

การปรับปรุงความกรอบของผลิตภัณฑ์ไก่ทอดคาราอาเกะแช่เยือกแข็งที่มีการอุ่นด้วยเตาอบไมโครเวฟ โดยใช้ไมโครแคปซูล ไคโตซาน-ซิลิกา-น้ำมันถั่วเหลือง

Improving the Crispness of Microwave-reheated Frozen Karaage Fried Chicken Products Using Chitosan-Silica-Soybean oil Microcapsules

พันศักดิ์ ส่งเสริม (Pansak Songserm)* วรณัฐ ศรีใจภูารักษ์ (Voranut Srijesdaruk)**

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแป้งชุบทอดโดยการเติมไมโครแคปซูล (MCcs) สำหรับไก่คาราอาเกะแช่เยือกแข็งที่อุ่นด้วยไมโครเวฟ เพื่อให้มีความกรอบใกล้เคียงกับการอุ่นด้วยการทอดแบบน้ำมันท่วม โดยศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิต MCcs จาก ค่าพีเอช และเวลาในการตกตะกอน MCcs วางแผนการทดลองแบบ central composite design พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต MCcs คือ พีเอช เท่ากับ 7.3 และเวลาในการตกตะกอนเท่ากับ 36 ชั่วโมง โดยมีขนาดอนุภาคเล็ก ($3.3\ \mu\text{m}$) และมีประสิทธิภาพในการเคลือบหุ้มน้ำมันสูง (ร้อยละ 67.3) เมื่อเติม MCcs ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0, 1, 1.5, 2.0 และ 2.5 ในแป้งชุบทอด แล้วนำไปทอดที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เวลา 3 นาทีและแช่เยือกแข็งที่ -30 ± 1 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง พบว่าผิวกรอบของแป้งชุบทอดที่เติม MCcs ความเข้มข้นร้อยละ 1 ให้ค่าความกรอบสูงสุดและมีความแข็งต่ำสุดหลังจากอุ่นร้อนโดยไมโครเวฟ จึงเลือกนำแป้งชุบทอดที่มีการเติม MCcs ร้อยละ 1 มาใช้ผลิตไก่ทอดคาราอาเกะแช่เยือกแข็ง และประเมินทางประสาทสัมผัส โดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีการเติม MCcs พบว่าตัวอย่างที่มีการเติม MCcs ร้อยละ 1 มีค่าคะแนนความชอบด้านความกรอบมากกว่าที่ไม่เติม MCcs หลังจากการอุ่นโดยไมโครเวฟ

ABSTRACT

This research aims to develop a batter by improving crispness of frozen Karaage chicken microwave reheated to be like deep-frying reheated by adding microcapsules (MCcs). The optimum conditions for MCcs production including pH and precipitation time of MCcs were studied with the central composite design experiments. The optimum conditions for production MCcs were at pH 7.3 and precipitation time of 36 hours. This condition is given small particles ($3.3\ \mu\text{m}$) and highest efficiency oil coatings (67.3%). Addition MCcs at concentrations of 0, 1, 1.5, 2.0, and 2.5% of batter before fried at 170 degrees Celsius for 3 minutes and frozen at -30 ± 1 degrees Celsius for 3 hours before reheating by microwave method. The batter's crispy surface with MCcs added at a concentration of 1% provides maximum crispness and has the lowest hardness and when using a batter for a deep-fried batter with 1% MCcs to produce Frozen Karaage Fried Chicken and sensory evaluation compared without MCcs samples. The result showed that samples with 1% MCcs addition had a more crispiness score than samples without MCcs.

คำสำคัญ: แป้งชุบทอด ไมโครเวฟ MCcs

Keywords: Batter, Microwave, Microcapsule

*นักศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

ประเทศไทยส่งออกผลิตภัณฑ์แปรรูปจากไก่มากเป็นอันดับหนึ่งของโลก มีสัดส่วนร้อยละ 31.0 ในเชิงปริมาณ (ชัยวัช, 2663) และยังคงมีการเติบโตต่อเนื่อง การส่งออกในปี 2560 มีปริมาณรวมกว่า 5.32 แสนตัน คิดเป็นการเติบโตร้อยละ 11.3 เพิ่มขึ้นร้อยละ 3.0 เมื่อเทียบกับปีก่อนหน้า โดยญี่ปุ่นเป็นประเทศผู้นำเข้าผลิตภัณฑ์ไก่แปรรูปหลักของไทย คิดเป็นร้อยละ 7.1 ของปริมาณการนำเข้ารวมจากทั่วโลก ในปัจจุบันการอุ่นอาหารพร้อมรับประทานแช่เยือกแข็งด้วยเตาอบไมโครเวฟเป็นที่นิยมมากทั้งในภาคครัวเรือนและเชิงพาณิชย์ เนื่องจากมีประสิทธิภาพมากสามารถอุ่นอาหารให้ร้อนได้อย่างรวดเร็ว แต่มักพบปัญหาในกรณีการอุ่นอาหารทอดแช่เยือกแข็ง เนื่องจากส่วนผิวกรอบของอาหารทอดจะดูดซับความชื้นในระหว่างการอุ่นด้วยเตาอบไมโครเวฟ (Metaxas, Meredith, 1993) โดยพบว่าผู้ศึกษาวิธีการคงความกรอบในผลิตภัณฑ์อาหารชุบทอดพร้อมทานแช่เยือกแข็งแล้วอุ่นด้วยเตาอบไมโครเวฟ เช่น Kang, Chen (2014) ศึกษาการปรับปรุงความกรอบของนั้กเก็ตปลาที่อุ่นในเตาอบไมโครเวฟด้วยการเติม MCCs โคโตซาน – ซิลิกาไฮบริด (MCcs) ดังนั้นจึงเป็นแนวทางการวิจัยที่จะนำมาใช้ในการพัฒนาความกรอบของผลิตภัณฑ์ไก่ทอดคาราอาเกะแช่เยือกแข็งที่มีการอุ่นด้วยไมโครเวฟ

