

รายงานการวิจัย

โครงการวิจัยเรื่อง

การประยุกต์ใช้วัสดุเหลือทิ้งเมล็ดทุเรียนเป็นแหล่งของแป้ง เพื่อผลิตฟิล์มที่ย่อยสลายได้และแคปซูลยาแบบแข็ง

Utilization of durian seed waste as a source of starch
for biodegradable film and pharmaceutical hard capsule formation

คณะผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. วารินทร์ พิมพา

ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร

คณะเกษตรศาสตร์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร

ดร. นิทรา เนื่องจำนงค์

หน่วยวิจัยโรคเขตร้อนมหิดล-อ็อกซ์ฟอร์ด

คณะเวชศาสตร์เขตร้อน มหาวิทยาลัยมหิดล

สนับสนุนโครงการโดยกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยนเรศวร

งบประมาณแผ่นดิน ปี 2553

การประยุกต์ใช้วัสดุเหลือทิ้งเม็ดทุเรียนเป็นแหล่งของแป้ง เพื่อผลิตฟิล์มที่ย่อยสลายได้และแคปซูลยาแบบแข็ง

รองศาสตราจารย์ ดร. วารินทร์ พิมพา¹

ดร. นิทรา เนื่องจำนงค์²

¹ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร

²หน่วยวิจัยโรคเขตร้อนมหิดล-อ็อกซ์ฟอร์ด คณะเวชศาสตร์เขตร้อน มหาวิทยาลัยมหิดล

แป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์และกักพร่องในเวลาเดียวกัน ปัจจุบันมีความพยายามที่จะพัฒนาพอลิเมอร์จากแป้งเพื่ออนุรักษ์แหล่งปิโตรเคมี ลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมและหาแนวทางในการใช้งานให้มากขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการสกัดแยกแป้งจากเม็ดทุเรียนและศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้แป้งเม็ดทุเรียนเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตฟิล์มที่ย่อยสลายได้และแคปซูลยาแบบแข็ง

เม็ดทุเรียนมีองค์ประกอบหลักเป็นแป้งประมาณร้อยละ 56 โดยน้ำหนักแห้ง และมีปริมาณไขมัน โปรตีน ใย และเยื่อใยหยาบในปริมาณต่ำ โดยอาศัยกระบวนการที่แยกแป้งออกจากเม็ดทุเรียนอย่างง่ายในระดับห้องปฏิบัติการ ให้ผลผลิตประมาณร้อยละ 20-30 โดยน้ำหนักเปียก แป้งเม็ดทุเรียนมีปริมาณอะไมโลสร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก เม็ดแป้งมีรูปร่างกลมขนาด 2-4 ไมโครเมตร ให้แป้งสุกที่มีลักษณะขุ่น เหนียว ยืดดี โปร่งแสง และไม่มีสี นอกจากนี้ยังได้ตรวจวัดสมบัติไฮเดรชันและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งเปรียบเทียบกับแป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลังตัดแปลงที่มีจำหน่ายทางการค้า สมบัติไฮเดรชันของแป้งเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แป้งเม็ดทุเรียนมีอุณหภูมิทรานสิชัน (T_0 , T_p and T_c) เท่ากับ 75.49, 82.00 และ 86.77 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และมีค่าเอนทัลปีของการเกิดเจลลิตินเซชัน (ΔH_{gel}) เท่ากับ 9.53 จูล/กรัม เมื่อตรวจวัดด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมตรี ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการใช้แป้งเม็ดทุเรียนเป็นแหล่งใหม่ของแป้งในรูปแบบของตัวดูดซับสูงในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางค์หรือใช้เป็นตัวพาในอุตสาหกรรมอาหารได้

การเกิดฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนเกี่ยวข้องกับกระบวนการเจลลิตินเซชันของเม็ดแป้งเมื่อถูกให้ความร้อนในสถานะที่มีน้ำมากเกินไป วิธีการเตรียมทำได้โดยเทคนิคการหล่อเมื่อใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนที่ได้มีลักษณะใส พื้นผิวเรียบและยืดหยุ่น เมื่อศึกษาผลของกลีเซอรอลพบว่า เมื่อใช้กลีเซอรอลความเข้มข้นสูงขึ้น จะลดความสามารถของฟิล์มในการกักกันความชื้น โดยฟิล์มที่ความเข้มข้นของกลีเซอรอลร้อยละ 30 โดยน้ำหนักเม็ดทุเรียนจะมีค่าการแพร่ผ่านไอน้ำต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 เมื่อเปรียบเทียบ

กับฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง นอกจากนี้ฟิล์มที่มีความเข้มข้นของกลีเซอรอลสูงขึ้นจะมีความแข็งแรงลดลงแต่จะยืดออกได้ดีขึ้น โดยมีค่าการต้านแรงดึงขาดลดลงแต่มีค่าการยืดตัวสูงขึ้น

เพื่อปรับปรุงสมบัติที่สำคัญบางประการของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนให้ดีขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงได้เตรียมฟิล์มคอมโพสิตของแป้งเม็ดทุเรียน โดยการผสมสารละลายแป้งเม็ดทุเรียนกับพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดที่ 2 ได้แก่ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) เจลาติน คาราจีแนน และเพคติน เมื่อเติม CMC ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแป้งเม็ดทุเรียนจะทำให้ฟิล์มมีสมบัติการยืดตัวดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) โดยให้ค่าการยืดตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 27.16 เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนควบคุม แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ CMC เป็นร้อยละ 10 กลับทำให้ฟิล์มมีค่าการยืดตัวลดลงจากร้อยละ 41.94 เป็น 24.09 นั่นคือการใช้ CMC ที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมเท่านั้นจึงจะทำให้ฟิล์มแข็งแรงขึ้นโดยไม่ส่งผลกระทบต่อความยืดหยุ่นของฟิล์ม ถึงแม้ว่าฟิล์มคอมโพสิต 5% CMC-DSS จะมีค่า TS ต่ำกว่าของฟิล์มแป้งข้าวโพดและฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง แต่มีค่า E มากกว่าถึงร้อยละ 70.36 และ 56.22 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามฟิล์ม CMC-DSS มีค่าการแพร่ผ่านไอน้ำ (WVP) เท่ากับ $18.115 \times 10^{-10} \text{ g/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}$ ซึ่งมากกว่าของฟิล์มพีวีซี ($0.765 \times 10^{-10} \text{ g/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}$) ในขณะที่มีค่า TS และ E (0.3890 KgF/mm^2 และ 41.94% , ตามลำดับ) น้อยกว่าของฟิล์มพีวีซี (2.1848 KgF/mm^2 และ 242.16%) เช่นกัน

นอกจากนี้เมื่อนำฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนและฟิล์มคอมโพสิต CMC-DSS ไปใช้เตรียมแคปซูลยาแบบแข็ง เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้แป้งเม็ดทุเรียนทดแทนการใช้เจลาตินที่เป็นวัตถุดิบมาจากผลิตภัณฑ์สัตว์ในการเตรียมแคปซูลในอุตสาหกรรมยา แคปซูลยาที่เตรียมจากแป้งเม็ดทุเรียนเป็นวัตถุดิบหลักขึ้นรูปได้ยากที่อุณหภูมิห้องเมื่อใช้เทคนิคการชุบเคลือบ จึงให้ลักษณะที่ปรากฏของแคปซูลที่ค่อนข้างแตกต่างจากที่มีจำหน่ายทางการค้า แคปซูลที่เตรียมจากแป้งเม็ดทุเรียนเป็นวัตถุดิบหลักละลายได้บ้างในน้ำและในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่พีเอช 1.2 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที โดยยังคงหลงเหลือส่วนของแคปซูลในสารละลาย ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้พอลิเมอร์ชีวภาพที่มาจากการใช้แป้งเม็ดทุเรียนเป็นวัตถุดิบหลักเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับผลิตฟิล์มที่ย่อยสลายได้และแคปซูลยาแบบแข็ง

คำสำคัญ : ทุเรียน เม็ด แป้ง ฟิล์มที่ย่อยสลายได้ แคปซูลยาแบบแข็ง

Utilization of durian seed waste as a source of starch for biodegradable film and pharmaceutical hard capsule formation

Assoc. Prof. Dr. Warin Pimpa¹

Dr. Nitra Nuengchamnong²

¹Department of Agro-Industry, Faculty of Agriculture, Natural Resource and Environment, Naresuan University

²Mahidol-Oxford Tropical Medicine Research Unit, Faculty of Tropical Medicine, Mahidol University

Starch is a natural polymer which possesses many unique properties and some shortcoming simultaneously. Many efforts have been exerted to develop starch-based polymers for conserving the petrochemical resources, reducing environmental impact and searching more applications. In this study, the durian seed starch was extracted and used as a base raw material for production of biodegradable film and pharmaceutical hard capsule.

Durian seed composed principally of starch about 56% by dried weight and low concentration of lipid, protein, ash and crude fiber. The process performed to isolate the starch from durian seed was simple and easy to realize at laboratory scale with an average starch yield of 20-30% of the fresh seed. Durian seed starch (DSS) with 25% amylose content was characterized by rounded granules ranging in size 2 to 4 μm . It formed thick, cohesive, translucent, and colorless pastes. The starch hydration properties and granular morphology were also investigated compared to commercial modified corn starch and cassava starch. The starch hydration properties increased with temperature. The transition temperature (T_0 , T_p and T_c) and enthalpy of gelatinization (ΔH_{gel}) were determined using differential scanning calorimetry (DSC). T_0 , T_p and T_c were 75.49, 82.00 and 86.77, respectively and ΔH_{gel} was 9.53 J/g. As an alternative starch DSS could replace traditional starches because it is also a lower cost option.

