

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

ตอนที่ 1 การสกัดแยกแป้งจากเม็ดทุเรียนและการศึกษาสมบัติของแป้งเม็ดทุเรียน

เม็ดทุเรียนมีปริมาณเยื่อใยสูงและถูกใช้เป็นส่วนผสมในอาหารเพื่อทำให้อาหารข้นหนืด (Amin, 2007) สมบัติ thickening ของเม็ดทุเรียนมาจากไฮโดรคอลลอยด์ (hydrocolloid) ในรูปของแป้ง (starch) ที่เป็นองค์ประกอบหลักในเม็ดทุเรียน งานวิจัยในส่วนนี้ต้องการแยกแป้งจากเม็ดทุเรียนและศึกษาสมบัติทางเคมีโดยเปรียบเทียบกับสมบัติของแป้งดัดแปลงทางการค้าที่นิยมใช้ในทางอาหาร 2 ชนิดคือ แป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลัง โดยคาดหวังความเข้าใจถึงความสัมพันธ์ของโครงสร้างและการทำงานของของแป้งเม็ดทุเรียน จำนำไปสู่การประยุกต์ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการเตรียมฟิล์มที่บริโภคได้สำหรับลดการดูดซับน้ำมันในอาหารทอด เพื่อเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการเพิ่มมูลค่าของเม็ดทุเรียน

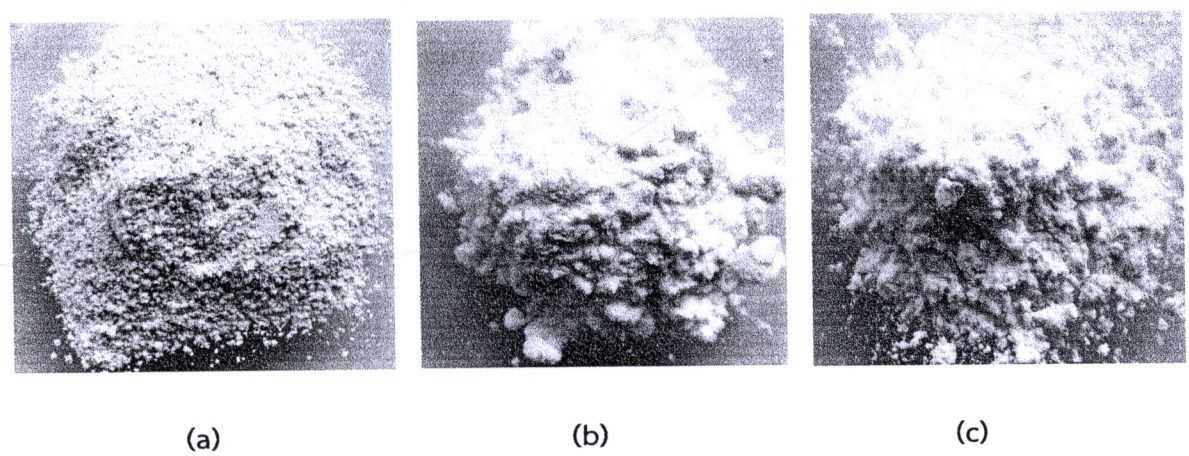
สีและลักษณะที่ปรากฏ (Color and appearance)

เม็ดทุเรียนมีลักษณะรีและมีเปลือกสีน้ำตาล เมื่อผ่าออกจะมีเมือก (slime) และเนื้อในสีขาวดังแสดงในรูปที่ 1 เมือกเหล่านี้จะเป็นปัญหาบ้างในขั้นตอนการปอกเปลือกเพื่อนำมาสกัดแป้ง ในการทดลองนี้ได้คัดขนาดของเม็ดทุเรียนให้ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 3.5-4.5 ซม. วิธีการการสกัดแป้งอย่างง่ายจากเม็ดทุเรียนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ให้ผลผลิตแป้งสูงที่มีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 13 โดยน้ำหนักตามมาตรฐานของ Thailand trade ministry (1993) ปริมาณผลผลิตแป้งที่ได้จะขึ้นอยู่กับปริมาณสารละลายที่ใช้ในขั้นตอนโฮโมจิไนเซชันและการกรอง โดยในการทดลองนี้ได้ผลผลิตอยู่ในช่วงร้อยละ 20-30 โดยน้ำหนักเม็ดทุเรียนสด

แป้งเม็ดทุเรียนที่แยกได้มีสีค่อนข้างขาว (รูปที่ 2) โดยมีค่า L^* ประมาณ 90% และมีค่า a^* เข้าใกล้ศูนย์ ในขณะที่ค่า b^* อยู่ในช่วงของสีเหลืองเล็กน้อย (ตารางที่ 2) ในขณะที่มีค่า Hue และ Chroma เท่ากับ 87.55 และ 9.14 ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าแป้งเม็ดทุเรียนมีสีเหลืองอ่อนจางและซีด (dull) โดยทั่วไปสีของแป้งจะแตกต่างกันไป ขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ สิ่งเจือปน และสภาวะที่ใช้ในการโม่ (milling) (Dobraszczyk, 2001) สีของแป้งเป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งสำหรับประยุกต์ใช้ทางอาหาร เพื่อให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ไม่เปลี่ยนแปลงไปที่เป็นผลมาจากการรบกวนของสีแป้ง



รูปที่ 1 ลักษณะที่ปรากฏของตัวอย่างเม็ดทุเรียนที่ใช้เพื่อสกัดแยกแป้ง



รูปที่ 2 ลักษณะที่ปรากฏและสีของ (a) แป้งเม็ดทุเรียน เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดัดแปลงที่จำหน่ายทางการค้า 2 ชนิดคือ (b) แป้งข้าวโพด และ (c) แป้งมันสำปะหลัง

องค์ประกอบทางโภชนา (Nutritional Composition)

เม็ดทุเรียนเป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อน (complex carbohydrates) จากผลการวิเคราะห์ตัวอย่าง เม็ดทุเรียนพบว่ามีแป้ง (starch) เป็นองค์ประกอบหลัก ถึงร้อยละ 56.03 ± 0.08 ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งน่าจะเป็นแหล่งของแป้งจากเม็ดผลไม้ที่น่าสนใจแหล่งหนึ่ง นอกจากนั้นยังประกอบด้วยโปรตีน (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง) 7.24 ± 0.10 ไขมันหยาบ 0.32 ± 0.03 เยื่อใยหยาบ (crude fiber content) 2.36 ± 0.15 และเถ้า 3.58 ± 0.03 เมื่อนำมาผ่านกระบวนการสกัดแยกแป้งอย่างง่ายโดยการแยกกากที่ไม่ละลายน้ำออก เนื่องจากกากที่ไม่ละลายน้ำนี้จะเป็นปัญหาสำคัญในการเตรียมฟิล์มที่บรีโกลได้ในขั้นตอนถัดไป ทำให้แป้งเม็ดทุเรียนที่แยกได้มีปริมาณเยื่อใยลดลงจาก 2.36% โดยน้ำหนักแห้ง เหลือเพียง 0.30% นั่นคือสามารถแยกกากที่ไม่ละลายน้ำได้คิดเป็นร้อยละ 87.29 แต่ก็ทำให้สูญเสียปริมาณโปรตีน ไขมันและเถ้าไปด้วยเหลือเพียงร้อยละ 4.71, 0.27 และ 2.82 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางโภชนาและสมบัติของแป้งเม็ดทุเรียน แป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลัง

Composition/Properties (Calculate by dried basis)	DSS	Corn starch	Cassava starch
Composition of starch			
Moisture content (%)	12.50±0.09	8.70±0.25	8.30±0.03
Protein content (%)	4.71±0.09	0.34±0.01	2.67±0.00
Crude fat content (%)	0.27±0.03	0.30±0.00	0.12±0.03
Crude fiber content (%)	0.30±0.00	0.50±0.00	0.40±0.00
Ash content (%)	2.82±0.08	0.08±0.03	0.10±0.00
Amylose content (%)	24.92±0.26	45.20±0.13	40.28±0.97
Viscosity			
Peak viscosity (RVU)	65±0	193±2	372±0
Holding strength (RVU)	61±0	138±3	13. ±2
Breakdown (RVU)	91±2	203±2	208±2
Final viscosity (RVU)	4±0	56±1	241±1
Peak time (min)	6.79±0.02	5.34±0.00	3.60±0.02
Pasting temperature (°C)	83.80±0.28	77.23±0.32	68.28±0.25
Setback (RVU)	30±2	65±1	77±4
Clarity (%T)	0.91±0.08	3.01±0.37	22.79±1.11
Color: L	89.78±0.05	96.74±0.01	96.09±0.03
a	0.39±0.02	-0.98±0.01	0.50±0.01
b	9.13±0.01	5.58±0.00	1.55±0.01
Hue angle	87.55	80.03	72.12
Chroma	9.14	5.67	1.63
Gelatinization (Determined by DSC)			
T _o , (°C)	75.49±0.06	66.18±0.30	61.53±0.38
T _p , (°C)	82.00±0.00	71.44±0.34	66.72±0.25
T _c , (°C)	86.77±0.05	76.80±0.48	73.92±0.26
ΔH _{gel} (J/g)	9.53±0.02	12.12±0.04	12.98±0.09
R	13.02	5.26	5.19
PHI	1.46	4.61	5.00

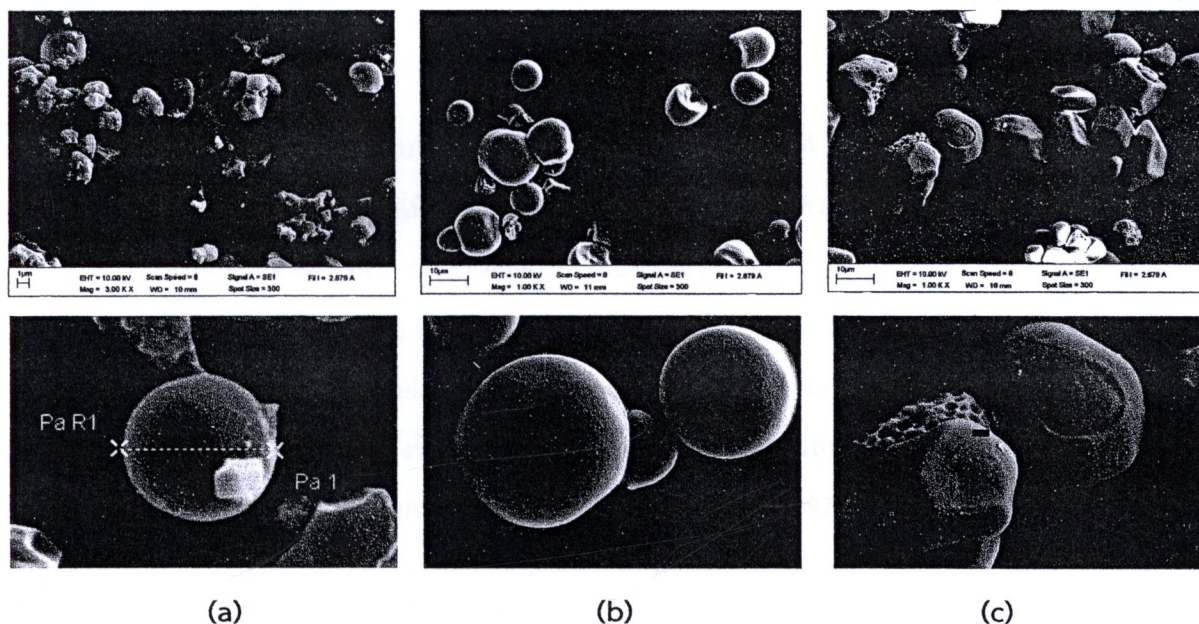
เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางโภชนาของแป้งเม็ดทุเรียนกับแป้งข้าวโพด และแป้งมันสำปะหลัง พบว่าแป้งเม็ดทุเรียนมีปริมาณโปรตีนและเถ้ามากกว่า แต่มีปริมาณเยื่อไยน้อยกว่าแป้งทั้งสองชนิดดังกล่าวอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) สำหรับปริมาณไขมันหยาบของแป้งเม็ดทุเรียน (0.27%) มีค่ามากกว่าแป้งที่สกัดมาจากจากพืชชนิดอื่นที่มีรายงานการศึกษามาก่อน เช่นใน okenia starch (0.17%) (Sanchez-Hernandez et al., 2002) amaranth starch (0.12-1.56%) (Perez et al. 1997) quinoa starch (0.11%) (Lorenz, 1990) ปริมาณไขมันในแป้งมีความสำคัญเพราะเกี่ยวข้องกับการเกิดสารเชิงซ้อนของอะไมโลส-ไขมันที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการแปรรูปเป็น resistant starch (Asp and Bjorck, 1992) และแป้งเม็ดทุเรียนมีปริมาณอะไมโลสเท่ากับร้อยละ 24.92 ซึ่งน้อยกว่ามันสำปะหลังและแป้งข้าวโพดอย่างมีนัยสำคัญ ($P > 0.05$)

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้ง (Morphology of starch granule)

เม็ดแป้งจะมีขนาดและรูปร่างหลากหลายและมีความจำเพาะตามชนิดของแป้ง (Srichuwong et al., 2005) ขึ้นกับชนิดของพืช (botanical source) ความหลากหลายทางพันธุกรรม (gene-line variation) ระยะของการพัฒนา (stage of development) การเกิดไฮโดรไลซิสของแป้ง (starch hydrolysis) และสภาวะแวดล้อม (Waghorn et al., 2003) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งขึ้นกับชีวเคมีของคลอโรพลาสต์ (chloroplast) หรืออะไมโลพลาสต์ (amyloplast) และสรีรวิทยา (physiology) ของพืช (Singh et al., 2003) โดยทั่วไปขนาดของเม็ดแป้งอาจแตกต่างกันในช่วง 1-110 ไมโครเมตร (Singh et al., 2003)

เมื่อทำการตรวจวัดแป้งเม็ดทุเรียนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าแป้งเม็ดทุเรียนมีขนาดเล็กและรูปร่างกลม (rounded shape) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดแป้งอยู่ในช่วง 2-4 ไมโครเมตร ในขณะที่แป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลังมีขนาดใหญ่กว่าอยู่ในช่วง 6-8 และ 10-12 ไมโครเมตร ตามลำดับ การที่แป้งเม็ดทุเรียนมีขนาดเล็กกว่านับเป็นข้อดีในการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เนื่องจากเม็ดแป้งขนาดเล็กจะมีความสามารถในการดูดซับสูง (high adsorbent capacity) (Paredes-Lopez et al., 1989) และสามารถใช้เป็นตัวพา (carrier) ในกระบวนการ encapsulation องค์ประกอบทางอาหาร เช่น กลิ่นรส (flavor) สี (colorant) (Zhao and Whistler, 1994)

เมื่อพิจารณาพื้นผิวของเม็ดแป้งของแป้งเม็ดทุเรียน (รูปที่ 3.1) พบว่ามีพื้นผิวเรียบ ไม่มีความผิดปกติหรือการกัดกร่อน (corrosion) บนพื้นผิว ซึ่งแตกต่างจากเม็ดแป้งข้าวโพดที่มีรูพรุน (pore) บนพื้นผิว ลักษณะของพื้นผิวจะมีผลกับการเกิดปฏิกิริยาของแป้งเมื่อต้องการดัดแปลงด้วยกระบวนการทางเคมีที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางเคมีกายภาพ และทางหน้าที่ให้เป็นไปตามที่ต้องการ (Bello-Peretz et al., 2006) อย่างไรก็ตามพบความเสียหายของเม็ดแป้งบางส่วน ซึ่งเป็นผลจากขั้นตอนการบด



รูปที่ 3 scanning electron micrograph ของ (a) แป้งเม็ดทุเรียน (b) แป้งมันสำปะหลัง และ (c) แป้งข้าวโพด (หมายเหตุ-การขยายและเลือกตัดเฉพาะบางส่วนของภาพ ทำให้สเกล (scale) การวัดขนาดที่แสดงในภาพนี้ไม่สามารถเทียบเคียงกันได้ด้วยตา)

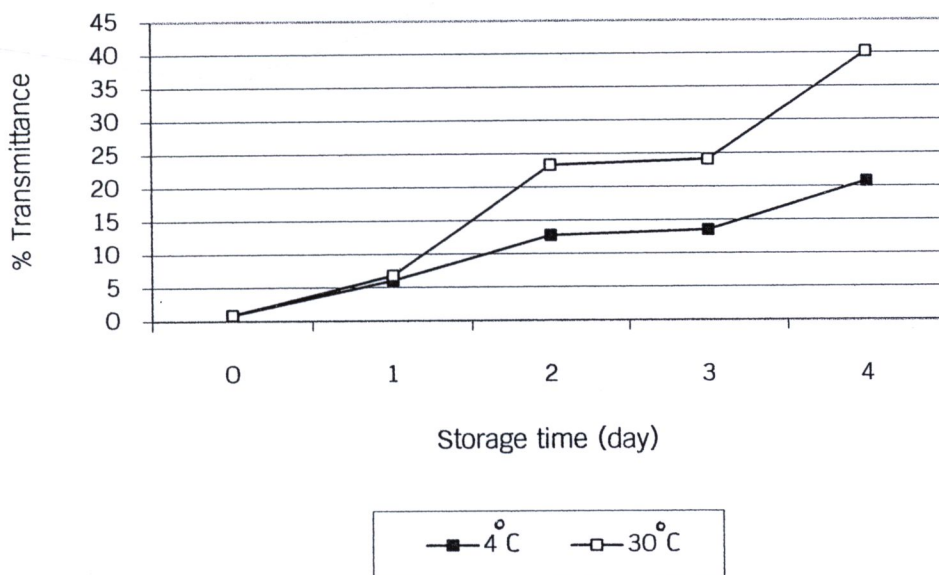
ความใสของแป้งสุก (Clarity of starch pastes)

การใช้งานแป้งที่สำคัญคือการเพิ่มความหนืดให้กับอาหาร ดังนั้นสมบัติความใสของแป้งจึงมีความสำคัญอย่างมาก ซึ่งขึ้นกับชนิดของแป้ง แต่สามารถเปลี่ยนแปลงได้เมื่อทำการดัดแปลงเม็ดแป้ง (starch granule modification) เมื่อนำแป้งเม็ดทุเรียนมาละลายน้ำและผ่านกระบวนการเจลาติไนเซชันจะได้แป้งสุกที่มีความใสเนื่องจากในระหว่างที่แป้งเกิดเจลาติไนเซชัน เม็ดแป้งที่พองตัวจะยอมให้แสงผ่านและเกิดการหักเห (refraction) โดยดัชนีของการหักเหจะลดลงเมื่อเม็ดแป้งมีการพองตัวเพิ่มขึ้น (Craig et al., 1989)

เมื่อเปรียบเทียบความใสของแป้งสุกระหว่างแป้งเม็ดทุเรียนกับแป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลัง พบว่าแป้งเม็ดทุเรียนสุกมีความโปร่งใสน้อยกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลัง (ตารางที่ 1) โดยมีค่า %T น้อยกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลัง 3.3 และ 25.0 เท่า ตามลำดับ เนื่องจากแป้งเม็ดทุเรียนสุกมีเศษเม็ดแป้ง (granule remnants) ที่เกิดการแตกหักจากขั้นตอนการบดที่พองตัวในดัชนีที่แตกต่างกัน ทำให้แสงที่ฉายผ่านเม็ดแป้งที่มีรูปร่างแตกต่างกันและความหนาแน่นแตกต่างกันไม่โค้งในรูแบบเดียวกัน (bend ununiformly) ดังนั้นจึงทำให้เห็นแป้งเม็ดทุเรียนสุกมีความใสน้อยกว่าแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพดที่มีเม็ดแป้งที่ค่อนข้างสมบูรณ์และขนาดใกล้เคียงกัน นอกจากนั้น Swinkels (1985) ยังรายงานว่าอัตราส่วนระหว่างอะไมโลสและอะไมโลเพคติน

และดีกรีของการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน (degree of polymerization) ของอะไมโลสก็เป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อสมบัติความใสของแป้งสุกเช่นกัน

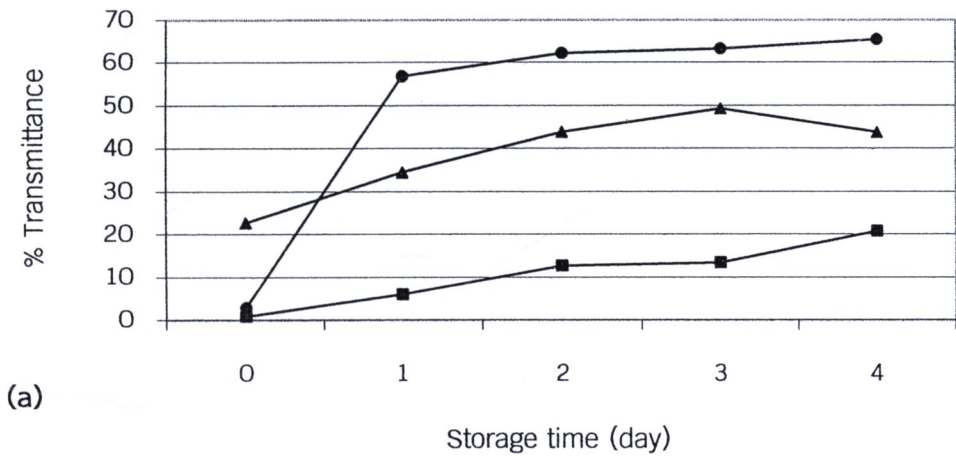
เมื่อนำแป้งเม็ดทุเรียนสุกมาเก็บรักษาที่ 30°C และที่ 4°C เป็นเวลา 4 วัน พบว่าจะเกิดการตกตะกอนขึ้น ทำให้แยกโซน (zone) ที่ค่อนข้างสังเกตเห็นได้ด้วยตา โซนส่วนบนของสารแขวนลอยจะสามารถให้แสงส่องผ่านได้มากขึ้น (%T เพิ่มขึ้น) Mile et al. (1985a,b) เสนอแนะว่าการคืนตัวของแป้งสุก (retrodegradation) ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนที่แยกจากกันคือ การเกิดเจล (gelation) ของโมเลกุลอะไมโลสที่ถูกขับออกมาจากเม็ดแป้งในระหว่างกระบวนการเจลาติไนเซชัน (gelatinization) และขั้นตอนการเกิดการตกผลึกใหม่ (recrystallization) ของอะไมโลเพคติน (amylopectin) ซึ่งขึ้นกับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ การพองตัวของเม็ดแป้ง เศษของเม็ดแป้ง อะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่ถูกขับออกมา (Jacobsom and BeMiller, 1997) ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติความใสของแป้งสุกและส่งผลต่อการหักเหและการกระจายของแสง (Perera and Hoover, 1999)



รูปที่ 4 สมบัติความใสของแป้งเม็ดทุเรียนสุกเมื่อเก็บรักษาที่ 4°C และ 30°C เป็นเวลา 4 วัน

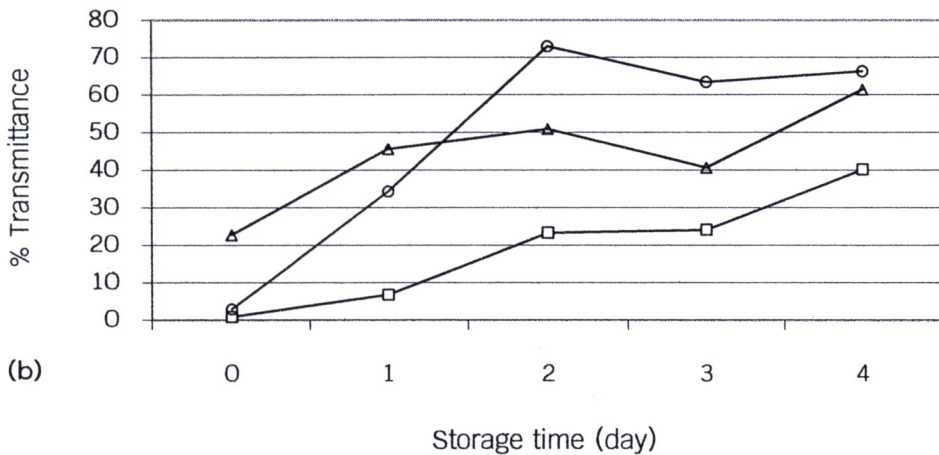
จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าภายหลังจากที่เก็บรักษาเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่ำ (4°C) จะให้ค่า %T ต่ำกว่าเมื่อเก็บที่อุณหภูมิสูง (30°C) แสดงว่าที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการคืนตัวของแป้งสุกได้ดีกว่าเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ การเก็บรักษาที่อุณหภูมิในตู้เย็นทำให้เกิดผลึกสมบูรณ์น้อยกว่าเมื่อเก็บที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งจะเกิดการรวมกลุ่มของโซ่อะไมโลสในอัตราสูง แนวโน้มในทำนองเดียวกันพบได้ในกรณีของแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพด (รูปที่ 5) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่า %T เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 48 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องมีผลทำให้มี

ค่า %T เพิ่มขึ้นร้อยละ 25.71, 24.39 และ 2.24 จากเริ่มต้น ของแป้งสุกจากแป้งเม็ดทุเรียน แป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลังตามลำดับ ในขณะที่เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิในตู้เย็นจะมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 14.10, 20.81 และ 1.93 จากเริ่มต้น ของแป้งสุกจากแป้งเม็ดทุเรียน แป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลัง ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแป้งเม็ดทุเรียนมีความเสถียรของ paste ไม่แตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$) กับของแป้งข้าวโพดเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง และมีความเสถียรดีกว่าเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง



(a)

■ Durian seed starch ▲ Cassava starch ● Corn starch



(b)

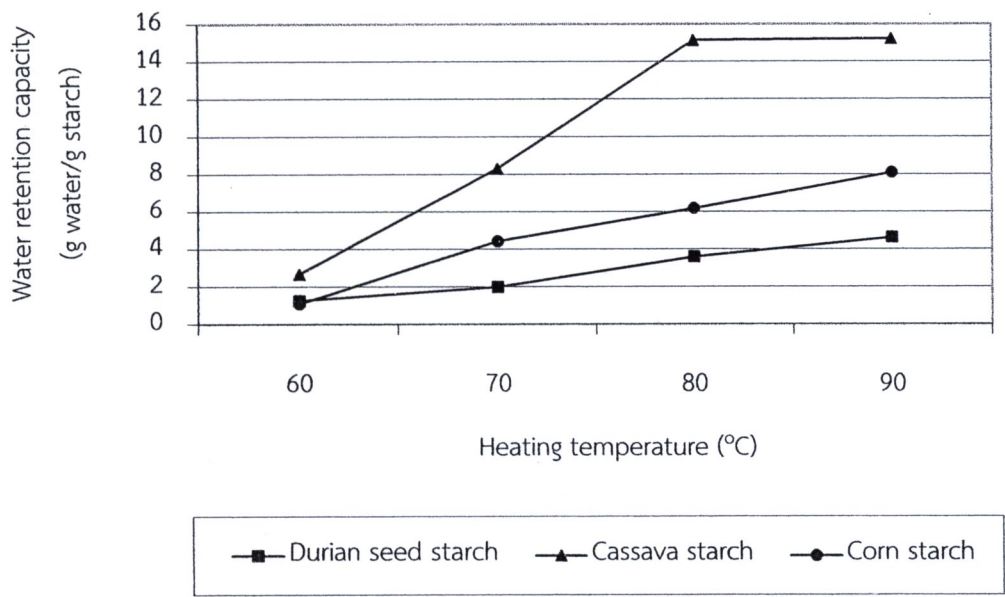
□ Durian seed starch ▲ Cassava starch ○ Corn starch

รูปที่ 5 สมบัติความใสของแป้งสุกของแป้งเม็ดทุเรียน แป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพดเมื่อเก็บรักษาที่ (a) 30°C และ (b) 4°C เป็นเวลา 4 วัน

ความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water retention capacity; WRC)

ค่า WRC บ่งบอกถึงความสามารถของโปรตีนแมทริกซ์ (protein matrix) ที่จะดูดซับและดักจับน้ำต้านแรงดึงดูด (gravity) (Traynham et al., 2007) จึงใช้เป็นตัวชี้วัดที่ใช้อธิบายความสามารถของแป้งในการอุ้มน้ำ เม็ดแป้งไม่ละลายในน้ำเย็น แต่จะดูดซับน้ำและพองตัวเล็กน้อยเนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันน้ำจำพวกไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ในโครงสร้างของแป้ง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น โมเลกุลของแป้งจะสั่น (vibrate) รุนแรงมากขึ้น และเกิดการทำลายพันธะระหว่างโมเลกุล ทำให้ตำแหน่งพันธะไฮโดรเจนดูดซับโมเลกุลน้ำได้มากขึ้น (Fennema, 1985) ค่า WRC ของแป้งเม็ดทุเรียนมีค่าอยู่ในช่วง 1.27 ± 0.06 กรัมของน้ำ/กรัมของแป้งแห้งที่อุณหภูมิ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง 4.65 ± 0.04 กรัมของน้ำ/กรัมของแป้งแห้งที่อุณหภูมิ $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ นั่นคือมีความสามารถในการอุ้มน้ำเพิ่มขึ้นถึง 266% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็น $90\text{ }^{\circ}\text{C}$

เมื่อเปรียบเทียบค่า WRC ของแป้งเม็ดทุเรียนกับแป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลัง (รูปที่ 6) พบว่าที่อุณหภูมิ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ แป้งเม็ดทุเรียน (1.27 ± 0.05) จะมีค่า WRC มากกว่าแป้งข้าวโพด (1.10 ± 0.09) เล็กน้อยแต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจะมีค่า WRC เพิ่มขึ้น ซึ่งให้แบบแผนที่เหมือนกับของแป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลัง แต่จะไม่มี ความแตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$) ของค่า WRC ของมันสำปะหลังเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 80 เป็น $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ นอกจากนั้นจะเห็นได้ว่าแป้งเม็ดทุเรียนมีค่า WRC ต่ำ เมื่อเทียบกับแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพดในเกือบทุกอุณหภูมิที่ทำการศึกษาในที่นี้ แสดงว่าแป้งเม็ดทุเรียนมีสมบัติการอุ้มน้ำได้ต่ำกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลังโดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง ๆ

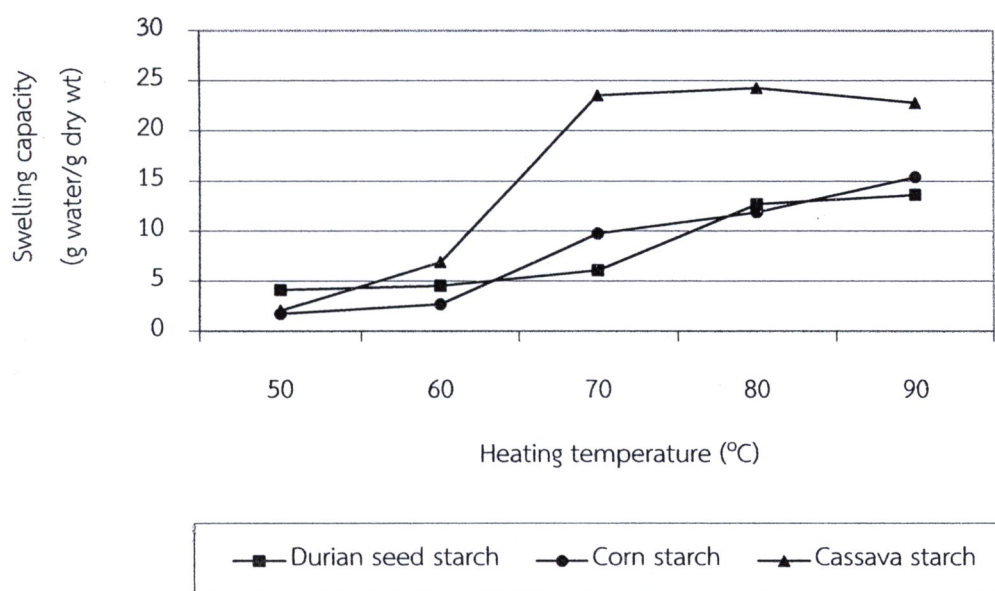


รูปที่ 6 สมบัติความสามารถในการอุ้มน้ำของแป้งเม็ดทุเรียน แป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพดที่อุณหภูมิ $60-90\text{ }^{\circ}\text{C}$

ความจุของการพองตัว (Swelling capacity; SWC)

ความจุของการพองตัวของเม็ดแป้งแสดงถึงการกระทำที่เกิดขึ้นบนโซ่แป้งระหว่างส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) และผลึก (crystalline) (Takizawa et al., 2004) การละลายของอะไมโลสในระหว่างกระบวนการเจลาติไนเซชันทำให้เกิดการพองตัวของแป้ง ขึ้นกับอัตราส่วนของอะไมโลส/อะไมโลเพคติน และลักษณะของอะไมโลส และอะไมโลเพคตินในเทอมของการกระจายของน้ำหนักโมเลกุล ตีกรีและความยาวของโซ่กิ่ง และคอนฟอร์เมชัน (conformation) (Hoover, 2001)

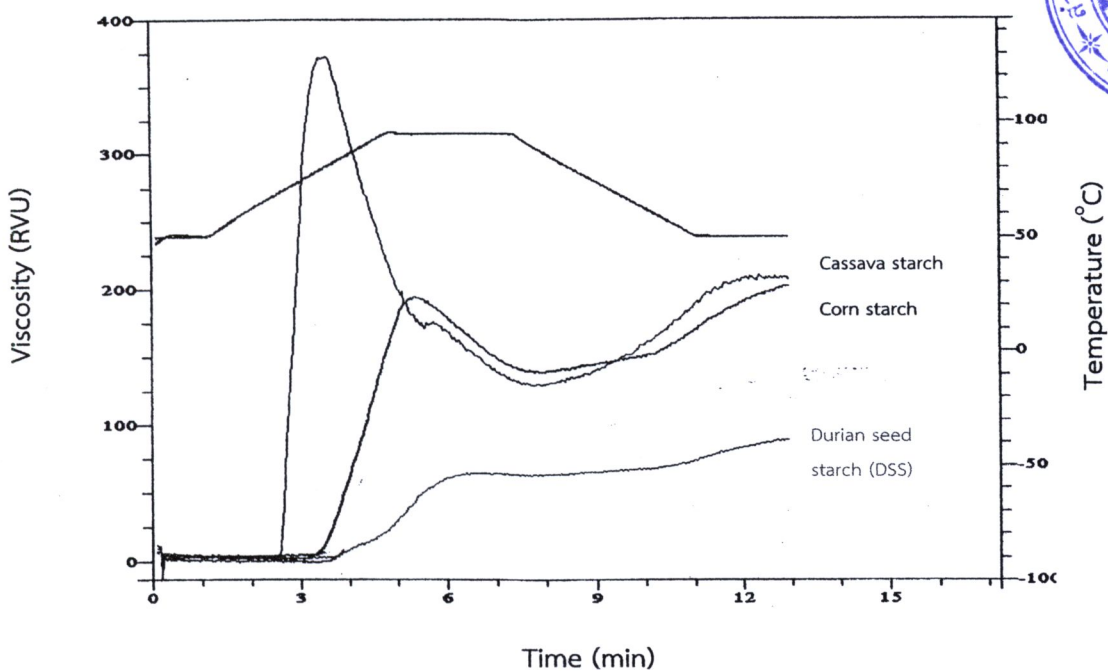
รูปที่ 7 แสดงแบบแผนของความจุการพองตัวของแป้งเม็ดทุเรียน แป้งข้าวโพด และแป้งมันสำปะหลัง ในสภาวะอุณหภูมิสูงแป้งทั้งสามชนิดจะมีการพองตัวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวพบได้เช่นกันในแป้งจากพืชชนิดอื่น เช่น Okina (Sanchez-Hernandez et al., 2002) และ sorghum (Perez et al., 1997) ค่า SWC จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเนื่องจากโมเลกุลของน้ำมีการเคลื่อนที่และแพร่ (mobility and diffusion) มากขึ้น ทำให้เกิดการดูดซับน้ำจำนวนมาก (Bello-Perez et al., 2006) ค่า SWC ของแป้งเม็ดทุเรียนอยู่ในช่วง 4.15 ± 0.23 กรัมของน้ำ/กรัมของแป้งแห้งที่อุณหภูมิ 50°C และ 13.65 ± 0.21 กรัมของน้ำ/กรัมของแป้งแห้งที่อุณหภูมิ 90°C กรัมของน้ำ/กรัมของแป้ง นั่นคือมีการเพิ่มขึ้นถึง 229% เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 50°C เป็น 90°C อย่างไรก็ตามแป้งมันสำปะหลังมีค่า SWC มากกว่าแป้งเม็ดทุเรียนและแป้งข้าวโพดในเกือบทุกอุณหภูมิต่ำ ($60-90^{\circ}\text{C}$) ($P < 0.05$) ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับปริมาณไขมันในแป้งที่เป็นตัวยับยั้งการพองตัวของเม็ดแป้ง



รูปที่ 7 สมบัติความจุของการพองตัวของแป้งเม็ดทุเรียน แป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพดที่อุณหภูมิ 50-90 °C

ความหนืด (Viscosity)

เมื่อให้ความร้อนกับแป้งในสภาวะที่มีปริมาณน้ำมากเกินไป เม็ดแป้งจะพองตัวและในเวลาเดียวกันก็จะละลายด้วย จึงทำให้เกิดทั้งการพองตัวและการกระจาย (dispersion) ของอนุภาคในสารแขวนลอยของแป้งในเฟสต่อเนื่อง (continuous phase) (Bello-Perez et al., 2006) วิธีการหนึ่งที่ใช้ติดตามกระบวนการเจลาติไนเซชันที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิได้โดยการตรวจวัดความหนืดของสารแขวนลอยแป้ง (Belitz and Grosch, 1999) ความหนืดของแป้งสูงที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการต้านทานการไหลของเม็ดแป้งขนาดใหญ่ที่อยู่ในปริมาตรทั้งหมดของสารแขวนลอย (Fennema, 1985) ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิของสารแขวนลอยลง อาจเนื่องจากการจัดเรียงตัวใหม่ (reorganization) ของโซ่อะไมโลส ที่ถูกทำให้ละลายในระหว่างการให้ความร้อน กระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดการเชื่อมขวาง (crosslink) ระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นเครือข่ายที่อุณหภูมิจำนวนมากเอาไว้ (Bello-Perez et al., 2006) ดังนั้นสมบัติความหนืดของแป้งสูงจึงขึ้นกับองค์ประกอบของแป้งที่อยู่ในรูปของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน โครงสร้างของเม็ดแป้ง น้ำหนักโมเลกุลของแต่ละองค์ประกอบ ความเสถียรของพันธะภายในโมเลกุล การขยายของขอบเขตของผลึกและอสัณฐาน (crystalline and amorphous) อุณหภูมิที่ใช้ และปริมาณน้ำในสารแขวนลอย (Belitz and Grosch, 1999)



รูปที่ 8 สมบัติความหนืดของแป้งสูงของแป้งเม็ดทุเรียน แป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพด

อุณหภูมิที่ทำให้เกิดแป้งสุก (pasting time) ของแป้งเม็ดทุเรียนเท่ากับ 83.80 ± 0.28 °C ซึ่งสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวโพด (77.23 ± 0.32 °C) และแป้งมันสำปะหลัง (68.28 ± 0.25 °C) ดังแสดงในตารางที่ 4 อย่างไรก็ตาม จากรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าแป้งเม็ดทุเรียนมีความหนืดน้อยกว่าทั้งแป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลังแต่มีความคงตัวเมื่อได้รับความร้อนสูงกว่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะแป้งเม็ดทุเรียนมีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบต่ำกว่านั่นเอง ซึ่งนับเป็นข้อดีสำหรับใช้เป็นองค์ประกอบในการเตรียมฟิล์มที่บิโธคได้ในขั้นตอนถัดไป นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า breakdown viscosity ของแป้งข้าวโพด (203 ± 2 RVU) และของแป้งมันสำปะหลัง (208 ± 2 RVU) ซึ่งมากกว่าของแป้งทุเรียน (91 ± 2 RVU) กว่า 2 เท่า แสดงว่าแป้งเม็ดทุเรียนมีความเสถียรต่อความร้อนและแรงตัดทางกล (mechanical shear) มากกว่าแป้งดัดแปลงทางการค้าทั้งสองดังกล่าว

เจลลิตไนเซชัน (Gelatinization)

ตารางที่ 3 แสดงอุณหภูมิทรานสิชัน (transition temperature; T_0 , T_p และ T_c) และค่าเอนทัลปีของการเกิดเจลลิตไนเซชัน (enthalpy of gelatinization; ΔH_{gel}) ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค differential scanning calorimetry (DSC) โดยให้ค่า T_0 , T_p และ T เท่ากับ 75.49, 82.00 and 86.77 °C ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าทั้งของแป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลัง ในขณะที่ให้ค่า ΔH_{gel} เท่ากับ 9.53 J/g น้อยกว่าของแป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลังคิดเป็นร้อยละ 27.18% และ 36.20% ตามลำดับ แป้งเม็ดทุเรียนมีช่วงอุณหภูมิของการเริ่มเปลี่ยนแปลง (T_0) และอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (T_p) ของความร้อนในการเกิดเจลลิตไนเซชันสูงกว่า แต่มีช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลลิตไนเซชันกว้างกว่า และใช้พลังงานในการเกิดเจลลิตไนเซชันต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับทั้งแป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลัง

โดยทั่วไปแป้งที่มีเม็ดแป้งที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous granules) จะให้ช่วงเอนทัลปีกว้าง ความแตกต่างของอุณหภูมิของการเกิดเจลลิตไนเซชันแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของความสมบูรณ์ของผลึกแป้ง (starch crystals) ถ้าแป้งมีความสมบูรณ์ของผลึกในผลึกแลตติซ (crystal lattice) สูงก็จะให้อุณหภูมิของการเกิดเจลลิตไนเซชันสูงด้วย (Mukprssirt and Sajjaanantakul, 2004) ซึ่งแสดงว่าแป้งเม็ดทุเรียนมีความสมบูรณ์ของผลึกมากกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งสอดคล้องกับการที่แป้งเม็ดทุเรียนต้องการพลังงานเจลลิตไนเซชัน (gelatinization energy) สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งทั้งสองชนิดดังกล่าว

ตอนที่ 2 การพัฒนากระบวนการทอดน้ำมันของชิ้นทุเรียนโดยใช้ฟิล์มแบ่งเม็ดทุเรียน

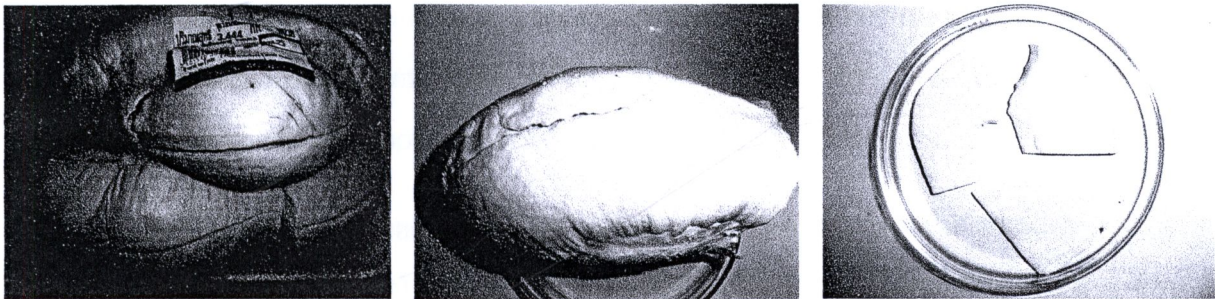
งานวิจัยในส่วนนี้ต้องการพัฒนากระบวนการทอดน้ำมันชิ้นทุเรียน (durian chip) โดยใช้ฟิล์มที่บริโภคน้ำมันจากแบ่งเม็ดทุเรียนเป็นสารเคลือบเพื่อลดการดูดซับน้ำมัน เทคนิคการแปรรูปอาหารโดยการทอดด้วยน้ำมัน (deep-fat frying) เป็นกระบวนการกำจัดน้ำประเภตหนึ่งที่ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางสำหรับผลิตอาหารแปรรูปที่มีรสชาติและเนื้อสัมผัสที่เป็นเอกลักษณ์ (unique flavor and texture) อุณหภูมิสูงของน้ำมันจะช่วยให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสให้คุณลักษณะที่ดีของอาหารทอด และทำให้ผลของน้ำตาลรีดิวส์ (reducing sugar effect) จากปฏิกิริยาที่เรียกว่าคาราไมเซชัน (caramization) ให้สีผิวน้ำตาลของอาหาร (BeMiller and Whistler, 1996) โดยทั่วไปสามารถจำแนกน้ำมันที่เกี่ยวข้องในกระบวนการทอดได้ 3 ชนิดคือ 1) น้ำมันโครงสร้าง (structural oil) เป็นน้ำมันที่ถูกดูดซับในระหว่างขั้นตอนการทอด 2) น้ำมันที่ถูกแทรกซึมเข้าสู่อาหาร (penetrated surface oil) ในระหว่างที่อาหารเริ่มเย็นตัวลงหลังจากถูกนำออกจากน้ำมัน และ 3) น้ำมันที่พื้นผิว (surface oil) ซึ่งเป็นน้ำมันที่คงเหลืออยู่ที่พื้นผิวของอาหาร โดยการดูดซับน้ำมันของอาหาร (oil uptake) มักเกิดขึ้นในช่วงหลังจากการทอด (post frying period) (Sun and Moreira, 1994; Ufheil and Escher, 1996; Southern et al., 2000; Bouchon et al., 2003)

องค์ประกอบทางโภชนาและสมบัติทางกายภาพของทุเรียน

ทุเรียนหมอนทองที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะที่ปรากฏดังแสดงในรูปที่ 9 เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางโภชนาของตัวอย่างทุเรียนโดยวิธี proximate analysis ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าเนื้อทุเรียน (durian pulp) มีปริมาณความชื้นค่อนข้างสูงมากกว่าร้อยละ 60 โดยน้ำหนักเปียก และมีปริมาณเยื่อใยหยาบ (crude fiber) และเถ้า (ash) สูง โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 3.86 และ 1.16 โดยน้ำหนักเปียก ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าเนื้อทุเรียนมีปริมาณเยื่อใยในหน่วยของร้อยละโดยน้ำหนักเปียกในรูปของ total dietary fiber (1.20%) ซึ่งมีค่ามากกว่าสละและมังคุด โดยแบ่งออกเป็น insoluble dietary fiber (0.80%) และ soluble dietary fiber (0.40%) และประกอบด้วยแร่ธาตุหลายชนิด (ในหน่วยไมโครกรัม/100 กรัม น้ำหนักเปียก) ได้แก่ Na (2.1), K (201.2), Mg (11.23), Ca (18.32), Fe (999.1), Mn (145.2), Zn (32.3), Cu (24.1) นอกจากนี้ยังมีปริมาณพอลิฟีนอลทั้งหมด (total polyphenols) ที่เชื่อกันว่าสัมพันธ์กับฤทธิ์ด้านการเกิดอนุมูลอิสระมากกว่าสละและมังคุดด้วย (Haruenkit et al., 2007)

ตัวอย่างชิ้นทุเรียนถูกนำมาตรวจวัดเนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง Instron texture analyzer โดยนำตัวอย่างทุเรียนมาตัดเป็นแผ่นที่มีความหนาในช่วง 5.45 ± 0.91 มม. และความยาวของชิ้นในช่วง 23.25 ± 1.50 มม. ได้ค่าความแน่นเนื้อเท่ากับ 1.729 ± 0.582 KgF โดยทั่วไปในระหว่างการเก็บรักษาทุเรียนจะมีความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจมาจากการสูญเสียความชื้น และยังมีการสูญเสียน้ำมาจากกระบวนการหายใจ (respiration) โดยเกิดเป็นหยดน้ำสะสมบน

แผ่นฟิล์มที่หุ้มห่อบรรจุภัณฑ์ นอกจากนั้นการเปลี่ยนแปลงสมบัติความแน่นเนื้อของทุเรียนเกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของเพคตินที่ละลายน้ำได้ (water-soluble pectin) และ polygalacturanase enzyme activity (Imsabai et al., 2002) สำหรับสีของตัวอย่างขึ้นทุเรียนมีค่า chroma เท่ากับ 26.48 และ มีค่า hue angle (θ) เท่ากับ -85.97 ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บรักษาโดยค่าความเข้มของสี (color intensity) ที่แสดงได้ด้วยค่า chroma มีค่าลดลงในขณะที่มีค่า hue angle เพิ่มขึ้น การที่ความเข้มสีลดลงเป็นมาจากการสลายตัวของเบตา-คาโรตินที่เกี่ยวข้องกับสีของทุเรียน (Voon et al., 2006)



รูปที่ 9 ลักษณะที่ปรากฏของตัวอย่างทุเรียนหมอนทองสำหรับทอดน้ำมัน

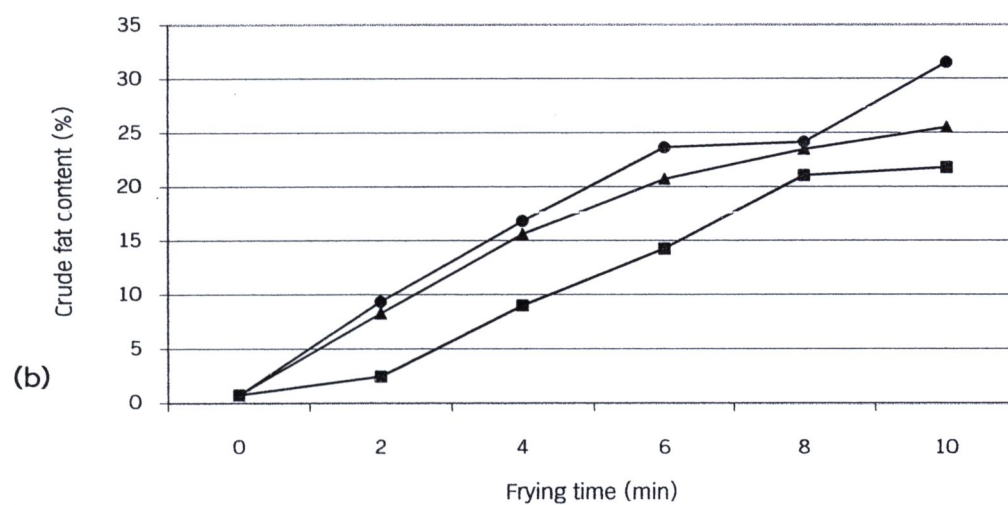
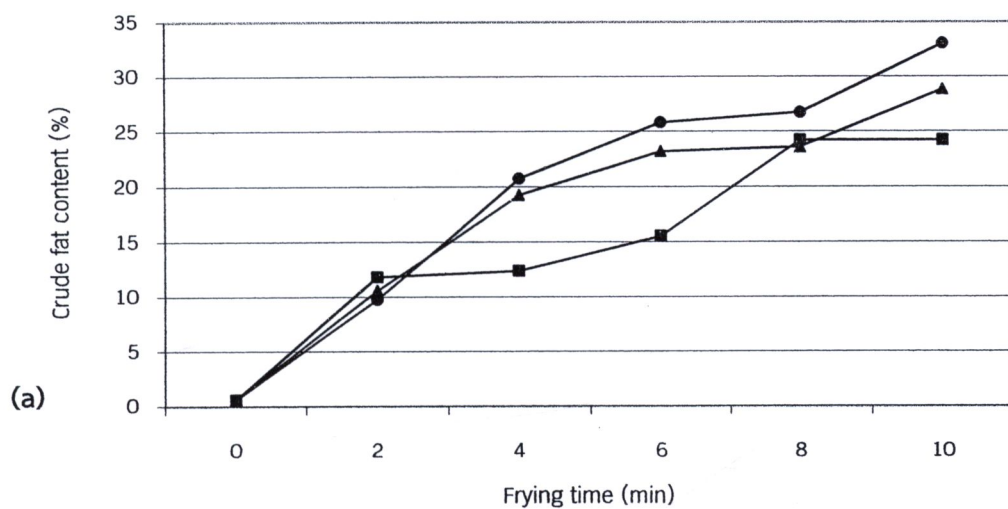
ตารางที่ 4 องค์ประกอบของตัวอย่างทุเรียนหมอนทอง

องค์ประกอบ/สมบัติของทุเรียน	ร้อยละโดยน้ำหนักของตัวอย่างเปียก (%)
ปริมาณความชื้น (moisture content)	61.89±1.25
ปริมาณไขมันหยาบ (crude fat content)	0.63±0.01
ปริมาณโปรตีนหยาบ (crude protein content)	1.98±0.12
ปริมาณเถ้าทั้งหมด (total ash content)	1.16±0.11
ปริมาณเยื่อใยหยาบ (crude fiber content)	3.86±0.02
สี (color)	
L*	86.47±0.05
a*	-1.86±0.03
b*	26.41±0.01

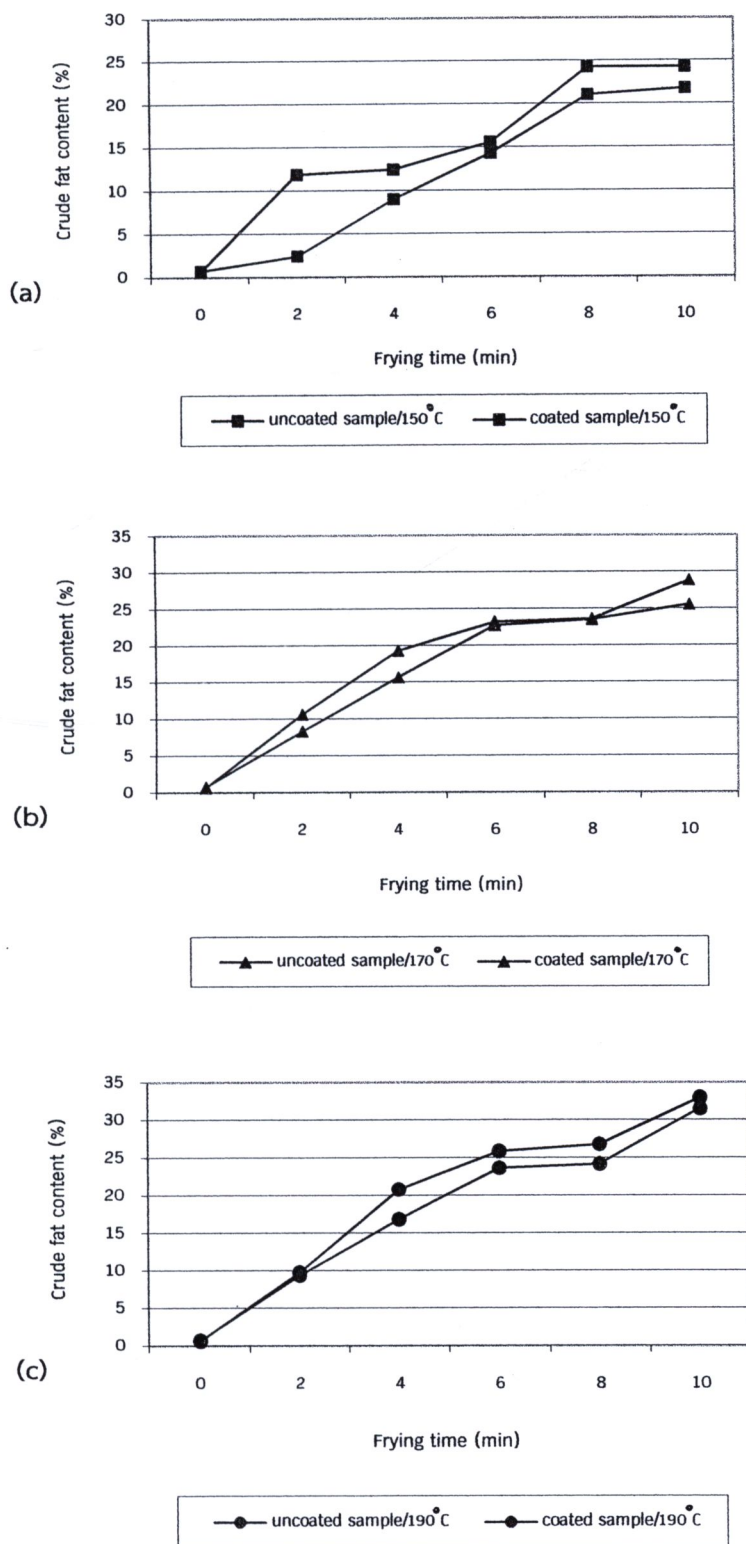
ผลของอุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ทอดและการเคลือบฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน

ในการทดลองนี้ได้เลือกศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ทอด(frying temperature) ต่อการดูดซับน้ำมันของชิ้นทุเรียน โดยใช้อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับคือ 150, 170 และ 190 °C และเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างชิ้นทุเรียนที่เคลือบและไม่ได้เคลือบด้วยฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน โดยหลังจากนำชิ้นทุเรียนไปชุบสารละลายฟิล์ม จะวางทิ้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาทีก่อนนำไปทอดทันที รูปที่ 10 แสดงแบบแผนของการดูดซับน้ำมันของผลิตภัณฑ์ชิ้นทุเรียนทอดโดยแสดงด้วยปริมาณไขมันหยาบของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทอดด้วยระยะเวลา 10 นาที จะเห็นได้ว่าให้รูปแบบของการดูดซับน้ำมันคล้ายคลึงกันในทุกอุณหภูมิที่ศึกษา และมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันทั้งตัวอย่างที่เคลือบและไม่ได้เคลือบด้วยฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน โดยชิ้นทุเรียนจะมีการดูดซับน้ำมันมากขึ้นเมื่อสัมผัสกับน้ำมันนานขึ้น ซึ่งการดูดซับน้ำมันของอาหารมาจาก capillary force (Pinthus and Saguy; 1993)

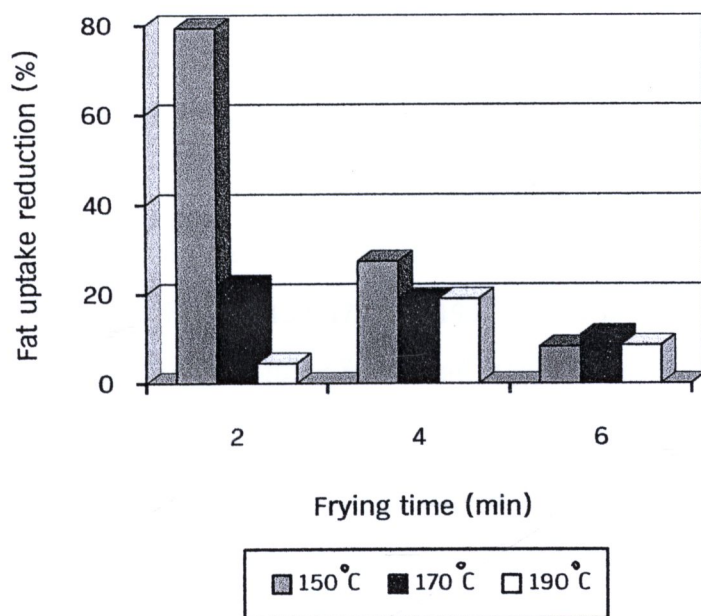
ในช่วง 2 นาทีแรกของการทอดของตัวอย่างที่ไม่ได้เคลือบฟิล์ม (รูปที่ 10) พบว่าไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$) ของการดูดซับน้ำมันเมื่อใช้อุณหภูมิในการทอดแตกต่างกัน แต่เมื่อใช้เวลาทอด 4 และ 6 นาทีพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ทอดที่อุณหภูมิ 150 °C จะดูดซับน้ำมันน้อยกว่าเมื่อทอดที่ 170 และ 190 °C ตามลำดับ นั่นคือมีความแตกต่างกันบ้างของปริมาณน้ำมันสุดท้ายในผลิตภัณฑ์และแบบแผนการกระจายของผลิตภัณฑ์เมื่อใช้อุณหภูมิน้ำมันแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามมีปัจจัยหลายประการที่มีผลต่อการดูดซับน้ำมัน ได้แก่ คุณภาพของน้ำมัน เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ทอด การจัดการเบื้องต้น (pretreatment) ที่ใช้ และองค์ประกอบและลักษณะของอาหาร เป็นต้น (Freitas et al., 2009) จากรูปที่ 11 จะเห็นผลของการเคลือบฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนต่อการดูดซับน้ำมันที่อุณหภูมิ 150 °C ได้ชัดเจนกว่าที่อุณหภูมิที่สูงกว่า (170 และ 190 °C) เมื่อใช้อุณหภูมิของน้ำมันที่ใช้ทอดที่ 150 °C ชิ้นทุเรียนที่เคลือบฟิล์มสามารถลดการดูดซับน้ำมันได้โดยเฉพาะในช่วงแรกของการทอด โดยสามารถลดการดูดซับน้ำมันได้มากถึงร้อยละ 79.36 และ 27.43 เมื่อใช้เวลาทอด 2 และ 4 นาที ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้เคลือบฟิล์ม และสามารถลดการดูดซับน้ำมันได้ดีกว่าในทุกช่วงเวลา 10 นาทีของการทอด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนที่ใช้เคลือบผิวของชิ้นทุเรียนทำหน้าที่เป็นตัวกีดกันการเคลื่อนย้ายของน้ำมันเข้าสู่อาหาร เมื่อเวลาที่ใช้ทอดเพิ่มขึ้นก็จะดูดซับน้ำมันได้เพิ่มขึ้นในทั้งสองทรีตเมนต์ อย่างไรก็ตามความสามารถในการลดการดูดซับน้ำมันของตัวอย่างที่เคลือบฟิล์มจะลดลงเมื่อระยะเวลาในการทอดเพิ่มขึ้นและเมื่อใช้อุณหภูมิน้ำมันสูงขึ้น ซึ่งจะได้ชัดเจนใน 2 นาทีแรกของการทอด แต่ความแตกต่างจะลดลง และความสามารถในการลดการดูดซับน้ำมันที่ทั้ง 3 อุณหภูมิก็ไม่มี ความแตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$) หลังจากเวลา 6 นาทีของการทอดแล้ว (รูปที่ 12)



รูปที่ 10 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไขมันหยาบของผลิตภัณฑ์ชิ้นทุเรียนทอดที่ (a) ไม่ได้เคลือบ และ (b) เคลือบด้วยฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนเมื่อทอดด้วยน้ำมันที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 150, 170 และ 190 °C เป็นเวลา 10 นาที



รูปที่ 11 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไขมันหยาบของตัวอย่างชิ้นทุเรียนทอดที่เคลือบและไม่ได้เคลือบด้วยฟิล์มแบ่งเม็ดทุเรียนในระหว่างการทอดน้ำมันที่อุณหภูมิ (a) 150, (b) 170 และ (c) 190°C

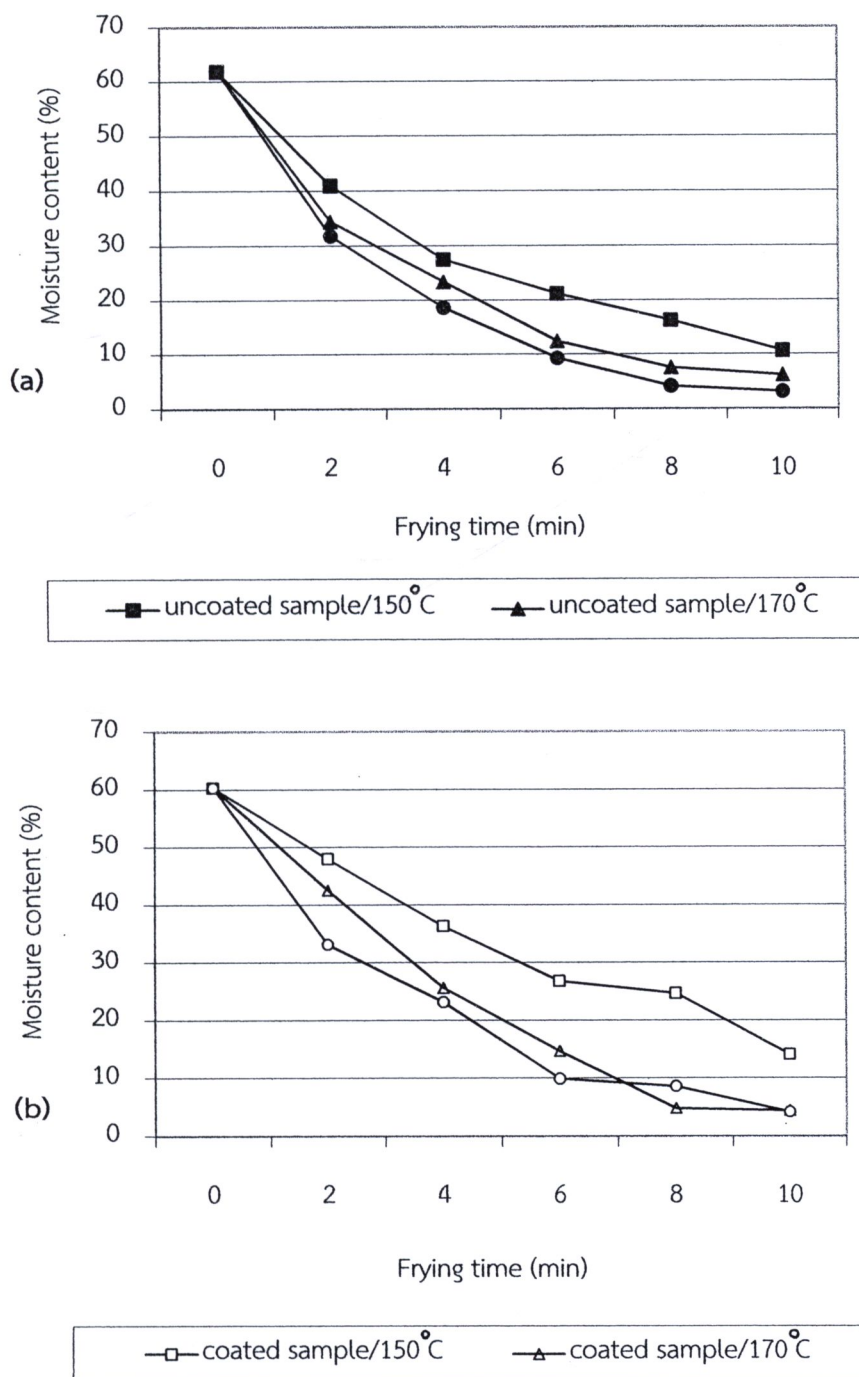


รูปที่ 12 เปรียบเทียบความสามารถในการลดการดูดซับน้ำมันเมื่อเคลือบด้วยแป้งเม็ดทุเรียนในช่วง 6 นาทีแรกของการทอดน้ำมันที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 150, 170 และ 190 °C

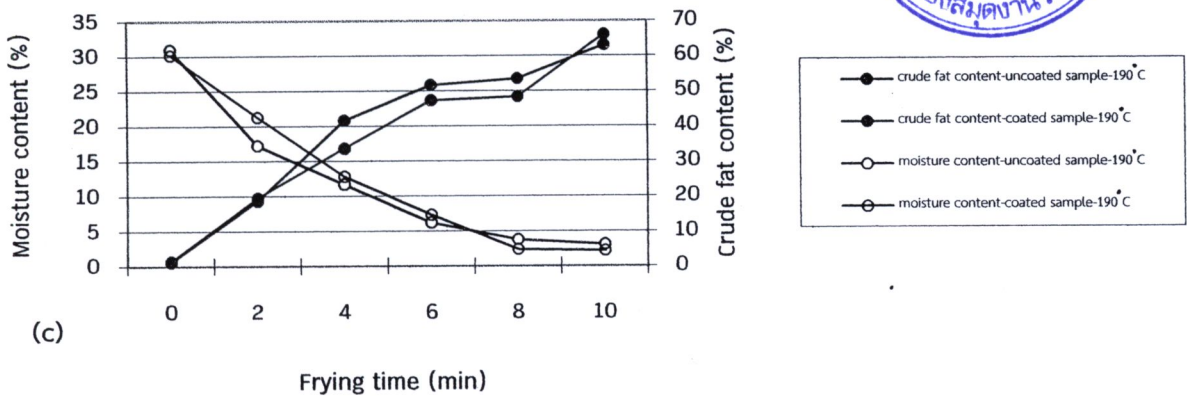
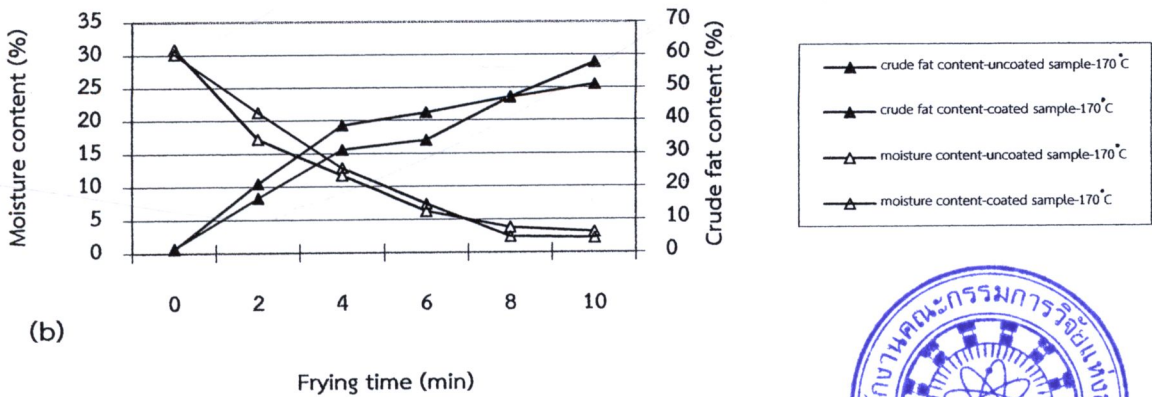
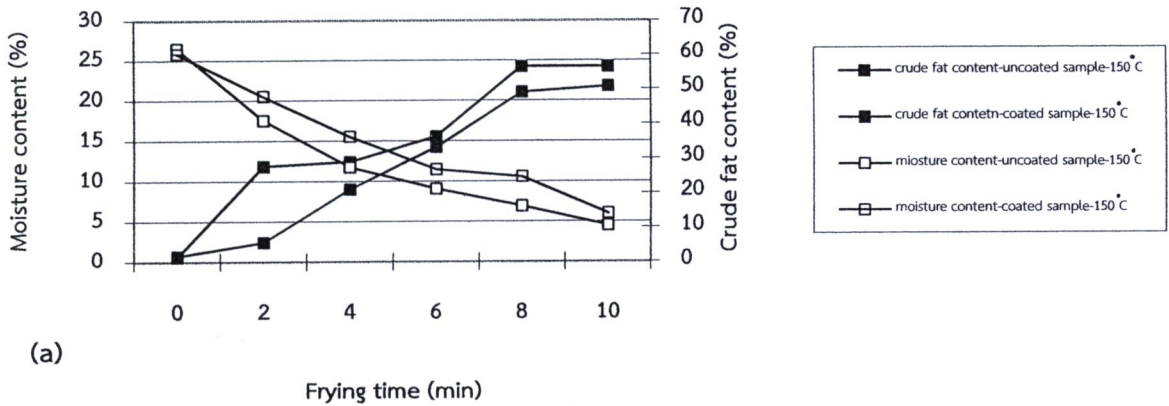
Moreira et al. (1997) อธิบายกลไกการดูดซับน้ำมันในผลิตภัณฑ์ tortilla chips ว่าในช่วง 10-15 วินาทีแรกของการทอด แป้งจะเกิดกระบวนการเจลาติไนเซชันและไอน้ำ (water vapor) จะออกจากผลิตภัณฑ์ทันที ทำให้เกิดการขยายตัวของ capillary pore ในช่วงนี้ น้ำมันจะเข้ายึดติดที่พื้นผิวของมันฝรั่งและเข้าสู่ส่วนในของผลิตภัณฑ์ด้วยโดยผ่านโซนที่เสียหาย (damage zone) ดังกล่าว หลังจากน้ำทั้งหมดถูกทำให้ระเหยหมดแล้ว อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะสูงขึ้น และอัตราการดูดซับน้ำมันจะลดลงเนื่องจากการลดลงของ interfacial tension ในขณะที่ Duran et al. (2007) ศึกษาการดูดซับน้ำมันของมันฝรั่งทอด (potato chips) ที่อุณหภูมิ 180 °C พบว่ามีเพียง 38% ของปริมาณน้ำมันทั้งหมดเท่านั้นที่แทรกซึมเข้าไปในโครงสร้าง ในขณะที่เกือบ 62% ยังคงอยู่ที่พื้นผิวของมันฝรั่งทอด แต่เมื่อเข้าสู่ขั้นตอนการทำให้เย็น (cooling stage) หลังจากนำผลิตภัณฑ์ออกจากหม้อทอดแล้ว การกระจายของน้ำมันจะกลับกัน โดยมีประมาณ 65% ของปริมาณน้ำมันทั้งหมดจะถูกดูดซับแต่ประมาณ 35% จะอยู่ที่พื้นผิว ความแตกต่างของการกระจายของน้ำมัน (oil content distribution) ในระหว่างการทอดและการทำให้เย็นเป็นผลมาจากการลดลงของอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์หลังจากที่ถูกนำออกมาจากหม้อทอด ลดการเกิด interfacial tension ระหว่างน้ำมันและอากาศ นอกจากนั้นเมื่อความดันภายในรูพรุนของผลิตภัณฑ์ลดลงจะทำให้เกิดการไหลเข้าของน้ำมันที่พื้นผิวเข้าสู่โครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์อย่างรวดเร็ว

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ชิ้นทุเรียนทอดเมื่อทอดที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับคือ 150, 170 และ 190 °C เป็นเวลา 10 นาที จากรูปที่ 13a พบว่ามีรูปแบบที่มีแนวโน้มตรงกันข้ามกับการดูดซับน้ำมัน นั่นคือปริมาณความชื้นจะลดลงเมื่อตัวอย่างสัมผัสอาหารนานขึ้น เนื่องจากเกิดการถ่ายโอนน้ำจากตัวอย่างไปสู่น้ำมัน และถ่ายโอนน้ำมันเข้าสู่ตัวอย่างในเวลาเดียวกัน และอย่างที่คาดหมายการระเหยของน้ำที่อุณหภูมิน้ำมันที่ 190 °C จะมากกว่าที่ 170 และ 150 °C ตามลำดับ โดยผลิตภัณฑ์สุดท้ายเมื่อใช้เวลาทอด 10 นาที จะมีปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 10.70 ± 0.61 , 6.27 ± 0.18 และ 3.24 ± 0.06 โดยน้ำหนัก สำหรับตัวอย่างที่ไม่ได้เคลือบฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนที่ทอดที่ 150, 170 และ 190 °C ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์สุดท้ายของตัวอย่างที่เคลือบฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนที่ทอดที่ 150, 170 และ 190 °C เมื่อใช้เวลาทอด 10 นาที (รูปที่ 13b) มีค่าเท่ากับร้อยละ 14.15 ± 0.82 , 4.45 ± 0.04 และ 4.24 ± 0.13 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เคลือบฟิล์ม แสดงให้เห็นว่าฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนนอกจากจะทำหน้าที่เป็นตัวกักกันการเคลื่อนที่เข้าของน้ำมันแล้วยังขัดขวางการเคลื่อนที่ออกของไอน้ำด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงแรกของการทอดตัวอย่างจะสูญเสียความชื้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากการระเหยของความชื้นที่พื้นผิวของตัวอย่าง เมื่อเวลาการที่ใช้ทอดนานขึ้นอัตราการสูญเสียความชื้นของตัวอย่างจะลดลง โดย Ashkenazi et al. (1984) เสนอแนะว่าการแพร่ของน้ำ (water diffusion) ในระหว่างกระบวนการทอดมันฝรั่ง (French fries) เป็นสัดส่วนกับรากที่สอง (square root) ของเวลาที่ใช้ทอด

จากรูปที่ 14 จะเห็นว่าผลิตภัณฑ์ชิ้นทุเรียนทอดเป็นเวลา 10 นาทีที่อุณหภูมิ 150 °C มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไขมันหยาบจากเริ่มต้น 0.63% เป็น 24.26% และมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 61.89% ลดลงเหลือ 10.70% ในขณะที่ตัวอย่างที่เคลือบด้วยฟิล์ม มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไขมันหยาบจากเริ่มต้น 0.75% เป็น 21.81% และมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 60.30% ลดลงเหลือ 14.15% คิดเป็นอัตราส่วนของปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับกับปริมาณความชื้นที่สูญเสียได้เท่ากับ 1: 2.17 และ 1:2.19 สำหรับตัวอย่างที่ไม่ได้เคลือบและเคลือบฟิล์มตามลำดับ จะเห็นได้ว่าในกรณีนี้ปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับ (oil uptake) มีค่าน้อยกว่าปริมาณความชื้นที่สูญเสีย (water loss) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Bhat and Bhattacharya (2001) แต่ให้ผลตรงกันข้ามกับการศึกษาของ Math et al. (2004) เนื่องจากชนิดของตัวอย่างและปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามการที่อัตราส่วนของทั้งสองพารามิเตอร์ (เคลือบและไม่เคลือบฟิล์ม) ไม่ได้แตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) แสดงให้เห็นว่าการใช้ฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนเคลือบผิวตัวอย่างก่อนทอดไม่ได้มีผลกระทบต่อกลไกโดยรวมของการทอด เพียงแต่ช่วยชะลอ/ยับยั้งการเคลื่อนที่ของความชื้นและน้ำมันเท่านั้น



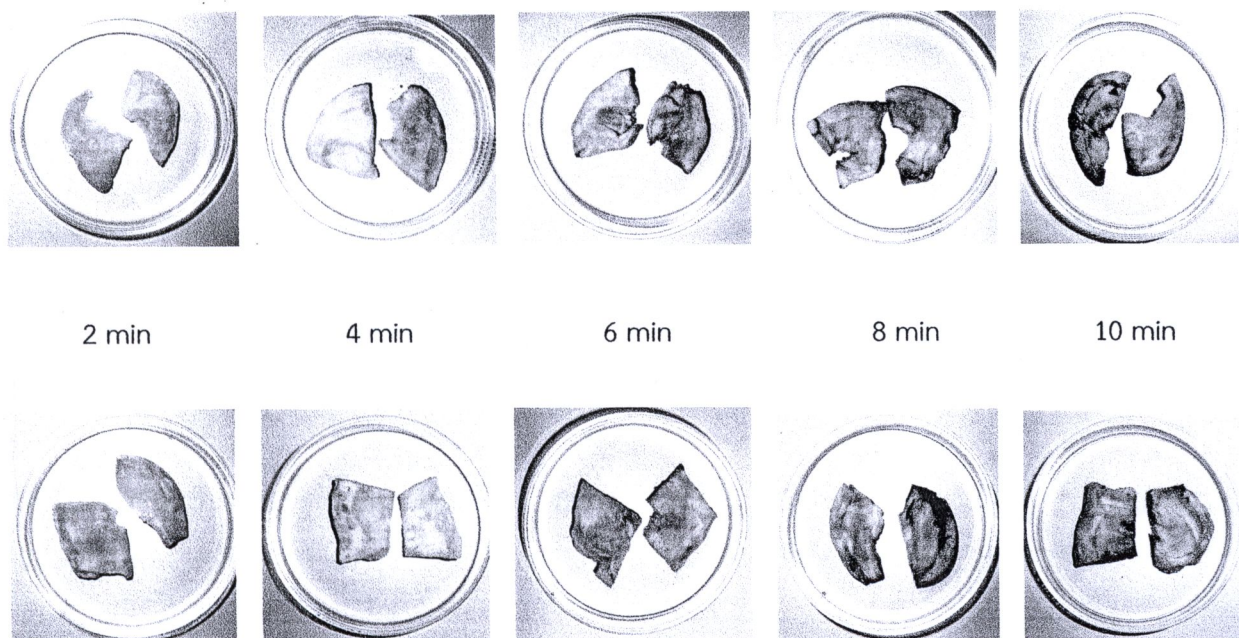
รูปที่ 13 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของตัวอย่างชิ้นทุเรียนทอดที่ (a) ไม่ได้เคลือบ และ (b) เคลือบด้วยฟิล์ม แป้งเม็ดทุเรียนในระหว่างการทอดน้ำมันที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 150, 170 และ 190 °C เป็นเวลา 10 นาที



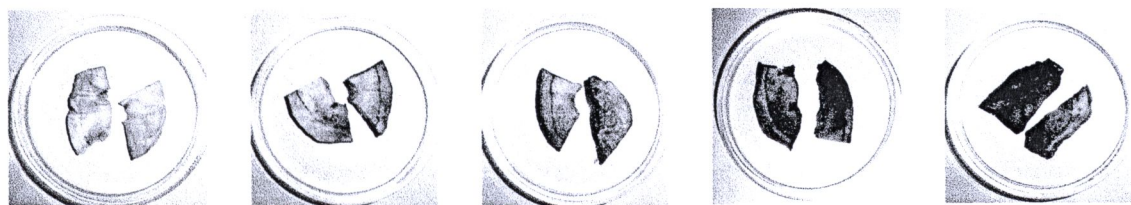
รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไขมันหยาบและปริมาณความชื้นของตัวอย่างชิ้นทุเรียนทอดที่ไม่ได้เคลือบและเคลือบด้วยฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนในระหว่างการทอดน้ำมันที่อุณหภูมิ (a) 150, (b) 170 และ (c) 190 °C

อย่างไรก็ตาม Duran et al. (2007) ศึกษาผลของการดูดซับน้ำมันของมันฝรั่งทอดโดยใช้ฟิล์มที่บริโกลได้ hydroxypropylmethylcellulose (HPMC) เคลือบก่อนนำไปทอดน้ำมันที่อุณหภูมิ 180 °C พบว่านอกจากจะไม่ช่วยลดการดูดซับน้ำมันแล้ว ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังมีปริมาณน้ำมันมากกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เคลือบฟิล์ม การที่ผลของการใช้ HPMC แตกต่างจากผลการใช้ฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนในงานวิจัยนี้ เนื่องจากประสิทธิภาพของฟิล์มที่บริโกลได้ขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างจุลภาค และสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ (Garcia et al., 2002) นอกจากนั้นผลการลดการดูดซับน้ำมันในอาหารทอดยังขึ้นกับชนิดของฟิล์ม เนื่องจากการแพร่ผ่านของน้ำมันไปที่อาหารขึ้นกับการละลายได้ของน้ำมันในฟิล์มด้วย ซึ่งสัมพันธ์กับความหนาของฟิล์ม (Freitas et al., 2009) และการเคลือบที่มีรูปแบบเดียวกัน (uniform) ทั้งพื้นผิวของตัวอย่างจะจำกัดการถ่ายโอนมวล (mass transfer) ได้ดี (Huse et al., 1998)

อุณหภูมิสูงของน้ำมันที่ใช้ทอดทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสและสีน้ำตาลที่พื้นผิวของผลิตภัณฑ์ แสดงลักษณะที่ปรากฏของผลิตภัณฑ์ชิ้นทุเรียนทอดในรูปที่ 15-17 เมื่อพิจารณาด้วยตาเปล่าจะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่เคลือบด้วยฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนจะมีความฉ่ำ (soggy) มากกว่าและมีสีน้ำตาลอ่อนกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เคลือบฟิล์มเมื่อใช้อุณหภูมิทอดเดียวกันในทุกช่วงเวลาที่ใช้ทอด สอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์สี (color parameter) ที่เป็นฟังก์ชันกับระยะเวลาที่ใช้ทอด (รูปที่ 18) โดยผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทอดนานขึ้นจะมีค่า L^* และ b^* ลดลงในขณะที่มีค่า a^* เพิ่มขึ้น ในตัวอย่างทั้งที่เคลือบและไม่เคลือบ แต่ตัวอย่างที่เคลือบฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนจะมีความสว่างมากกว่า (L มากกว่า)



รูปที่ 15 ลักษณะที่ปรากฏของชิ้นทุเรียนทอดที่อุณหภูมิน้ำมัน 150 °C เป็นเวลา 2, 4, 6, 8, 10 นาที เมื่อ รูปแบบ เป็นตัวอย่างที่ไม่ได้เคลือบฟิล์ม และรูปร่างเป็นตัวอย่างที่เคลือบด้วยฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนก่อนนำไปทอดน้ำมัน



2 min

4 min

6 min

8 min

10 min



รูปที่ 16 ลักษณะที่ปรากฏของชิ้นทุเรียนทอดที่อุณหภูมิน้ำมัน 170 °C เป็นเวลา 2, 4, 6, 8, 10 นาที เมื่อ รูปบน เป็นตัวอย่างที่ไม่ได้เคลือบฟิล์ม และรูปล่างเป็นตัวอย่างที่เคลือบด้วยฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนก่อนนำไปทอดน้ำมัน



2 min

4 min

6 min

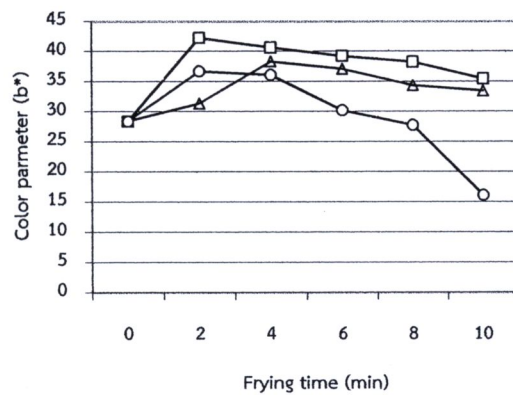
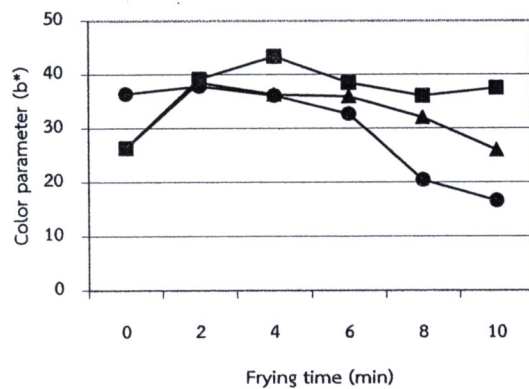
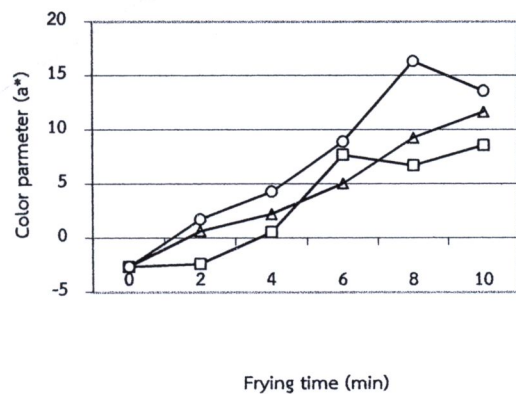
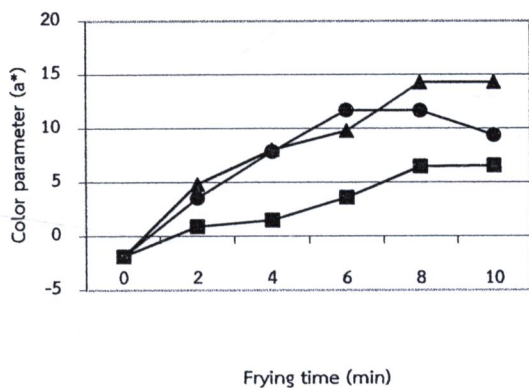
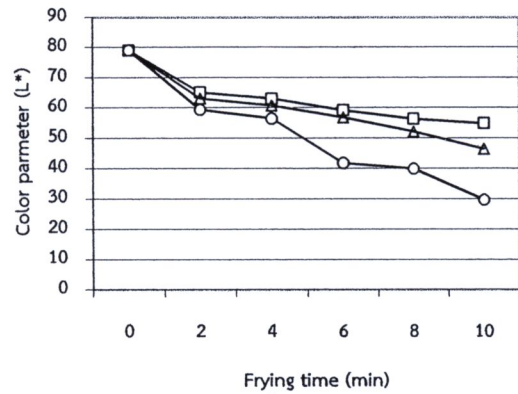
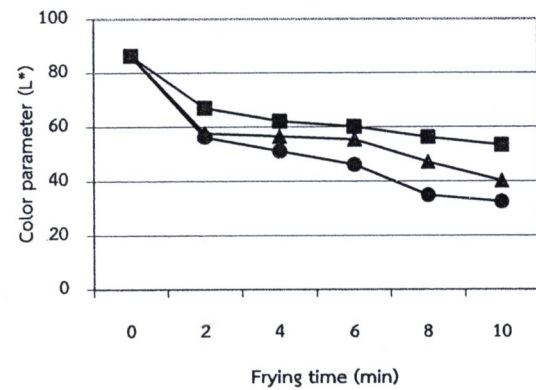
8 min

10 min



รูปที่ 17 ลักษณะที่ปรากฏของชิ้นทุเรียนทอดที่อุณหภูมิน้ำมัน 190 °C เป็นเวลา 2, 4, 6, 8, 10 นาที เมื่อ รูปบน เป็นตัวอย่างที่ไม่ได้เคลือบฟิล์ม และรูปล่างเป็นตัวอย่างที่เคลือบด้วยฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนก่อนนำไปทอดน้ำมัน





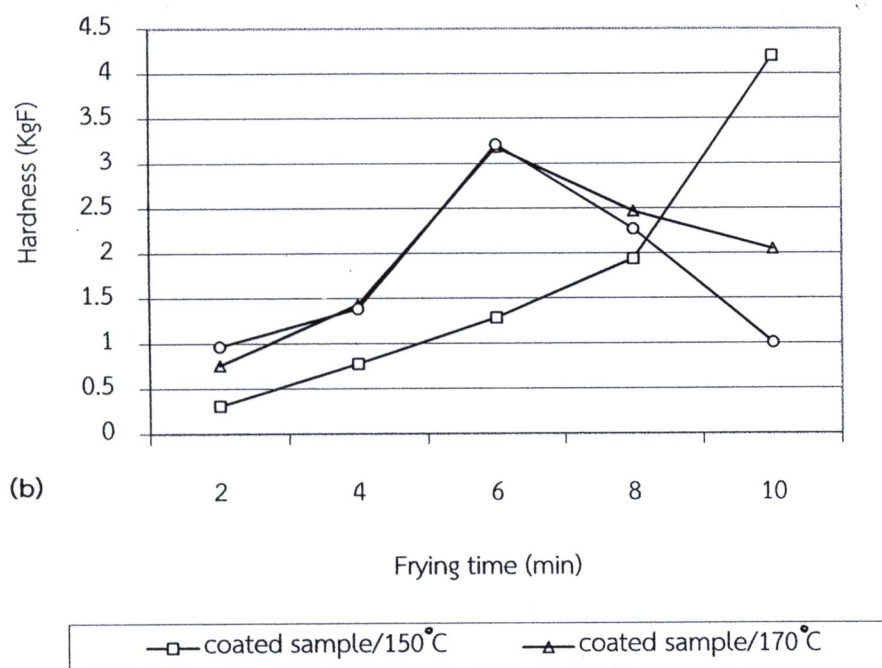
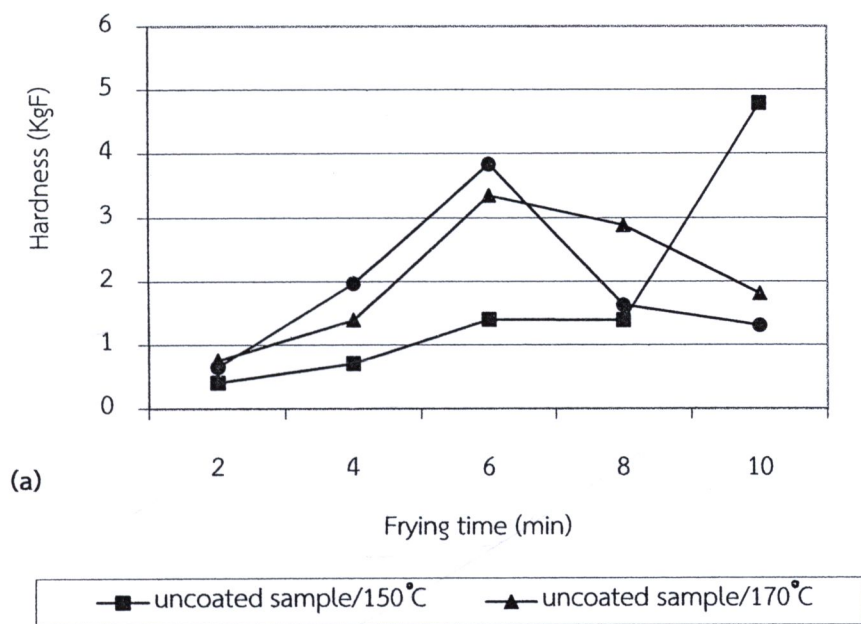
รูปที่ 18 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์สี (L^* , a^* และ b^*) ของตัวอย่างชิ้นทุเรียนทอดที่ (a) ไม่ได้เคลือบ และ (b) เคลือบด้วยฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนในระหว่างการทอดน้ำมันที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 150, 170 และ 190 °C เป็นเวลา 10 นาที สัญลักษณ์ทึบ ■, ▲, ● แสดงถึงตัวอย่างที่ไม่ได้เคลือบฟิล์มที่ทอดที่อุณหภูมิ 150, 170 และ 190 °C ตามลำดับ และสัญลักษณ์โปร่ง □, ○, △ แสดงถึงตัวอย่างที่เคลือบฟิล์มที่ทอดที่อุณหภูมิ 150, 170 และ 190 °C ตามลำดับ

ตารางที่ 5 สมบัติทางด้านสีและเนื้อสัมผัสของชิ้นทุเรียนทอดที่อุณหภูมิ 150 °C ของตัวอย่างที่เคลือบและไม่ได้เคลือบด้วยฟิล์มแบ่งเม็ดทุเรียน

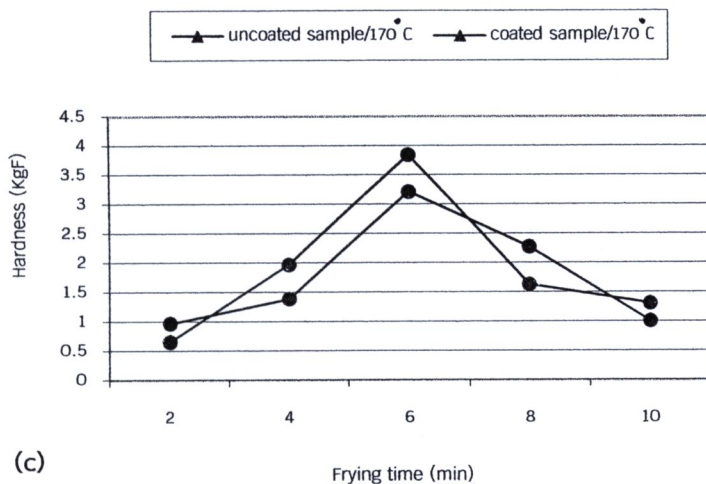
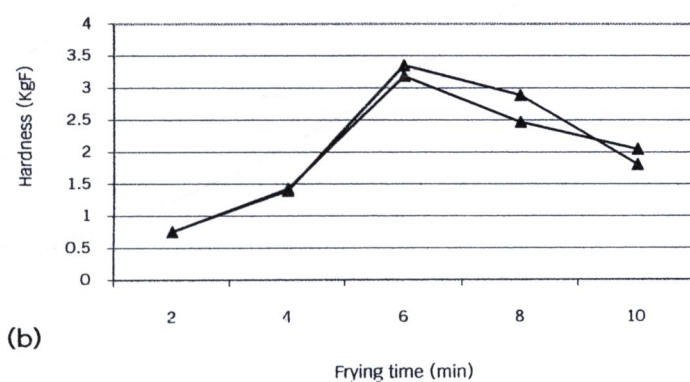
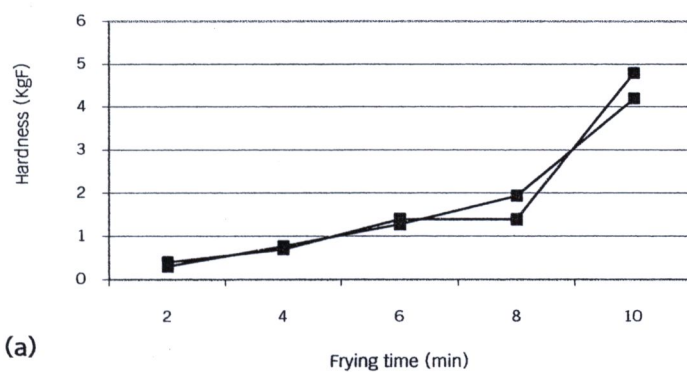
สมบัติ	เวลาที่ใช้ทอด (นาที)									
	ตัวอย่างที่ไม่ได้เคลือบฟิล์ม					ตัวอย่างที่เคลือบฟิล์ม				
	2	4	6	8	10	2	4	6	8	10
สีผิว										
L*	67.06	62.21	60.20	56.34	53.44	65.22	63.14	59.26	56.40	54.94
a*	0.93	1.52	3.62	6.51	6.61	-2.40	0.55	7.69	6.73	8.57
b*	39.24	43.44	38.55	36.11	37.57	42.29	40.69	39.29	38.31	35.51
Hue										
เนื้อสัมผัส										
Hardness	0.405 ^a	0.776 ^a	1.407 ^b	1.396 ^b	4.797 ^c	0.309 ^A	0.712 ^{ab}	1.286 ^B	1.342 ^B	4.201 ^C
(KgF)	± 0.174	± 0.475	± 0.300	± 0.154	± 1.298	± 0.142	± 0.154	± 0.507	± 0.364	± 1.023

สัญลักษณ์ a และ b (A และ B) บอกระดับความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (P<0.05) ของข้อมูลความแข็งของตัวอย่างที่ไม่ได้เคลือบฟิล์ม (เคลือบฟิล์ม) เมื่อใช้เวลาทอด 2, 4, 6, 8 และ 10 นาที

เมื่อพิจารณาเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ชิ้นทุเรียนทอดที่ทอดด้วยน้ำมันที่อุณหภูมิ 150 °C (ตารางที่ 5) พบว่าเมื่อใช้เวลาทอดเพิ่มขึ้น ผลอดกัณฑ์จะมีเนื้อสัมผัสที่แสดงด้วยค่าความแข็ง (hardness) เพิ่มขึ้น โดยผลิตภัณฑ์ที่ใช้ระยะเวลาทอด 10 นาทีที่มีความแข็งมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ใช้เวลาทอด 2 นาทีเท่ากับ 11.84 และ 13.60 เท่า สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้เคลือบและเคลือบฟิล์ม ตามลำดับ ตัวอย่างที่เคลือบฟิล์มจะมีความแข็งน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เคลือบฟิล์มในทุกช่วงเวลา อย่างไรก็ตามมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงความแข็งของผลิตภัณฑ์เช่นเดียวกันทั้งสองทรีตเมนต์ อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทอดที่อุณหภูมิ 170 และ 190 °C ให้รูปแบบการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งแตกต่างจากเมื่อทอดที่ 150 °C ดังแสดงในรูปที่ 19 พบว่าในขณะที่ตัวอย่างที่ทอดที่ 150 °C มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ระยะเวลาทอดนานขึ้นจนถึง 10 นาที แต่ตัวอย่างที่ทอดที่ 170 และ 190 °C กลับมีค่าความแข็งมากที่สุดเมื่อทอดเป็นเวลา 6 นาที หลังจากนั้นจะมีค่าความแข็งลดลง ทั้งนี้เนื่องจากผลิตภัณฑ์ทอดที่ได้เริ่มเกรียมไหม้ตัวเอง (รูปที่ 16-17) ซึ่งไม่เกิดขึ้นในระยะเวลา 10 นาทีของการทอดที่ 150 °C (รูปที่ 15) โดยจะเห็นผลของการเคลือบฟิล์มต่อเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ได้ชัดเจนในตัวอย่างที่ทอดที่ 190 °C ในช่วง 4-6 นาที (รูปที่ 20c)



รูปที่ 19 การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของตัวอย่างชิ้นทุเรียนทอดที่ (a) ไม่ได้เคลือบ และ (b) เคลือบด้วยฟิล์มแป้ง เม็ดทุเรียนในระหว่างการทอดน้ำมันที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 150, 170 และ 190 °C เป็นเวลา 10 นาที

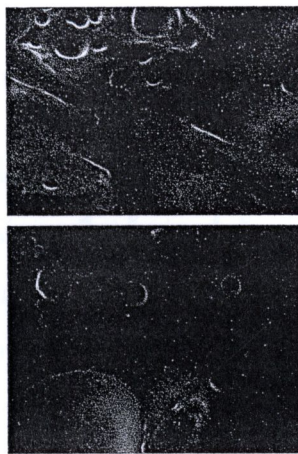
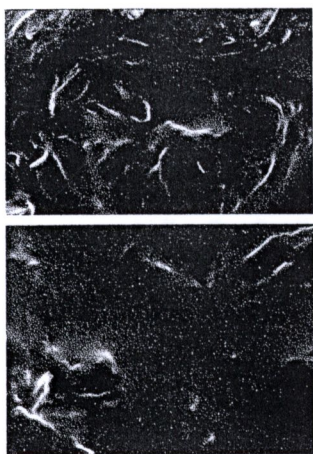


รูปที่ 20 การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของตัวอย่างชิ้นทุเรียนทอดที่เคลือบและไม่ได้เคลือบด้วยแป้งเม็ดทุเรียนในระหว่างการทอดน้ำมันที่อุณหภูมิ (a) 150, (b) 170 และ (c) 190 °C เป็นเวลา 10 นาที

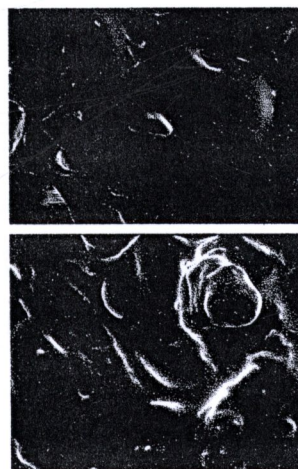
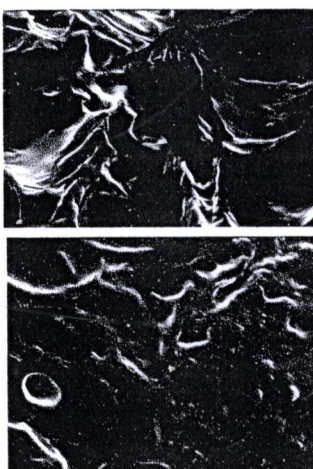
จากไมโครกราฟที่แสดงโครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์ชั้นทุเรียนทอดในรูปที่ 21 พบการแตกออก (rupture) ของเซลให้ช่องว่างขนาดใหญ่ (large void spaces) ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ออกของน้ำในระหว่างการทอด ทั้งนี้เนื่องจากทุเรียนมีปริมาณน้ำเป็นองค์ประกอบสูง เมื่ออยู่ในน้ำมันที่มีอุณหภูมิสูง น้ำที่อยู่ในทุเรียนจะถูกทำให้ร้อนและถูกบีบออกสู่น้ำมันที่ล้อมรอบมันในรูปของไอน้ำ (Varela et al., 1988) และน้ำมันทั้งหมดที่อยู่ที่พื้นผิวจะเข้าสู่ภายในชั้นทุเรียนจากการควบแน่น (condensation) ของไอน้ำเมื่อเวลาที่นำออกจากหม้อทอด (Gamber and Rice, 1987) แต่ตัวอย่างที่เคลือบฟิล์มจะมีขนาดเซลเล็กกว่าและมีความสมบูรณ์ (integrity) ของเซลที่เกิดจากการหดตัวในเซลเมมเบรนดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้เคลือบฟิล์มที่ใช้ระยะเวลาทอดเท่ากันในช่วงเวลาเดียวกัน และมีพื้นที่ผิวค่อนข้างเรียบกว่าและมีรูพรุนน้อยกว่า ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความแตกต่างของการดูดซับน้ำมันของทั้งสองทรีตเมนต์ โดยจะเห็นความแตกต่างได้ชัดเจนในผลิตภัณฑ์ที่ใช้เวลาทอด 2 นาที (รูป 21a)

นอกจากนั้นยังแสดงให้เห็นถึงการที่ตัวอย่างที่เคลือบฟิล์มมีการคายน้ำ (dehydrate) ในระหว่างกระบวนการทอดและถูกยึดติดอยู่ที่พื้นผิว ซึ่งก็เป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ใช้อธิบายการที่ผลิตภัณฑ์ที่เคลือบฟิล์มที่มีปริมาณน้ำมันต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เคลือบฟิล์ม (Suarez et al., 2008) อย่างไรก็ตามการปลดปล่อยไอน้ำทำให้เกิดการพอง (blister) ที่พื้นผิวด้านนอกของตัวอย่างที่เคลือบฟิล์มมากกว่าที่ไม่เคลือบฟิล์ม นอกจากนั้นในระหว่างช่วงแรกของการทอด ตัวอย่างที่เคลือบฟิล์มจะมีความชุ่มชื้น (humidity) และเกิดเจลาตินไนเซชันในสภาวะที่มีปริมาณน้ำสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เคลือบฟิล์ม ทำให้มีโครงสร้างที่เป็นเครือข่ายที่หนาแน่น (compact) กว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เคลือบฟิล์ม

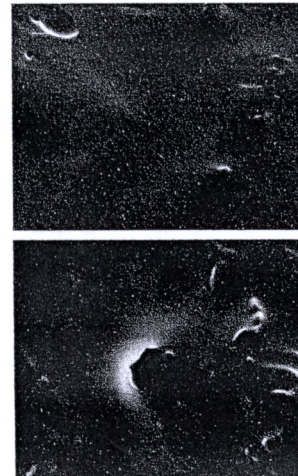
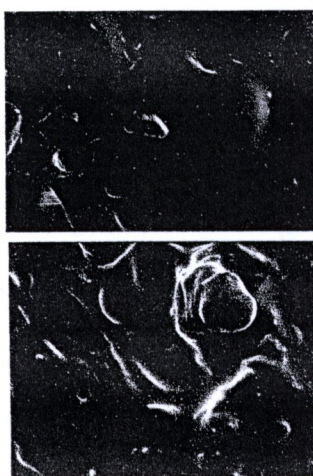
(a)



(b)



(c)



รูปที่ 21 โครงสร้างทางจุลภาคเมื่อตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 500 เท่า โดยแสดงภาคตัดขวางและพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ขั้นทุเรียนทอด (ข้าว-ที่ไม่ได้เคลือบฟิล์ม และข้าว-เคลือบฟิล์ม) ที่ทอดน้ำมันอุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา (a) 2, (b) 6, และ (c) 10 นาที โดยแต่ละชุดรูปภาพประกอบด้วย บน-ภาคตัดขวาง (cross section) และ ล่าง-พื้นผิว (surface)

ผลของวิธีการเคลือบฟิล์มแบ่งเม็ดทุเรียนบนชิ้นทุเรียนและการจัดการหลังการทอด

จากตารางที่ 6 และรูปที่ 22 จะเห็นได้ว่าวิธีการที่ใช้เคลือบฟิล์มแบ่งเม็ดทุเรียนมีผลต่อการดูดซับน้ำมันของผลิตภัณฑ์ชิ้นทุเรียนทอดเช่นกัน ถึงแม้จะมีรายงานว่าวิธีการจัดการเบื้องต้นก่อนนำตัวอย่างไปทอดด้วยการลดปริมาณความชื้นโดยใช้ไมโครเวฟ ลมร้อนจะช่วยลดปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับลงได้อย่างมีนัยสำคัญในผลิตภัณฑ์ทอดหลายชนิด (Gamble and Rice, 1987; Lamberg et al., 1990; Krokida et al., 2001; Moreno and Bouchon, 2008) แต่จากผลการทดลองพบว่าการเคลือบฟิล์มแล้ววางทิ้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องให้ผลลดการดูดซับน้ำมันดีกว่าเมื่อทำให้แห้งโดยการอบที่อุณหภูมิ 60 และ 80 °C เมื่อใช้เวลา 30 นาทีเท่ากันก่อนนำไปทอดน้ำมันที่อุณหภูมิ 170 °C เป็นเวลา 5 นาที โดยเฉพาะเมื่ออบที่ 60 °C นอกจากจะไม่ช่วยลดการดูดซับน้ำมันแล้ว ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังมีปริมาณไขมันหยาบมากกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เคลือบฟิล์มด้วย นอกจากนั้นเพิ่มระยะเวลาที่ใช้ออบที่ 60 °C จาก 30 นาที เป็น 60 นาที ก็ไม่มีผลแตกต่างทางสถิติของปริมาณความชื้นและปริมาณไขมันหยาบ ($P>0.05$) แต่เนื่องจากความหนาของฟิล์มที่เคลือบมีผลต่อสมบัติการกีดกันการผ่านเข้าออกของปริมาณความชื้นและน้ำมัน ทำให้เมื่อเพิ่มความหนาของฟิล์มโดยการใช้วิธีการชุบสารละลายฟิล์มและทำให้แห้งที่ 60 °C จำนวน 2 ครั้ง พบว่าสามารถลดการดูดซับน้ำมันได้จาก 33.55% ที่ชุบสารละลายฟิล์มเพียงครั้งเดียว เป็น 23.01% แต่ก็ไม่ได้แตกต่างจากตัวอย่างที่ไม่ได้เคลือบฟิล์ม ($P>0.05$)

ผลดังกล่าวขัดแย้งกับรายงานของ Martinez-Avila et al. (2010) ที่พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนที่ 61 °C ก่อนนำไปทอดน้ำมันของนกเก็ตไก่ (chicken nuggets) สามารถลดการดูดซับน้ำมันได้ถึง 50% และการศึกษาการทอดมันฝรั่งของ Moyano and Pedreschi (2006) ที่รายงานว่าการอบมันฝรั่งหลังทอดจะช่วยลดการดูดซับน้ำมันเนื่องจากความร้อนที่ให้งดกล่าวจะไปลดปริมาณความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่าง ส่งผลให้ลดการถ่ายโอนน้ำมันเข้าสู่อาหาร นอกจากนั้นผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการจัดการเบื้องต้นดังกล่าวไม่ได้เกิดจากการลดลงของปริมาณความชื้นเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่มาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่พื้นผิวของชิ้นตัวอย่างที่ส่งผลให้มีการลดการแพร่ผ่านของน้ำมันที่พื้นผิว ซึ่งจะเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนของพื้นผิวชิ้นทุเรียนทอดจากไมโครกราฟในรูปที่ 23 ที่แสดงพื้นผิวของชิ้นทุเรียนที่ทอดที่อุณหภูมิ 170 °C เป็นเวลา 5 นาที พื้นผิวดูตัวอย่างที่เคลือบฟิล์มจะเรียบกว่าของตัวอย่างที่ไม่ได้เคลือบฟิล์ม ซึ่งส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ทอดที่ได้มีปริมาณไขมันหยาบต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$)

Mallikajunan et al. (1997) อธิบายการลดการดูดซับของน้ำมันและการสูญเสียความชื้นเป็นผลมาจากการเกิดขึ้นป้องกัน (protective layer) บนพื้นผิวของตัวอย่างในระหว่างช่วงแรกของการทอดเนื่องจากการเกิดเจล (gelation) ที่อุณหภูมิมากกว่า 60 °C ชั้นป้องกันที่เกิดขึ้นจะไปยับยั้งการถ่ายโอนของความชื้นและน้ำมันในระหว่างตัวอย่างกับสิ่งแวดล้อมของมัน ดังนั้นความสม่ำเสมอของการเคลือบ (coating integrity) จึงเป็นปัจจัยที่สำคัญเพราะถ้ามีรอยแตก (crack) ก็จะลดสมบัติการกีดกัน (barrier property) ลง (Donhowe and Fennema, 1993; Huse et al., 1998) ซึ่งความสมบูรณ์ของการเคลือบขึ้นกับชนิดของสับสเตรท (Garcia et al., 2002)

ในการทำเดียวกันจากรูปที่ 24 ตัวอย่างที่ถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C ก่อนนำไปทอดให้พื้นผิวที่มีความพรุนมากกว่าตัวอย่างที่วางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องและที่ 80 °C จึงทำให้สามารถแพร่ผ่านน้ำมันเข้าสู่อาหารได้ดีกว่า สอดคล้องกับผลของปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับมากกว่านั่นเอง ความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทุเรียนทอดที่มีวิธีการเคลือบแตกต่างกันก็มีผลต่อเนื้อสัมผัสของตัวอย่างเช่นกันดังแสดงในตารางที่ 6 ซึ่งแสดงได้ด้วยค่าความแข็งซึ่งมาจาก maximum force parameter โดยสะท้อนถึงพื้นผิวด้านนอกของชิ้นทุเรียนทอดเมื่อถูกตัดด้วยหัวตัดจากเครื่อง Instron texture analysis ทั้งนี้เนื่องจากในระหว่างการทอด ค่าความแข็งของตัวอย่างจะลดลงในช่วงเริ่มต้นเนื่องจากเนื้อเยื่อของชิ้นทุเรียนอ่อนลงเพราะเกิดการเจลาติไนเซชันของแป้งและการละลายของ lamella media (Andersson et al., 1994) จากนั้นค่าความแข็งของตัวอย่างจึงพัฒนาเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการทอดสอดคล้องกับสมบัติของเปลือกของชิ้นทุเรียนทอด ลักษณะเช่นนี้เกิดขึ้นเช่นเดียวกันในกรณีของมันฝรั่งทอด (Pedreschi et al., 2001) เนื้อสัมผัสโดยรวมของชิ้นทุเรียนในทุกช่วงเวลาของการทอดจึงมาจากกระบวนการทั้งสองดังกล่าว ดังนั้นวิธีการเคลือบที่แตกต่างกันทำให้มีโครงสร้างทางจุลภาคที่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้เกิดการเจลาติไนเซชันของแป้งและการละลายของ lamella media ที่แตกต่างกันด้วย

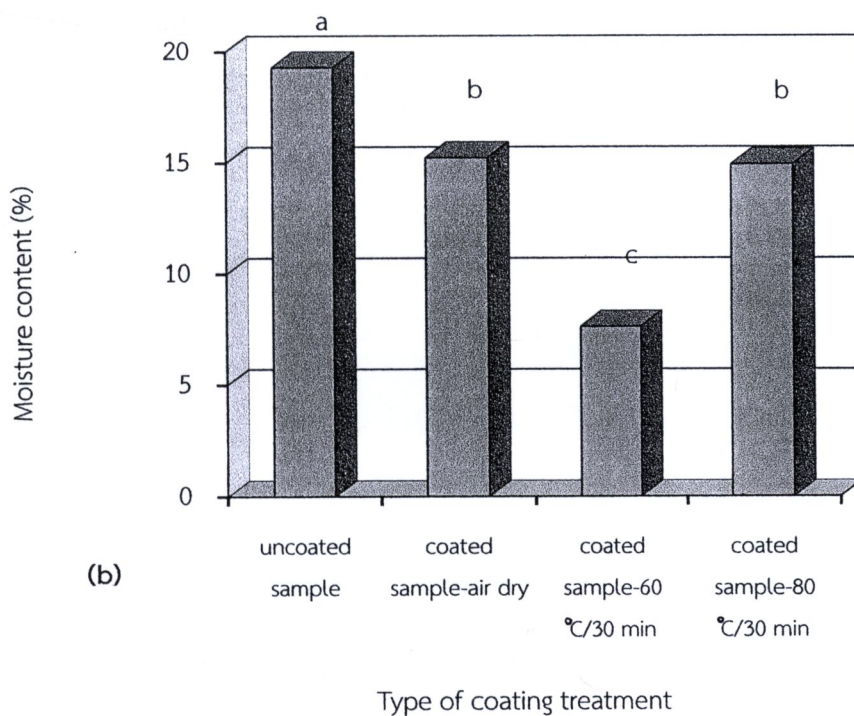
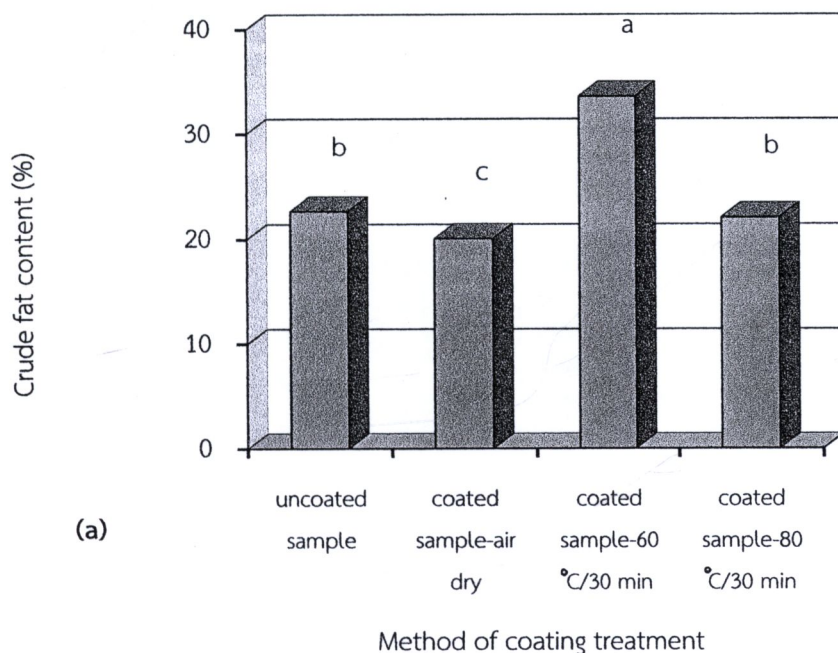
วิธีการเคลือบโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 และ 80 °C ไม่มีผลช่วยลดการดูดซับน้ำมันแต่อย่างใด รวมทั้งการเพิ่มความหนาของฟิล์มโดยการชุบซ้ำก็ไม่ให้ผลทางบวกด้วย นอกจากนั้นการใช้อุณหภูมิสูงกับผลิตภัณฑ์หลังทอดก็ไม่มีผลลดการดูดซับน้ำมันเช่นกัน (ตารางที่ 6 และรูปที่ 25) การจัดการหลังการทอดด้วยการอบที่ 60 °C ก็ไม่มีผลต่อการลดการดูดซับน้ำมันเช่นกัน โดยมีค่าการดูดซับน้ำมันไม่แตกต่างจากตัวอย่างเมื่อไม่ได้อบหลังทอดในสภาวะเดียวกัน ทั้ง ๆ ที่วิธีการดังกล่าวใช้ได้ผลกับการทอดน้ำมันของนักเก็ตไก่เช่นกัน (Martinez-Avila et al., 2010) ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างหลังทอดที่อบและไม่อบที่ไม่สามารถบอกความแตกต่างได้ชัดเจน (รูปที่ 26) แต่ตัวอย่างที่ผ่านการอบหลังจากทอดน้ำมันทั้ง 2 ทรีตเมนต์ที่ทำการศึกษาดังนั้นก็ให้ผลิตภัณฑ์ชิ้นทุเรียนทอดที่มีเนื้อสัมผัสที่มีค่าความแข็งมากกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้อบหลังการทอดในสภาวะเดียวกัน นอกจากนั้นก็มีแนวโน้มที่จะมีค่าพารามิเตอร์สีของความสว่างต่ำกว่าด้วย (ตารางที่ 6)

กล่าวโดยสรุปได้ว่า วิธีการเหมาะสมที่สุดสำหรับการเคลือบแป้งเม็ดทุเรียนบนชิ้นทุเรียนทอดที่อุณหภูมิ 170 °C เป็นเวลา 5 นาทีคือ หลังเคลือบแล้ววางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (30 °C) เป็นเวลา 30 นาที โดยสามารถลดการดูดซับน้ำมันอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ประมาณ 11.5% โดยฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนสามารถดัดแปลงการกีดกันการเคลื่อนที่ผ่านของทั้งน้ำมันเข้าสู่ตัวอย่างและการเคลื่อนที่ของความชื้นออกจากตัวอย่าง ซึ่งแสดงได้ด้วยปริมาณของไขมันหยาบและปริมาณความชื้นที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ของผลิตภัณฑ์ทุเรียนทอดที่ไม่ได้เคลือบและเคลือบฟิล์ม

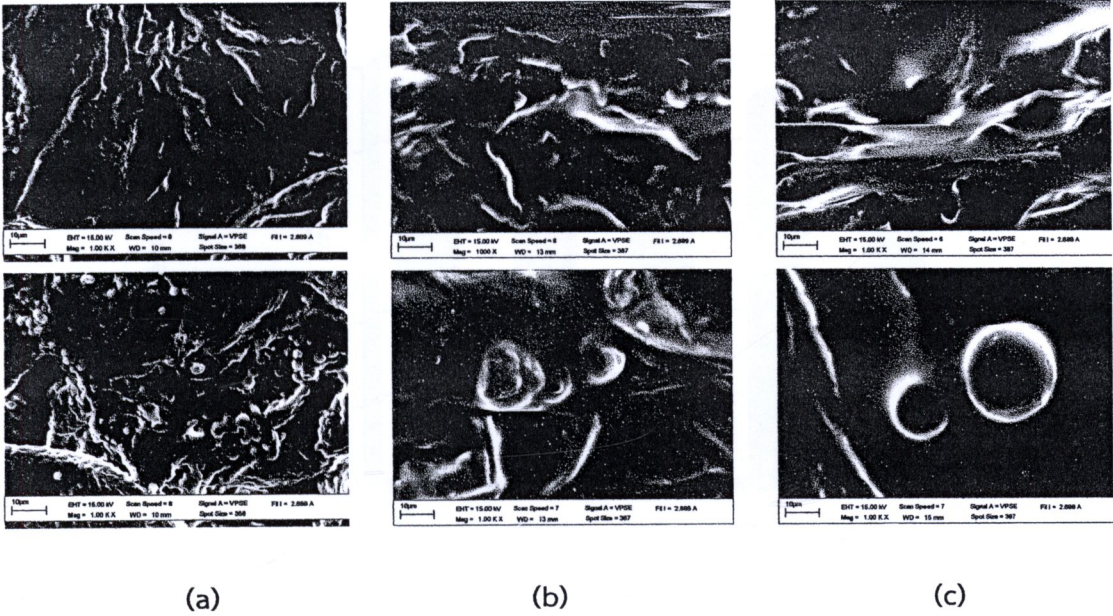


ตารางที่ 6 ผลของวิธีการเคลือบฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนต่อปริมาณไขมันหยาบ ปริมาณความชื้น ความแข็ง และค่าพารามิเตอร์สีของผลิตภัณฑ์ชิ้นทุเรียนทอดที่อุณหภูมิ 170 °C เป็นเวลา 5 นาที

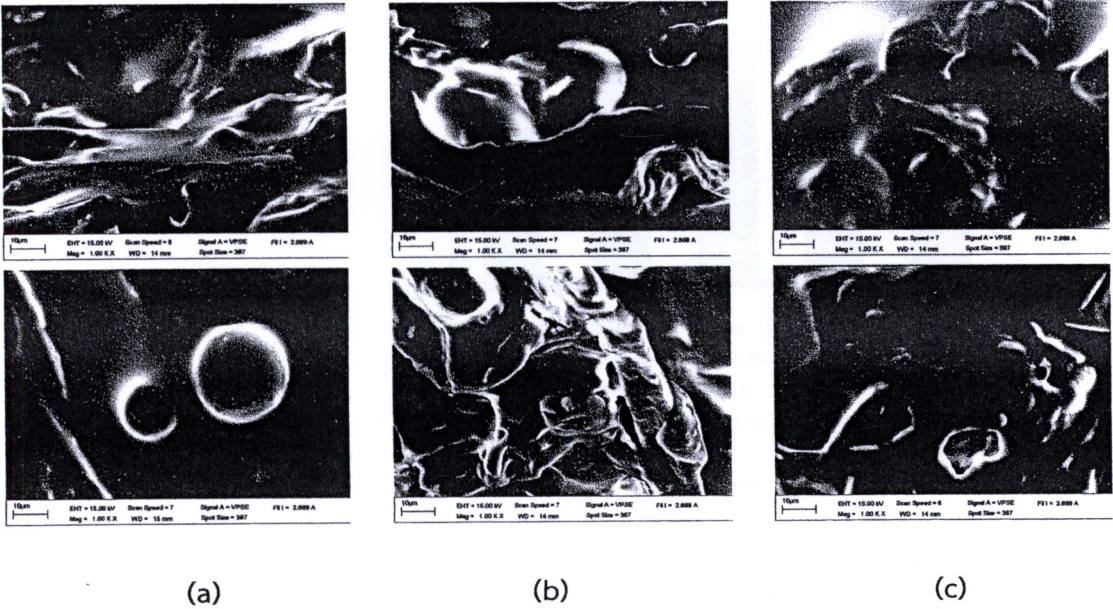
วิธีการเคลือบฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนบนชิ้นทุเรียน	ปริมาณไขมันหยาบ (%)	ปริมาณความชื้น (%)	ความแข็ง (KgF)	ค่าพารามิเตอร์สี		
				L*	a*	b*
ตัวอย่างเคลือบก่อนทอด	0.75	60.30±0.46	1.729±0.582	79.12	-2.65	28.40
ตัวอย่างทอดที่ไม่ได้เคลือบฟิล์ม	22.64	19.28±1.03	1.694±0.841	45.02	13.26	31.38
การจัดการหลังเคลือบฟิล์ม						
วางทิ้งที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที	20.05	15.22±0.76	1.608±0.141	50.22	6.55	33.00
อบที่ 60 °C 30 นาที	33.55	7.61±0.34	1.871±0.289	40.83	11.58	28.42
อบที่ 60 °C 60 นาที	32.22	7.47±0.37	1.896±0.723	42.54	11.69	27.16
อบที่ 60 °C 30 นาที (เคลือบ 2 ครั้ง)	23.01	14.33±0.76	2.669±1.036	38.38	13.47	25.12
อบที่ 80 °C 30 นาที	22.05	14.91±0.82	1.375±0.390	43.96	10.59	30.14
การจัดการหลังเคลือบฟิล์ม/หลังทอด						
วางทิ้งที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที/อบที่ 60 °C 30 นาที	20.23	12.12±0.44	3.313±1.895	49.43	8.64	32.20
อบที่ 60 °C 30 นาที/อบที่ 60 °C 30 นาที	34.62	9.06±0.46	2.575±0.532	46.38	10.60	31.58



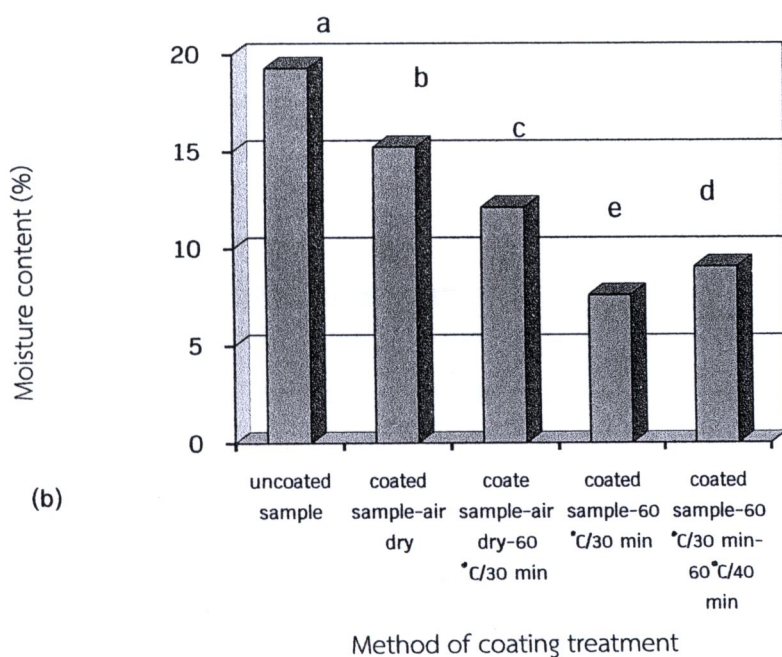
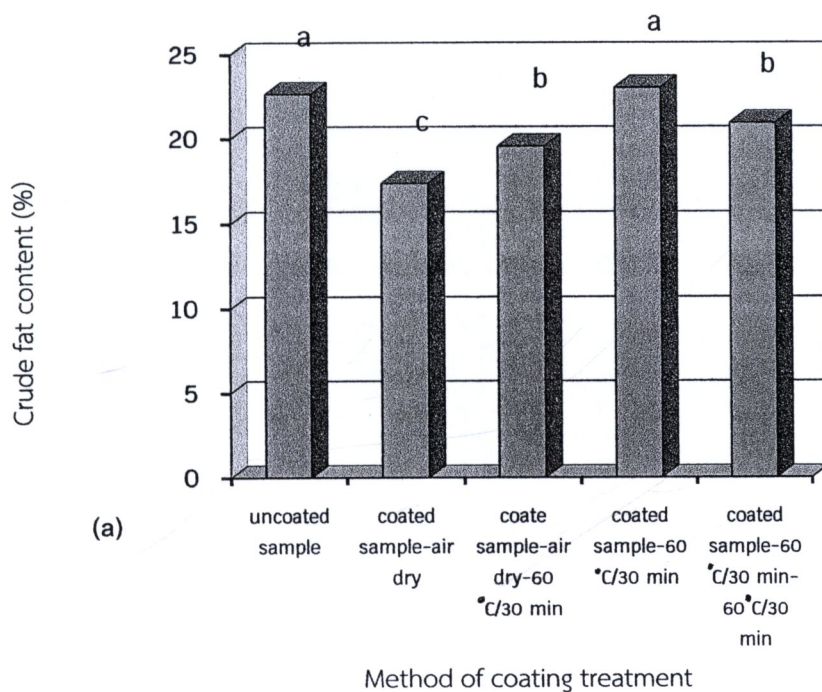
รูปที่ 22 (a) ปริมาณไขมันหยาบและ (b) ปริมาณความชื้นของตัวอย่างชิ้นทุเรียนทอดที่เคลือบด้วยแป้งเม็ดทุเรียนเมื่อทอดที่อุณหภูมิ 170 °C เป็นเวลา 5 นาที และใช้การจัดการหลังการเคลือบที่แตกต่างกัน 3 แบบ คือ ทิ้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง (30 °C), 60 และ 80 °C เป็นเวลา 30 นาที ก่อนนำมาทอดทันทีเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่นำมาทอดโดยไม่ได้เคลือบฟิล์ม



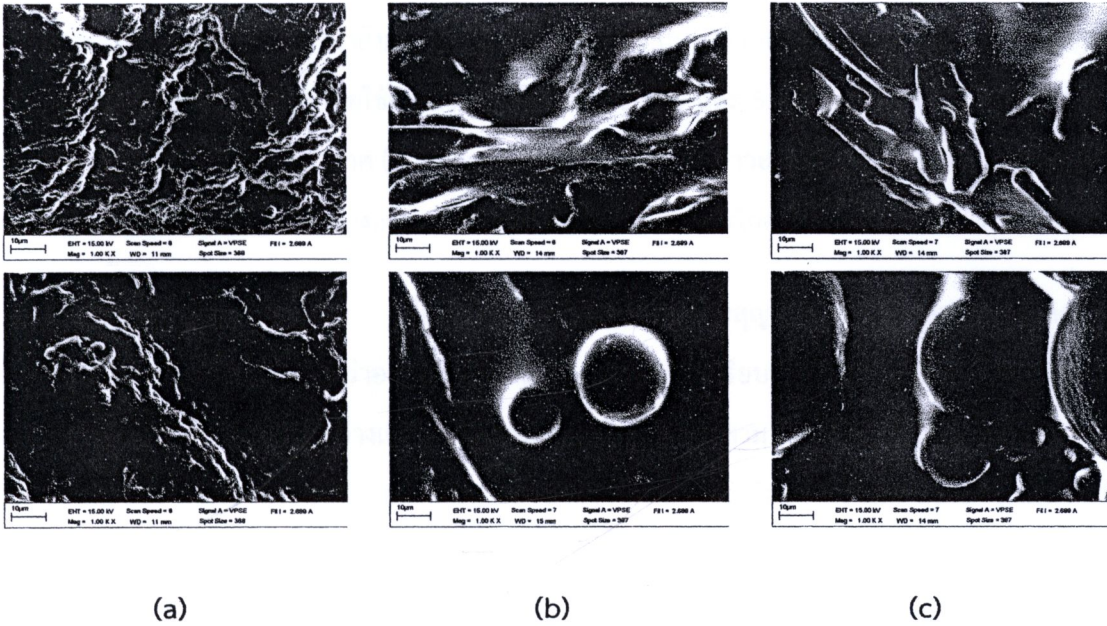
รูปที่ 23 โครงสร้างจุลภาคของเส้นใยเรซินทอดที่ 170 °C เมื่อตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า โดยแสดงภาคตัดขวาง (บน) และพื้นผิว (ล่าง) ของตัวอย่างที่ (a) เป็นเส้นใยเรซินสด (b) เส้นใยเรซินทอดที่ไม่ได้เคลือบฟิล์ม และ (c) เส้นใยเรซินทอดที่เคลือบฟิล์มแบ่งเม็ดเรซินแล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที ก่อนนำไปทอด



รูปที่ 24 โครงสร้างจุลภาคของเส้นใยเรซินทอด เมื่อตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า โดยแสดงภาคตัดขวาง (บน) และพื้นผิว (ล่าง) ของตัวอย่างที่มีวิธีการจัดการหลังเคลือบฟิล์มแตกต่างกันโดย (a) ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที (b) อบที่ 60 °C 30 นาที และ (c) อบที่ 80 °C 30 นาที ก่อนนำไปทอด



รูปที่ 25 (a) ปริมาณไขมันหยาบและ (b) ปริมาณความชื้นของตัวอย่างชิ้นทุเรียนทอดที่เคลือบด้วยแป้งเม็ดทุเรียน และทอดที่อุณหภูมิ 170 °C เป็นเวลา 5 นาที เมื่อใช้การจัดการหลังการเคลือบที่แตกต่างกัน 3 แบบ คือ ทิ้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง (30 °C) และ 60 เป็นเวลา 30 นาที ก่อนนำมาทอดทันที หลังจากนั้นจึงนำมาอบต่อที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 40 นาทีเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่นำมาทอดโดยไม่ได้เคลือบฟิล์ม



รูปที่ 26 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทุเรียน (ทอด) เมื่อตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า โดยแสดงภาคตัดขวาง (บน) และพื้นผิว (ล่าง) ของตัวอย่างที่มีวิธีการจัดการหลังทอดแตกต่างกันโดยตัวอย่างชิ้นทุเรียนสดที่เคลือบฟิล์มแล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที (a) ไม่ได้ทอด (b) ทอดที่ 170 °C และ (c) หลังทอดอบที่ 60 °C 30 นาที

ตอนที่ 3 การเสริมแคลเซียมชิ้นทุเรียนด้วยกระบวนการแช่ในสุญญากาศ

ในระหว่างกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชัน (osmotic dehydration) เนื้อเยื่อของเซลล์พืชจะถูกจุ่มลงในสารละลายความเข้มข้นสูงที่เรียกว่าสารละลายออสโมติก (osmotic solution) จะเกิดการสูญเสียน้ำในเซลล์ของผลไม้เนื่องจากโครงสร้างของเนื้อเยื่อถูกเปิดให้พื้นที่ว่างในระหว่างเซลล์ (intercellular space) จึงทำให้เกิดการแพร่ของตัวถูกละลายจากสารละลายภายนอกเข้าสู่ผลไม้ มีการแลกเปลี่ยนแก๊สในรูปพลาสมาภายนอก (external fluid (Fito, 1994) ดังนั้นตัวถูกละลายที่มี physiological function เช่นแคลเซียม จึงสามารถถูกนำเข้าไปในโครงสร้างของเซลล์ของผลไม้ การใช้สุญญากาศเพียงชั่วระยะเวลาสั้น ๆ ในระยะเวลาเริ่มต้นของกระบวนการออสโมติกจะมีผลกระทบต่อจุลนาศาสตร์และคุณภาพของผลไม้ รวมทั้งช่วยลดค่าใช้จ่ายในเรื่องพลังงาน (Fito and Chiralt, 2000) โดยทั่วไปแล้วจุลนาศาสตร์ของกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันพิจารณาในเทอมของปริมาณน้ำที่สูญเสีย การสูญเสีย น้ำหนัก และปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (Fito and Chiralt, 1997) ซึ่งมักขึ้นกับลักษณะของวัตถุดิบ (Raoult-Wack, 1994) และสภาวะที่ใช้ในการแปรรูป เช่น ความเข้มข้นและอุณหภูมิ (Barat et al., 2001) เวลาที่ใช้ในกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชัน (Escriche et al., 2000) หรือความดัน (Barat et al., 2001)

ผลของการใช้กระบวนการแช่ในสุญญากาศ

การทดลองในส่วนนี้ได้ศึกษาถึงผลการใช้กระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันโดยการแช่ในสภาวะสุญญากาศ ร่วมกับในสภาวะบรรยากาศห้อง โดยใช้สารละลายซูโครสเข้มข้น 20 และ 55% (w/v) เปรียบเทียบระหว่างทรีตเมนต์ที่แช่ตัวอย่างในสภาวะสุญญากาศ (50 mbar) 5 นาทีตามด้วยที่สภาวะปกติ (1000 mbar) 15 นาที กับทรีตเมนต์ที่ใช้เฉพาะสภาวะบรรยากาศเพียงอย่างเดียว และใช้ความเข้มข้นของโอออนแคลเซียมที่ 2% (w/w sample)

จากตารางที่ 7 จะเห็นได้ว่า เมื่อใช้กระบวนการแช่ในสภาวะสุญญากาศร่วมด้วยจะทำให้ผลิตภัณฑ์ขึ้นทุเรียนสามารถนำเข้าแคลเซียมได้ดีกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้กระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันในบรรยากาศปกติเพียงอย่างเดียวในทั้งสองความเข้มข้น โดยสามารถนำเข้าแคลเซียมได้มากกว่าคิดเป็นร้อยละ 53.28 และ 46.98 สำหรับตัวอย่างที่ใช้สารละลายซูโครสที่ความเข้มข้น 20 และ 55% ตามลำดับ โดยผลิตภัณฑ์สุดท้ายของตัวอย่างที่ใช้สภาวะสุญญากาศร่วมกับออสโมติกดีไฮเดรชันที่สภาวะปกติและใช้สารละลายน้ำตาลซูโครสที่ความเข้มข้น 20% มีปริมาณแคลเซียมเท่ากับ 47.09 มิลลิกรัม Ca/100 กรัมชิ้นทุเรียน (น้ำหนักเปียก) นั่นคือมีปริมาณมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทุเรียนสด (25.30 มิลลิกรัม Ca/100 กรัมทุเรียนสด) ประมาณ 2 เท่า นั่นคือ 100 กรัมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะให้ประมาณ 4.71% ของ RDI ของแคลเซียม (1000 มก./วัน) กระบวนการแช่ในสภาวะสุญญากาศจะช่วยให้ทำให้การแพร่ผ่านของของแข็งที่ละลายได้เข้าสู่ผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันได้ดีขึ้นในขณะที่ลดค่าคงที่อัตราการสูญเสียน้ำ (rate constant of water loss) (Fito and Chiralt, 2001; Fito et al., 2001b, Mujica-Paz et al., 2003) อย่างไรก็ตามในสภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้ความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสที่ 20 และ 55% ไม่มีผลต่อการนำเข้าของแคลเซียมโดยให้ค่าไม่แตกต่างทางสถิติ ($P > 0.05$) ทั้งในทรีตเมนต์ที่ใช้และไม่ใช้การแช่สุญญากาศร่วมด้วย และการใช้กระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันที่สภาวะบรรยากาศปกติเป็นเวลา 15 นาทีเพียงอย่างเดียว โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณแคลเซียมไม่แตกต่างทางสถิติ ($P > 0.05$) กับชิ้นทุเรียนสด

สำหรับกลไกที่เกิดขึ้นเสนอแนะโดย Moraga et al. (2009) ที่ศึกษาการใช้กระบวนการแช่ในสุญญากาศของเกรฟฟรุต (grapefruit) รายงานว่าตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการแช่ในสุญญากาศจะมีค่าตัวถูกละลายที่ได้รับ (solute gain) มากกว่าในขณะที่มีการสูญเสียน้ำน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการแช่ในสภาวะสุญญากาศ ในขณะที่ Fito and Chiralt (1997) อธิบายว่าการถ่ายโอนของน้ำและตัวถูกละลายที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชัน (osmotic dehydration) เป็นผลมาจากกลไก 2 ประการคือ pseudodiffusional mechanism ซึ่งเกี่ยวข้องกับ osmotic mechanism และ Fickian mechanism โดยกลไกแบบนี้มีความสัมพันธ์กับเกรเดียนต์ในความเข้มข้น (gradients in concentration) และ hydrodynamic mechanisms ที่เกิดจากเกรเดียนต์ของความดัน (pressure gradients) ซึ่งเกี่ยวข้องกับโครงสร้างของผลิตภัณฑ์และอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการ

ตารางที่ 7 ผลของการใช้กระบวนการแช่ในสภาวะสุญญากาศร่วมกับกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันในบรรยากาศปกติต่อปริมาณแคลเซียมและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ชิ้นทุเรียน เมื่อใช้ความเข้มข้นของแคลเซียม 2% (w/w sample)

ความเข้มข้นของสารละลายซูโครส (% w/v)	สภาวะที่ใช้		ปริมาณแคลเซียม (mg Ca/100 g sample)	ความแข็ง (KgF)
	Vacuum impregnation (min)	Osmotic dehydration (min)		
20	0	15	30.72 ^{ab} ±1.55	1.681 ^{ns} ±0.213
20	5	15	47.09 ^c ±3.96	1.703 ^{ns} ±0.287
55	0	15	25.56 ^a ±5.64	1.530 ^{ns} ±0.094
55	5	15	37.57 ^{bc} ±1.19	1.983 ^{ns} ±0.071
ชิ้นทุเรียนสดก่อนผ่านกระบวนการ			25.30 ^a ±1.52	1.729 ^{ns} ±0.582

^{a-c} ตัวอักษรตามแนวดิ่ง แสดงถึงข้อมูลที่แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ (P<0.05)

^{ns} ตัวอักษรตามแนวดิ่ง แสดงถึงข้อมูลที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ (P>0.05)

การใช้ปริมาณแคลเซียมถูกนำเข้าสู่โครงสร้างของพืชที่มีรูพรุน (porous structure) เลยดูเหมือนจะทำให้ลดการกักน้ำที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันที่ดำเนินการต่อเนื่อง ทั้งนี้อาจเนื่องจากการที่แคลเซียมเข้ากระทำการกับเมทริกซ์ของเซลล์พืช (plant cellular matrix) โดยเกิดพันธะระหว่าง เพคตินกับองค์ประกอบของผนังเซลล์อื่น ๆ (Brett and Waldron, 1990; Gras et al., 2003) ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่เหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกล ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนของมวลในระหว่างกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชัน และเกิดการเปลี่ยนแปลงของเซลล์ในแบบ deformation-relaxation phenomena (Barrera et al. 2009) จึงเกิดการสูญเสียและมีปริมาตรของตัวอย่างลดลง (Barat et al, 1998) โดยการลดลงของปริมาตรไม่จำเป็นต้องเป็นเชิงเส้น (linear correlation) กับปริมาณความชื้น แต่ขึ้นกับชนิดของอาหาร และสมบัติ viscoelastic ของเนื้อเยื่อ และการเปลี่ยนแปลงในระดับโครงสร้าง อย่างไรก็ตาม จากตารางที่ 7 จะเห็นได้ว่าเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีค่า

ความแข็งของทุพพริตเมนต์ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$) กับชิ้นทุเรียนสดที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการออสโมซิส ผลในทำนองเดียวกันพบได้จากการศึกษาของ Moraga et al (2009) รายงานว่าไม่มีความแตกต่างของเนื้อสัมผัสของเนื้อเยื่อเกรปฟรุต์ (grapefruit) ซึ่งอาจเนื่องมาจากธรรมชาติความยืดหยุ่น (elastic nature) ของเนื้อเยื่อเมื่อใช้ความเข้มข้นของแคลเซียมที่ 2%

ผลของกระบวนการแช่ในสภาวะสุญญากาศเห็นได้ชัดเจนจากไมโครกราฟของโครงสร้างจุลภาคดังแสดงในรูปที่ 27 เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทุเรียนสด พบการแทนที่แก๊สด้วยของเหลวที่พื้นผิวที่มีรูพรุนของตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการแช่ในสภาวะสุญญากาศ (Barat, 1997) ลักษณะของโครงสร้างเซลล์จะได้รับอิทธิพลในระหว่างกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันของผลไม้ เช่น การเปลี่ยนแปลงของผนังเซลล์ การแยกออกของ middle lamella การไลซิส (lysis) ของเมมเบรน (Plasmalemma and tonoplast) การหดตัวของเนื้อเยื่อ และอื่น ๆ (Alvarez et al., 1995; Alzamora et al., 2005; Nieto et al., 1998) การเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อเหล่านี้ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง cellular compartmentalization, wall matrix และการแพร่ผ่านของเมมเบรน (membrane permeability) ที่มีอิทธิพลอย่างมากกับสมบัติการเคลื่อนย้ายของผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันจะมีความหนาของผนังเซลล์มากกว่า อาจเนื่องจากการดูดซับของน้ำตาลที่องค์ประกอบของผนังเซลล์ ได้แก่ เซลลูโลส สารประกอบเพกติก และพอลิแซ็กคาไรด์อื่น ๆ (Nieto et al., 1998) นอกจากนั้นยังมีการลดลงของขนาดของเซลล์ เนื่องจากกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันจะทำให้ขนาดของตัวอย่างลดลง (Prothon et al., 2001)

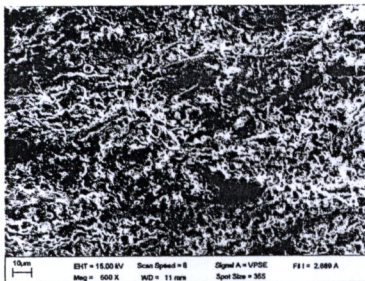
ผลของความเข้มข้นของแคลเซียม

ตารางที่ 8 แสดงผลของความเข้มข้นของแคลเซียมต่อการนำเข้าสู่ของแคลเซียมและเนื้อสัมผัสของตัวอย่างชิ้นทุเรียนที่ผ่านกระบวนการแช่ในสภาวะสุญญากาศ 5 นาที ตามด้วยกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันในสภาวะบรรยากาศปกติอีก 15 นาที โดยใช้สารละลายออสโมติกเป็นซูโครสที่ความเข้มข้น 20 และ 55% และความเข้มข้นของแคลเซียมที่ 0, 2, 4 และ 6% พบว่าในกรณีที่จุ่มตัวอย่างในสารละลายซูโครสทั้งสองความเข้มข้นโดยที่ไม่มีการเติมไอออนแคลเซียม จะพบการแพร่ออกของแคลเซียมที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่างชิ้นทุเรียน ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณแคลเซียมลดลงเล็กน้อย แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$) กับตัวอย่างสดที่ไม่ผ่านกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชัน ความเข้มข้นของแคลเซียมมีผลต่อการนำเข้าสู่ของแคลเซียม โดยที่เมื่อใช้ความเข้มข้น 6% ซึ่งเป็นความเข้มข้นสูงสุดที่ใช้ในการทดลองนี้ จะให้ตัวอย่างสุดท้ายที่มีปริมาณแคลเซียมเท่ากับ 74.08 และ 73.76 mg Ca/100 g sample ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) ในทั้งสองพริตเมนต์ที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายซูโครส 20 และ 55% ตามลำดับ โดยมีปริมาณแคลเซียมมากกว่าในทุเรียนสดประมาณ 3 เท่า ซึ่งมีผลทำให้ตัวอย่างทั้งสองพริตเมนต์ดังกล่าวมีความแข็งของเนื้อสัมผัสมากกว่าพริตเมนต์อื่นอย่างมีนัยสำคัญ ($P>0.05$) สอดคล้องกับลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคดังแสดงในไมโครกราฟในรูปที่ 28

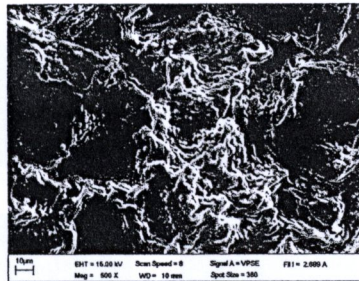
ตารางที่ 8 ผลของความเข้มข้นของไอออนแคลเซียมในสารละลายออสโมติกต่อปริมาณแคลเซียมและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขึ้นทุเรียน เมื่อใช้สภาวะในการทดลองร่วมกันของกระบวนการแช่ในสภาวะสุญญากาศ 5 นาที แล้วตามด้วยกระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชันในบรรยากาศปกติ 15 นาที

ความเข้มข้นของ สารละลายซูโครส (% w/v)	ความเข้มข้นของแคลเซียม (%w/w sample)	ปริมาณแคลเซียม (mg Ca/100 g sample)	ความแข็ง (KgF)
20	0	16.89 ^a ±0.74	1.463 ^a ±0.728
20	2	47.72 ^b ±0.25	2.262 ^{ab} ±0.592
20	4	52.94 ^{bc} ±2.76	2.027 ^{ab} ±0.611
20	6	74.08 ^d ±2.77	2.688 ^b ±0.870
55	0	17.78 ^a ±1.76	1.651 ^{ab} ±0.259
55	2	42.54 ^b ±9.34	2.218 ^{ab} ±0.465
55	4	63.48 ^{cd} ±10.46	2.383 ^{ab} ±1.259
55	6	73.76 ^d ±13.32	2.634 ^b ±0.297
ขึ้นทุเรียนสดก่อนผ่านกระบวนการ		25.30 ^a ±1.52	1.729 ^{ab} ±0.582

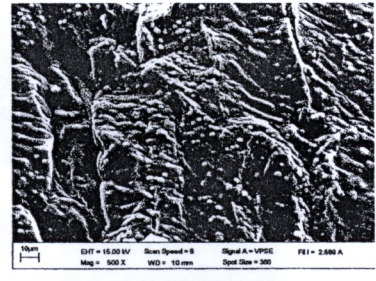
a-d ตัวอักษรตามแนวนอน แสดงถึงข้อมูลที่แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ (P<0.05)



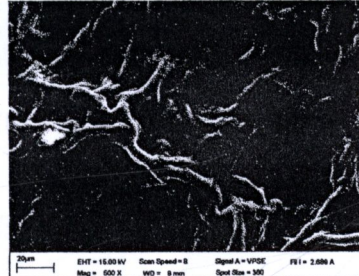
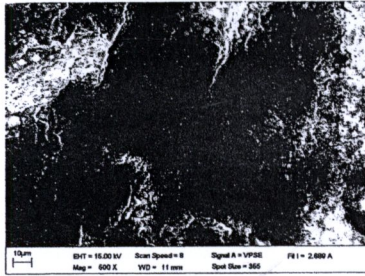
(a)



(b)



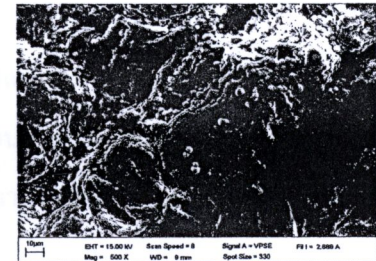
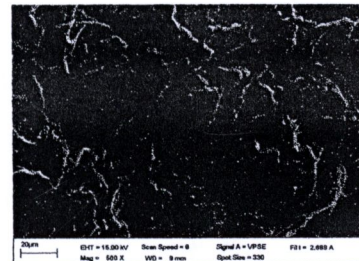
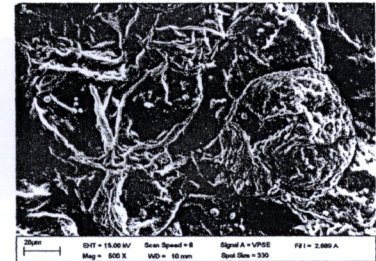
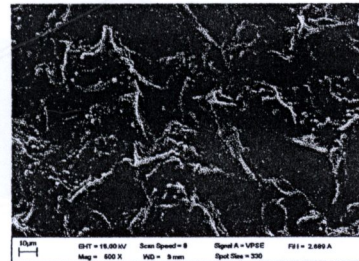
(c)



(d)

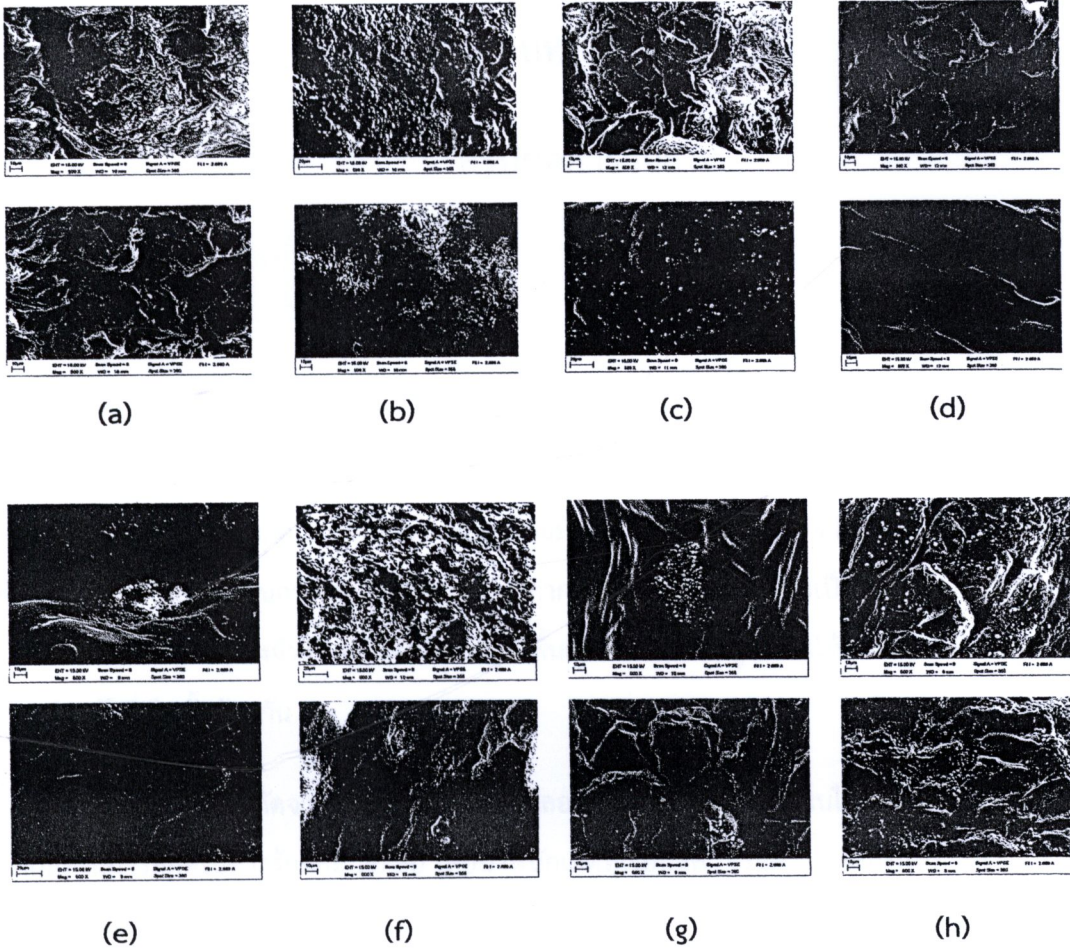


(e)



รูปที่ 27 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทุเรียน เมื่อตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 500 เท่า โดยแสดงภาคตัดขวาง (บน) และพื้นผิว (ล่าง) โดยเปรียบเทียบตัวอย่าง (a) ชิ้นทุเรียนสด ตัวอย่าง (b-c) หลังผ่านกระบวนการนำเข้าแคลเซียม เมื่อใช้สารละลายซูโครสเข้มข้น (b-c) 20% และ (d-e) 55% โดยใช้ความเข้มข้นของแคลเซียม 2% โดยน้ำหนักของสารตัวอย่าง เมื่อ (b, d) แช่ในสภาวะสุญญากาศเป็นเวลา 5 นาที แล้วตามด้วยออสโมติกไฮเดรชันที่บรรยากาศปกติ 15 นาที และ (c, e) ออสโมติกไฮเดรชันที่บรรยากาศปกติเพียงอย่างเดียว 15 นาที





รูปที่ 28 โครงสร้างจุลภาคของซึ้นทุเรียน เมื่อตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 500 เท่า โดยแสดงภาคตัดขวาง (บน) และพื้นผิว (ล่าง) โดยเปรียบเทียบตัวอย่างหลังผ่านกระบวนการนำเข้าแคลเซียมโดยแช่ในสถานะสุญญากาศเป็นเวลา 5 นาที แล้วตามด้วยออสโมติกดีไฮเดรชันที่บรรยากาศปกติ 15 นาที เมื่อใช้สารละลายซูโครสเข้มข้น (a-d) 20% และ (e-h) 55% โดยใช้ความเข้มข้นแคลเซียม (a, e) 0%, (b, f) 2%, (c, g) 4% และ (d, h) 6% (w/w sample)