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต MCcs จากโคโตซาน-ซิลิกา-น้ำมันถั่วเหลือง (MCcs) และผลของปริมาณการเติมลงในแป้งชุบต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและลักษณะทางประสาทสัมผัสของไก่ทอดคาราอาเกะที่มีการอุ่นด้วยเตาอบไมโครเวฟเพื่อหาปริมาณการเติมที่เหมาะสม

วิธีการวิจัย

1. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไมโครแคปซูลจากโคโตซาน-ซิลิกา (MCcs)

วางแผนการทดลองแบบ central composite design (CCD) ด้วยโปรแกรมสถิติสำเร็จรูป Design Expert® โดยมีปัจจัยที่ต้องการศึกษา คือ ค่าพีเอช ที่ระดับต่าง ๆ ได้แก่ 5 - 9 (A) และเวลาสำหรับสำหรับการตกตะกอนแคปซูลที่ 24 - 36 ชั่วโมง (B) แสดงดังตารางที่ 1

1.1 ขนาดของอนุภาค (particle size) ทำการวัดขนาดอนุภาคโดยใช้ Ocular micrometer เป็นตัววัด ซึ่งจะต้องคำนวณหาขนาดของ Ocular micrometer โดยเทียบกับขนาดของ Stage micrometer

1.2 ประสิทธิภาพการเคลือบหุ้ม (Encapsulation Efficiency, %EE) โดยนำ MCcs ที่ผลิตได้ปริมาณ 0.5 กรัม ไปผสมกับเฮกเซนและเขย่าด้วยมือ 2 นาทีเพื่อแยกเอาน้ำมันที่ไม่ถูกเคลือบหุ้ม (NO) และอีกตัวอย่างใช้ ultrasonic vibrations อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาทีและนำไปกรองและสกัดเอาน้ำมันเพื่อหาปริมาณน้ำมันทั้งหมด (TO) ผลต่างของค่า TO กับ NO จะบอกค่าปริมาณน้ำมันที่ถูกเคลือบหุ้ม (EO) ซึ่งสามารถนำไปคำนวณค่าประสิทธิภาพการเคลือบหุ้มได้จากสมการ 1

$$\%EE = \frac{EO(g)}{TO(g)} \times 100 \text{-----}(1)$$

วิเคราะห์ผลการทดลอง โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Design Expert® ทางสถิติแบ่งออกเป็น คือ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square: R-Sq) และการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากนั้นสร้างสมการทำนายปัจจัยเรื่อง เวลาและพีเอชในกระบวนการไมโครแคปซูลขึ้นโดยการใส่ค่าของปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยของเวลา และพีเอช ซึ่งมีค่าตอบสนองคือ ค่าขนาดอนุภาค ประสิทธิภาพในการเคลือบหุ้มน้ำมัน โดยที่ตัวแปรอิสระคือค่า พีเอช และเวลาในกระบวนการเคลือบหุ้ม

วิเคราะห์ข้อมูลเพื่อสร้างสมการถดถอยและพิจารณาสมการจากค่า lack of fit ถึงความสมบูรณ์ของสมการ ($p > 0.05$) ก่อนสร้างพื้นผิวตอบสนองโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Design Expert® รุ่น 12

1.3 หาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ได้ MCcs ที่มีค่าประสิทธิภาพการเคลือบหุ้มสูงที่สุดและค่าขนาดของอนุภาคเล็กที่สุด มีค่าเสถียรภาพต่อความร้อนไม่สลายตัวขณะทอด จะใช้โปรแกรมสถิติสำเร็จรูปทางสถิติ Design Expert คัดเลือก 1 สภาวะที่ทำให้ MCcs ที่มีค่าประสิทธิภาพการเคลือบหุ้มสูงที่สุด ค่าขนาดอนุภาคเล็กที่สุด และมีค่าเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่าอุณหภูมิการทอด (170 องศาเซลเซียส)

1.4 การยืนยันผลและเปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลองจริง ของค่าขนาดอนุภาคกับค่าร้อยละประสิทธิภาพการเคลือบหุ้มของไมโครแคปซูลพืสุจน์แบบจำลอง (validation) โดยการทำการทดลองที่เป็นอิสระภายใต้ขอบเขตของตัวแปรแต่ละตัวที่ศึกษา เปรียบเทียบค่าที่สังเกตกับค่าทำนายเพื่อดูความถูกต้องของแบบจำลอง ($p > 0.05$)

2. ศึกษาปริมาณ MCcs ที่เหมาะสมสำหรับเติมในแป้งชุบทอด

โดยศึกษาผลที่มีต่อสมบัติทางเคมีกายภาพ ความกรอบของผิวกรอบ การดูดซับน้ำมันและประเมินทางประสาทสัมผัสไก่ทอดคาราอาเกะแช่เยือกแข็งชุบแป้งทอดที่มี MCcs ที่โคโตซาน-ซิลิกา (MCcs) โดย แป้งชุบทอดผสมกับน้ำเย็นในอัตราส่วน 1:1 ด้วยเครื่องตีปั่นผสมอาหารและผสม MCcs ที่ผ่านการผลิตในสภาวะที่มีความเหมาะสม โดยการเติม MCcs ที่ปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0, 1.0, 1.50, 2.0, 2.5 กรัม โดยทั้งหมดใช้แผนการทดลองแบบ completely randomized design ทำการอุ่นตัวอย่างโดยใช้ไมโครเวฟที่มีความถี่ 2450 เมกะเฮิร์ตซ์/700 วัตต์ 90 วินาทีก่อนทำการวิเคราะห์

2.1 วิเคราะห์ปริมาณไขมัน ตามวิธีมาตรฐาน AOAC (2000) ไขมันรอบน้ำหนัก 3 กรัม ที่ผ่านการทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อน 105 องศาเซลเซียสที่มีน้ำหนักที่ ไปสกัดน้ำมันด้วยเฮกเซน โดยรายงานน้ำหนักของน้ำมันที่สกัดได้ต่อน้ำหนักของตัวอย่าง

2.2 วิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส ด้วยเครื่อง Texture Analyzer โดยหัววัด Knife set เพื่อวิเคราะห์หา ค่า hardness (peak force) ในหน่วย กรัมและค่า number of peak (ความกรอบ) เนื้อไก่ส่วนสะโพกส่วนน้ำหนักประมาณ 20 กรัม/ชิ้น จุ่มไปเคลือบด้วยแป้งแห้งก่อนชุบในน้ำแป้งชุบทอดเป็นเวลา 10 วินาที ก่อนทอดแบบ deep-fried ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที และแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -30 ± 1 องศาเซลเซียส ด้วยตู้แช่เยือกแข็งแบบลมเย็น (แช่เยือกแข็งแบบเร็ว) เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง ก่อนเคลื่อนมาเก็บที่ตู้แช่เยือกแข็งปกติอุณหภูมิ -18 ± 1 องศาเซลเซียส

2.3 การประเมินทางประสาทสัมผัสของไก่ทอดคาราอาเกะที่มีการเติมไมโครแคปซูล เปรียบเทียบไก่ทอดคาราอาเกะที่อุ่นด้วยวิธีการต่างกัน (น้ำมันท่วม กับไมโครเวฟ) โดยใช้การทดสอบแบบ 9 point hedonic scale วิเคราะห์ข้อมูลโดยโปรแกรมสถิติ SPSS รุ่น 28 และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple range และวิเคราะห์ความแปรปรวน (Anova) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการศึกษา

1. สภาวะที่เหมาะสมในการผลิต MCcs จากโคโตซาน-ซิลิกา (MCcs)

ค่าขนาดอนุภาค และประสิทธิภาพการเคลือบหุ้มน้ำมันของต่างๆ ในการผลิต MCcs จากโคโตซาน-ซิลิกา (MCcs) ดังตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของตัวแบบจำลองเพื่อหารูปแบบสมการที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ได้แสดงข้อมูลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 2 การวิเคราะห์ผลทางสถิติของแบบจำลอง (Model summary statistic) พบว่ารูปแบบที่เหมาะสมสำหรับทำนายค่าขนาดอนุภาค คือ สมการรูปแบบกำลังสอง (Quadratic) ส่วนค่าประสิทธิภาพการเคลือบหุ้ม

น้ำมันคือ สมการรูปแบบเชิงเส้น (Linear) ทั้งนี้เนื่องจากค่า P-value ของรูปแบบสมการทั้งสองมีค่าน้อยกว่า 0.05 อีกทั้งเมื่อพิจารณาโดยประเมินที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) พบว่าตัวแบบจำลองทั้งสองสมการมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเข้าใกล้ 1 โดยมีค่าเท่ากับ 0.97 และ 0.92 ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแบบจำลองกำลังสอง (Quadratic model) มีความเหมาะสมสำหรับใช้ในการทำนายค่าขนาดอนุภาค และสมการแบบจำลองเชิงเส้น (Linear model) มีเหมาะสมสำหรับเป็นตัวแบบจำลองที่จะใช้ในการทำนายค่าประสิทธิภาพการเคลือบหุ้มสารแกน ในการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิต MCcs

ตารางที่ 1 ปัจจัยและค่าตอบสนองของกระบวนการ encapsulation สภาวะที่เหมาะสมในการผลิต MCcs จากโคโคซาน-ซิลิกา (MCcs)

Run	A: pH	B: time (hr.)	Particle Size (μm)	Encapsulation Efficiency (%EE)
1	7.00	38.49	4.64	69.46
2	7.00	30.00	4.77	58.44
3	9.83	30.00	12.08	77.15
4	7.00	30.00	5.00	57.05
5	5.00	24.00	2.47	58.64
6	7.00	21.51	5.05	53.94
7	4.17	30.00	1.09	55.03
8	9.00	36.00	9.61	73.43
9	9.00	24.00	9.95	76.12
10	5.00	36.00	2.44	57.67
11	7.00	30.00	4.75	69.47
12	7.00	30.00	4.65	61.39
13	7.00	30.00	5.03	69.01

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์หาแบบสมการที่เหมาะสมสำหรับค่าตอบสนอง

Responses	Equation	Sequential p-value	Lack of Fit p-value	Adjusted R^2	Predicted R^2
Particle size	Quadratic	0.0001	0.0734	0.9924	0.9734
%EE	Linear	0.0034	0.1288	0.9535	0.9211

1.1 ผลการวิเคราะห์ค่าขนาดอนุภาค

จากตารางที่ 1 พบว่าที่สภาวะ พีเอช เท่ากับ 9.83 และ เวลาตกตะกอน 30 ชั่วโมงมีขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 12.08 μm ในทางกลับกันที่สภาวะ พีเอช เท่ากับ 4.17 เวลาตกตะกอน 30 ชั่วโมง มีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดเท่ากับ 1.09 μm การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน สำหรับใช้ในการตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบจำลอง ดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 3 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบจำลองการถดถอยของค่าขนาดอนุภาค

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	120.67	5	24.13	312.96	< 0.0001	significant
A-pH	113.95	1	113.95	1477.57	< 0.0001	
B-time	0.1128	1	0.1128	1.46	0.2658	
AB	0.0240	1	0.0240	0.3115	0.5941	
A ²	6.59	1	6.59	85.42	< 0.0001	
B ²	0.0740	1	0.0740	0.9593	0.3600	
Residual	0.5398	7	0.0771			
Lack of Fit	0.4290	3	0.1430	5.16	0.0734	not significant
Pure Error	0.1108	4	0.0277			
Cor Total	121.21	12				

A significant at 5% level ($p < 0.05$), $R^2 = 99.55\%$

ตารางที่ 4 ตัวแบบสำหรับทำนายค่าขนาดอนุภาค

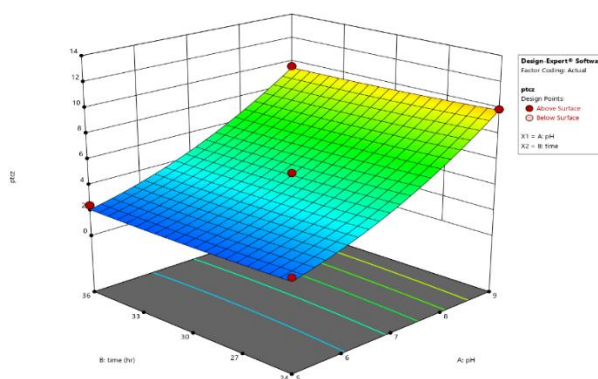
Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	4.84	1	0.1242	4.55	5.13	
A-pH	3.77	1	0.0982	3.54	4.01	1.00
B-time	-0.1187	1	0.0982	-0.3509	0.1134	1.00
AB	-0.0775	1	0.1388	-0.4058	0.2508	1.00
A ²	0.9731	1	0.1053	0.7242	1.22	1.02
B ²	0.1031	1	0.1053	-0.1458	0.3521	1.02

จากตารางที่ 3 เมื่อตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบสมการ พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น (Model) มีค่า P-value ค่าน้อยกว่า 0.001 และเมื่อตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากค่า Lack of fit พบว่าเหมาะสมกับรูปแบบสมการเชิงเส้นโค้ง อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า P-value มากกว่า 0.05 และการประเมินค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.99

ในส่วนของการวิเคราะห์แต่ละตัวแปรนั้น แต่ละพจน์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีการแสดงนัยสำคัญทางสถิติของตัวแปรอิสระแต่ละตัว (P-value) ในตารางที่ 3 เมื่อพิจารณาในส่วนของพจน์เชิงเส้น (Linear terms) พบว่าตัวแปรอิสระได้แก่ pH(A) และเวลาในการตกตะกอน (B) มีค่า P-value เท่ากับ <0.0001 และ 0.2658 ตามลำดับ ซึ่งตัวแปรอิสระในพจน์ที่กล่าวมามีเฉพาะพจน์ของตัวแปร pH (A) เท่านั้น ที่มีค่า P-value < 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงให้เห็นว่าตัวแปรอิสระดังกล่าวมีผลต่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าขนาดอนุภาค MCcs ในขณะที่เมื่อพิจารณาในส่วนพจน์อิทธิพลร่วม (Interaction terms) พบว่าค่า P-value ของตัวแปรอิสระได้แก่ พจน์อิทธิพลร่วมระหว่างพีเอชกับเวลาในการตกตะกอน (AB) มีค่า P-value เท่ากับ 0.5941 แสดงว่าไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองกับตัวแปรอิสระดังกล่าวอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) สุดท้ายพิจารณาในส่วนพจน์กำลังสอง (Square terms) จะเห็นว่าค่า P-value ของตัวแปรอิสระดังต่อไปนี้คือ พจน์กำลังสองของ pH (A²) และพจน์กำลังสองของเวลาใน