The formation of DSS films involves gelatinization of starch granules by heating in excess water. They were prepared by casting with glycerol as plasticizer. The developed DSS films were clear, smooth surfaced, and flexible. The effect of glycerol used as a plasticizer was evaluated.

Higher glycerol content decreased the DSS film's ability to act as a barrier to moisture. At 30% (w/v) glycerol treatments, the significant lower WVP values ($P < 0.05$) for DSS film, compared to cassava film, was observed. Furthermore, increasing the glycerol content of DSS films made them weaker but more stretchable. The tensile strength (TS) decreased and the elongation at break (E) increased as the percentage of glycerol increased.

Using a second biopolymer in the DSS based composite has been studied as a strategy to improve their important properties. The blending with various biopolymers, including carboxymethylcellulose (CMC), gelatin, caragenan and pectin, have been investigated. The best improvement was noted for CMC-DSS composite films. As compared to the DSS control film, it was observed a significant increase ($P < 0.05$) of elongation at break (27.16%) when 5% CMC was added. However, with the increase of the CMC concentration from 5% to 10%, the E reduced from 41.94% to 24.09%. It seems that only CMC at appropriate amount could improve the film strength without significant depressing effect of flexibility. Although the TS value of the 5% CMC-DSS film was lower, the E value was much higher than those of both corn starch and cassava starch films by 70.36 and 56.22%, respectively. However, the water barrier property of the durian seed starch-CMC composite films ($18.115 \times 10^{-10} \text{ g/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}$) was higher than the PVC film ($0.765 \times 10^{-10} \text{ g/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}$). In the cases of tensile strength and elongation properties, the composite films had lower values (0.3890 KgF/mm^2 and 41.94%, respectively) than the PVC film (2.1848 KgF/mm^2 and 242.16%).

The durian seed starch-CMC composite films were also used to develop hard capsules for utilization in the pharmaceutical industry as a substitute for gelatin or animal based products. It was developed by using a simple dip-coating technique. A slightly different in appearance from the commercial capsules was observed, due to the difficult molding of DSS-based capsules at room condition by using dip-coating technique. The dissolution test result indicated that the DSS-based capsules did not dissolve completely within 10 min in 50 mL water at 37°C or in 50 mL HCl (pH 1.2) solution at 37°C , but the small fragments of capsules remained. Thus, the durian seed starch-based biodegradable polymers are attractive to be a new alternative for the production of biodegradable films and hard capsules.

Keywords: durian, seed, starch, biodegradable film, hard capsule

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนสนับสนุนการวิจัยกองบริหารการวิจัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
งบประมาณแผ่นดินปี 2553

งานวิจัยนี้จะสำเร็จลงไม่ได้เลย ถ้าขาดคุณจักรกฤษณ์ พิมพา ผู้อยู่เบื้องหลังของการทำงานเสมอมา

สารบัญเรื่อง

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	1
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	3
กิตติกรรมประกาศ	5
สารบัญเรื่อง	6
สารบัญรูปภาพ	8
สารบัญตาราง	10
บทที่ 1 บทนำ	
- ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	11
- วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	12
- ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	13
บทที่ 2 การทบทวนเอกสารงานวิจัย	
- ทูเรียนและวัสดุเหลือทิ้งจากทูเรียน	14
- फिल्मที่ย่อยสลายได้	15
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
- การเตรียมตัวอย่างและสกัดแยกแบ่งจากเม็ดทูเรียน	18
- การวิเคราะห์สมบัติของแบ่งเม็ดทูเรียน	18
- การเตรียมสารละลายแบ่งจากเม็ดทูเรียนและการขึ้นรูปฟิล์ม	20
- การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม	20
- การเตรียมแคปซูลยาแบบแข็ง	22
- การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	22
บทที่ 4 ผลและอภิปรายผลการทดลอง	
ตอนที่ 1 การสกัดแยกแบ่งจากเม็ดทูเรียนและการศึกษาสมบัติของแบ่งเม็ดทูเรียน	23
- สีและลักษณะที่ปรากฏ	23

- องค์ประกอบทางโภชนา	24
- ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้ง	26
- ความใสของแป้งสุก	27
- ความสามารถในการอุ้มน้ำ	30
- ความจุของการพองตัว	31
- ความหนืด	32
- เจลาตินไนเซชัน	33
ตอนที่ 2 การพัฒนาการเตรียมฟิล์มที่ย่อยสลายได้และแคปซูลยาแบบแข็งจากแป้งเม็ดทุเรียน	34
- ฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน	34
- การแพร่ผ่านไอน้ำ	36
- สมบัติทางกล	41
- โครงสร้างทางจุลภาค	46
- ลักษณะที่ปรากฏ สี และความโปร่งแสง	49
- การละลายได้	53
- แคปซูลยาแบบแข็งจากแป้งเม็ดทุเรียน	55
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	57
บรรณานุกรม	59

สารบัญรูปลูกภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 ลักษณะที่ปรากฏของตัวอย่างเม็ดทุเรียนที่ใช้เพื่อสกัดแยกแป้ง	24
รูปที่ 2 ลักษณะที่ปรากฏและสีของแป้งเม็ดทุเรียน	24
รูปที่ 3 scanning electron micrograph ของแป้งเม็ดทุเรียน	27
รูปที่ 4 สมบัติความใสของแป้งเม็ดทุเรียนสุก	28
รูปที่ 5 สมบัติความใสของแป้งสุกของแป้งเม็ดทุเรียน แป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพด	29
รูปที่ 6 สมบัติความสามารถในการอุ้มน้ำของแป้งเม็ดทุเรียน	30
รูปที่ 7 สมบัติความจุของการพองตัวของแป้งเม็ดทุเรียน	31
รูปที่ 8 สมบัติความหนืดของแป้งสุกของแป้งเม็ดทุเรียน	32
รูปที่ 9 ผลของความเข้มข้นของกลีเซอรอลต่อค่าการแพร่ผ่านไอน้ำของฟิล์มเม็ดทุเรียน ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20-50 โดยน้ำหนักของแป้งเม็ดทุเรียน	38
รูปที่ 10 ผลของความเข้มข้นของกลีเซอรอลต่อสมบัติการต้านทางแรงดึงขาดและการยืดตัวของฟิล์มเม็ดทุเรียนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20-50 โดยน้ำหนักของแป้งเม็ดทุเรียน	43
รูปที่ 11 ไมโครกราฟของพื้นผิวและภาคตัดขวางของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน เมื่อใช้ความเข้มข้นของกลีเซอรอลแตกต่างกัน	47
รูปที่ 12 ไมโครกราฟของพื้นผิวและภาคตัดขวางของ DDS film, 5%CMC-DDS film, corn starch film และcassava starch film	47
รูปที่ 13 ไมโครกราฟของพื้นผิวและภาคตัดขวางของ DDS film, 5% CMC- DDS film และ 10% CMC- DDS film	48
รูปที่ 14 ไมโครกราฟของพื้นผิวและภาคตัดขวางของ durian seed starch (DDS) film, polyvinylchloride (PVC) film, polyethylene (PE) film และ polypropylene (PP) film	48
รูปที่ 15 ไมโครกราฟของพื้นผิวและภาคตัดขวางของ CMC- DDS film, gelatin-DSS film, caragenan-DSS film และ pectin-DSS film ที่ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ชีวภาพ ที่เติมร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแป้งเม็ดทุเรียน	49
รูปที่ 16 ลักษณะที่ปรากฏของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนที่มีกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 20-50 โดยน้ำหนักแป้งเม็ดทุเรียน	52

- รูปที่ 17 ลักษณะที่ปรากฏของฟิล์มคอมโพไซด์แป้งเม็ดทุเรียนที่ผสมพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดที่ 2 52
- รูปที่ 18 ลักษณะที่ปรากฏของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มฟิล์มพีวีซี 52
- รูปที่ 19 ผลของความเข้มข้นของกลีเซอรอลต่อสมบัติการละลายได้ของฟิล์มเม็ดทุเรียน
ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20-50 โดยน้ำหนักของแป้งเม็ดทุเรียน 53
- รูปที่ 20 วิธีการเตรียมแคปซูลอย่างง่ายด้วยเทคนิค dip-coating และลักษณะที่ปรากฏ
ของแคปซูลแป้งเม็ดทุเรียน 55

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 สถิติการผลิตทุเรียนของไทยในปี 2546 – 2552	15
ตารางที่ 2 สถิติปริมาณและมูลค่าการส่งออกทุเรียนสดแช่เย็น แช่แข็ง และผลิตภัณฑ์แปรรูป	15
ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางโภชนาและสมบัติของแป้งเม็ดทุเรียน แป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลัง	25
ตารางที่ 4 ค่าการแพร่ผ่านไอน้ำของฟิล์มคอมโพสิตของแป้งเม็ดทุเรียน และฟิล์มพีวีซี	38
ตารางที่ 5 ค่าการแพร่ผ่านไอน้ำของฟิล์มคอมโพสิตของแป้งเม็ดทุเรียน	39
ตารางที่ 6 ค่าการแพร่ผ่านไอน้ำของฟิล์มคอมโพสิตของแป้งเม็ดทุเรียน เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งข้าวโพดและฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง	40
ตารางที่ 7 ค่าการต้านแรงดึงขาดและการยืดตัวของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งข้าวโพดและฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง	43
ตารางที่ 8 ค่าการต้านแรงดึงขาดและการยืดตัวของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพีวีซี	44
ตารางที่ 9 ค่าการต้านแรงดึงขาดและการยืดตัวของฟิล์มคอมโพสิตของแป้งเม็ดทุเรียน	45
ตารางที่ 10 ความหนา ความโปร่งแสง และพารามิเตอร์สีของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน ฟิล์มคอมโพสิต แป้งเม็ดทุเรียน ฟิล์มพอลิเมอร์สังเคราะห์ ฟิล์มแป้งข้าวโพด และฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง	51
ตารางที่ 11 สมบัติการละลายได้ของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน ฟิล์มคอมโพสิตแป้งเม็ดทุเรียน ฟิล์มแป้งข้าวโพด และฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง	54

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

จุดมุ่งหมายประการหนึ่งสำหรับงานทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพคือ การใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหรือของเสียจากอุตสาหกรรมเกษตร ซึ่งนอกจากจะเป็นการเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือทิ้ง ลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะของแข็งแล้ว ยังเป็นการลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการสะสมของวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้ด้วย โดยเฉพาะลดปัญหาการเกิดแก๊สที่เกิดจากกระบวนการหมักตามธรรมชาติของสารอินทรีย์ หรือการกำจัดโดยการเผาทำลาย ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อปัญหาโลกร้อนที่กำลังเป็นที่วิตกกังวลของประชากรทั่วโลก

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการใช้ประโยชน์จากเมล็ดทุเรียน ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการแปรรูปทุเรียน เพื่อใช้เป็นแหล่งของแป้ง (starch) สำหรับเป็นวัตถุดิบในการผลิตฟิล์มที่ย่อยสลายได้และแคปซูลยาแบบแข็ง สาเหตุที่เลือกใช้ประโยชน์จากเมล็ดทุเรียน เนื่องจากเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีจำนวนมาก โดยเฉพาะในช่วงที่มีผลผลิตทุเรียนออกสู่ตลาดมากประมาณเดือนพฤษภาคม-กันยายน ซึ่งสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงพาณิชย์รายงานว่า ไทยเป็นผู้ผลิตรายใหญ่ของโลก (ปี 2546-2552) เฉลี่ยปีละ 700,129 ตัน โดยมีการบริโภคทั้งในรูปของผลสดและในรูปของผลิตภัณฑ์แปรรูปหลายชนิดทั้งบริโภคภายในประเทศและการส่งออก อุตสาหกรรมการแปรรูปทุเรียนจะก่อให้เกิดวัสดุเหลือทิ้งเปลือกทุเรียนและเมล็ดทุเรียนซึ่งจะถูกกำจัดทิ้งเป็นขยะ สำหรับปริมาณเมล็ดทุเรียนมีมากถึงร้อยละ 20-25 โดยน้ำหนัก แต่ในทางปฏิบัติกลับไม่มีการใช้ประโยชน์จากเมล็ดทุเรียนเลย ถึงแม้ว่าเมื่อเทียบกับเปลือกทุเรียนแล้ว เมล็ดทุเรียนจะเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีปริมาณน้อยกว่ามาก แต่เมื่อทิศทางการนำทรัพยากรกลับมาใช้ใหม่ (resource recovery) เป็นที่สนใจกันอย่างมากในปัจจุบัน การนำเมล็ดทุเรียนมาใช้ประโยชน์จึงเป็นสิ่งที่ควรพิจารณามากกว่าการกำจัดทิ้งเป็นขยะ แต่จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพัฒนากระบวนการที่จะสามารถใช้ประโยชน์จากเมล็ดทุเรียนโดยไม่จำเป็นต้องผ่านขั้นตอนที่ยุงยากมากหรือผ่านการทำให้บริสุทธิ์ (purification) สูง เพื่อลดต้นทุนการผลิตให้ต่ำ จนทำให้มีความเป็นไปได้เพิ่มขึ้นในการพัฒนาสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ได้

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน โดยในส่วนแรกของงานวิจัย จะทำการสกัดแยกแป้งด้วยกระบวนการง่าย ๆ จากเมล็ดทุเรียนและศึกษาสมบัติทางกายภาพ-เคมี (physicochemical property) สมบัติรีโอโลยี (reological property) และลักษณะสัณฐานทางวิทยา (morphology) ของแป้ง โดยเปรียบเทียบกับสมบัติ

ของแป้งดัดแปลงที่มักนิยมใช้ทางอาหาร 2 ชนิดคือ แป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลัง และงานวิจัยในส่วนที่สอง จะนำแป้งที่สกัดได้มาประยุกต์ใช้งานสำหรับเป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ 2 ชนิด คือ ฟิล์มที่ย่อยสลายได้ (biodegradable films) และแคปซูลยาแบบแข็ง (pharmaceutical hard capsules)

ฟิล์มที่ย่อยสลายได้เป็นชนิดหนึ่งของบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจากพอลิเมอร์ตามธรรมชาติ จึงสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ปัจจุบันเมื่อประชากรทั่วโลกหันมาใส่ใจกับปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ความสำคัญของบรรจุภัณฑ์ประเภทนี้จึงมีเพิ่มขึ้นสำหรับใช้ทดแทนฟิล์มพลาสติกที่ผลิตจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ซึ่งไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และก่อให้เกิดการสะสมปริมาณมากในแต่ละปี มีรายงานว่าประมาณร้อยละ 30 ของขยะบรรจุภัณฑ์จะมีบรรจุภัณฑ์ที่ทำมาจากพลาสติกมากถึงร้อยละ 13 (Han, 2001) กระบวนการเผาให้เป็นเถ้า (incineration) เป็นวิธีการที่นิยมใช้ในการกำจัดพอลิโอเลฟิน (polyolefins) แต่ก็ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณมาก ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่จะก่อปัญหาโลกร้อน

สำหรับแคปซูลยาเป็นอีกรูปแบบหนึ่งของฟิล์มที่ย่อยสลายได้ที่มีลักษณะแข็ง (hard) โดยทั่วไปแล้วแคปซูลยาที่ใช้กันมักผลิตมาโปรตีนเจลาติน ถึงแม้จะมีรายงานว่าฟิล์มที่มาจากโปรตีน (protein-based films) จะมีสมบัติทางกล (mechanical properties) ที่เหนือกว่าฟิล์มที่มาจากพอลิแซคคาไรด์ (polysaccharide-based films) (Jongjareorak et al., 2006) แต่ฟิล์มพอลิแซคคาไรด์ก็มีสมบัติการกีดกันออกซิเจน (oxygen barrier properties) ที่ดีเหนือกว่าฟิล์มโปรตีน นอกจากนี้ผู้บริโภคที่เป็นมังสวิรัติที่เคร่งครัดไม่ต้องการบริโภคผลิตภัณฑ์ที่มาจากเนื้อสัตว์ อาจจะชื่นชอบแคปซูลยาที่ผลิตจากพอลิแซคคาไรด์มากกว่า อีกทั้งปัจจุบันมีโรคหลายชนิดจากสัตว์ที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ เช่น โรควัวบ้า (mad cow disease) จึงก่อให้เกิดความกังวลว่าการบริโภคผลิตภัณฑ์จากสัตว์อาจก่อให้เกิดการติดต่อของโรสดังกล่าว

ความสำเร็จที่ได้จากการใช้แป้งจากเมล็ดทุเรียนมาผลิตเป็นฟิล์มที่ย่อยสลายได้และแคปซูลยาแบบแข็ง นอกจากจะเป็นการเพิ่มมูลค่าเมล็ดทุเรียน ลดการสะสมของขยะของแข็ง ยังได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นอีกหนึ่งทางเลือกของผู้บริโภค นอกจากนี้ยังเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญที่ก่อให้เกิดการสร้างนวัตกรรมภายในประเทศ ความรู้ความเข้าใจที่ได้จะนำไปสู่การประยุกต์ใช้วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเกษตรอื่น ๆ สำหรับผลิตฟิล์มที่ย่อยสลายได้และแคปซูลยาแบบแข็งต่อไป

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. สกัดแยกแป้งจากเมล็ดทุเรียนและศึกษาสมบัติของแป้งเมล็ดทุเรียน
2. ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้แป้งเมล็ดทุเรียนเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตฟิล์มที่ย่อยสลายได้และแคปซูลยาแบบแข็ง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นงานวิจัยที่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มทางเศรษฐกิจของเม็ดทุเรียนที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางอุตสาหกรรมการแปรรูปทุเรียนจำนวนมาก ซึ่งปัจจุบันยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์ มักทิ้งให้เป็นขยะของแข็ง โดยใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตฟิล์มที่ย่อยสลายได้สำหรับเป็นบรรจุภัณฑ์ทางอาหารและแคปซูลยาแบบแข็ง จึงจัดเป็นการเสริมสร้างการพัฒนาอย่างยั่งยืน ให้มีทางเลือกของการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งจากเม็ดทุเรียนเพิ่มขึ้น
2. ลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการสะสมของวัสดุเหลือทิ้งทางอุตสาหกรรมเกษตร โดยเฉพาะลดปัญหาการเกิดแก๊สที่เกิดจากกระบวนการหมักตามธรรมชาติของสารอินทรีย์ หรือการกำจัดโดยการเผาทำลาย ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อปัญหาโลกร้อนที่กำลังเป็นที่ห่วงใยของประชากรทั่วโลก
3. เนื่องจากสามารถสกัดแยกแ่่งจากเม็ดทุเรียนได้โดยใช้กระบวนการอย่างง่าย ใช้ต้นทุนต่ำ จึงเพิ่มความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้แ่่งจากเม็ดทุเรียนในทางอุตสาหกรรมอาหารและไม่ใช่อาหารได้ จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกของการใช้แ่่งเม็ดทุเรียนทดแทนการใช้แ่่งที่มีจำหน่ายทางการค้า ซึ่งลดต้นทุนของการผลิต เพิ่มโอกาสในการแข่งขันในเรื่องราคาของสินค้าในตลาดได้
4. เป็นการพัฒนากระบวนการผลิตฟิล์มที่ย่อยสลายได้และแคปซูลยาแบบแข็งด้วยวัตถุดิบหลักคือแ่่งจากเม็ดทุเรียน และเป็นแนวทางสำหรับการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร/อุตสาหกรรมเกษตรที่มีองค์ประกอบคล้ายคลึงกันชนิดอื่น

