526 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญา  
วิทยาศาสตรบัณฑิตจาก ภาควิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัย  
รังสิต เมื่อปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาในระดับปริญญาโท ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2548



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย