

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

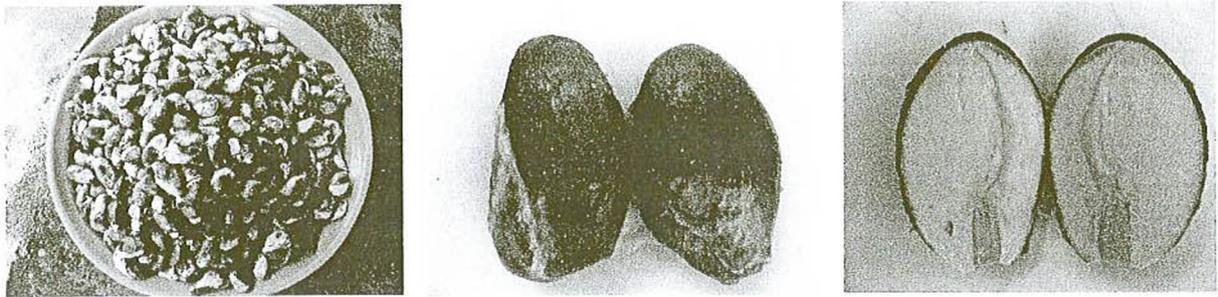
ตอนที่ 1 การสกัดแยกแป้งจากเมล็ดทุเรียนและการศึกษาสมบัติของแป้งเมล็ดทุเรียน

เมล็ดทุเรียนมีปริมาณเยื่อใยสูงและถูกใช้เป็นส่วนผสมในอาหารเพื่อทำให้อาหารข้นหนืด (Amin, 2007) สมบัติ thickening ของเมล็ดทุเรียนมาจากไฮโดรคอลลอยด์ (hydrocolloid) ในรูปของแป้ง (starch) ที่เป็นองค์ประกอบหลักในเมล็ดทุเรียน งานวิจัยในส่วนนี้ต้องการแยกแป้งจากเมล็ดทุเรียนและศึกษาสมบัติทางเคมีโดยเปรียบเทียบกับสมบัติของแป้งดัดแปลงทางการค้าที่นิยมใช้ในทางอาหาร 2 ชนิดคือ แป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลัง โดยคาดหวังความเข้าใจถึงความสัมพันธ์ของโครงสร้างและการทำงานของของแป้งเมล็ดทุเรียน จำนำไปสู่การประยุกต์ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการเตรียมฟิล์มที่ย่อยสลายได้สำหรับลดการดูดซับน้ำมันในอาหารทอด เพื่อเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการเพิ่มมูลค่าของเมล็ดทุเรียน

สีและลักษณะที่ปรากฏ (Color and appearance)

เมล็ดทุเรียนมีลักษณะรีและมีเปลือกสีน้ำตาล เมื่อผ่าออกจะมีเมือก (slime) และเนื้อในสีขาวดังแสดงในรูปที่ 1 เมือกเหล่านี้จะเป็นปัญหาบ้างในขั้นตอนการลอกเปลือกเพื่อนำมาสกัดแป้ง ในการทดลองนี้ได้คัดขนาดของเมล็ดทุเรียนให้ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 3.5-4.5 ซม. วิธีการการสกัดแป้งอย่างง่ายจากเมล็ดทุเรียนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ให้ผลผลิตแป้งสูงที่มีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 13 โดยน้ำหนักตามมาตรฐานของ Thailand trade ministry (1993) ปริมาณผลผลิตแป้งที่ได้จะขึ้นอยู่กัปริมาณสารละลายที่ใช้ในขั้นตอนไฮโมจิโนเซชันและการกรอง โดยในการทดลองนี้ได้ผลผลิตอยู่ในช่วงร้อยละ 20-30 โดยน้ำหนักเมล็ดทุเรียนสด

แป้งเมล็ดทุเรียนที่แยกได้มีสีค่อนข้างขาว (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 ซึ่งแสดงว่าแป้งเมล็ดทุเรียนมีสีเหลืองอ่อนจางและซีด (dull) โดยทั่วไปสีของแป้งจะแตกต่างกันไป ขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ สิ่งเจือปน และสภาวะที่ใช้ในการโม่ (milling) (Dobraszcyk, 2001) สีของแป้งเป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งสำหรับประยุกต์ใช้ทางอาหาร เพื่อให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ไม่เปลี่ยนแปลงไปที่เป็นผลมาจากการรบกวนของสีแป้ง



รูปที่ 1 ลักษณะที่ปรากฏของตัวอย่างเม็ดทุเรียนที่ใช้เพื่อสกัดแยกแป้ง



(a)

(b)

(c)

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

องค์ประกอบทางโภชนา (Nutritional Composition)

เม็ดทุเรียนเป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อน (complex carbohydrates) จากผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเม็ดทุเรียนพบว่ามีแป้ง (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 เนื่องจากกากที่ไม่ละลายน้ำนี้จะเป็นปัญหาสำคัญในการเตรียมฟิล์มที่ย่อยสลายได้ในขั้นตอนถัดไป 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 องค์ประกอบทางโภชนะและสมบัติของแป้งเม็ดทุเรียน 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 _{ov} (°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

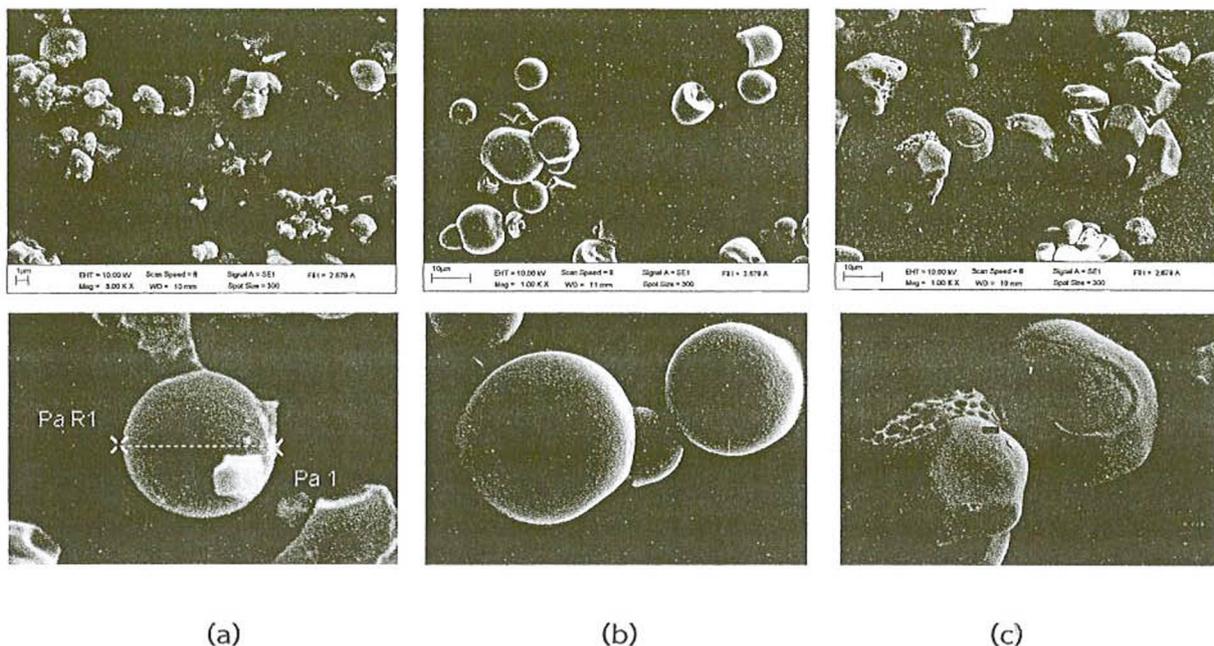
เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางโภชนาของแป้งเม็ดทุเรียนกับแป้งข้าวโพด และแป้งมันสำปะหลัง พบว่าแป้งเม็ดทุเรียนมีปริมาณโปรตีนและเส้นใยมากกว่า แต่มีปริมาณเยื่อใยน้อยกว่าแป้งทั้งสองชนิดดังกล่าวอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) สำหรับปริมาณไขมันหยาบของแป้งเม็ดทุเรียน (0.27%) มีค่ามากกว่าแป้งที่สกัดมาจากพืชชนิดอื่นที่มีรายงานการศึกษามาก่อน 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)

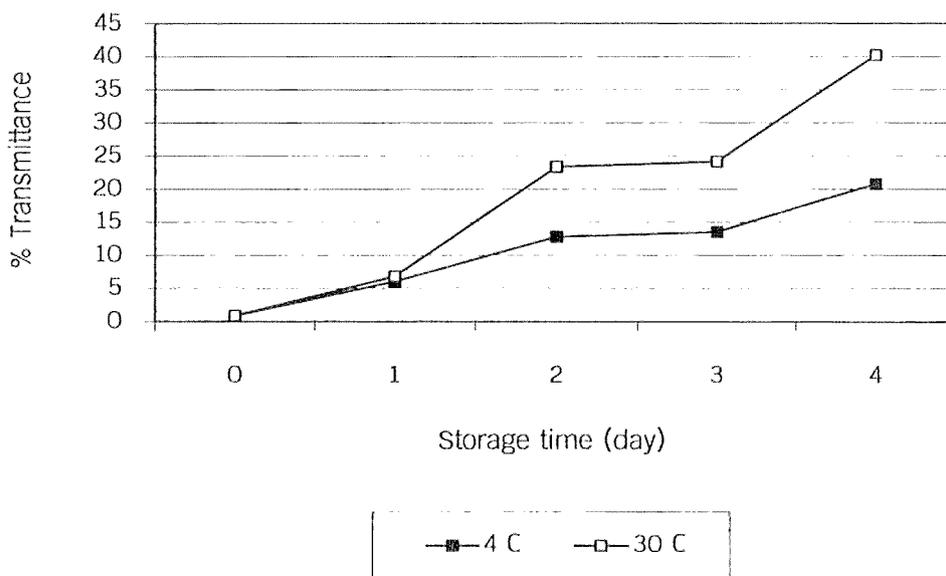
ความใสของแป้งสุก (Clarity of starch pastes)

การใช้งานแป้งที่สำคัญคือการเพิ่มความหนืดให้กับอาหาร ดังนั้นสมบัติความใสของแป้งจึงมีความสำคัญอย่างมาก ซึ่งขึ้นกับชนิดของแป้ง แต่สามารถเปลี่ยนแปลงได้เมื่อทำการดัดแปลงเม็ดแป้ง (starch granule modification) เมื่อนำแป้งเม็ดทุเรียนมาละลายน้ำและผ่านกระบวนการเจลาติไนเซชันจะได้แป้งสุกที่มีความใส เนื่องจากในระหว่างที่แป้งเกิดเจลาติไนเซชัน 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 นอกจากนี้ Swinkels (1985) ยังรายงานว่าอัตราส่วนระหว่างอะไมโลสและอะไมโลเพคติน

และดีกรีของการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน (degree of polymerization) ของอะไมโลสก็เป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อสมบัติความใสของแป้งสุกเช่นกัน

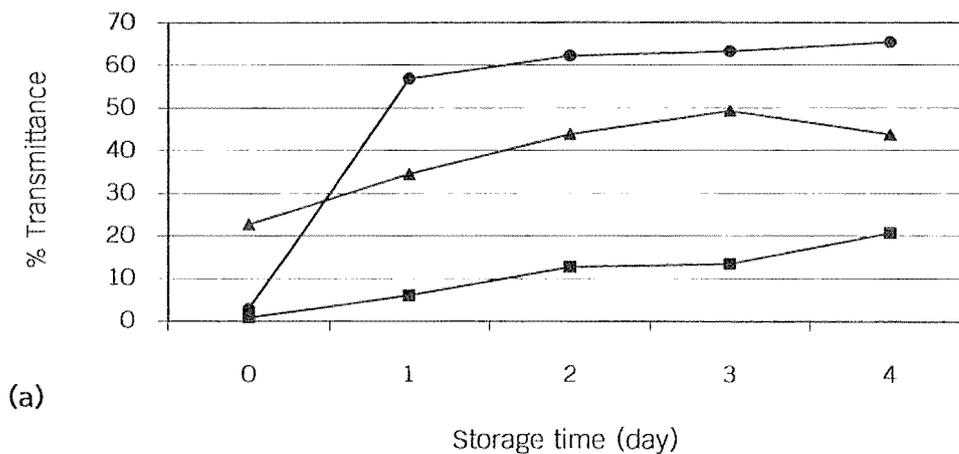
เมื่อนำแป้งเม็ดทุเรียนสุกมาเก็บรักษาที่ 30°C และที่ 4°C เป็นเวลา 4 วัน พบว่าจะเกิดการตกตะกอนชั้น ทำให้แยกโซน (zone) ที่ค่อนข้างสังเกตเห็นได้ด้วยตา โชนส่วนบนของสารแขวนลอยจะสามารถให้แสงส่องผ่านได้มากขึ้น (%T เพิ่มขึ้น) Mile et al. (1985a,b) เสนอแนะว่าการคืนตัวของแป้งสุก (retrodegradation) ประกอบด้วย 2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



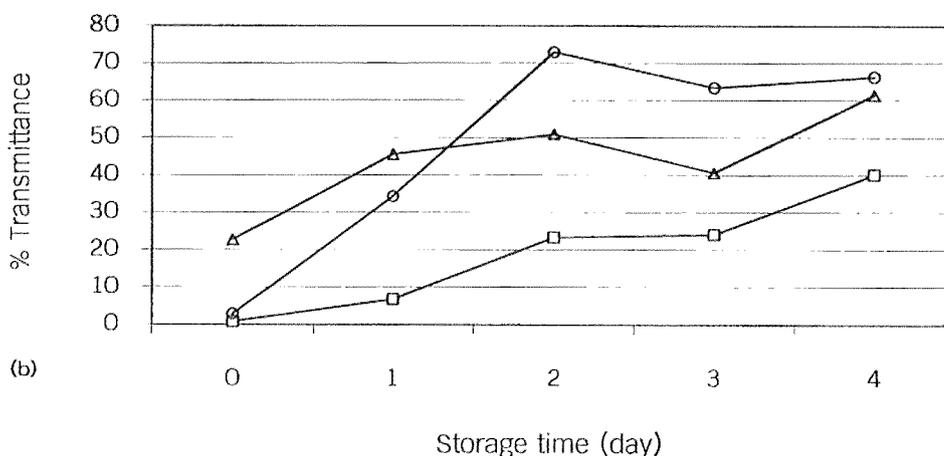
รูปที่ 4 สมบัติความใสของแป้งเม็ดทุเรียนสุกเมื่อเก็บรักษาที่ 4°C และ 30°C เป็นเวลา 4 วัน

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



■ Durian seed starch ▲ Cassava starch ● Corn starch



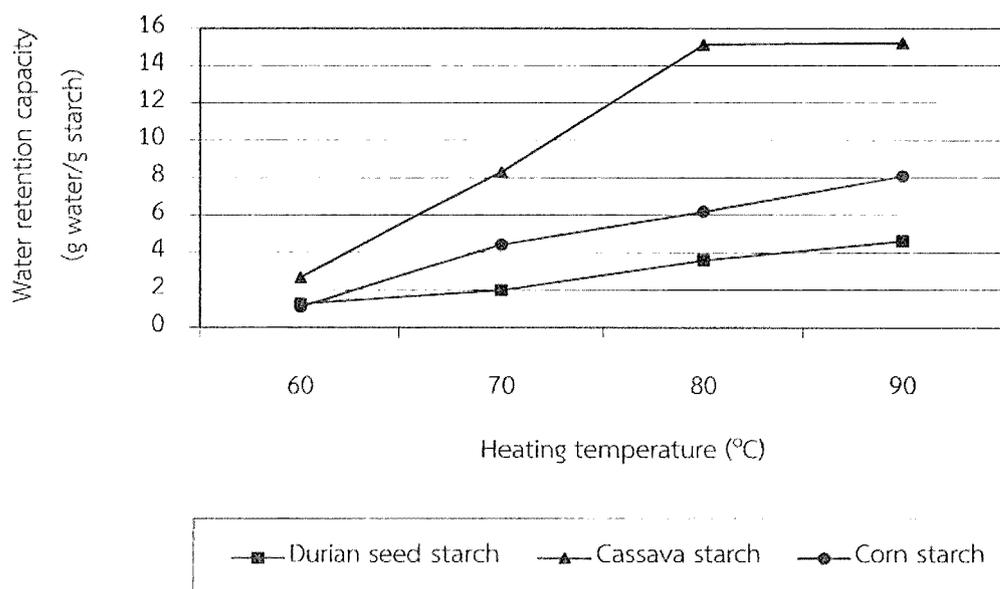
□ Durian seed starch ▲ Cassava starch ○ Corn starch

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°C ถึง 4.65 ± 0.04 กรัมของน้ำ/กรัมของแป้งแห้งที่อุณหภูมิ 90°C นั่นคือมีความสามารถในการอุ้มน้ำเพิ่มขึ้นถึง 266% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 60°C เป็น 90°C

เมื่อเปรียบเทียบค่า WRC ของแป้งเม็ดทุเรียนกับแป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลัง (รูปที่ 6) พบว่าที่อุณหภูมิ 60°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°C นอกจากนั้นจะเห็นได้ว่าแป้งเม็ดทุเรียนมีค่า WRC ต่ำ เมื่อเทียบกับแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพดในเกือบทุกอุณหภูมิที่ทำการศึกษาในที่นี้ แสดงว่าแป้งเม็ดทุเรียนมีสมบัติการอุ้มน้ำได้ต่ำกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลังโดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง ๆ

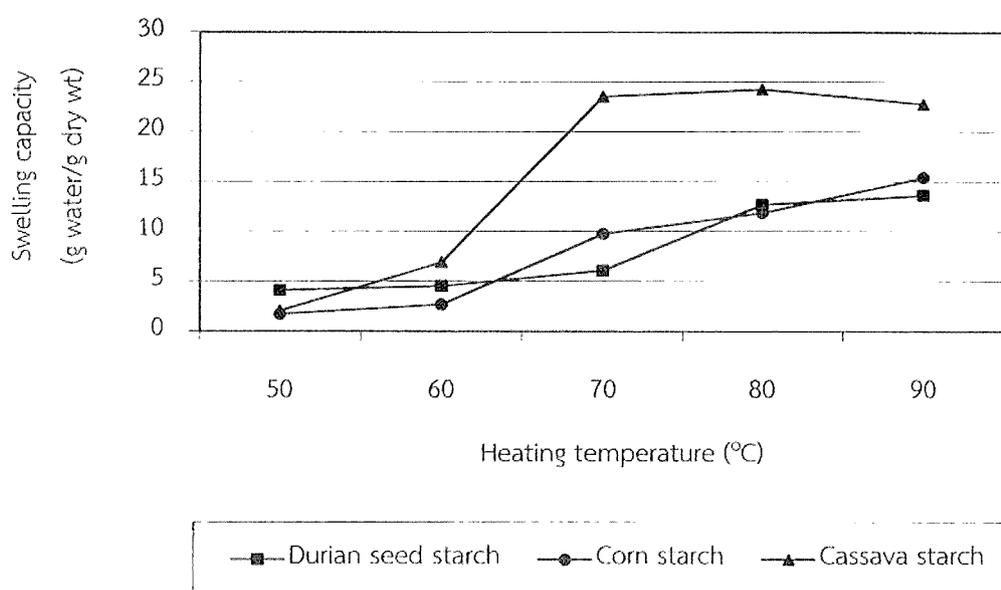


รูปที่ 6 สมบัติความสามารถในการอุ้มน้ำของแป้งเม็ดทุเรียน แป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพดที่อุณหภูมิ $60-90^{\circ}\text{C}$

ความจุของการพองตัว (Swelling capacity; SWC)

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

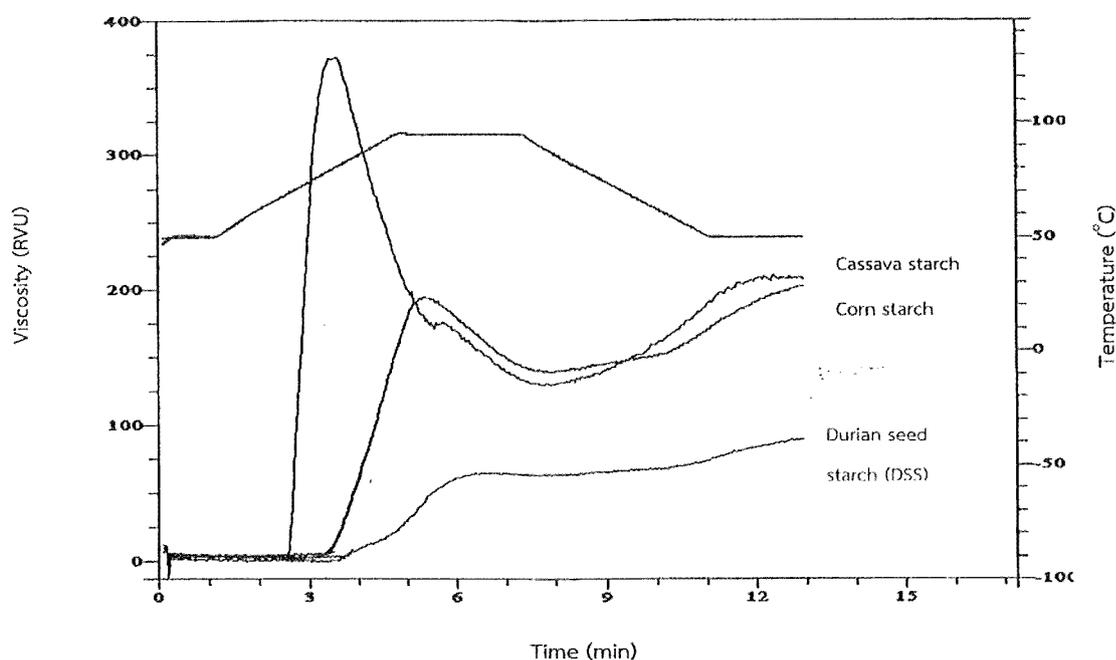
รูปที่ 7 แสดงแบบแผนของความจุการพองตัวของแป้งเม็ดทุเรียน แป้งข้าวโพด และแป้งมันสำปะหลัง ในสภาวะอุณหภูมิสูงแป้งทั้งสามชนิดจะมีการพองตัวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวพบได้เช่นกันในแป้งจากพืชชนิดอื่น เช่น Okina (Sanchez-Hernandez et al., 2002) และ sorghum (Perez et al., 1997) ค่า SWC จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเนื่องจากโมเลกุลของน้ำมีการเคลื่อนที่และแพร่ (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)

เมื่อให้ความร้อนกับแป้งในสภาวะที่มีปริมาณน้ำมากเกินพอ เม็ดแป้งจะพองตัวและในเวลาเดียวกันก็จะละลายด้วย จึงทำให้เกิดทั้งการพองตัวและการกระจาย (dispersion) ของอนุภาคในสารแขวนลอยของแป้งในเฟสต่อเนื่อง (continuous phase) (Bello-Perez et al., 2006) วิธีการหนึ่งที่ใช้ติดตามกระบวนการเจลาตินในเซชันที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิได้โดยการตรวจวัดความหนืดของสารแขวนลอยแป้ง (Belitz and Grosch, 1999) ความหนืดของแป้งสูงที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการต้านทานการไหลของเม็ดแป้งขนาดใหญ่ที่อยู่ในปริมาตรทั้งหมดของสารแขวนลอย (Fennema, 1985) ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิของสารแขวนลอยลง อาจเนื่องจากการจัดเรียงตัวใหม่ (reorganization) ของโซ่อะไมโลส ที่ถูกทำให้ละลายในระหว่างการให้ความร้อน กระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดการเชื่อมขวาง (crosslink) ระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นเครือข่ายที่อุ้มน้ำจำนวนมากเอาไว้ (Bello-Perez et al., 2006) ดังนั้นสมบัติความหนืดของแป้งสูงจึงขึ้นกับองค์ประกอบของแป้งที่อยู่ในรูปของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน 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 ซึ่งนับเป็นข้อดีสำหรับใช้เป็นองค์ประกอบในการเตรียมฟิล์มที่ย่อยสลายได้ในขั้นตอนถัดไป นอกจากนี้เมื่อพิจารณา ค่า breakdown viscosity ของแป้งข้าวโพด (203 ± 2 RVU) และของแป้งมันสำปะหลัง (208 ± 2 RVU) ซึ่งมากกว่าของแป้งทุเรียน (91 ± 2 RVU) กว่า 2 เท่า แสดงว่าแป้งเม็ดทุเรียนมีความเสถียรต่อความร้อนและแรงตัดทางกล (mechanical shear) มากกว่าแป้งดัดแปลงทางการค้าทั้งสองดังกล่าว

เจลาติไนเซชัน (Gelatinization)

ตารางที่ 3 แสดงอุณหภูมิทรานสิชัน (transition temperature; T_0 , T_p และ T_c) และค่าเอนทาลปีของการเกิดเจลาติไนเซชัน (enthalpy of gelatinization; ΔH_{gel}) ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค differential scanning calorimetry (DSC) โดยให้ค่า T_0 , T_p และ T_c 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) ของความร้อนในการเกิดเจลาติไนเซชันสูงกว่า แต่มีช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลาติไนเซชันกว้างกว่า และใช้พลังงานในการเกิดเจลาติไนเซชันต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับทั้งแป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลัง

โดยทั่วไปแป้งที่มีเม็ดแป้งที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous granules) จะให้ช่วงเอนทาลปีกว้าง ความแตกต่างของอุณหภูมิของการเกิดเจลาติไนเซชันแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของความสมบูรณ์ของผลึกแป้ง (starch crystals) ถ้าแป้งมีความสมบูรณ์ของผลึกในผลึกแลตทิซ (crystal lattice) สูงก็จะให้อุณหภูมิของการเกิดเจลาติไนเซชันสูงด้วย (Mukprssirt and Sajjaanantakul, 2004) ซึ่งแสดงว่าแป้งเม็ดทุเรียนมีความสมบูรณ์ของผลึกมากกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งสอดคล้องกับการที่แป้งเม็ดทุเรียนต้องการพลังงานเจลาติไนเซชัน (gelatinization energy) สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งทั้งสองชนิดดังกล่าว

ตอนที่ 2 การพัฒนาการเตรียมฟิล์มที่ย่อยสลายได้และแคปซูลยาแบบแข็งจากแป้งเมล็ดทุเรียน

ฟิล์มแป้งเมล็ดทุเรียน (Durian seed starch based-films)

ปัจจุบันผู้บริโภคมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่จะใช้ฟิล์มพอลิเมอร์ชีวภาพ (biopolymer films) ทดแทนฟิล์มสังเคราะห์ (synthetic films) ในบรรจุภัณฑ์อาหารเนื่องจากเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า โดยเฉพาะเมื่อใช้วัตถุดิบเป็นแป้งเนื่องจากเป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์และมีราคาถูกกว่าพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดอื่น (Lopez et al., 2008; Arvanitoyannis et al., 1994; Garcia et al., 2000, 2006; Liu, 2005; Lourdin et al., 1997a,b; van Soest and Essers, 1997) ในงานวิจัยนี้ให้ความสนใจกับแป้งที่สกัดแยกมาจากเมล็ดทุเรียน ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าให้สมบัติที่สามารถประยุกต์ใช้ทางอาหารได้ดี เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตฟิล์มพอลิเมอร์ชีวภาพ

การเกิดฟิล์มที่ย่อยสลายได้จากแป้งเมล็ดทุเรียนเกี่ยวข้องกับกระบวนการเจลาติไนเซชันของเม็ดแป้ง (starch granule) ในสถานะที่มีน้ำมากเกินพอ ส่งผลให้เกิดการพองตัว (swelling) และกระจัดกระจาย (disruption) ของเม็ดแป้ง ในขณะเดียวกันก็เกิดการหลุดออกขององค์ประกอบที่ละลายได้ (soluble components) เช่น อะไมโลสจากเม็ดแป้ง สารละลายจะมีสภาพขุ่นหนืดโดยประกอบด้วย continuous phase ที่มีองค์ประกอบหลักเป็นอะไมโลสที่ถูกละลายอยู่ และ discontinuous phase ซึ่งเป็นเศษของเม็ดแป้ง (remnant granules) โดยมีอะไมโลเพคตินเป็นหลัก (Zobel, 1994) เมื่อสารแขวนลอยดังกล่าวถูกทำให้เย็นลงจะเกิดเป็นเจลที่มีสมยืดหยุ่นได้ (viscoelastic gel) ซึ่งเกิดจากการกระทำของโมเลกุลพอลิเมอร์ด้วยพันธะโคเวเลนต์ พันธะไฮโดรเจน และ/หรือ แรงวานเดอร์วาลส์ การเตรียมฟิล์มที่ย่อยสลายได้จึงเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายประการ

ถึงแม้แป้งจะเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่นิยมใช้ในการเตรียมฟิล์มที่ย่อยสลายได้มากที่สุดก็ตาม จากการที่มันสามารถเกิดเมทริกซ์ที่ต่อเนื่อง (continuous matrix) เป็นทรัพยากรที่หมุนเวียน (renewable) และเห็นแหล่งที่มีมาก (Lourdin et al., 1995; Romeo-Bastida et al., 2005; Bertuzzi et al., 2007; Talja et al., 2007) แต่ก็มีข้อจำกัดหลายประการ เช่น มีลักษณะที่ชอบน้ำสูง (strong hydrophilic character) หรือไวต่อน้ำ (water sensitivity) และมีสมบัติทางกลที่ไม่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ (Averous and Boquillon, 2004) ซึ่งทำให้อาจไม่ประสบความสำเร็จกับการประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร วิธีการหนึ่งที่มีกนิยมนำมาใช้แก้ปัญหาดังกล่าวโดยการดัดแปลงแป้งโดยอาศัยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง (cross-linking) เพื่อให้ฟิล์มที่มีความไวต่อน้ำลดลงและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น (Dermigez et al., 2000; Kim and Lee, 2002) โดยใช้สารเคมีในกระบวนการเชื่อมขวาง เช่น กลูตาราลดีไฮด์ (glutaraldehyde) (Ramaraj, 2007) กรดบอริก (Yin et al., 2005) และ อีพิคลอโรไฮดริน (epichlorohydrin) (Sreedhar et al., 2006) อย่างไรก็ตามสารเคมีเหล่านี้มักเป็นพิษจึงมีข้อจำกัดในการใช้งาน โดยเฉพาะกับการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ชีวภาพเพื่อประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร

ดังนั้นสำหรับงานวิจัยนี้เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว จึงใช้กรดซิตริก (citric acid) ซึ่งเป็นกรดอินทรีย์หลักที่พบในผลไม้หลายชนิด เช่น สับประรด และมะนาว เดิมลงในสารละลายแป้งเม็ดทุเรียนสำหรับเตรียมฟิล์มด้วยความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของแป้งเม็ดทุเรียน ทั้งนี้เนื่องจากกรดซิตริกมีหมู่ฟังก์ชันหนึ่งหมู่เป็นหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) และอีกสามหมู่เป็นคาร์บอกซิล (carboxyl group) ทั้งนี้เพื่อต้องการให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอกซิลของกรดซิตริกกับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้ง โดยคาดหวังว่าจะช่วยปรับปรุงความสามารถในการต้านทานน้ำ (water resistibility) เนื่องจากไปลดหมู่ไฮดรอกซิลบนโมเลกุลแป้ง (Borredon et al., 1997) นอกจากนั้นหมู่คาร์บอกซิลของกรดซิตริกสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้ง จึงป้องกันการเกิด recrystallization และ retrogradation และเนื่องจากการที่กรดซิตริกมีโครงสร้างที่มีหมู่คาร์บอกซิลหลายหมู่ (multi-carboxyl structure) จึงทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมขวาง (cross-linking agent) จึงอาจช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลและสมบัติการต้านทานน้ำของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนได้ด้วย (Shi et al., 20007) โดยที่กรดซิตริกเป็นสารที่ไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคและถูกยอมรับโดย FDA ให้ใช้เป็นสารเติมแต่งในอาหารหารได้ (Yang et al., 2004) โดยฟิล์มที่ใช้แป้งเม็ดทุเรียนเป็นวัตถุดิบหลัก (durian seed starch-based films) ที่เตรียมได้จะถูกนำมาศึกษาสมบัติสมบัติทางกล และเคมี-กายภาพ โครงสร้างทางจุลภาค โดยเปรียบเทียบกับฟิล์มที่เตรียมจากแป้งดัดแปลงที่มีจำหน่ายทางการค้าและเป็นที่ยอมรับใช้งานทางอาหาร 2 ชนิด คือ ฟิล์มแป้งข้าวโพด และฟิล์มแป้ง อีกทั้งยังเปรียบเทียบกับสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์สังเคราะห์ 2 ชนิดคือ ฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์ และฟิล์มพอลิเอทิลีนด้วย

นอกจากนั้นในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอร์ ทั้งนี้เนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีว่า พลาสติกไซเซอร์ถูกใช้ด้วยวัตถุประสงค์ 2 ประการคือ ช่วยในกระบวนการเตรียมฟิล์ม และดัดแปลงสมบัติของผลิตภัณฑ์สุดท้าย ในกรณีของฟิล์มที่มีวัตถุดิบหลักเป็นแป้ง (starch-based films) การเติมพลาสติกไซเซอร์ลงในสารละลายสำหรับเตรียมฟิล์มก็เพื่อลดความเปราะ (brittleness) ให้ฟิล์มสามารถยืดหยุ่น (flexibility) และขยายตัว (extensibility) ได้ดีขึ้น นอกจากกลีเซอรอลซึ่งเป็นสารในกลุ่มพอลิอล (polyol) ที่นิยมใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์มากที่สุดแล้ว พลาสติกไซเซอร์อาจเป็นสารในกลุ่มอื่น เช่น โอลิโกแซคคาไรด์ (oligosaccharide) หรือไลปิด (lipid) เป็นต้น (Arvanitoyannis et al., 1997, 1998; Banker, 1996; Cuq et al., 1997; Gennadios et al., 1996; Gontard et al., 1993; Park et al., 1994; Sothornvit and Krochta, 2005) ดังนั้นในส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้จึงประเมินความเหมาะสมของความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่ต้องใช้ในฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน โดยในที่นี้ใช้กลีเซอรอลที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20-50 โดยน้ำหนักของแป้งเม็ดทุเรียน

อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้เพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์มจึงพัฒนาฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนโดยการเตรียมเป็นฟิล์มคอมโพสิตโดยใช้องค์ประกอบผสมของแป้งเม็ดทุเรียนกับพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดอื่นที่นิยมใช้ทางอาหาร ที่มีโครงสร้างทางเคมีและสมบัติที่แตกต่างกัน โดยคาดหวังว่าจะก้าวข้ามขีดจำกัดบางประการที่จำเป็นต่อการประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ทางอาหาร โดยทั่วไปพอลิเมอร์สังเคราะห์มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic character) จึงไม่รวมเป็นเนื้อ

เดียวกับแป้งที่มีสมบัติชอบน้ำ ทำให้เกิดเฟสที่แยกจากกันและให้ฟิล์มที่มีสมบัติทางกลที่ไม่ดี เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว ในที่นี้จึงเลือกใช้พอลิเมอร์ชีวภาพที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและยอมรับให้ใช้งานในอาหาร

การแพร่ผ่านไอน้ำ (Water vapor permeability; WVP)

ชนิดและความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อสมบัติของฟิล์มในการประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ จำเป็นอย่างยิ่งที่ฟิล์มดังกล่าวจะต้องทำหน้าที่ลดการถ่ายโอนของความชื้นจากอาหารออกสู่สิ่งแวดล้อม นั่นคือควรจะต้องมีค่า WVP ต่ำ พลาสติกไซเซอร์เป็นสารประเภทหนึ่งที่ใช้เพื่อดัดแปลงสมบัติทางกลของฟิล์ม โดย พลาสติกไซเซอร์จะไปลดการกระทำระหว่างสายพอลิเมอร์ที่อยู่ข้างเคียง ทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น แต่ก็มักจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติการกักเก็บน้ำของฟิล์ม (Garcia et al., 2000) ดังนั้นการเลือกใช้พลาสติกไซเซอร์ที่เหมาะสมจึงจำเป็นต่อการเตรียมฟิล์มที่ย่อยสลายได้ (McHugh and Krochta, 1994b) สำหรับในงานวิจัยนี้ พบว่ากลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ที่ดีที่สุดสำหรับฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน เมื่อฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนเตรียมจากแป้งเม็ดทุเรียนที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และกลีเซอรอล (glycerol) ที่ความเข้มข้นที่ศึกษาในช่วง 20-50 โดยน้ำหนักของแป้งเม็ดทุเรียน ให้ฟิล์มที่เป็นเนื้อเดียวกัน ผิวเรียบไม่มีรูรั่วหรือรอยแตก ฟิล์มมีลักษณะนุ่ม (soft) และยืดหยุ่น (flexible) ได้ดี จึงสามารถลอกออกได้ง่ายหลังจากขึ้นรูปแล้ว

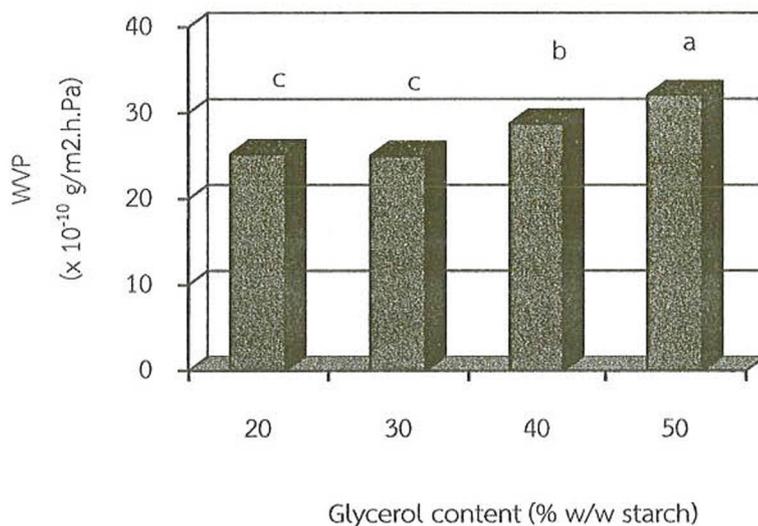
จากรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอล จะทำให้ความสามารถของฟิล์มที่จะทำหน้าที่เป็นตัวกีดกัน (barrier) ของความชื้นลดลง เนื่องจากกลีเซอรอลมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (92 g/mol) จึงสามารถแทรกสอดเข้าไปในระหว่างสายพอลิเมอร์ที่อยู่ใกล้เคียงกันได้ ลดการกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุล โดยเข้าทำลายพันธะไฮโดรเจน ทำให้สายพอลิเมอร์แยกออกจากกัน สายพอลิเมอร์จึงสามารถเคลื่อนที่ได้มากขึ้นในปริมาตรอิสระ (free volume) ระหว่างสายพอลิเมอร์ ทำให้เครือข่ายพอลิเมอร์เกิดการผ่อนคลายและมีความหนาแน่นลดลง เพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุล และช่วยให้เกิดการเคลื่อนย้ายของโมเลกุลไอน้ำและแก๊สได้ดีขึ้น (Garcia et al., 2000; Baldwin and Baker, 2002) และการที่กลีเซอรอลมีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) บนแต่ละคาร์บอนจึงมีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic molecule) จึงทำให้ฟิล์มสามารถดูดกลืนโมเลกุลของน้ำเข้าไปในสายพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น ทำให้สมบัติการกักเก็บความชื้นลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอล (Martelli et al., 2006; Irisin et al., 2001) นอกจากนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอล ยังทำให้ฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้น จากการที่กลีเซอรอลแผ่ขยายเข้าไปในเครือข่ายพอลิเมอร์ จึงไปเพิ่มปริมาตรอิสระทั้งในสายพอลิเมอร์เดียวกันและต่างสายในฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน

ฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนให้สมบัติของการแพร่ผ่านไอน้ำที่ดีที่สุดเมื่อใช้ความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่ร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนักของแป้ง ($P > 0.05$) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 25×10^{-10} g/m².h.Pa ในขณะที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็นร้อยละ 40 และ 50 โดยน้ำหนักแป้ง จะลดความสามารถในการกักเก็บน้ำโดยให้ค่า WVP เพิ่มขึ้น 15.15% และ 28.26 % เมื่อเปรียบเทียบกับเมื่อใช้กลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 20-30 โดยน้ำหนักของแป้ง ตามลำดับ

($P < 0.05$) อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพลาสติก 2 ชนิดที่ผลิตจากวัตถุดิบแตกต่างกันคือ พอลิเอทิลีน (polyethylene; PE) และพอลิไวนิลคลอไรด์ (polyvinylchloride; PVC) ที่มีจำหน่ายทางการค้า พบว่ายังมีความแตกต่างของค่า WVP ของฟิล์มพีวีซี ($0.765 \pm 0.017 \times 10^{-10}$ g/m².h.Pa) และฟิล์มพีอี ($0.202 \pm 0.027 \times 10^{-10}$ g/m².h.Pa) อยู่ค่อนข้างมากนั่นคือฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนมีความสามารถในการกักกั้นน้ำได้น้อยกว่าฟิล์มพีวีซีและฟิล์มพีอี โดยให้ค่า WVP มากกว่าถึงประมาณ 32 และ 123 เท่า ตามลำดับ เป็นที่ทราบกันว่าฟิล์มที่เตรียมจากพอลิเมอร์ชีวภาพจะมีสมบัติกักกั้นความชื้นได้ต่ำ เนื่องจากมีหมู่ที่ชอบน้ำในสายพอลิเมอร์จำนวนมาก ในทำนองเดียวกันเนื่องจากโมเลกุลแป้งมีธรรมชาติที่ชอบน้ำ จึงทำให้ฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนมีแนวโน้มที่จะดูดซับน้ำได้ในปริมาณมาก ส่งผลให้ฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนมีสมบัติการกักกั้นน้ำที่ไม่ดีเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์สังเคราะห์

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสมบัติการกักกั้นไอน้ำของแต่ละฟิล์มขึ้นกับทั้งประสิทธิภาพการแพร่ของโมเลกุล (molecular diffusion coefficient) และการละลายได้ในเมทริกซ์ (McHugh et al., 1994b) ดังนั้นชนิดและความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอร์ไม่ใช่ปัจจัยเพียงอย่างเดียวที่มีผลต่อสมบัติการกักกั้นน้ำของฟิล์มที่ย่อยสลายได้ โดยทั่วไปแล้ว ขึ้นกับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ธรรมชาติขององค์ประกอบที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม โครงสร้างของฟิล์ม สภาวะที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม และเทอร์โมไดนามิกส์ เป็นต้น ดังนั้นเพื่อปรับปรุงสมบัติการกักกั้นไอน้ำของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญสำหรับความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร ในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนด้วยการเตรียมเป็นฟิล์มคอมโพสิต โดยผสมพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดที่สองกับแป้งเม็ดทุเรียน โดยในที่นี้เลือกใช้พอลิเมอร์ชีวภาพ (biopolymer) ที่มีโครงสร้างทางเคมีและสมบัติที่แตกต่างกัน 4 ชนิดและเป็นที่นิยมใช้งานทางอาหารเพื่อปรับปรุงเนื้อสัมผัสของอาหารเนื่องจากมีสมบัติการเกิดเจลที่ดี ประกอบด้วยพอลิแซคคาไรด์ 3 ชนิด ได้แก่ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (caroxymethylcellulose; CMC) คาราจีแนน (carragenan) และเพคติน (pectin) ส่วนอีกชนิดหนึ่งเป็นเจลาติน (gelatin) ที่เป็นส่วนผสมของเปปไทด์และโปรตีนจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสบางส่วนของคอลลาเจน โดยใช้ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแป้งเม็ดทุเรียน

จากตารางที่ 9 จะเห็นได้ว่าเมื่อเติมพอลิเมอร์ชีวภาพทั้ง 4 ชนิดดังกล่าวที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแป้งเม็ดทุเรียนลงไป จะทำให้ฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนมีค่า WVP ลดลง แต่ที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) คือเมื่อเติม CMC และเจลาติน นั่นคือการปรับปรุงสมบัติการแพร่ผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนสามารถทำได้โดยการเติม CMC หรือเจลาตินที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแป้งเม็ดทุเรียน โดยส่งผลให้มีค่า WVP ลดลงประมาณร้อยละ 27 และทำให้สามารถลดความแตกต่างของความสามารถในการกักกั้นความชื้นจากประมาณ 32 เท่าเหลือเพียงประมาณ 23 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพีวีซี อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 10 ไม่ทำให้ค่า WVP ของฟิล์มคอมโพสิต CMC-DSS ลดลง ($P > 0.05$) แต่กลับทำให้ค่า WVP ของฟิล์มคอมโพสิต Gelatin-DSS เพิ่มขึ้น ($P < 0.05$) (ตารางที่ 5)



รูปที่ 9 ผลของความเข้มข้นของกลีเซอรอลต่อค่าการแพร่ผ่านไอน้ำ (WVP) ของฟิล์มเม็ดทุเรียนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20-50 โดยน้ำหนักของแป้งเม็ดทุเรียน

ตารางที่ 4 ค่าการแพร่ผ่านไอน้ำ (WVP) ของฟิล์มคอมโพสิตของแป้งเม็ดทุเรียน และฟิล์มพีวีซี

Type of films (*-DSS)	WVP ($\times 10^{-10}$ g/m ² .h.Pa)
DSS	25.026 ^c ±1.304
5% CMC-DSS	18.115 ^b ±3.569
5% Gelatin-DSS	18.920 ^b ±1.713
5% Caragenan-DSS	21.038 ^{bc} ±2.232
5% Pectin-DSS	23.866 ^c ±2.053
PVC	0.765 ^a ±0.017

a-c ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามคอลัมน์แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$)

ตารางที่ 5 ค่าการแพร่ผ่านไอน้ำ (WVP) ของฟิล์มคอมโพสิตของแป้งเม็ดทุเรียน

Type of films (*-DSS)	WVP ($\times 10^{-10}$ g/m ² .h.Pa)
5% CMC-DSS	18.115 ^a ±3.569
10% CMC-DSS	17.504 ^a ±2.146
5% Gelatin-DSS	18.920 ^a ±1.713
10% Gelatin-DSS	26.479 ^c ±0.948
5% Caragenan-DSS	21.038 ^{ab} ±2.232
10% Caragenan-DSS	23.605 ^{bc} ±1.435
5% Pectin-DSS	23.866 ^{bc} ±2.053
10% Pectin-DSS	22.699 ^b ±1.614

a-c ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามคอลัมน์แสดงถึงข้อมูลที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P>0.05$)

ดังนั้นการปรับปรุงความสามารถในการกีดกันความชื้นโดยการเติมพอลิเมอร์ชีวภาพ ที่ให้ผลดีที่สุดในงานวิจัยนี้คือการเติม CMC ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5-10 โดยน้ำหนักแป้งเม็ดทุเรียน ซึ่งจะปรับปรุงให้ฟิล์มมีค่า WVP ลดลงประมาณร้อยละ 30 เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนควบคุม สอดคล้องกับรายงานการลดลงของค่า WVP จากการเติมของพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดที่สองลงในฟิล์มของ Ghanbarzadeh et al. (2010) ซึ่งอาจมาจากการที่พอลิเมอร์ที่อยู่ในรูปเฮลลูโลสมีสมบัติการเป็นผลึก (crystalline) สูงและมีลักษณะที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic character) มากกว่าพอลิเมอร์ที่อยู่ในรูปแป้ง โดย CMC อาจทำให้เกิดความคดเคี้ยวของทางเดิน (tortuous path) ที่จะให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่ผ่าน จึงขัดขวางการแพร่ผ่านไอน้ำของฟิล์ม (Kristo and Biliaderis, 2007) โดยที่เมื่อใช้ความเข้มข้นของ CMC ต่ำ (5%) CMC จะกระจายตัว (disperse) ได้ดีในแมทริกซ์ของแป้ง จึงขัดขวาง (block) การแพร่ผ่านของน้ำ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ CMC สูงขึ้น จะเกิดการจับกลุ่มกัน (congregate) จะลดผลดังกล่าวจนไม่สามารถขัดขวางการแพร่ผ่านของน้ำได้ดีอีกต่อไป ดังนั้นเป็นที่คาดเดาได้ว่า ถ้าใช้ความเข้มข้นมากกว่า 10% อาจมีผลให้ค่าฟิล์มมีค่า WVP เพิ่มขึ้นก็เป็นได้ เช่นเดียวกับกรณีของการเติมเจลาตินที่ความเข้มข้น 10%

ตารางที่ 6 ค่าการแพร่ผ่านไอน้ำ (WVP) ของฟิล์มคอมโพไซด์ของแป้งเม็ดทุเรียน เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งข้าวโพดและฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง

Type of films	WVP ($\times 10^{-10}$ g/m ² .h.Pa)
DSS-film	25.026 ^b ±1.304
5%CMC-DSS film	18.115 ^a ±3.569
10%CMC-DSS film	17.504 ^a ±2.146
Corn starch film	27.561 ^b ±1.354
Cassava starch film	32.253 ^c ±2.060

a-c ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามคอลัมน์แสดงถึงข้อมูลที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

แต่เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลังพบว่าฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนมีสมบัติการกักกันความชื้นดีกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 6 โดยฟิล์มแป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลังมีค่า WVP มากกว่าฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนประมาณ 1.5 และ 1.8 เท่า ตามลำดับ และฟิล์มแป้งมันสำปะหลังมีค่า WVP มากกว่าฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนควบคุมประมาณ 1.3 เท่า นั่นคือเมื่อพิจารณาเฉพาะค่า WVP ของฟิล์มคอมโพไซด์ CMC-DSS ทำให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการใช้แป้งเม็ดทุเรียนเป็นวัตถุดิบในการเตรียมฟิล์มที่มีสมบัติกักกันความชื้นที่เหมาะสมกับการประยุกต์ทางอาหารดีกว่าการใช้แป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบในการเตรียมฟิล์ม โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาถึงเรื่องต้นทุนของแป้งแล้ว ทำให้แป้งเม็ดทุเรียนมีความน่าสนใจเพิ่มขึ้นอย่างมาก

นอกจากนั้นความเข้มข้นของแป้งเม็ดทุเรียนที่เป็นองค์ประกอบในฟิล์มก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อสมบัติการกักกันความชื้นของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน ซึ่งความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเตรียมฟิล์มเมื่อพิจารณาถึงค่า WVP เป็นหลัก คือที่ความเข้มข้นของแป้งเม็ดทุเรียนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ถ้าใช้ความเข้มข้นที่ต่ำกว่านี้จะทำให้ฟิล์มไม่สามารถขึ้นรูปและลอกออกได้ ในขณะที่เมื่อใช้ความเข้มข้นสูงขึ้นไปเป็นร้อยละ 7.5 ฟิล์มที่ได้นอกจากจะมีความหนาเพิ่มขึ้นแล้วยังให้ค่า WVP สูงกว่าฟิล์มที่ใช้ความเข้มข้นของแป้งเม็ดทุเรียนที่ร้อยละ 5 อย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) โดยจะทำให้ฟิล์มมีค่า WVP เพิ่มขึ้นจาก 25.026 เป็น 35.996×10^{-10} g/m².h.Pa คิดเป็นเพิ่มขึ้นประมาณ 1.44 เท่า และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็นร้อยละ 10 สารละลายฟิล์มที่ได้จะมีความหนืดสูงมาก จนไม่สามารถเตรียมฟิล์มด้วยวิธีที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้

สมบัติทางกล (Mechanical property)

แป้งเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงที่ประกอบด้วยอะไมโลสที่ตรง และอะไมโลเพคตินที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าและเป็นโซ่กิ่ง (Maurer et al., 2001) โดยอะไมโลสจะรับผิดชอบต่อความสามารถในการเกิดฟิล์ม (Romero-bastisa et al., 2005) แป้งที่มาจากแหล่งต่างกันที่มีสัดส่วนของอะไมโลส/อะไมโลเพคตินแตกต่างกันจะให้สมบัติที่แตกต่างกันด้วย โดยทั่วไปฟิล์มที่มีอะไมโลสปริมาณสูงมักจะมีคุณสมบัติที่ยืดตัวเพียงเล็กน้อยในขณะที่อาจไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติการต้านแรงดึงขาดเลย (Lawton, 1996; Krogars et al., 2003) อย่างไรก็ตาม เจลแป้ง (starch granules) อาจพิจารณาได้ว่าเป็นพอลิเมอร์องค์ประกอบ (polymer composite) ของอนุภาคเม็ดแป้งที่ฝังตัวอยู่ใน continuous matrix ของโมเลกุลอะไมโลส (Forest et al., 2007) ทำให้สมบัติทางกลของฟิล์มแป้งจึงได้รับอิทธิพลมาจากทั้งลักษณะทางรีโอโลยี (rheological characteristics) ของเจลแอมพิลิกซ์ของอะไมโลส (amylase gel matrix) ความแข็งเกร็ง (rigidity) ของเม็ดแป้งที่ถูกเจลาติไนซ์ และแรงกระทำระหว่างองค์ประกอบของแป้ง

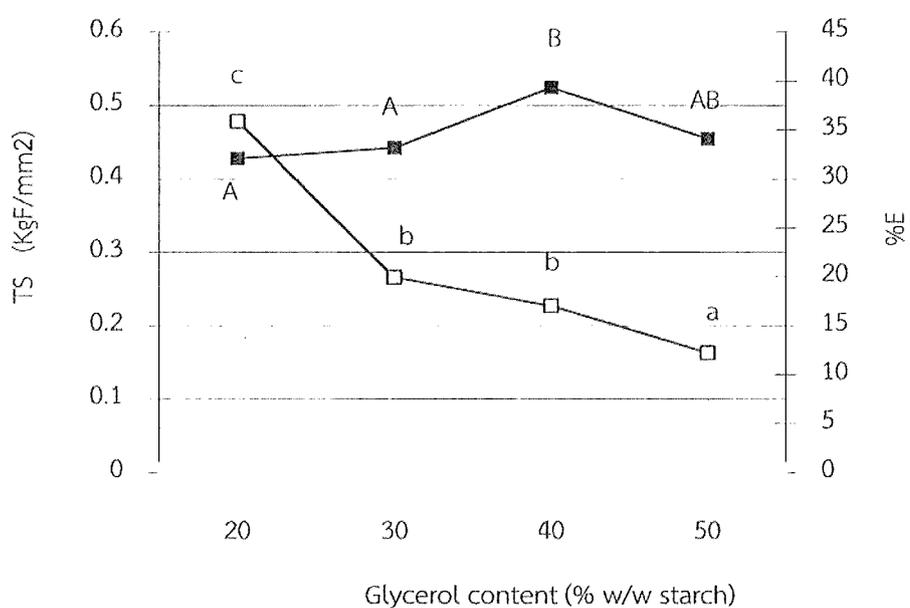
สมบัติทางกลเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่มีความสำคัญสำหรับใช้ประเมินการใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารของฟิล์มพอลิเมอร์ชีวภาพ เนื่องจากฟิล์มที่มีความแข็งแรงมากพอจะทนแรงภายนอกได้สูง (high external forces) และป้องกันอาหารจากสิ่งแวดล้อมได้ดี (Hu and Gao, 2008) โดยทั่วไปฟิล์มแป้งตามธรรมชาติ (native starch films) จะมีความเปราะมากกว่าฟิล์มพอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น พอลิเอทิลีน และมักจำเป็นต้องเติมพลาสติกไซเซอร์ในกระบวนการเตรียมฟิล์ม พลาสติกไซเซอร์ที่ให้สมบัติทางกลดีควรจะมีโครงสร้างคล้ายคลึงกับพอลิเมอร์แป้ง โดยมักใช้สารประกอบพวกพอลิออล เช่น กลีเซอรอล และซอร์บิทอล โดยในงานวิจัยนี้กลีเซอรอลที่ถูกเติมลงในกระบวนการเตรียมฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน จะช่วยป้องกันการแตก (crack) ของฟิล์มในระหว่างการใช้งานหรือเมื่อเก็บรักษา โดยพบว่ากลีเซอรอลมีผลต่อสมบัติทางกลของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนทั้งสมบัติการต้านแรงดึงขาด (tensile strength) และการยืดตัว (elongation at break) โดยทั่วไปพลาสติกไซเซอร์จะไปรบกวนสายพอลิเมอร์ทำให้เครื่องข่ายมีความแข็งเกร็ง (rigidity) ลดลง มีผลให้โครงสร้างของฟิล์มมีความเป็นระเบียบลดลง (Sothornvit and Krochta, 2005) ซึ่งพบได้เช่นกันในกรณีของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน

จากรูปที่ 10 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอล มีผลให้ฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนมีความแข็งแรงน้อยลงแต่ยืดหยุ่นได้ดีขึ้น โดยฟิล์มมีค่า TS ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอลจากร้อยละ 20 ถึง 50 โดยน้ำหนักของแป้งเม็ดทุเรียน โดยทำให้ฟิล์มมีค่า TS ลดลง 65.82% โดยฟิล์มที่มีกลีเซอรอลเป็นองค์ประกอบที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 ให้ค่า TS ไม่แตกต่างทางสถิติ ($P > 0.05$) กับฟิล์มที่มีกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 ในขณะที่ฟิล์มมีค่าการยืดตัว (elongation at break; E) เพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอลจากร้อยละ 20 ถึง 40 โดยน้ำหนักของแป้งเม็ดทุเรียน ($P < 0.05$) คิดเป็นการเพิ่มขึ้นของค่า %E เท่ากับ 22.50% ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลกลีเซอรอลจะเข้าไปรบกวนการบรรจุของแป้ง (starch packing) โดยเข้าไปจับ (masking) กับ

ตำแหน่งที่มีขั้ว (polar site) ของโมเลกุลพอลิเมอร์ จึงลดการกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลที่อยู่ใกล้เคียงกันในสายพอลิเมอร์ (Gontard and Guilbert, 1993) นอกจากนั้นกลีเซอรอลยังยอมให้โมเลกุลข้างเคียงเคลื่อนที่ผ่านซึ่งกันและกันได้ดียิ่งขึ้น จึงทำให้ฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนยืดออกได้ดีขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็นร้อยละ 50 กลับให้ฟิล์มที่ค่า %E ไม่แตกต่างจากฟิล์มที่มีความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่ร้อยละ 40 ($P > 0.05$) ดังนั้นเมื่อใช้สมบัติการต้านแรงดึงขาดและการยืดของฟิล์มเป็นเกณฑ์ จะพบว่าความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่เหมาะสมสำหรับฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนคือที่ร้อยละ 30-40 โดยน้ำหนักของแป้งเม็ดทุเรียน

เมื่อเปรียบเทียบฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนกับฟิล์มคอมโพไซด์ที่ประกอบด้วยส่วนผสมของแป้งเม็ดทุเรียนกับ CMC (CMC-DSS film) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนักของแป้งเม็ดทุเรียนจะได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 7 จะเห็นได้ว่าการเติม CMC ที่ระดับความเข้มข้นดังกล่าวไม่มีผลต่อความแข็งแรงของฟิล์ม ทำให้ฟิล์มมีค่า TS ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) แต่ที่ฟิล์มที่เติม CMC ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 จะให้ฟิล์มที่มีค่า %E เพิ่มขึ้นจาก 32.98% เป็น 41.94% นั่นคือเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) โดยมีค่ามากฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนควบคุม 1.27 เท่า แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ CMC เป็นร้อยละ 10 นอกจากไม่ทำให้ฟิล์มมีสมบัติการยืดตัวดีขึ้น กลับทำให้มีค่า %E ลดลงเหลือเพียง 24.09% ($P < 0.05$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ปริมาณ CMC ที่เหมาะสมเท่านั้นจึงจะช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน โดยในที่นี้การใช้ CMC ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแป้งเม็ดทุเรียนจึงจะทำให้สมบัติการยืดตัวดีขึ้นแต่ไม่มีผลกระทบทางลบต่อสมบัติการต้านทานแรงดึงขาด

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นเยื่อใยที่มาจากเซลลูโลส (cellulose-based fibers) ที่นิยมใช้สำหรับเป็นฟิลเลอร์ที่ย่อยสลายได้ (biodegradable filler) (Dufresne et al., 2000; Averous et al., 2001; Lu et al., 2005) เมื่อเยื่อใยตามธรรมชาติถูกผสมเข้ากับแป้ง จะส่งผลให้สมบัติทางกลของฟิล์มคอมโพไซด์ดีขึ้น เนื่องจากความคล้ายคลึงทางเคมีของแป้งและเยื่อใยจากพืชจะเกิดการกระทำต่อกันได้ดี (Averous et al., 2001; Lu et al., 2006; Ghanbazadeh et al., 2010) อย่างไรก็ตาม Ghanbazadeh et al. (2010) ศึกษาผลของเยื่อใยเซลลูโลส (cellulosic fibers) ที่มีต่อสมบัติทางกลของฟิล์มแป้ง พบว่าการที่ฟิล์มมีกรดซิตริกเป็นองค์ประกอบ จะไปลดอิทธิพลของ CMC ต่อการเพิ่มความแข็งแรงของฟิล์มแป้ง เนื่องจาก CMC ไม่สามารถเข้ากระทำได้อย่างหนาแน่นกับแอมทริกซ์ของแป้ง สอดคล้องกับผลการทดลองข้างต้น ที่การเติม CMC ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5-10 โดยน้ำหนักแป้งเม็ดทุเรียนลงในฟิล์ม ไม่ช่วยปรับปรุงสมบัติการต้านแรงดึงขาดของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนแต่กลับช่วยทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ในขณะที่โมเลกุลของแป้งเม็ดทุเรียนเกิดการกระทำกับโปรตีนเจลาตินให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ฟิล์มมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น (Eskin, 1990; McHugh and Olsen, 2004)



รูปที่ 10 ผลของความเข้มข้นของกลีเซอรอลต่อสมบัติการต้านแรงดึงขาด (Tensile strength; TS) และการยืดตัว (Elongation at break; E) ของฟิล์มเม็ดทุเรียนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20-50 โดยน้ำหนักของแป้งเม็ดทุเรียน

ตารางที่ 7 ค่าการต้านแรงดึงขาด (TS) และการยืดตัว (E) ของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งข้าวโพดและฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง

Type of films	TS (KgF/mm ²)	%E
DSS-film	0.30 ^a ±0.09	32.98 ^d ±1.16
5%CMC-DSS film	0.39 ^a ±0.04	41.94 ^e ±4.09
10%CMC-DSS film	0.45 ^a ±0.03	24.09 ^c ±1.99
Corn starch film	0.86 ^b ±0.12	12.43 ^a ±1.96
Cassava starch film	0.76 ^b ±0.19	18.36 ^b ±4.17

a-c ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามคอลัมน์แสดงถึงข้อมูลที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 8 ค่าการต้านแรงดึงขาด (TS) และการยืดตัว (E) ของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพีวีซี

Type of films	TS (KgF/mm ²)	%E
DSS	0.30 ^a ±0.09	32.98 ^a ±1.16
5% CMC-DSS	0.39 ^a ±0.04	41.94 ^b ±4.09
5% Gelatin-DSS	0.54 ^b ±0.02	36.30 ^{ab} ±2.80
5% Caragenan-DSS	0.34 ^a ±0.03	38.45 ^{ab} ±3.51
5% Pectin-DSS	0.35 ^{ab} ±0.05	39.87 ^{ab} ±10.40
PVC	2.18 ^d ±0.25	242.16 ^c ±31.41
PE	1.76 ^c ±0.21	800.43±60.00

a-c ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามคอลัมน์แสดงถึงข้อมูลที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ในขณะที่ฟิล์มคอมโพสิต 5% CMC-DSS มีสมบัติการยืดที่ต่ำกว่าทั้งของฟิล์มแป้งข้าวโพดและฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง โดยให้ค่า %E มากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) โดยมีค่ามากกว่า 3.38 และ 2.28 เท่า ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าฟิล์มมีความยืดหยุ่นมากกว่าฟิล์มแป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งอาจเป็นข้อได้เปรียบของการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ทางอาหาร ในขณะที่เมื่อเติมเจลาติน คาราจีแนนและเพคตินที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแป้งเม็ดทุเรียนกลับไม่มีผลต่อการยืดของฟิล์มโดยมีค่า %E ไม่แตกต่างทางสถิติ ($P > 0.05$) กับฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนควบคุม แต่สำหรับฟิล์มที่เติมเจลาตินที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 มีผลกับสมบัติการต้านแรงดึงขาด โดยให้ค่า TS มากกว่าฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนควบคุม 1.8 เท่า (ตารางที่ 8) อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพีวีซีและฟิล์มพีอี ก็ยังมีสมบัติการต้านแรงดึงขาดและสมบัติการยืดที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$)

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของพอลิเมอร์ชีวภาพที่เติมลงไปเป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของแป้งเม็ดทุเรียนได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 9 จะเห็นได้เฉพาะการเพิ่มความเข้มข้นของเพคตินเท่านั้นที่มีผลต่อสมบัติการต้านแรงดึงขาด โดยการเติมเพคตินที่ความเข้มข้น 10 % จะให้ฟิล์มที่มีค่า TS มากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) กับฟิล์มที่เติมเพคตินที่ความเข้มข้น 5% ผลการทดลองสอดคล้องกับการศึกษาฟิล์มเพคติน-แป้ง (pectin-starch films) ของ

Fishman and Coffin (1995) เมื่อพบว่าการเติมเพคตินในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของฟิล์มโดยให้ค่า TS มากขึ้น เนื่องจากเพคตินเป็นพอลิแซคคาไรด์เชิงซ้อน (complex polysaccharide) จึงสามารถเกิดการเชื่อมขวางกับโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบเล็กน้อยในแป้ง (Thakur et al., 1997) สำหรับการเพิ่มความเข้มข้นของพอลิชีวภาพชนิดอื่นอีก 3 ชนิดที่ใช้ในการทดลองนี้ไม่มีผลที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า TS ($P > 0.05$) ในขณะที่การเพิ่มความเข้มข้นของ CMC และเพคตินมีผลต่อสมบัติการยืด โดยมีค่า %E น้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) กับฟิล์มที่เติมที่ความเข้มข้นต่ำกว่า นั่นคือการเติม 10% เพคตินจะให้ฟิล์มที่มีค่า TS มากที่สุดเท่ากับ 0.6234 KgF/mm^2 ในขณะที่ให้ค่า %E ต่ำสุดเช่นกันเท่ากับ 19.36%

ตารางที่ 9 ค่าการต้านแรงดึงขาด (TS) และการยืดตัว (E) ของฟิล์มคอมโพสิตของแป้งเม็ดทุเรียน

Type of films	TS (KgF/mm ²)	%E
5% CMC-DSS	$0.39^{bc} \pm 0.04$	$41.94^b \pm 4.09$
10% CMC-DSS	$0.45^{bcd} \pm 0.03$	$24.09^a \pm 1.99$
5% Gelatin-DSS	$0.54^{de} \pm 0.02$	$36.30^b \pm 2.80$
10% Gelatin-DSS	$0.47^{cd} \pm 0.08$	$35.50^b \pm 4.81$
5% Caragenan-DSS	$0.34^{ab} \pm 0.03$	$38.45^b \pm 3.51$
10% Caragenan-DSS	$0.25^a \pm 0.03$	$41.26^b \pm 7.14$
5% Pectin-DSS	$0.35^{abc} \pm 0.05$	$39.87^b \pm 10.40$
10% Pectin-DSS	$0.62^e \pm 0.20$	$19.36^a \pm 12.77$

a-e ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามคอลัมน์แสดงถึงข้อมูลที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

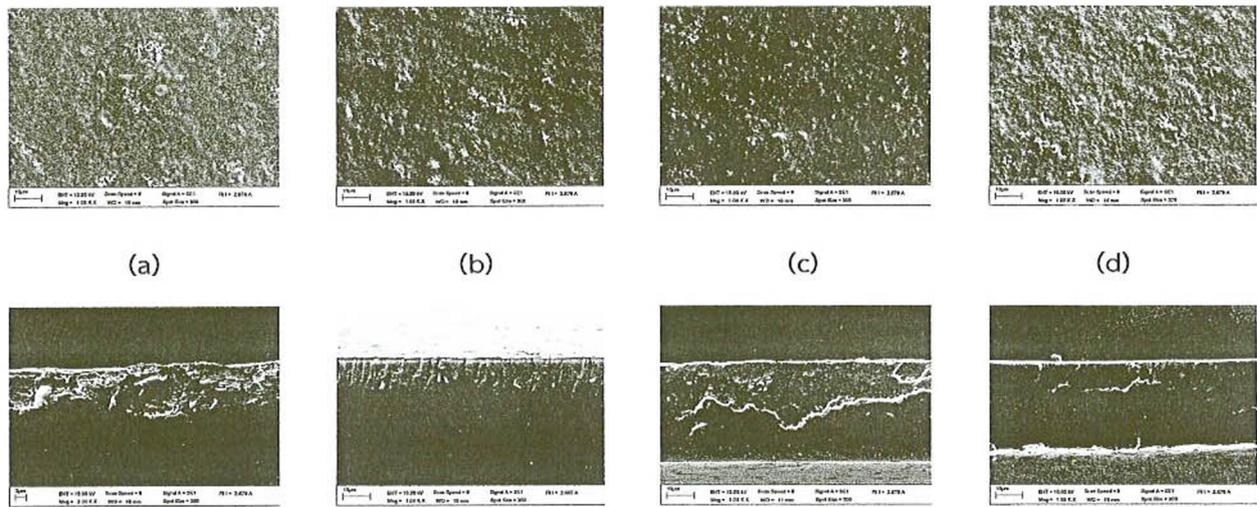
โครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure)

เมื่อพิจารณาโครงสร้างทางจุลภาคของฟิล์มแบ่งเม็ดทุเรียนโดยอาศัยการตรวจวัดด้วยเครื่องมือจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า ทั้งที่พื้นผิว (surface) และภาคตัดขวาง (cross-section) ของฟิล์มแบ่งเม็ดทุเรียน พบลักษณะที่เป็นแบบแผนของพื้นผิวฟิล์มที่เตรียมจากแบ่ง ซึ่งแสดงถึง withered ghost granules ของแบ่ง (Salleh et al., 2009) มีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบ แสดงถึงความเป็นเนื้อเดียว (homogeneous) และ continuous matrix โดยไม่มีรอยแตกหัก (crack) แต่มีการกระจายของอนุภาคขนาดเล็กโดยไม่มีแยกเฟส

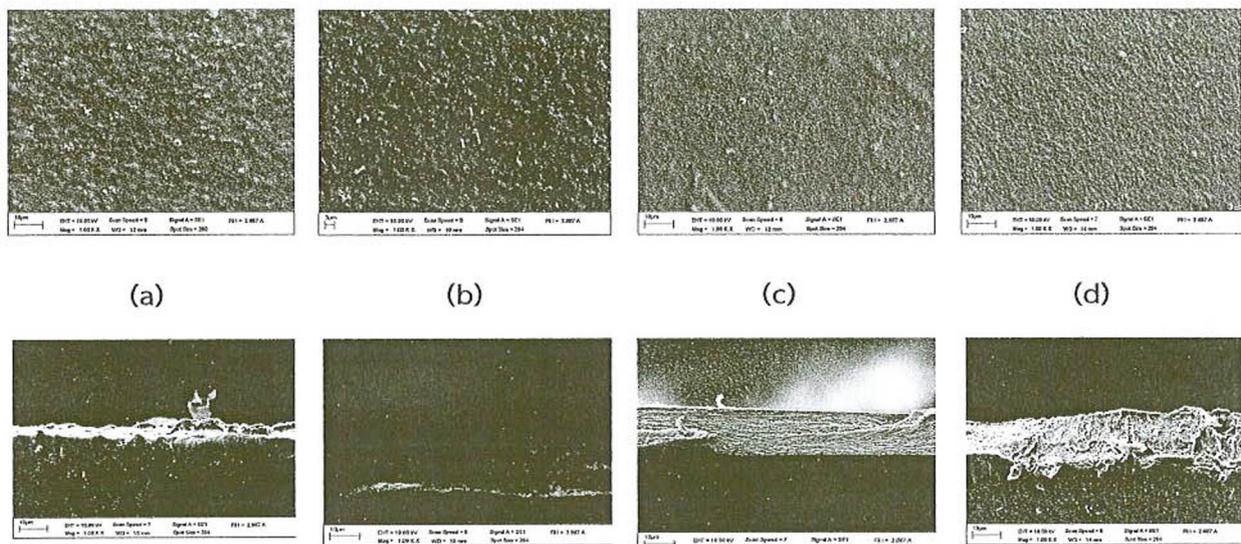
จากรูปที่ 11 พบว่าความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอร์มีผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาค (microstructure) ของฟิล์มแบ่งเม็ดทุเรียน ซึ่งจะเห็นการเข้ากันได้ดี (compatibility) ของกลีเซอรอลกับแบ่งเม็ดทุเรียน โดยแสดงให้เห็นถึงพื้นผิวค่อนข้างเรียบ และเป็นเนื้อเดียวกันทั่วทั้งฟิล์ม แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอลจะเห็นพื้นที่ว่าง (empty space) และรอยแตกแยกของเนื้อฟิล์มเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นดีขึ้นแต่มีความสามารถในการกักน้ำลดลงสอดคล้องกับแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าการแพร่ผ่านไอน้ำ (WVP) ของฟิล์มแบ่งเม็ดทุเรียน

นอกจากนั้น จากรูปที่ 12 จะเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนของพื้นผิวของฟิล์มแบ่งเม็ดทุเรียน ฟิล์มคอมโพสิตของแบ่งเม็ดทุเรียนกับ CMC (CMC-DSS film) ฟิล์มแป้งข้าวโพด และฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง ถึงแม้ว่าฟิล์มคอมโพสิต CMC-DSS จะมีลักษณะหรือรูปแบบคล้ายคลึงกับฟิล์มแบ่งเม็ดทุเรียน แต่ฟิล์มแบ่งเม็ดทุเรียนที่มีการเติม CMC จะมีความผิดปกติ (irregular) ของพื้นผิวมากกว่าฟิล์มแป้งทุเรียนควบคุม ซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีแมโครโมเลกุล (macromolecule) มากกว่า 1 ชนิดในพอลิเมอร์เมทริกซ์ (polymeric matrix) (Dias et al., 2010) ผลดังกล่าวจะเห็นได้ชัดขึ้นจากไมโครกราฟของฟิล์มคอมโพสิต CMC-DSS เมื่อใช้ความเข้มข้นร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนักของแบ่งเม็ดทุเรียน ซึ่งจะเห็นความผิดปกติของพื้นผิวมากขึ้นเมื่อฟิล์มมีองค์ประกอบ CMC มากขึ้น (รูปที่ 13)

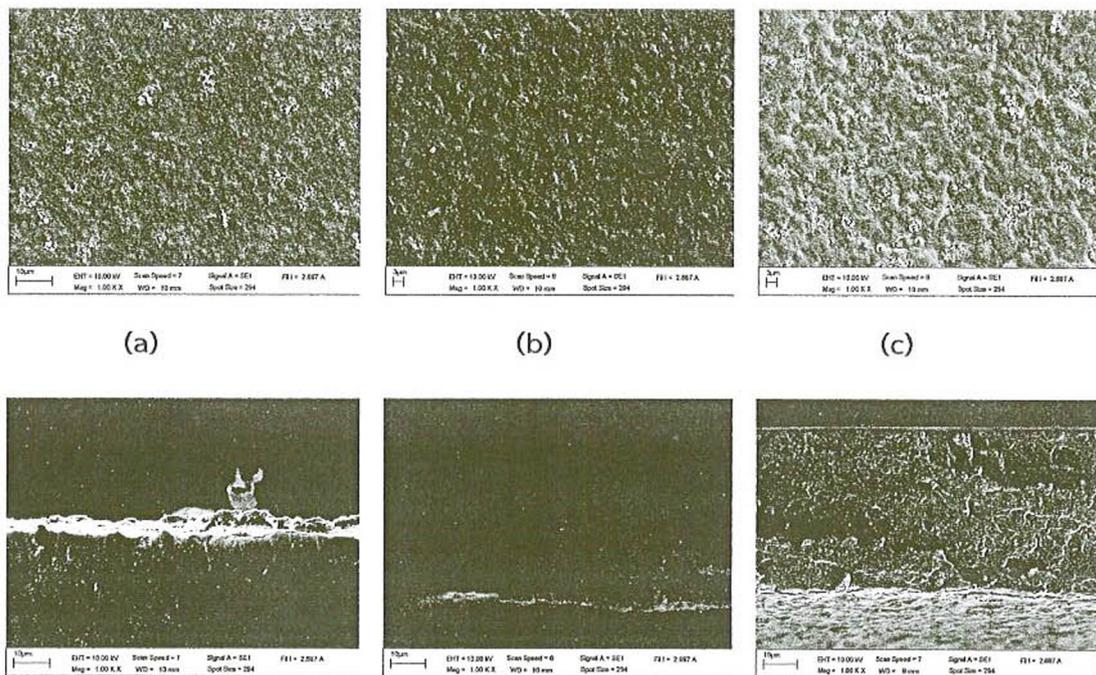
ในขณะที่ฟิล์มแป้งข้าวโพดและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังจะมีความแน่นและเรียบของพื้นผิวมากกว่าฟิล์มแบ่งเม็ดทุเรียน และฟิล์มคอมโพสิต CMC-DSS (รูปที่ 12) ซึ่งอาจเป็นสาเหตุของความแตกต่างของการที่ทั้งฟิล์มแป้งข้าวโพดและฟิล์มแป้งทุเรียนต่างก็มีค่า TS มากกว่า ในขณะที่มีค่า %E น้อยกว่าของฟิล์มที่มีองค์ประกอบหลักเป็นแบ่งเม็ดทุเรียน และจะเห็นความแตกต่างของพื้นผิวอย่างชัดเจนระหว่างฟิล์มแบ่งเม็ดทุเรียนกับฟิล์มพอลิเมอร์สังเคราะห์ทั้ง 3 ชนิด (ฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์ ฟิล์มพอลิเอทิลีน และฟิล์มพอลิโพรพิลีน (รูปที่ 14) โดยฟิล์มพีวีซีจะมีพื้นผิวเรียบแน่น ทั้งนี้เนื่องจากสายพอลิเมอร์ที่โครงสร้างง่าย ๆ และเป็นเส้นตรงที่มักพบในโครงสร้างของพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่เป็นองค์ประกอบในฟิล์มพอลิเมอร์สังเคราะห์ จะสามารถบรรจุกันแน่นหนา (firmly packed) ในขณะที่สายพอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่โต (voluminous chain) จะบรรจุกันอย่างหลวม ๆ (loosely packed) จึงทำให้เกิดการแพร่ผ่านได้มากกว่า (Chen, 1995)



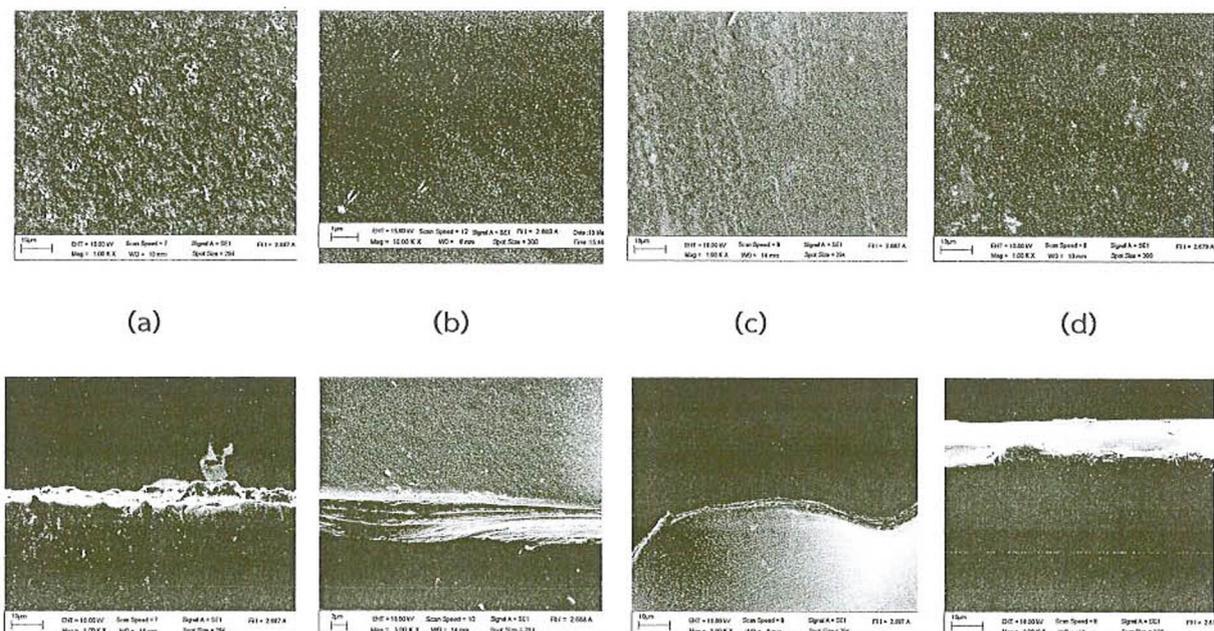
รูปที่ 11 ไมโครกราฟของพื้นผิว (รูปบน) และภาคตัดขวาง (รูปล่าง) ของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนที่ตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของกลีเซอรอลแตกต่างกันเมื่อ (a) 20% (b) 30% (c) 40% (d) 50% (w/w starch)



รูปที่ 12 ไมโครกราฟของพื้นผิว (รูปบน) และภาคตัดขวาง (รูปล่าง) ของฟิล์มที่ตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า เมื่อ (a) DDS film (b) 5%CMC-DDS film (c) corn starch film and (d) cassava starch film (เมื่อใช้กลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนักแป้งเม็ดทุเรียน)

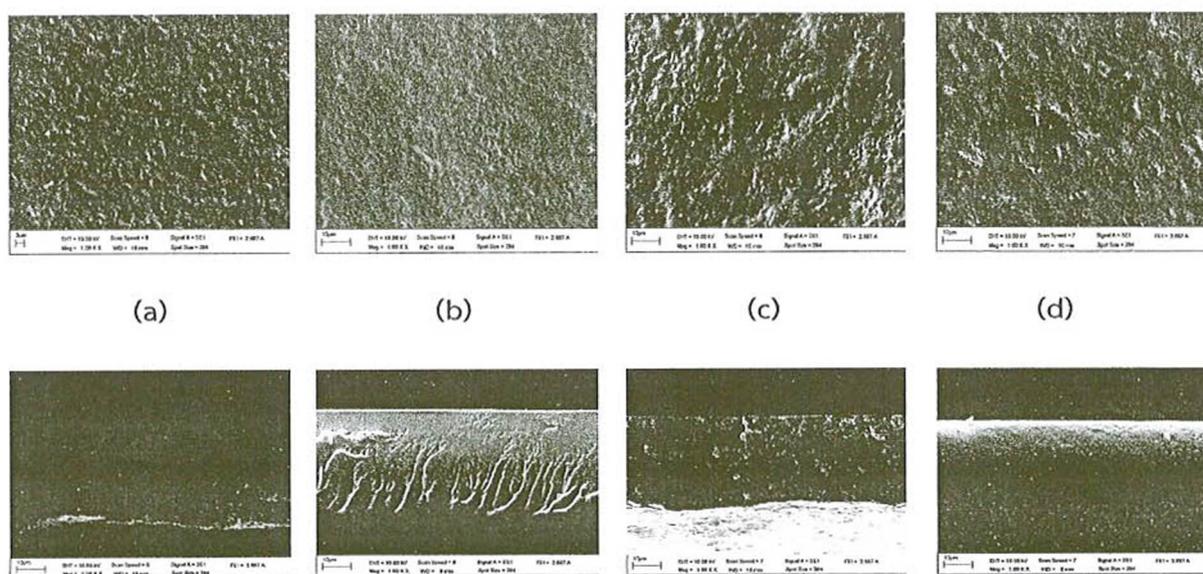


รูปที่ 13 ไมโครกราฟของพื้นผิว (รูปบน) และภาคตัดขวาง (รูปล่าง) ของฟิล์มที่ตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า เมื่อ (a) DDS film (b) 5% CMC- DDS film และ (c) 10% CMC- DDS film



รูปที่ 14 ไมโครกราฟของพื้นผิว (รูปบน) และภาคตัดขวาง (รูปล่าง) ของฟิล์มที่ตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (a) durian seed starch (DDS) film กับฟิล์มพอลิเมอร์สังเคราะห์ (b) polyvinylchloride (PVC) film, (c) polyethylene (PE) film และ (d) polypropylene (PP) film

รูปที่ 15 โครงสร้างทางจุลภาคของฟิล์มคอมโพสิตแป้งเม็ดทุเรียนที่เติมพอลิเมอร์ชีวภาพทั้ง 4 ชนิด พบว่าฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนที่เติมเจลาตินจะมีพื้นผิวเรียบและมีโครงสร้างที่จัดเรียงกันอย่างแน่นหนากว่าฟิล์มที่เติมพอลิแซคคาไรด์อีก 3 ชนิด (CMC คาราจีแนนและเพคติน) สอดคล้องกับผลการทดลองที่พบว่าฟิล์มคอมโพสิตของแป้งเม็ดทุเรียนกับเจลาติน (gelatin-DSS film) มีสมบัติการต้านแรงดึงขาดดีกว่า (ค่า TS มากกว่า) แต่มีค่าการยืดตัวต่ำกว่าฟิล์มคอมโพสิตอีกสามชนิดเมื่อเติมพอลิเมอร์ชีวภาพที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแป้งเม็ดทุเรียนเท่ากัน ในขณะที่ฟิล์มคอมโพสิต CMC-DSS และ gelatin-DSS มีการจัดเรียงขององค์ประกอบที่เป็นระเบียบกว่า และมีช่องว่างน้อยกว่า จึงส่งผลให้ฟิล์มทั้งสองมีสมบัติการกักน้ำที่ดีกว่าฟิล์มคอมโพสิต caragenan-DSS และ pectin-DSS



รูปที่ 15 ไมโครกราฟของพื้นผิว (รูปบน) และภาคตัดขวาง (รูปล่าง) ของฟิล์มคอมโพสิตแป้งเม็ดทุเรียนที่ตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า เมื่อ (a) CMC- DDS film (b) gelatin-DSS film (c) caragenan-DSS film และ (d) pectin-DSS film ที่ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ชีวภาพที่เติมร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแป้งเม็ดทุเรียน

ลักษณะที่ปรากฏ สี และความโปร่งแสง

ฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนและฟิล์มคอมโพสิตของแป้งเม็ดทุเรียนมีลักษณะ non-sticky ซึ่งทำให้สามารถลอกออกได้ง่าย พับม้วนงอได้ดีโดยไม่มีการแตกหัก ให้ฟิล์มที่มีความหนาเฉลี่ย 41.64 ± 3.78 ไมโครเมตร และมีความโปร่งแสงที่ดี ให้ลักษณะปรากฏที่ดีเหมาะกับการใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร (รูปที่ 16-18) ซึ่งเป็นสมบัติของฟิล์มอย่างหนึ่งที่สำคัญสำหรับการประยุกต์ใช้ห่อหุ้มอาหาร

สมบัติความโปร่งแสงก็มีความสำคัญต่อการประยุกต์ใช้ทางอาหารของฟิล์มเช่นกัน เนื่องจากเป็นตัวกำหนดลักษณะที่ปรากฏ (appearance) ของผลิตภัณฑ์อาหารที่ถูกห่อหุ้ม เมื่อแสงผ่านพื้นผิวของฟิล์มจะถูกดูดกลืน (absorbed) หรือถูกส่งผ่าน (transmitted) การกระทำระหว่างแสงกับผลิตภัณฑ์จะส่งผลกระทบต่อสี ความมันวาว (gloss) และความโปร่งแสง (Huching, 1999) โดยทั่วไปสมบัติความโปร่งแสงของฟิล์มจะขึ้นกับทั้งองค์ประกอบและสภาวะที่ใช้เตรียมฟิล์ม อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของกลีเซอรอลในช่วงร้อยละ 20-50 โดยน้ำหนักของแป้งเม็ดทุเรียนไม่มีผลต่อความโปร่งแสงของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน โดยให้ค่าความโปร่งแสงอยู่ในช่วง 9.789-11.791 มม⁻¹

เนื่องจากความโปร่งแสงของฟิล์มเกี่ยวข้องกับชนิดและขนาดของอนุภาคที่กระจายอยู่ทั่วฟิล์ม การจัดเรียงตัวใหม่ขององค์ประกอบของฟิล์มเมทริกซ์ระหว่างกระบวนการทำให้แห้งของฟิล์มทั้งโครงสร้างภายในและพื้นที่ผิวก็เกี่ยวข้องกับการโปร่งแสงของฟิล์มเช่นกัน จึงทำให้ฟิล์มคอมโพไซด์ของแป้งเม็ดทุเรียนที่มีการผสมพอลิเมอร์ชีวภาพแตกต่างกันจึงให้สมบัติความโปร่งแสงที่แตกต่างกัน และฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนที่เติมพอลิเมอร์ชีวภาพที่ความเข้มข้นสูงขึ้นจะมีความโปร่งแสงลดลง (ตารางที่ 10) และมีความโปร่งแสงน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์สังเคราะห์ (ฟิล์มพีวีซีและฟิล์มพอลิเอทิลีน) และฟิล์มแป้งดัดแปลงทางการค้าที่ใช้ในการทดลองนี้ (ฟิล์มแป้งข้าวโพดและฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง) อย่างไรก็ตามฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนมีความสว่าง (L*) มากกว่าทั้งฟิล์มพีวีซี (1.44) ฟิล์มพอลิเอทิลีน (4.99) ฟิล์มแป้งข้าวโพด (6.23) ฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง (11.25)

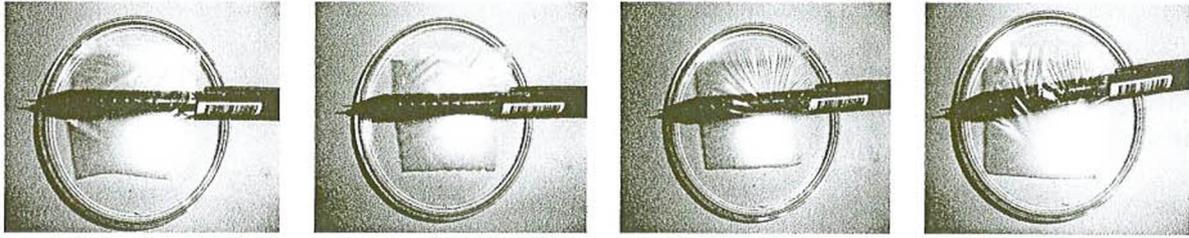
นอกจากนั้นเมื่อใช้พอลิเมอร์ชีวภาพทั้ง 4 ชนิดที่ความเข้มข้นต่ำ (5% w/w starch) เติมนลงในสารละลายสำหรับเตรียมฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน พบว่าให้ฟิล์มคอมโพไซด์ที่มีส่วนผสมของเจลาตินและเพคตินให้ค่าความโปร่งแสงน้อยกว่าฟิล์มคอมโพไซด์ที่มีส่วนผสมของ CMC และคาราจีแนน ($P < 0.05$) ซึ่งฟิล์มคอมโพไซด์ 2 ชนิดหลังไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P > 0.05$) กับฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนควบคุม และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเจลาตินเป็นร้อยละ 10 ก็ยังให้ค่าความโปร่งแสงน้อยกว่าฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนควบคุม ดูเหมือนว่าการเกิดเครือข่ายของโปรตีนเจลาตินกับแป้งเม็ดทุเรียนให้การบรรจุหรือเครือข่ายที่ยอมให้แสงผ่านได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับของแป้งเม็ดทุเรียนเพียงอย่างเดียว การเกิดเจลและการกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างแป้งเม็ดทุเรียนและพอลิเมอร์ชีวภาพแต่ละชนิด มีผลให้เกิดโครงสร้างและสมบัติของฟิล์มที่แตกต่างกัน (Imason et al., 1997; Coughtan et al., 2004) ดังนั้นสมบัติความโปร่งแสงของฟิล์มทั้งหมดจึงขึ้นกับปัจจัยหลายประการไม่เพียงแต่ชนิดของแป้งและพอลิเมอร์ชีวภาพที่เติมลงไปเท่านั้น แต่ยังขึ้นกับธรรมชาติ และความแข็งแรงระหว่างการกระทำที่เกิดขึ้นของแป้งและไฮโดรคอลลอยด์ด้วย (Hemar et al., 2001; 2002)

สีของฟิล์มก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการยอมรับของผู้บริโภค โดยแสดงค่าพารามิเตอร์สี (L*, a*, และ b* ในตารางที่ 10) ฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนควบคุม (DSS film) มีค่าความสว่าง (L*) น้อยกว่าฟิล์มคอมโพไซด์ 5% CMC-DSS ($P < 0.05$) ในขณะที่ฟิล์มคอมโพไซด์ในทรีตเมนต์อื่นไม่มีความแตกต่างของค่าความสว่าง ($P > 0.05$)

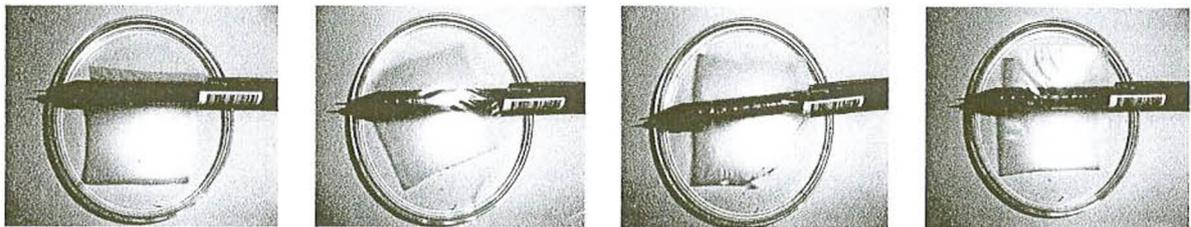
อย่างไรก็ตามฟิล์มที่เตรียมจากแป้งเม็ดทุเรียน (DSS based films) มีค่า L^* มากกว่าฟิล์มแป้งข้าวโพดและฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง ($P < 0.05$)

ตารางที่ 10 ความหนา ความโปร่งแสง และพารามิเตอร์สีของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน ฟิล์มคอมโพสิตแป้งเม็ดทุเรียน ฟิล์มพอลิเมอร์สังเคราะห์ ฟิล์มแป้งข้าวโพด และฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง

Type of film	Thickness (m)	Transparence (m^{-1})	Color parameter		
			L^*	a^*	b^*
DSS	0.040±0.000	13.59±0.05	25.21	9.40	-18.18
5% CMC-DSS	0.043±0.002	14.78±0.63	35.64	-17.00	13.99
10% CMC-DSS	0.042±0.002	16.11±0.10	25.16	6.75	2.79
5% Gelatin-DSS	0.039±0.005	8.27±0.02	18.70	-0.28	-0.23
10% Gelatin-DSS	0.042±0.002	9.50±0.05	21.25	-2.03	1.37
5% Caragenan-DSS	0.042±0.003	14.09±0.01	23.08	-1.18	1.07
10% Caragenan-DSS	0.047±0.003	14.71±0.03	30.16	-2.56	6.74
5% Pectin-DSS	0.048±0.004	9.44±0.02	20.71	1.01	0.97
10% Pectin-DSS	0.041±0.006	14.58±0.05	21.91	-3.73	3.72
Corn starch	0.034±0.001	2.63±0.01	6.23	4.50	-3.19
Cassava starch	0.400±0.005	2.10±0.01	11.25	-0.17	-2.27
PVC	0.012±0.001	4.61±0.01	1.44	-0.29	-0.59
PE	0.009±0.000	6.39±0.006	4.99	0.27	-1.42



รูปที่ 16 ลักษณะที่ปรากฏของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน (DSS film) ที่มีกลีเซอรอลที่ความเข้มข้น (a) 20% (b) 30% (c) 40% (d) 50% (w/w starch)

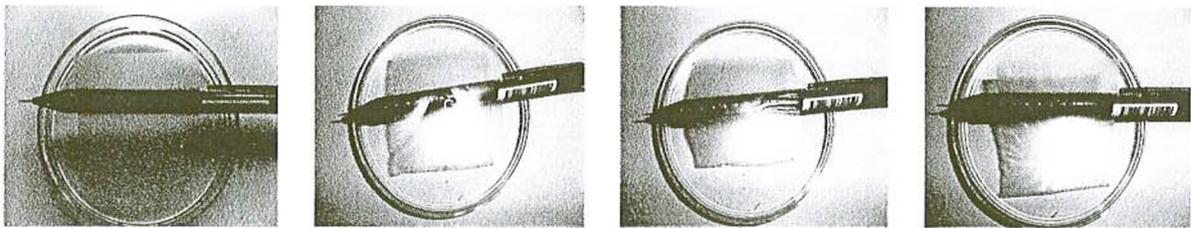


(a)

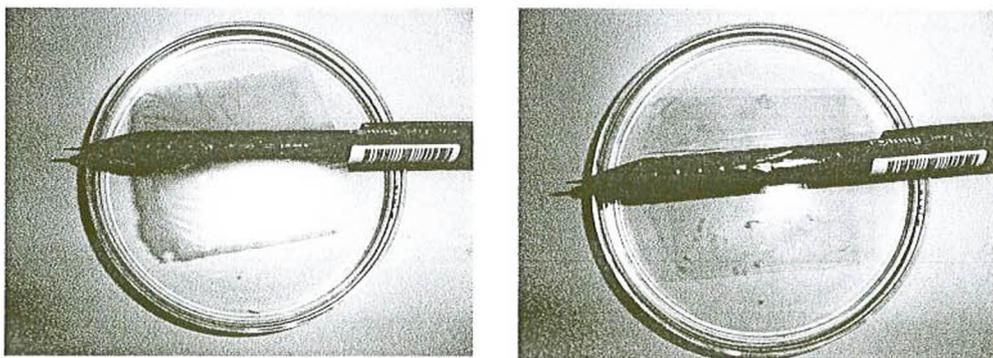
(b)

(c)

(d)



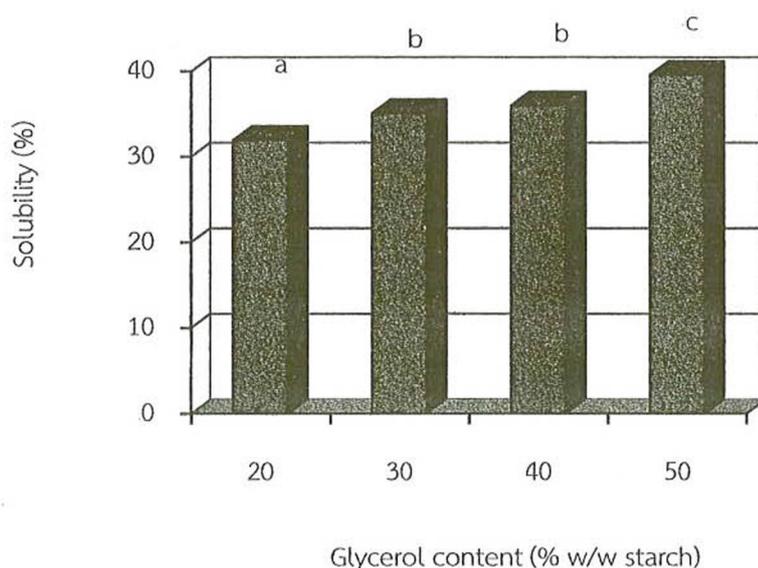
รูปที่ 17 ลักษณะที่ปรากฏของฟิล์มคอมโพสิตแป้งเม็ดทุเรียนที่ผสมพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดที่ 2 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 (a-d) และ 10 (e-h) โดยน้ำหนักของแป้งเม็ดทุเรียน ตามลำดับ เมื่อ (a,e) CMC-DSS, (b,f) Geletin-DSS, (c,g) caragenan-DSS, (d,h) pectin-DSS



รูปที่ 18 ลักษณะที่ปรากฏของ (a) ฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน (DSS film) เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์สังเคราะห์ (b) ฟิล์มพีวีซี

การละลายได้ (Solubility)

ความเข้มข้นของกลีเซอรอลมีผลต่อการละลายได้ของฟิล์ม จากรูปที่ 19 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอลจะทำให้ฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนมีความสามารถในการละลายน้ำได้ดีขึ้น โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอลจากร้อยละ 20 เป็นร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของแป้งเม็ดทุเรียนจะทำให้ฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนมีค่าการละลายได้เพิ่มขึ้นจาก 31.94% เป็น 39.58% คิดเป็นค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 24% ($P < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของกลีเซอรอลที่มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic nature) เข้าไปแทรกสอดอยู่ในโครงสร้างของเครือข่ายพอลิเมอร์แป้งทำให้โครงสร้างของฟิล์มมีสมบัติชอบน้ำเพิ่มขึ้น อีกทั้งโมเลกุลกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นจะไปขัดขวางการเกิดเครือข่าย (network) ของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน ทำให้เครือข่ายพอลิเมอร์มีความแข็งแรงน้อยลง จึงทำให้ฟิล์มละลายได้เพิ่มขึ้นเมื่อมีกลีเซอรอลเป็นองค์ประกอบเพิ่มขึ้น Romeo-Bastida et al. (2005) รายงานว่าวิธีการทำให้เกิดเจล (gelatinization method) มีผลอย่างมากต่อสมบัติการละลายได้ของฟิล์ม ในกรณีของกระบวนการเจลาตินในเซชันที่ใช้ความร้อน (thermal gelatinization) การเติมพลาสติกไซเซออร์จะทำให้ฟิล์มมีการละลายได้เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามมักจะมียค่าการละลายได้ต่ำกว่าฟิล์มที่เตรียมด้วยกระบวนการเจลาตินในเซชันที่ไม่ใช้ความร้อน (cold gelatinization)



รูปที่ 19 ผลของความเข้มข้นของกลีเซอรอลต่อสมบัติการละลายได้ของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20-50 โดยน้ำหนักของแป้งเม็ดทุเรียน

สำหรับการละลายได้ของฟิล์มคอมโพสิตของแป้งเม็ดทุเรียน พบว่าชนิดและความเข้มข้นของพอลิเมอร์ชีวภาพที่เติมลงไปในฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนให้ผลที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 11) โดยเฉพาะการเติม CMC ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักแป้งเม็ดทุเรียนเท่านั้นที่ทำให้ฟิล์มให้ค่าการละลายลดลงซึ่งมีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.5$) กับแป้งเม็ดทุเรียนควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากทั้ง CMC มีธรรมชาติที่ไม่ชอบน้ำมากกว่าแป้ง และเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งข้าวโพดและฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง ฟิล์มคอมโพสิต CMC-DSS มีค่าการละลายน้ำได้ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) โดยมีสมบัติการละลายได้ในน้ำน้อยกว่า 1.5 และ 1.9 เท่า ตามลำดับ

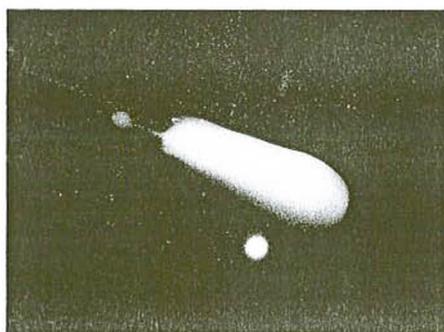
ตารางที่ 11 สมบัติการละลายได้ของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน ฟิล์มคอมโพสิตแป้งเม็ดทุเรียน ฟิล์มแป้งข้าวโพด และฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง

Type of film	Solubility (%)
DSS	37.00 ^{cd} ±3.55
5% CMC-DSS	30.68 ^{bc} ±3.94
10% CMC-DSS	24.27 ^a ±1.07
5% Gelatin-DSS	28.85 ^{bc} ±0.49
10% Gelatin-DSS	38.59 ^{de} ±3.13
5% Caragenan-DSS	32.95 ^{bcd} ±4.62
10% Caragenan-DSS	31.64 ^{bc} ±1.67
5% Pectin-DSS	43.39 ^{ef} ±3.42
10% Pectin-DSS	47.12 ^f ±3.15
Corn starch	36.15 ^{cd} ±2.93
Cassava starch	45.91 ^f ±6.54

a-f ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามคอลัมน์แสดงถึงข้อมูลที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

แคปซูลยาแบบแข็งจากแป้งเม็ดทุเรียน

ในทางการค้าแคปซูลยาแบบแข็งเตรียมโดยอาศัยเทคนิค injection molding process เพื่อให้ได้แคปซูลที่มีขนาดที่แน่นอนและสามารถเชื่อมติด (seal) ระหว่างส่วนบนและล่างได้ดี โดยขั้นตอนการเติม (filling) และเชื่อมติด (sealing) เกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน (simultaneous) (Angsburger, 1995) สำหรับงานวิจัยนี้ใช้วิธีการ dip-coating โดยใช้สารละลาย 10% แป้งเม็ดทุเรียน (w/v) เป็นหลัก เปรียบเทียบกับการใช้สารละลายผสมของแป้งเม็ดทุเรียนกับ CMC ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแป้งเม็ดทุเรียน ทำได้โดยใช้แท่งโลหะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5 มม. ถูกทำให้ร้อน (preheated) จากนั้นจึงนำมาจุ่มลงในสารละลายแป้งที่ถูกทำให้เป็นเจลจากความร้อนแล้ว เมื่อดึงเอาแท่งโลหะออกจะมีเจลแป้ง (gell starch solution) เคลือบติดเป็นฟิล์มที่แท่งโลหะดังกล่าว จากนั้นจึงนำมาทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 25°C (50%RH) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แคปซูลที่แห้งแล้วถูกลอกออกมาและนำมาตัดให้ได้ขนาดตามที่กำหนด อย่างไรก็ตามเนื่องจากสารละลายที่ใช้ในการขึ้นรูปแคปซูลยาแบบแข็งมีตัวทำละลายเป็นน้ำ การขึ้นรูปด้วยวิธีการจุ่มเคลือบดังกล่าวจึงทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากไม่สามารถให้แคปซูลแข็งทันทีหรือในเวลาน้อยกว่าเร็ว ลักษณะของแคปซูลที่ได้จึงไม่ดีมากนัก และมีขนาดความหนาที่ไม่เท่ากัน (รูปที่ 20) ปัจจัยหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูปแคปซูลขึ้นกับชนิดของแป้ง โดยแป้งที่มีสัดส่วนของอะไมโลสสูงจะให้แคปซูลที่ดีกว่าแป้งที่มีสัดส่วนของอะไมโลสต่ำและมีอะไมโลเพคตินสูง (Bae et al, 2008) ซึ่งสามารถขึ้นรูปแคปซูลแบบแข็งได้โดยไม่ต้องอาศัยสารที่ทำให้เป็นเจล (gelling agent) ด้วยเมื่อใช้แป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูง ๆ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้แคปซูลที่เตรียมจากแป้งทุเรียนขึ้นรูปได้ยาก ทั้งนี้เนื่องจากพบว่าแป้งเม็ดทุเรียนมีปริมาณอะไมโลสค่อนข้างต่ำ โดยมีเท่ากับ 24.92% ซึ่งน้อยกว่าทั้งแป้งข้าวโพด (45.20%) และแป้งมันสำปะหลัง (40.28%) (ตารางที่ 3)



(a)



(b)

รูปที่ 20 (a) วิธีการเตรียมแคปซูลอย่างง่ายด้วยเทคนิค dip-coating และ (b) ลักษณะที่ปรากฏ (appearance) ของแคปซูลแป้งเม็ดทุเรียน

โดยทั่วไปแคปซูลเจลาตินที่ผลิตขึ้นมาทางการค้ามีปริมาณความชื้นในช่วง 13-16% (Bowman and Ofner, 2002) และสำหรับแคปซูล HPMC ที่มีปริมาณความชื้นที่ 5% (Forsell et al., 2002) ในขณะที่แคปซูลแบ่งเม็ดทุเรียนทั้งสองสูตรที่เตรียมในงานวิจัยนี้มีความชื้นต่ำอยู่ในช่วง 6.08-6.43 % เมื่อนำแคปซูลแบ่งเม็ดทุเรียนมาทดสอบการละลายในน้ำและในสารละลาย HCl (pH 1.2) ปริมาตร 50 มล. ที่อุณหภูมิ 37 ± 2 °C ภายใน 10 นาทีพบว่าทั้ง แคปซูล DSS และ CMC-DSS ต่างก็ละลายได้บางส่วน (partly dissolved) โดยยังคงหลงเหลือชิ้นส่วน (fragment) โดยแคปซูล DSS และ CMC-DSS จะละลายน้ำได้เท่ากับ 38.89% และ 36.27% ตามลำดับ ในขณะที่มีค่าการละลายในสารละลายกรดของแคปซูล DSS และ CMC-DSS เท่ากับ 34.52% และ 39.59% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแคปซูล DSS จะละลายน้ำได้ดีกว่า และละลายในสารละลายกรดได้น้อยกว่าแคปซูล CMC-DSS ($P < 0.05$)