บทที่ 2

การทบทวนเอกสารงานวิจัย

ทุเรียนและวัสดุเหลือทิ้งจากทุเรียน (Durian and durian wastes)

ทุเรียน (Durian) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Durio zibethinus* เป็นผลไม้เขตร้อนที่มีต้นกำเนิดอยู่ในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เป็นผลไม้ที่มีคุณค่าสูงและเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคของคนเอเชียจนได้รับการขนานนามว่าเป็น “ราชาแห่งผลไม้ (King of the fruit)” เนื่องจากมีกลิ่นและรสชาติที่เป็นเอกลักษณ์ และเป็นผลไม้จำพวก climacteric fruit ในตระกูล Bombacaceae ที่เจริญเติบโตได้ดีในสภาวะอากาศร้อนชื้นในเขตเส้นศูนย์สูตร ดังนั้นทุเรียนเป็นผลไม้ชนิดหนึ่งที่ปลูกกันมากในประเทศไทยเช่นกัน ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตรายใหญ่ของโลก (ปี 2546-2552) เฉลี่ยปีละ 700,129 ตัน (ตารางที่ 1) แหล่งผลิตที่สำคัญจะเป็นภาคตะวันออกได้แก่ จันทบุรี ระยอง และตราด ภาคใต้ได้แก่ ชุมพร สุราษฎร์ธานี และนครศรีธรรมราช และเป็นผลไม้ส่งออกมูลค่าสูงประเภทหนึ่ง ทั้งในรูปของทุเรียนสดแช่เย็น และผลิตภัณฑ์แปรรูป (ตารางที่ 2) ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี

ทุเรียนมีรูปร่างค่อนข้างกลมและมีน้ำหนักโดยเฉลี่ยประมาณ 2.0-4.5 กิโลกรัมขึ้นกับชนิดของทุเรียน โดยถูกห่อหุ้มด้วยเปลือกที่มีหนามแหลมที่ยากแก่การปอก แต่มีส่วนเนื้อประมาณร้อยละ 30 เท่านั้นที่เป็นส่วนที่รับประทานได้ ส่วนที่เหลือเป็นเมล็ดและเปลือกจะถูกทิ้งเป็นของเสีย (wastes) (Amiza et al., 2007) อุตสาหกรรมการแปรรูปทุเรียนจะก่อให้เกิดของเสียทั้งเปลือกทุเรียนและเมล็ดทุเรียนจำนวนมาก สำหรับปริมาณเมล็ดทุเรียนมีมากถึงร้อยละ 20-25 โดยน้ำหนัก ถึงแม้ว่าเมื่อเทียบกับเปลือกทุเรียนแล้ว เมล็ดทุเรียนจะเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีปริมาณน้อยกว่ามาก แต่เมื่อทิศทางของการนำทรัพยากรกลับมาใช้ใหม่ (resource recovery) เป็นที่สนใจกันอย่างมากในปัจจุบัน การนำเมล็ดทุเรียนมาใช้ประโยชน์จึงเป็นสิ่งที่ควรพิจารณามากกว่าการกำจัดทิ้งเป็นขยะ แต่ในทางปฏิบัติกลับไม่มีการใช้ประโยชน์จากเมล็ดทุเรียนเลย ทั้งที่มีรายงานการวิจัยว่าเมล็ดทุเรียนมีคุณค่าทางโภชนาการสูงและมีปริมาณเยื่อใยสูง และแป้งจากเมล็ดทุเรียน (durian seed flour) สามารถใช้ผสมในอาหารหลายชนิด เช่น เค้ก คุกกี้ ชูป เป็นต้น โดยใช้แทนที่แป้งสาลีหรือใช้เป็น thickening agent (Amiza et al., 2004) ได้ ดังนั้นการเพิ่มมูลค่าของเมล็ดทุเรียนนอกจากจะเป็นการลดการสะสมของปริมาณขยะ ลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะ ยังเป็นการลดต้นทุนการผลิตทุเรียนแปรรูปด้วย อย่างไรก็ตามจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพัฒนากระบวนการที่จะสามารถใช้ประโยชน์จากจากเมล็ดทุเรียนโดยไม่จำเป็นต้องผ่านขั้นตอนที่ยุ่งยากมากหรือผ่านการทำให้บริสุทธิ์ (purification) สูง เพื่อลดต้นทุนการผลิตให้ต่ำ จนทำให้มีความเป็นไปได้เพิ่มขึ้นในการพัฒนาสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ได้

ตารางที่ 1 สถิติการผลิตทุเรียนของไทยในปี 2546 - 2552

ปี	ปริมาณ (ตัน)
2546	736,651
2547	829,197
2548	649,789
2549	569,057
2550	752,965
2551*	679,142
2552*	684,104

ที่มา : สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร

ตารางที่ 2 สถิติปริมาณและมูลค่าการส่งออกทุเรียนสดแช่เย็น แช่แข็ง และผลิตภัณฑ์แปรรูป ปริมาณ : ตัน
มูลค่า: ล้านบาท

ประเภท	2550		2551		2552(ม.ค.-มิ.ย)		อัตราการเปลี่ยนแปลง(%)			
	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า	D51/50		D52/51 (มค.-มิ.ย.)	
							ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า
ทุเรียนสดแช่เย็น	157,407	2,567	203,127	3,132	156,612	2,463	29	22	16	23
ทุเรียนสดแช่แข็ง	12,909	421	16,311	417	8,911	198	26	-1	12	2
แปรรูปอบแห้ง	682	77	524	123	165	56	-23	60	6	5.3
แปรรูปกวน	9,223	415	2,598	153	1,411	82	-72	-63	16	31
รวม	180,221	3,480	222,559	3,824	167,099	2,799	23	10	16	21

ที่มา : ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์

ฟิล์มที่ย่อยสลายได้ (Biodegradable films)

บรรจุภัณฑ์ทำหน้าที่ป้องกันอาหารเสื่อมเสียจากปัจจัยทางกายภาพ เคมีและชีววิทยา เช่น ความชื้น แสง แก๊ส กลิ่น จุลินทรีย์ หนูและแมลง โดยยังคงรักษาคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ และให้ข้อมูลที่สำคัญต่อผู้บริโภค เช่น วันหมดอายุ แต่บรรจุภัณฑ์ที่ใช้อยู่ทำให้เกิดวัสดุเหลือทิ้งประเภทของแข็งถึงประมาณร้อยละ 30 โดย

น้ำหนักของขยะทั้งหมด คิดเป็นสองในสามของปริมาตรในถังขยะเนื่องจากความเหอะเหอะของบรรจุภัณฑ์ และในร้อยละ 30 ของวัสดุเหลือทิ้งพวกบรรจุภัณฑ์เหล่านี้ ร้อยละ 13 เป็นพวกบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่มีอายุยาวนาน ฉื่อย และต้านทานการย่อยสลายของจุลินทรีย์ จึงไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ (Krochta and DeMulder-Johnson, 1997; Mali et al., 2002) บรรจุภัณฑ์จากพอลิเมอร์สังเคราะห์เหล่านี้มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางทางอาหาร เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ ได้แก่ มีความแข็งแรงสูง ยืดหยุ่นได้ดี มีสมบัติการกีดกันแก๊สที่ดี ราคาถูก และต้านทานน้ำ (Guilbert, 1986) ปัจจุบันประมาณมีการผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติกในแต่ละปีมากกว่า 150 ล้านตันทั่วโลก การใช้งานเพิ่มขึ้นของบรรจุภัณฑ์พลาสติก (Hue and Gao, 2008) ส่งผลให้มีการใช้น้ำมันเพิ่มขึ้นเนื่องจากผลิตภัณฑ์เหล่านี้มาจากน้ำมันดิบ นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์พลาสติกยังก่อปัญหารุนแรงทางมลภาวะสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม่สามารถย่อยสลายได้ในสภาวะสิ่งแวดล้อมปกติ โดยทั่วไปการกำจัดขยะพลาสติกมักใช้วิธีการฝังกลบ (landfills) ซึ่งต้องใช้พื้นที่ปริมาณมาก

ดังนั้นปัจจุบันเมื่อผู้บริโภคมีความใส่ใจเรื่องของสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น การเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ จึงนับเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจอย่างมาก โดยทดแทนการใช้บรรจุภัณฑ์สังเคราะห์บางส่วน บรรจุภัณฑ์เหล่านี้สามารถย่อยสลายได้ก่อนที่จะถูกขนย้ายไปสู่แหล่งฝังกลบ (landfill sites) จึงทำให้ปริมาณวัสดุเหลือทิ้งที่เป็นของแข็งทั้งหมดลดลง ดังนั้นจึงนำไปสู่การค้นคว้าวิจัยเพื่อพัฒนาบรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ในธรรมชาติอย่างกว้างขวางในช่วงไม่กี่ปีมานี้ (Guilbert, 1986; Kester and Fennema, 1986; Krochta et al., 1994; Krochta and De Mulder-Johnson, 1997; Debeaufort et al., 1998; Sanchez et al., 1998; Perez-Gago et al., 1999; Ayhllon-Meixueiro et al., 2000) โดยเฉพาะการใช้พอลิแซคคาไรด์ เช่น เซลลูโลส ไคโตแซน (chitosan) และแป้ง โดยเฉพาะแป้งได้รับความสนใจอย่างมาก เพราะมีสมบัติ เช่น การเกิดเจล การทำให้ข้นเหนียว (thickening) การยึดเหนียวและยึดติด (bonding and adhesion) (Pavlath and Robertson, 1999; Tanada-Palmu and Grosso, 2003) ซึ่งทำให้เหมาะกับการเป็นวัสดุค้ำในการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ชีวภาพ Soares et al., 2005)

โดยทั่วไปการประยุกต์ใช้ฟิล์มที่ย่อยสลายได้มีอยู่ 2 แบบ คือใช้ทดแทนบรรจุภัณฑ์พลาสติกสำหรับอาหาร และใช้เป็นฟิล์มหรือสารเคลือบห่อหุ้มอาหาร โดยมีข้อดีคือ 1) เป็นสารที่บริโภคได้ 2) โดยมากมักมีราคาต่ำ 3) ลดปริมาณของเสียจากขยะบรรจุภัณฑ์ 4) ช่วยปรับปรุงสมบัติทางกล และทางโภชนะของอาหารให้ดีขึ้น 5) ปกป้องอาหารทั้งหมดหรือสัดส่วนเล็ก ๆ ของอาหารจากการสัมผัสโดยตรงกับสิ่งแวดล้อม และ 6) สามารถใช้งานกับอาหารที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียว (heterogeneous food) โดยทำหน้าที่เป็นตัวกีดกัน (barrier) ระหว่างองค์ประกอบในอาหาร (Guilbert, 1986) นอกจากนี้ฟิล์มที่ย่อยสลายได้ยังสามารถบรรจุสารเติมแต่งทางอาหาร เช่น สารต้านการเกิดออกซิเดชันของลิปิด สารต้านจุลินทรีย์และสารแต่งกลิ่นรส ทำหน้าที่เป็นตัวกีดกันที่จำเพาะ (selective barrier) เพื่อ

ป้องกันการเคลื่อนย้ายของไอแก๊สและตัวถูกละลายภายในของอาหารที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และยังสามารถบริโภคบรรจุภัณฑ์พร้อมอาหารได้ด้วย (Cherian et al., 1995)

การเตรียมฟิล์มที่ย่อยสลายได้ต้องการองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ชนิดคือ สารพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบหลักในการเกิดฟิล์ม ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของฟิล์ม (structural support) ซึ่งอาจเป็นลิวติน พอลิแซ็กคาไรด์ โปรตีน หรือองค์ประกอบผสมของพอลิเมอร์เหล่านี้ก็ได้ ส่วนอีกองค์ประกอบคือ พลาสติไซเซอร์ (plasticizer) ซึ่งเป็นสารประกอบพอลิโออล (polyol) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ช่วยลดความเปราะและเพิ่มความยืดหยุ่นของฟิล์ม เนื่องจากพลาสติไซเซอร์จะไปลดแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งพลาสติไซเซอร์จะต้องรวมเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ และจะต้องละลายได้ในตัวทำละลายเดียวกัน (Banker, 1966) สูตรในการเตรียมฟิล์มมีอิทธิพลโดยตรงต่อธรรมชาติและสมบัติของฟิล์ม (Krester and Fennema, 1986) โดยที่รูปร่าง (shape) ของโมเลกุลพอลิเมอร์เป็นตัวกำหนดการยึดเหนี่ยวหรือไขว้กัน (interlace) ของชิ้นส่วนโมเลกุล (molecular segments) และสมบัติทางกายภาพของฟิล์ม ในขณะที่ลำดับของโซ่ (chain order) จะมีอิทธิพลต่อความไม่ยืดหยุ่น (rigidity) ความกระด้าง (toughness) การแพร่ผ่าน (permeability) ความยืดหยุ่น (flexibility) และความเปราะ (brittleness) ของฟิล์ม

ฟิล์มที่เตรียมมาจากแป้งและอนุพันธ์ของแป้ง (starch derivative) มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสามารถขึ้นรูปได้ดี และมีสมบัติทั้งการกีดกันออกซิเจนสูงและสมบัติทางกลที่ดี (Lawton, 1996; Lee and Rhim, 2000; Mali et al., 2002) ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ฟิล์มที่ผลิตจากแป้งเพื่อใช้เคลือบเมล็ดยา ลูกกวาด และผลไม้แห้ง ใช้ฟิล์มที่ผลิตจากอนุพันธ์ของเซลลูโลส เช่น HPMC, MC และ HPC สำหรับเคลือบสารเสริมอาหารและเมล็ดยา และใช้แป้งที่มาจากพืช (vegetable starch) เตรียมเป็นแคปซูลยา ซึ่งมีสมบัติทางกายภาพและทางกล เช่นเดียวกับผลิตภัณฑ์สังเคราะห์จากเจลลาติน (Bae et al., 2008)

โดยทั่วไปสมบัติการแพร่ผ่านของฟิล์ม (permeability) และความแข็งแรง (strength) ขึ้นกับความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์ (McHugh and Krochta, 1994a) เมื่อใช้ปริมาณของพลาสติไซเซอร์เพิ่มขึ้นจะเพิ่มความสามารถในการแพร่ผ่าน และความสามารถในการยืด (extendibility) แต่ลดความแข็งแรงของฟิล์ม (McHugh et al., 1994; McHugh and Krochta, 1994b) พลาสติไซเซอร์จะทำให้แรงระหว่างโมเลกุลที่ทำหน้าที่ระหว่างโซ่พอลิเมอร์ลดลง ดังนั้นจึงทำให้ฟิล์มยืดหยุ่นได้มากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันก็จะทำให้มีสมบัติการกีดกันแก๊สและความชื้นลดลง เนื่องจากการเพิ่มการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนของโซ่พอลิเมอร์ นอกจากนั้นพลาสติไซเซอร์ ซึ่งมักเป็นสารประกอบพอลิโออล (polyol) เช่นกลีเซอรอล (glycerol) มีสมบัติไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) จึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความไวต่อน้ำ (water sensitivity) ของพอลิเมอร์ มีรายงานว่าฟิล์มที่เตรียมมาจากแป้งที่ใช้น้ำเป็นพลาสติไซเซอร์จะมีสมบัติการกีดกันออกซิเจนที่ดีที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิห้องเช่นเดียวกับฟิล์ม EVOH (Forssell et al., 2002)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมตัวอย่างและสกัดแยกแป้งจากเมล็ดทุเรียน

งานวิจัยจัดซื้อเมล็ดทุเรียนจากโรงงานแปรรูปในเขตจังหวัดในภาคตะวันออก หลังจากขนส่งมาที่ห้องปฏิบัติการ มาปอกเอาเม็ดออก จากนั้นนำเม็ดมาล้างทำความสะอาดภายนอกอย่างรวดเร็วด้วยน้ำกลั่น ปอกเปลือกทั้งชั้นนอนและลอกเยื่อหุ้มชั้นในออก และนำมาผ่านกระบวนการสกัดแยกแป้ง โดยดัดแปลงมาจากวิธีการของ Bobio et al. (1978) เพื่อให้เหมาะสมกับตัวอย่างเมล็ดทุเรียน โดยนำเมล็ดทุเรียนที่ปอกเปลือกออกแล้วมาปั่นผสมกับสารละลาย 0.5% NaHSO₃ ในสัดส่วน 1:1 โดยน้ำหนักเป็นเวลา 2 นาที ของเหลวแขวนลอย (slurry) ที่ได้จะนำมาแยกเยื่อใยที่ไม่ละลายน้ำที่เป็นองค์ประกอบในเมล็ดทุเรียนออกโดยบีบผ่านผ้าขาวบาง นำของเหลวสีขาวนมที่ได้มาวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C เพื่อให้เกิดการแยกชั้นของเหลวออกจากของแข็ง กรองของแข็งออกโดยวิธีการ decantation ล้างด้วยน้ำกลั่นและ 80% เอทานอล ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งของแข็งที่ได้มีค่าความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 13 โดยน้ำหนัก หลังจากทำให้แห้งแล้วเก็บไว้ในถุงพลาสติกที่ปิดสนิทจนกว่าจะนำมาใช้งานต่อไป

การวิเคราะห์สมบัติของแป้งเมล็ดทุเรียน

1. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (chemical analysis) ปริมาณความชื้น (moisture content) วิเคราะห์โดยหาน้ำหนักที่สูญเสียน้ำ (weight loss) โดยใช้แป้งตัวอย่าง 2 กรัม นำมาอบที่อุณหภูมิ 100 °C จนได้น้ำหนักคงที่ (Amiza et al., 2007) ปริมาณเถ้าทั้งหมด (total ash content) วิเคราะห์ตามวิธีการของ AOAC Official Method 923.03 (AOAC, 1990) ปริมาณโปรตีน และไขมัน วิเคราะห์ตามวิธีการของ AACC method 46-13 และ 30-25 ตามลำดับ (AACC, 1983)
2. สี (color) วิเคราะห์โดยใช้ Hunter Lab colorimeter รุ่น DP 9000 และใช้ standard plate no C2-38460 ที่มีค่า Y_{CIE} 83.21 X_{CIE} 81.26 และ Z_{CIE} 98.77 สำหรับ calibration เครื่องมือ บันทึกผลด้วยค่าพารามิเตอร์สี (color parameter) เป็น L* (degree of the lightness), a* (greenness/redness) และ b* (blueness/yellowness) คำนวณและรายงานผลด้วยค่า Hue angle ($H^\circ = \tan^{-1} (b^*/a^*)$) และ Chroma ($C = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$)

3. ปริมาณอะไมโลส (amylase content) วิเคราะห์โดยใช้ colorimetric method ตามวิธีการของ Juliano (1971) โดยใช้สารละลายมาตรฐานของอะไมโลสของมันฝรั่ง (potato amylase, type III) ในการเตรียมกราฟมาตรฐาน และอ่านค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร
4. ความหนืด (viscosity) วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA, model 3D; Newport Scientific Pty., New South Wales, Australia) โดยใช้แป้ง 3 กรัม (ความชื้น 14%) ในน้ำ 25 กรัม เป็นสารมาตรฐาน การวิเคราะห์ความหนืดจะให้ความร้อนกับสารละลายแป้งจนถึงอุณหภูมิ 95°C จากนั้นจึงทำให้เย็นอุณหภูมิ 25°C ในสภาวะที่อุณหภูมิห้อง และรายงานผลในรูปของ peak time (°C), pasting temperature (°C), peak viscosity, holding strength และ viscosity after holding at 95°C และ final viscosity at the end of the test (RVU) และคำนวณหาค่า set back และ breakdown โดยใช้ RVA software version 2.1
5. มอร์ฟอโลยีของเม็ดแป้ง (starch granular morphology) วิเคราะห์โดยใช้เทคนิค scanning electron microscope (SEM) ด้วยเครื่อง LEO/1455 Vp โดยเคลือบด้วยทองคำที่มีความหนา 50 นาโนเมตร และตรวจวัดในสภาวะ acceleration voltage 10 kV
6. เจลาติไนเซชัน (Gelatinization) วิเคราะห์โดยใช้เทคนิค DSC (differential scanning calorimeter) ด้วยเครื่อง PERKIN ELMER DSC7 ตามวิธีของ Kim (1995) และรายงานผลในรูปของ T_0 = onset temperature, T_p = peak temperature, T_c = conclusion temperature, R = gelatinization range $2(T_p - T_0)$, ΔH_{gel} = enthalpy of gelatinization (dw, based on starch weight), PHI = peak height index $\Delta H_{gel} / (T_p - T_0)$
7. ความเสถียรและความโปร่งใส (stability and clarity) วิเคราะห์ตามวิธีของ Sanchez-Hernandez et al. (2002) โดยละลายแป้ง 5 กรัมในน้ำ 5 มล. ในหลอดทดลองที่มีฝาปิด ให้ความร้อนในอ่างน้ำเดือด 60 นาที โดยเขย่าขวดทุก 5 นาที หลังจากทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง (15 นาที) นำไปวัด % Transmittance (%T) ที่ 650 นาโนเมตร จากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ($30 \pm 2^\circ\text{C}$) และที่ 4°C และนำมาตรวจวัดค่า %T ที่เวลา 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง
8. ประสิทธิภาพในการอุ้มน้ำ (water retention capacity) วิเคราะห์ตามวิธีการของ Bryant and Hamaker (1997) โดยเติมน้ำลงในแป้งที่ซึ่งน้ำหนักที่แน่นอนพร้อมหลอดเซ็นตริฟิวจ์ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่ 60, 70, 80 และ 90°C เป็นเวลา 15 นาที โดยเขย่าทุก 5 นาที จากนั้นจึงนำไปปั่นเหวี่ยงที่ $1000 \times g$ เป็นเวลา 15 นาที เทน้ำใสออกและตั้งหลอดให้ทำมุม 45 องศาทิ้งไว้เพื่อกำจัดน้ำที่หลงเหลืออีก 10 นาที จากนั้นชั่งน้ำหนักหลอดอีกครั้ง น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจะถูกใช้เพื่อคำนวณหาค่าประสิทธิภาพในการอุ้มน้ำ

9. การพองตัว (swelling capacity) วิเคราะห์ตามวิธีการของ Sanchez-Hernandez et al. (2002) โดยใช้สารละลายแป้งที่ความเข้มข้น 1% (w/w) ในขวดรูปชมพู่ (flask) ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 80 และ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที โดยเขย่าทุก 5 นาที จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ 5000 x g เป็นเวลา 10 นาที รินน้ำใสออกและนำไปอบแห้งจนตะกอนที่ได้มีน้ำหนักคงที่ ทำให้เย็น ชั่งน้ำหนักตะกอน แล้วนำไปคำนวณหาค่าการพองตัว

การเตรียมสารละลายแป้งจากเม็ดทุเรียนและการขึ้นรูปฟิล์ม

สารละลายแป้งที่ใช้สำหรับการเตรียมฟิล์มสามารถเตรียมได้โดยดัดแปลงจากวิธีการเตรียมของ Bae et al. (2008) โดยใช้แป้งเม็ดทุเรียนที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ผสมกับกลีเซอรอลซึ่งใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ (ในช่วงความเข้มข้นร้อยละ 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของแป้งเม็ดทุเรียน) ในสารละลาย 10% citric acid และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 ± 5 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงในอ่างน้ำร้อน (water bath) นำมาทำให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง (25 ± 2 °C, $50 \pm 5\%$ RH) จากนั้นจึงนำมาขึ้นรูปตามวิธีการของ Pimpa and Pongkhongkaew (2008) หลังจากลอกฟิล์มออกแล้วนำมาเก็บที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่คงที่เป็นเวลา 48 ชั่วโมงก่อนนำไปวิเคราะห์หาสมบัติต่อไป

สำหรับการศึกษาเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของฟิล์มโดยการเตรียมเป็นฟิล์มคอมโพสิต (composite film) ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โดยใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (carboxymethylcellulose; CMC) เจลาติน (gelatin) คาราจีแนน (caragenan) และเพคติน (pectin) ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนักของแป้งเม็ดทุเรียน

การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม

1. ความหนาของฟิล์ม (Film thickness) วิเคราะห์ได้โดยใช้ caliper micrometer โดยเลือกวัดที่ 10 ตำแหน่งของฟิล์มรอบ ๆ แผ่นฟิล์ม
2. สี (color) ของฟิล์มรายงานผลด้วยค่าพารามิเตอร์สี L-a-b scale โดยตรวจวัดด้วยเครื่อง Hunter colorimeter และ standardize เครื่องก่อนใช้ด้วย white plate (No. C6664) และ grey plate (No. C6664G) (Bae et al., 2008)
3. การต้านทานแรงดึงขาด (Tensile strength) และการยืดตัว (elongation-at-break) ของฟิล์มตรวจวัดโดยใช้เครื่อง Instron Model 4414 (Canton, MA, USA) โดยใช้ชิ้นฟิล์มที่มีขนาด 2.5 x 10 เซนติเมตร ใช้หัวทดสอบแบบ tension ซึ่งเป็นหัวทดสอบที่มีลักษณะเป็นหัวหนีบ 2 หัว ตามวิธีการมาตรฐานในการวัด tensile properties ของ พลาสติกแผ่นบาง (thin plastic sheeting) ASTM method D882-95; ASTM 1995) โดยใช้ระยะห่างระหว่างหัววัด (initial grip distance) 80

มิลลิเมตร และ ความเร็วของหัววัด (crosshead speed) 10 มม./นาที ค่า tensile strength at maximum (TS) และ percentage elongation at break (%E) ได้จากการวัดทั้งหมด 6 ซ้ำของแผ่นฟิล์มเดียวกัน ถ้าชิ้นตัวอย่างเลื้อนหรือขาดตรงขอบที่ยึดขณะทดสอบ แสดงว่ามีแรงตามแนวกว้างของชิ้นตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ ให้ตัดค่าที่อ่านได้ทิ้งไป

4. ความโปร่งแสง (Transparency) ของฟิล์ม ตรวจวัดได้โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) ตามวิธีการของ Han and Floros (1997) ซึ่งปรับปรุงมาจากวิธีการของ ASTM method D1746-92 ซึ่งเป็นวิธีการมาตรฐานสำหรับการวัดความโปร่งแสงของแผ่นพลาสติกบาง และสามารถคำนวณหาค่าการโปร่งแสงของฟิล์มได้หลังจากการวัดค่าความหนาของฟิล์ม และค่าร้อยละของการส่งผ่าน (% transmittance) หรือค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร (T600 or A600) และคำนวณโดยใช้สมการดังนี้

$$\text{Transparency} = A_{600} / b \text{ or } (\log T_{600}) / b$$

เมื่อ T600 = ค่าการส่งผ่านที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร A600 = ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร และ b เป็นความยาวทางเดินแสงผ่านสารตัวอย่าง (ความหนาของฟิล์ม)

5. การแพร่ผ่านของไอน้ำ (Water vapor permeability) วิเคราะห์โดยวิธีการที่ปรับปรุงมาจาก ASTM E 96-80 procedure desiccant method (ASTM, 1998) และของ Perez-Gago et al. (1999) โดยใช้ฟิล์มที่ขึ้นรูปแห้งดีแล้ว ตัดแผ่นฟิล์มให้เป็นวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร โดยตัวอย่างต้องปราศจากรอยพับ ซีด รุ่ยที่มองเห็นได้ ออกนำมาปิดปากถ้วยที่บรรจุน้ำกลั่น จากนั้นนำไปวางไว้ในโถดูดความชื้น (desiccator) ที่บรรจุซิลิกาเจลเพื่อทำหน้าที่ควบคุมค่า RH ภายในโถดูดความชื้นให้มีค่าเท่ากับ 0%RH และอุณหภูมิ 25 ± 5 องศาเซลเซียส ทำการชั่งน้ำหนักของถ้วย บันทึกการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาคำนวณหาการแพร่ผ่านของไอน้ำ

$$\text{Water transmission rate (WVTR)} = \frac{(G/t)}{A}$$

$$\text{Water vapor permeability (WVP)} = \text{Permanence} \times \text{thickness of film}$$

$$\text{Permanence} = \frac{WVTR}{\Delta P} = \frac{WVTR}{S(R_1 - R_2)}$$

เมื่อ WVTR = อัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำ (กรัมต่อตารางเมตร . ชั่วโมง) G/T = อัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่อเวลา A = พื้นที่ตัวอย่าง (ตารางเมตร) WVP = การแพร่ผ่านของไอน้ำ (กรัม . มิลลิเมตรต่อตารางเมตร . ชั่วโมง . กิโลปาสกาล) S = ความดันไอของไอน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส = 23.73 มิลลิเมตรปรอท (1.333×10^2 ปาสกาล = 1 มิลลิเมตรปรอท) $R_1 =$

ความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศในเคบิกเคเตอร์ = 0%RH และ R_2 = ความชื้นสัมพัทธ์ภายในถ้วยทดสอบ = 100%RH

6. การละลายได้ (Solubility) วิเคราะห์โดยตัดฟิล์มเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 7.5 มม. x 15 มม. นำมาทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 100°C จนได้น้ำหนักคงที่ ชั่งน้ำหนักเริ่มต้นที่แน่นอน นำมาใส่ในหลอดทดลองที่บรรจุน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง นำชิ้นฟิล์มที่เหลือมาทำให้แห้งอีกครั้งโดยอบที่อุณหภูมิ 70 °C จนกว่าน้ำหนักคงที่ รายงานค่าการละลายได้ของฟิล์มโดยคำนวณหาค่าร้อยละขององค์ประกอบที่ละลายได้ทั้งหมดในฟิล์ม (total soluble matter; SM) ในฟิล์มหาได้จากสมการดังนี้

$$\%SM = \left[\frac{(Initial\ dry\ wt - Final\ dry\ wt)}{Initial\ dry\ wt} \right] \times 100$$

การเตรียมแคปซูลยาแบบแข็ง

การเตรียมแคปซูลยาแบบแข็งอย่างง่าย ทำได้โดยใช้วิธีการ dip-coating โดยดัดแปลงมาจากวิธีการของ Bae et al. (2008) โดยเตรียมสารละลายแป้งเม็ดทุเรียนที่มีองค์ประกอบและสถานะที่ใช้เช่นเดียวกับการเตรียมฟิล์มดังกล่าวข้างต้น (ยกเว้นมีแป้งเม็ดทุเรียนเป็นองค์ประกอบที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง และลอกออกจากแม่แบบ (template) เพื่อนำไปทดสอบการละลาย (dissolving test) เพื่อทราบสมบัติการละลายของแคปซูลว่าสามารถละลายได้ดีในสารละลายที่เป็นกลางหรือเป็นกรดเล็กน้อยภายในเวลา 10 นาที โดยดัดแปลงมาจากวิธีการวิเคราะห์ของ Korea Pharmacopoeia (2002)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวางแผนการวิจัยเป็นแบบ completely randomized design (CRD) โดยทำการทดลองทำ 3 ซ้ำ และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย (mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ของแต่ละชุดข้อมูล ทุกการทดลองใช้สารเคมีที่มีความบริสุทธิ์สูง (Analytical grade) วิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการแปรปรวนทางเดียว (One way analysis of variance) โดยใช้โปรแกรม SPSS กรณีที่ผลทดสอบทางสถิติพบนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 จะใช้การเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ย สำหรับข้อมูลที่มีความสำคัญจะทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลองที่ได้

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

ตอนที่ 1 การสกัดแยกแป้งจากเมล็ดทุเรียนแลการศึกษาสมบัติของแป้งเมล็ดทุเรียน

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 เมือกเหล่านี้จะเป็นปัญหาบ้างในขั้นตอนการปอกเปลือกเพื่อนำมาสกัดแป้ง ในการทดลองนี้ได้คัดขนาดของเมล็ดทุเรียนให้ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 3.5-4.5 ซม. วิธีการการสกัดแป้งอย่างง่ายจากเมล็ดทุเรียนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ให้ผลผลิตแป้งสูงที่มีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 13 โดยน้ำหนักตามมาตรฐานของ Thailand trade ministry (1993) ปริมาณผลผลิตแป้งที่ได้จะขึ้นอยู่กับปริมาณสารละลายที่ใช้ในขั้นตอนโฮโมจีไนเซชันและการกรอง 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) (Dobraszczyk, 2001) สีของแป้งเป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งสำหรับประยุกต์ใช้ทางอาหาร เพื่อให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ไม่เปลี่ยนแปลงไปที่เป็นผลมาจากการรบกวนของสีแป้ง



รูปที่ 1 ลักษณะที่ปรากฏของตัวอย่างเมล็ดทุเรียนที่ใช้เพื่อสกัดแยกแป้ง



(a)

(b)

(c)

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

องค์ประกอบทางโภชนา (Nutritional Composition)

เมล็ดทุเรียนเป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อน (complex carbohydrates) จากผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเมล็ดทุเรียนพบว่ามีแป้ง (starch) เป็นองค์ประกอบหลัก ถึงร้อยละ 56.03 ± 0.08 ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งน่าจะเป็นแหล่งของแป้งจากเมล็ดผลไม้ที่น่าสนใจแหล่งหนึ่ง นอกจากนี้ยังประกอบด้วยโปรตีน (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง) 7.24 ± 0.10 ไขมันหยาบ 0.32 ± 0.03 เยื่อใยหยาบ (crude fiber content) 2.36 ± 0.15 และเถ้า 3.58 ± 0.03 เมื่อนำมาผ่านกระบวนการสกัดแยกแป้งอย่างง่ายโดยการแยกกากที่ไม่ละลายน้ำออก เนื่องจากกากที่ไม่ละลายน้ำนี้เป็นปัญหาสำคัญในการเตรียมฟิล์มที่ย่อยสลายได้ในขั้นตอนถัดไป ทำให้แป้งเมล็ดทุเรียนที่แยกได้มีปริมาณเยื่อใยลดลงจาก 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

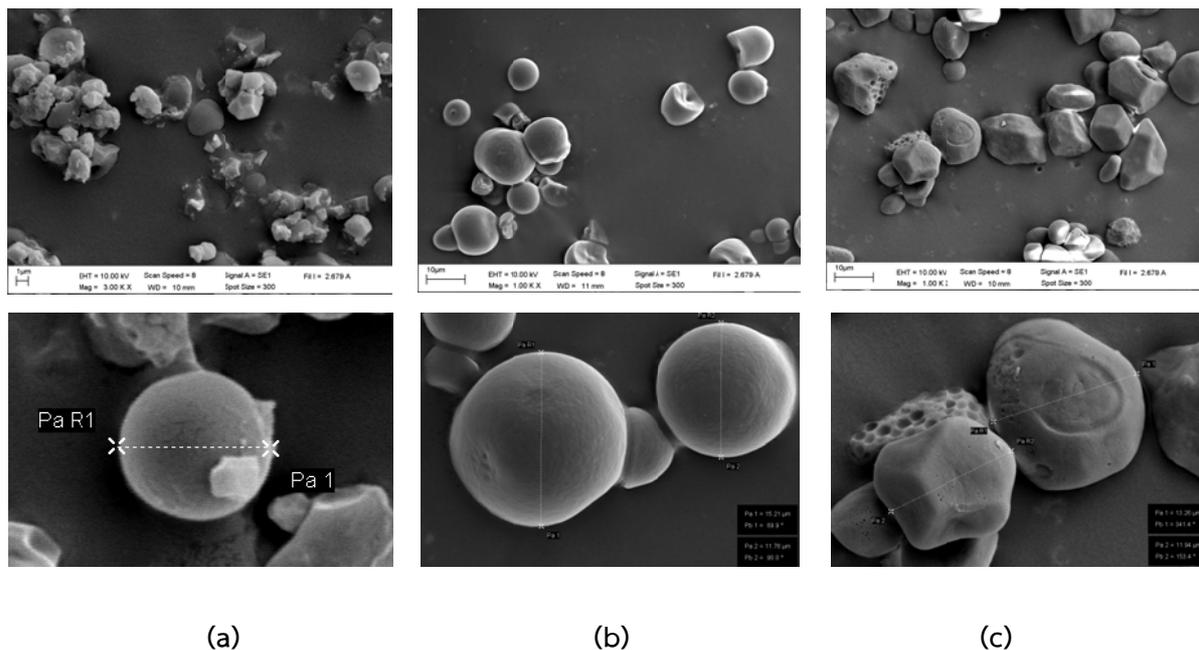
เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางโภชนาของแป้งเม็ดทุเรียนกับแป้งข้าวโพด และแป้งมันสำปะหลัง พบว่าแป้งเม็ดทุเรียนมีปริมาณโปรตีนและเถ้ามากกว่า แต่มีปริมาณเยื่อใยน้อยกว่าแป้งทั้งสองชนิดดังกล่าวอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) สำหรับปริมาณไขมันหยาบของแป้งเม็ดทุเรียน (0.27%) มีค่ามากกว่าแป้งที่สกัดมาจากจากพืชชนิดอื่นที่มีรายงานการศึกษามาก่อน 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 ลักษณะของพื้นผิวจะมีผลกับการเกิดปฏิกิริยาของแป้งเมื่อต้องการตัดแปลงด้วยกระบวนการทางเคมีที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางเคมีกายภาพ 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)