การตกตะกอน (B²) มีค่า P-value เท่ากับ <0.0001 และ 0.3600 ตามลำดับ แสดงว่าตัวแปรอิสระของพจน์กำลังสองของ pH (A²) เท่านั้นที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% อีกทั้งตารางที่ 4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละพจน์ pH(A) และพจน์กำลังสองของ pH (A²) มีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 3.77 และ 0.9731 ลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวหมายความว่าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของค่าตัวแปร pH จะทำให้ขนาดของอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยจากตารางที่ 4 จะสามารถเขียนในรูปของสมการถดถอยและพล็อตเป็นกราฟพื้นผิวตอบสนองได้ดังสมการที่ 2 และรูปที่ 1 ตามลำดับ

$$\text{Particle Size} = 4.84 + 3.77A - 0.97A^2 \quad (2)$$



รูปที่ 1 แผนภูมิภาพพื้นผิวตอบสนองของค่าขนาดอนุภาค (ptcz) กับค่า pH (A) และเวลา (B)

1.2 ผลการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการเคลือบหุ้ม

จากตารางที่ 1 พบว่าที่สภาวะพีเอชเท่ากับ 9.83 เวลาตกตะกอนเท่ากับ 30 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการเคลือบหุ้มสูงสุด ร้อยละ 77.15 ในทางกลับกันที่สภาวะ พีเอชเท่ากับ 4.17 เวลาตกตะกอนเท่ากับ 30 ชั่วโมงมี ประสิทธิภาพการเคลือบหุ้มต่ำที่สุดเท่ากับร้อยละ 55.03

รูปของสมการถดถอยและพล็อตเป็นกราฟพื้นผิวตอบสนองของค่าประสิทธิภาพการเคลือบหุ้ม แสดงดัง สมการที่ 3 และดังรูปที่ 2 ตามลำดับ

ดังตารางที่ 5 เมื่อใช้ F-test ตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบสมการ พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น (Model) มีค่า P-value ค่าเท่ากับ 0.0034 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่า 0.05 ($p < 0.05$) และเมื่อตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากค่าความสมบูรณ์ (Lack of fit) พบว่าเหมาะสมกับรูปแบบเชิงเส้นตรงอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่า P-value มากกว่า 0.05 และการประเมินค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R²) พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.9613

ในส่วนของการวิเคราะห์ตัวแปรนั้น ตัวแปรอิสระในแต่ละพจน์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะมีการแสดงนัยสำคัญทางสถิติของตัวแปรอิสระแต่ละตัว (P-value) ในตารางที่ 5 เมื่อพิจารณาในส่วนของพจน์เชิงเส้น (Linear terms) พบว่าตัวแปรอิสระได้แก่ pH(A) และเวลาในการตกตะกอน (B) มีค่า P-value เท่ากับ 0.0013 และ 0.2386 ตามลำดับ ซึ่งตัวแปรอิสระในพจน์ที่กล่าวมามีเฉพาะพจน์ของตัวแปร pH (A) เท่านั้น ที่มีค่า P-value < 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงให้เห็นว่าตัวแปร pH มีนัยสำคัญต่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าประสิทธิภาพการเคลือบหุ้มน้ำมันของ MCcs โดยจากตารางที่ 6 มีค่าสัมประสิทธิ์เท่า 64.37 หมายถึงเมื่อมีเพิ่มสูงขึ้นของ

pH จะส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการเคลือบหมื่นน้ำมันสูงตามไปด้วย สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Allen, Matijevic, 1969) เมื่ออยู่ในสภาวะที่พีเอชสูงขึ้นจะเร่งการเกิด โครงสร้างแบบ sol-gel ของซิลิกา

ตารางที่ 5 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบจำลองการถดถอยของค่าประสิทธิภาพการเคลือบหมื่น

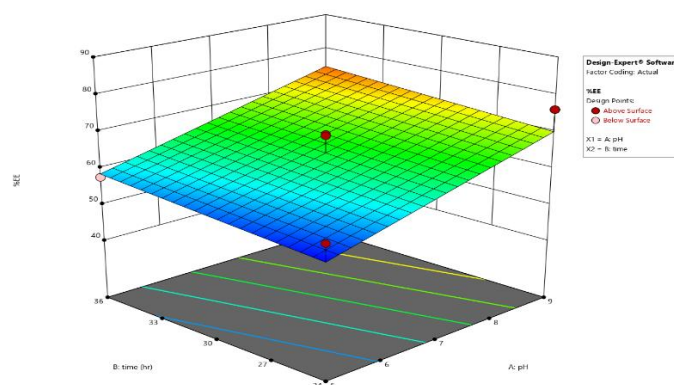
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	562.47	2	281.24	10.57	0.0034	significant
A-pH	520.68	1	520.68	19.58	0.0013	
B-time	41.79	1	41.79	1.57	0.2386	
Residual	265.97	10	26.60			
Lack of Fit	129.25	6	21.54	0.6303	0.7082	not significant
Pure Error	136.72	4	34.18			
Cor Total	828.44	12				

A significant at 5% level ($p < .05$), $R^2 = 96.13\%$

ตารางที่ 6 ตัวแบบสำหรับทำนายค่าประสิทธิภาพการเคลือบหมื่น

Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	64.37	1	1.43	61.18	67.56	
A-pH	8.07	1	1.82	4.00	12.13	1.0000
B-time	2.29	1	1.82	-1.78	6.35	1.0000

$$\%EE = 64.37 + 8.07A \text{ สมการที่ } 4.5 - 2.29B \quad (3)$$



รูปที่ 2 แผนภูมิภาพพื้นผิวตอบสนองของค่าประสิทธิภาพการเคลือบหมื่นกับค่า pH (A) และเวลา (B)

1.3 หาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต MCcs จากไคโตซาน-ซิลิกา (MCcs) โดยกำหนดเกณฑ์คัดเลือก จากค่าเคลือบหมื่นสูงที่สุดและค่าขนาดของอนุภาคเล็กที่สุด สามารถทำนายค่าดังกล่าวได้ ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 เกณฑ์เพื่อกำหนดเป้าหมายของผลิตภัณฑ์

ตัวแปร	เป้าหมาย	ค่าทำนาย
A: ค่าความเป็นกรด-ด่าง	อยู่ในเกณฑ์	7.30
B: เวลาในการตกตะกอน (ชั่วโมง)	อยู่ในเกณฑ์	36.00
ขนาดอนุภาค (μm)	น้อยที่สุด	3.33
ประสิทธิภาพการเคลือบหุ้มน้ำมัน (%)	มากที่สุด	67.32
Desirability		0.604

การหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ค่าขนาดอนุภาคเล็กที่สุดในขณะเดียวกันต้องมีประสิทธิภาพในการเคลือบหุ้มมากที่สุด โดยการนำสมการถดถอยกำลังสอง (สมการที่ 2) และสมการเชิงเส้น (สมการที่ 3) มากำหนดเงื่อนไขดังตารางที่ 7 พบว่าค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดจากการคำนวณของโปรแกรม Design Expert คือ ที่สภาวะพีเอช เท่ากับ 7.3 และเวลาในการตกตะกอนเท่ากับ 36 ชั่วโมง โดยให้ค่าจากการทำนายของค่าขนาดอนุภาคและประสิทธิภาพการเคลือบหุ้มเท่ากับ 3.3 μm และร้อยละ 67.32 ตามลำดับ โดยที่มีค่าการยอมรับ (Desirability) เท่ากับ 0.604

1.4 การยืนยันผลและเปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลองจริงของค่าขนาดอนุภาคกับค่าร้อยละประสิทธิภาพการเคลือบหุ้มของไมโครแคปซูล

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น (สมการที่ 1 และ 2) พบว่าสามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มาใช้ในการทำนายค่าขนาดอนุภาคและค่าประสิทธิภาพการเคลือบหุ้มได้หรือไม่ จึงได้นำสภาวะที่เหมาะสมที่กำหนดเกณฑ์ดังรายละเอียดในตารางที่ 7 ไปทำการทดลองจริง ซึ่งได้ทำการทดลองซ้ำจำนวนทั้งสิ้น 3 ครั้งการทดลอง พร้อมทั้งได้เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ได้จากการทำนายของสมการถดถอยเพื่อยืนยันผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ผล ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ผลการพิสูจน์แบบจำลอง (Validation)

Response	Predicted Mean	Std Dev	n	SE Pred	95% PI low	Data Mean	95% PI high
ptcz	3.30	0.277	3	0.202	2.360	3.23	4.319
%EE	64.36	5.157	3	3.303	57.008	67.33	71.728

โดย ptcz = ขนาดอนุภาค (μm)
%EE = ประสิทธิภาพการเคลือบหุ้ม (ร้อยละ)

จากผลการทดลองเพื่อยืนยันผลจะเห็นว่าค่าขนาดอนุภาค และค่าประสิทธิภาพการเคลือบหุ้ม (Data Mean) มีค่าเท่ากับ 3.23 และ 67.33 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าได้จากการทำนาย (Predicted Mean) คือ 3.30 และ 64.36 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาด้วยโปรแกรมสถิติสำเร็จรูป Design Expert พบว่ามีค่าเป็นยอมรับไม่เกิน 5% อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนที่เหมาะสมที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความน่าเชื่อถือและสามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ 1 และ 2 เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ทำนายค่าขนาดอนุภาค และประสิทธิภาพการเคลือบหุ้มของ MCCs และที่สภาวะที่เหมาะสม (พีเอช 7.3 และเวลาตกตะกอน 36 ชั่วโมง) จะให้ค่าเสถียรภาพต่อความร้อนหลังจากการทำแห้งด้วยวิธี lyophilization

2. ผลการศึกษาปริมาณMCcsที่โคโคซาน-ซิลิกา (MCcs) สำหรับแป้งชูปทอด

ผลการเติมปริมาณMCcsร้อยละ 0, 1.0, 1.50, 2.0, 2.25 ในน้ำแป้งชูปทอดที่มีต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของผิวกรอบแป้งชูปทอด ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลทางเคมีกายภาพของผิวกรอบแป้งชูปทอดที่มีการเติมMCcsที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ

ทรีตเมนต์	ค่าไขมัน ^{ns} (ร้อยละ)	ค่าความแข็ง (กรัม)	ค่าความกรอบ (จำนวนฟิค)
0% MCcs	14.27±0.19	70.64±11.4 ^d	7.87±3.39 ^c
1% MCcs	14.05±0.36	90.56±10.8 ^c	17.75±8.31 ^a
1.5% MCcs	14.52±0.35	122.55±13.5 ^b	9.87±2.90 ^b
2.0% MCcs	14.20±0.33	134.52±13.6 ^b	8.12±2.10 ^b
2.5% MCcs	14.33±0.07	146.59±17.8 ^a	1.25±3.01 ^c

*MCcs หมายถึง MCcsโคโคซานซิลิกา-น้ำมันพืช

*ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวอักษรยกกำลังต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยการทดสอบแบบ Duncan's Multiple Rang Test

2.1 ผลวิเคราะห์ปริมาณไขมัน

จากตารางที่ 9 การเติม MCcs ที่ระดับแตกต่างกันประกอบด้วยร้อยละ 0, 1, 1.5, 2.0 และ 2.5 พบว่าการเติมMCcs ไม่ส่งผลให้ค่าไขมัน

2.2 ผลวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส

ส่วนของค่าความแข็งพบว่า การเติม MCcs ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 มีผลให้ค่าความแข็งมีค่าความแข็งต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การเติม MCcs ที่ความเข้มข้นอื่นๆ โดยการเติม MCcs ที่ระดับความเข้มข้นสูงขึ้นไปส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แต่ที่ระดับการเติม MCcs ที่ร้อยละ 1.5 และ 2.0 มีผลต่อค่าความแข็งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) อย่างไรก็ตามการไม่มีการเติมMCcsทำให้ผิวกรอบที่ผ่านการอุ่นด้วยไมโครเวฟมีค่าต่ำที่สุด และค่าความกรอบต่ำสุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Kang, Chen, 2014) นักเก็ตปลาที่มีระดับความเข้มข้น MCCS ร้อยละ 1 ของน้ำแป้ง ที่เมื่อนำกลับมาอุ่นโดยใช้เตาไมโครเวฟทำให้ผิวกรอบของนักเก็ตปลาที่มีแรงดัดต่ำสุดและค่าความกรอบมีค่าในช่วงที่ยอมรับได้ และ งานวิจัยของ KangและChen (2014) พบว่าการเติม MCcs ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1 นั้นมีผลทำให้ค่าความกรอบสูงกว่าตัวอย่างอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ดังนั้นการเติม MCcs ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 ในแป้งชูปทอดในผลิตภัณฑ์ไก่คาราอาเกะแช่แข็ง เมื่อนำมาอุ่นด้วยไมโครเวฟพบว่าเป็นสูตรที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำไปผลิตเป็นตัวอย่างไก่แช่เยือกแข็งที่อุ่นด้วยไมโครเวฟ

2.3 ผลการประเมินทางประสาทสัมผัสของไก่ทอดคาราอาเกะที่มีการเติมไมโครแคปซูล

อีกทั้งเมื่อนำไปประเมินความชอบทางประสาทสัมผัส โดยเปรียบเทียบระหว่างการอุ่นด้วยไมโครเวฟเปรียบเทียบกับ การอุ่นแบบน้ำมันท่วม พร้อมเปรียบเทียบการเติมและไม่มีการเติม MCcs ที่ร้อยละ 1 ของแป้งชูปทอดรวมตัวอย่างไก่คาราอาเกะทั้งหมด 4 ตัวอย่าง

ดังตารางที่ 10 พบว่าค่าคะแนนด้าน ลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส และความชอบโดยรวมมีค่าคะแนนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่ค่าความกรอบพบว่าตัวอย่างที่มีการเติม MCcs มีค่าความกรอบสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่มีการเติม การอุ่นโดยวิธีทอดแบบน้ำมันท่วมมีค่าความกรอบสูงกว่าตัวอย่างที่อุ่นด้วยวิธีไมโครเวฟ ตัวอย่าง

ที่ไม่มีการเติม MCcs จะมีค่าความชอบด้านความกรอบน้อยกว่าตัวอย่างที่มีการเติม MCcs แต่ตัวอย่างที่มีการเติม MCcs และอุ่นด้วยไมโครเวฟจะมีค่าคะแนนความชอบด้านการอมน้ำมันที่สูงกว่าตัวอย่างอื่นๆ

ตารางที่ 10 ค่าคะแนนในการประเมินทางประสาทสัมผัสของไก่กระอะเกะแซ่เยือกแข็งเปรียบเทียบระหว่างการอุ่นด้วยไมโครเวฟกับการอุ่นแบบน้ำมันท่วม พร้อมเปรียบเทียบการเติมและไม่มีการเติม MCcs ที่ร้อยละ 1 ของแป้งชูทอด

ทรีตเมนต์	ลักษณะปรากฏ ^{ns}	สี ^{ns}	กลิ่นรส ^{ns}	ความกรอบ**	การอมน้ำมัน**	ความชอบโดยรวม ^{ns}
MO 485	7.40±1.32	7.40±2.26	6.73±1.62	7.97±2.24 ^a	3.67±2.25 ^b	5.90±1.43
Mm 427	6.97±1.42	7.20±2.22	6.20±2.25	6.90±2.27 ^b	5.90±2.23 ^a	5.33±2.07
NO 135	7.07±2.23	7.13±0.62	5.97±1.76	7.97±2.25 ^a	3.83±1.26 ^b	5.93±2.32
Nm 563	7.27±2.25	7.50±2.21	6.13±2.12	5.53±2.23 ^c	6.20±2.21 ^a	6.03±2.36

*ตำแหน่งแรกของอักษรย่อ M หมายถึง ตัวอย่างที่มีการเติม และ N หมายถึงตัวอย่างที่ไม่มีการเติม MCcs ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1

*ตำแหน่งที่สองของอักษรย่อ O หมายถึงตัวอย่างที่มีการอุ่นด้วยวิธีแบบน้ำมันท่วม และ m หมายถึงตัวอย่างที่มีการอุ่นด้วยวิธีไมโครเวฟ

**ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวอักษรกำกับ หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

^{ns} หมายถึง ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

อภิปรายและสรุปงานวิจัย

ค่าขนาดอนุภาคและค่าประสิทธิภาพการเคลือบหุ้มมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามค่าพีเอช โดยที่เวลาในการตกตะกอนไม่มีผลต่อค่าขนาดอนุภาคและประสิทธิภาพการเคลือบหุ้มของไมโครแคปซูล โดยสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไมโครแคปซูลจากโคโคซาน-ซิลิกา ที่ค่าขนาดอนุภาคเล็กและมีประสิทธิภาพในการเคลือบหุ้มมากที่สุด คือ ที่สภาวะ พีเอชเท่ากับ 7.3 และเวลาในการตกตะกอนเท่ากับ 36 ชั่วโมง โดยให้ค่าจากการทำนายของค่าขนาดอนุภาคและประสิทธิภาพการเคลือบหุ้มเท่ากับ 3.3 μm และร้อยละ 67.32 ตามลำดับ

ผลปริมาณไมโครแคปซูลที่โคโคซาน-ซิลิกา (MCcs) สำหรับแป้งชูทอดในสูตรที่ได้รับการคัดเลือกแล้ว (1 สูตร) พบว่าการเติมไมโครแคปซูลทุกความเข้มข้น ไม่มีผลต่อค่าไขมัน การเติมไมโครแคปซูลที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 มีผลให้ค่าความแข็งมีค่าต่ำที่สุดและมีค่าความกรอบสูงที่สุด ขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มไมโครแคปซูลที่ระดับความเข้มข้นสูงขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น แต่การไม่มีการเติมไมโครแคปซูลทำให้ผิวกรอบที่ผ่านการอุ่นด้วยไมโครเวฟมีค่าต่ำที่สุดหรือนิมสุด ดังนั้นการเติมไมโครแคปซูลที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 เป็นความเข้มข้นของไมโครแคปซูลที่เหมาะสมสำหรับเติมในแป้งชูทอดสำหรับผลิตภัณฑ์ไก่กระอะเกะแซ่เยือกแข็งที่มีการอุ่นด้วยไมโครเวฟ เมื่อนำไปประเมินความชอบทางประสาทสัมผัส โดยเปรียบเทียบระหว่างการอุ่นที่อุ่นด้วยไมโครเวฟเปรียบเทียบกับการอุ่นแบบน้ำมันท่วม อีกตัวแปรที่ถูกนำมาใช้เปรียบเทียบคือการเติมและไม่มีการเติมไมโครเวฟที่ร้อยละ 1 ของแป้งชูทอด การเติมไมโครแคปซูลที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 มีค่าคะแนน ด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส และความชอบโดยรวมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนค่าความกรอบพบว่าตัวอย่างที่มีการเติมไมโครแคปซูลมีค่าความกรอบสูงขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีการเติม วิธีการอุ่นด้วยการทอดแบบน้ำมันท่วมมีค่าความกรอบสูงกว่าตัวอย่างที่อุ่นด้วยวิธีไมโครเวฟ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บริษัท อาเคเดีย ฟูดส์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัตถุดิบในการทำวิจัยในครั้งนี้ตลอดจน คณะเทคโนโลยีที่มหาวิทยาลัยขอนแก่นที่สนับสนุนทุนส่งเสริมการศึกษา

เอกสารอ้างอิง

- ชัยวัช โขวเจริญสุข. อุตสาหกรรมไก่แช่เยือกแข็งและแปรรูป. ศูนย์วิจัยกรุงศรี. ธนาคารกรุงศรีอยุธยา. 2563
- AOAC. Official methods of analysis of AOAC international. 2, 17th ed. AOAC international; 2000.
- Allen LH, Matijevic E. Stability of colloidal silica: I. Effect of simple electrolytes. Journal of Colloid and Interface Science. 1969; 31(3):287–96.
- Kang H-Y, Chen H-H. Preparation of Thermally Stable Microcapsules with a Chitosan-Silica Hybrid: Chitosan silica hybrid microcapsules. Journal of Food Science. 2014; 79(9):E1713–21.
- Metaxas AC, Meredith RJ. Industrial Microwave Heating. IET. 1983.