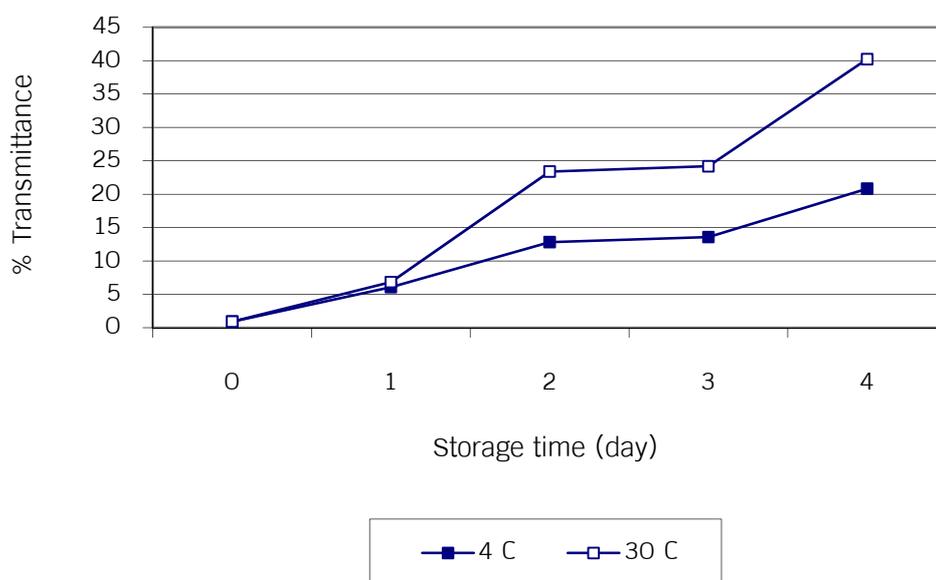
ความใสของแป้งสุก (Clarity of starch pastes)

การใช้งานแป้งที่สำคัญคือการเพิ่มความหนืดให้กับอาหาร ดังนั้นสมบัติความใสของแป้งจึงมีความสำคัญอย่างมาก ซึ่งขึ้นกับชนิดของแป้ง แต่สามารถเปลี่ยนแปลงได้เมื่อทำการดัดแปลงเม็ดแป้ง (starch granule modification) เมื่อนำแป้งเม็ดทุเรียนมาละลายน้ำและผ่านกระบวนการเจลาติไนเซชันจะได้แป้งสุกที่มีความใส เนื่องจากในระหว่างที่แป้งเกิดเจลาติไนเซชัน เม็ดแป้งที่พองตัวจะยอมให้แสงผ่านและเกิดการหักเห (refraction) โดยดีกรีของการหักเหจะลดลงเมื่อเม็ดแป้งมีการพองตัวเพิ่มขึ้น (Craig et al., 1989)

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

และดีกรีของการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน (degree of polymerization) ของอะไมโลสก็เป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อสมบัติความใสของแป้งสุกเช่นกัน

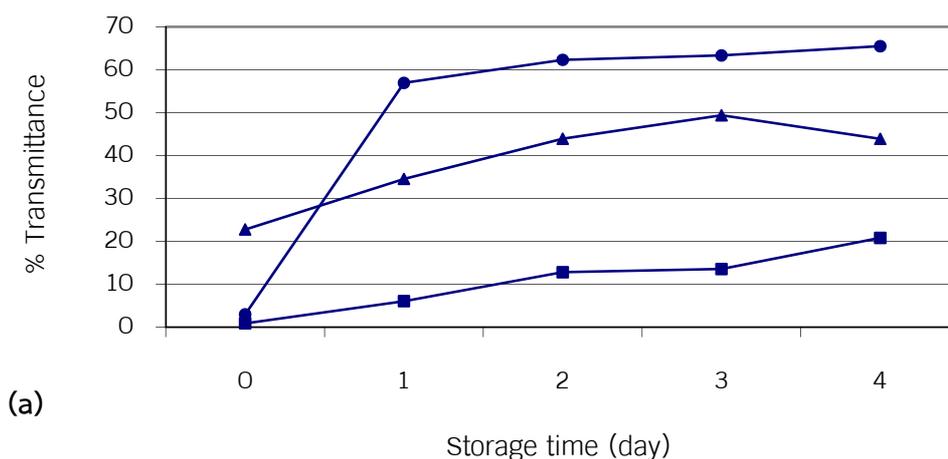
เมื่อนำแป้งเม็ดทุเรียนสุกมาเก็บรักษาที่ 30°C และที่ 4°C เป็นเวลา 4 วัน พบว่าจะเกิดการตกตะกอนขึ้น ทำให้แยกโซน (zone) ที่ค่อนข้างสังเกตเห็นได้ด้วยตา โชนส่วนบนของสารแขวนลอยจะสามารถให้แสงส่องผ่านได้มากขึ้น (%T เพิ่มขึ้น) Mile et al. (1985a,b) เสนอแนะว่าการคืนตัวของแป้งสุก (retrogradation) ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนที่แยกจากกันคือ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



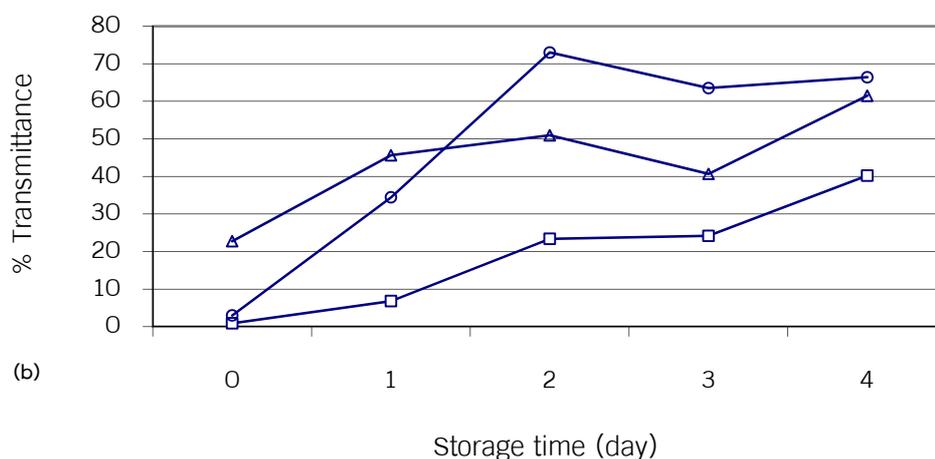
รูปที่ 4 สมบัติความใสของแป้งเม็ดทุเรียนสุกเมื่อเก็บรักษาที่ 4°C และ 30°C เป็นเวลา 4 วัน

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าภายหลังจากที่เก็บรักษาเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่ำ (4°C) จะให้ค่า %T ต่ำกว่าเมื่อเก็บที่อุณหภูมิสูง (30°C) แสดงว่าที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการคืนตัวของแป้งสุกได้ดีกว่าเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ การเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำทำให้เกิดผลึกสมบูรณ์น้อยกว่าเมื่อเก็บที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งจะเกิดการรวมกลุ่มของโซ่อะไมโลสในอัตราสูง แนวโน้มในการทำงานของเดียวกันพบได้ในกรณีของแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพด (รูปที่ 5) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่า %T เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 48 ชั่วโมงที่อุณหภูมิต่ำมีผลทำให้มี

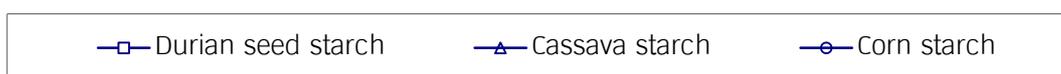
ค่า %T เพิ่มขึ้นร้อยละ 25.71, 24.39 และ 2.24 จากเริ่มต้น ของแป้งสุกจากแป้งเม็ดทุเรียน แป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลังตามลำดับ ในขณะที่เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิในตู้เย็นจะมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 14.10, 20.81 และ 1.93 จากเริ่มต้น ของแป้งสุกจากแป้งเม็ดทุเรียน แป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลัง ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแป้งเม็ดทุเรียนมีความเสถียรของ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



(a)



(b)

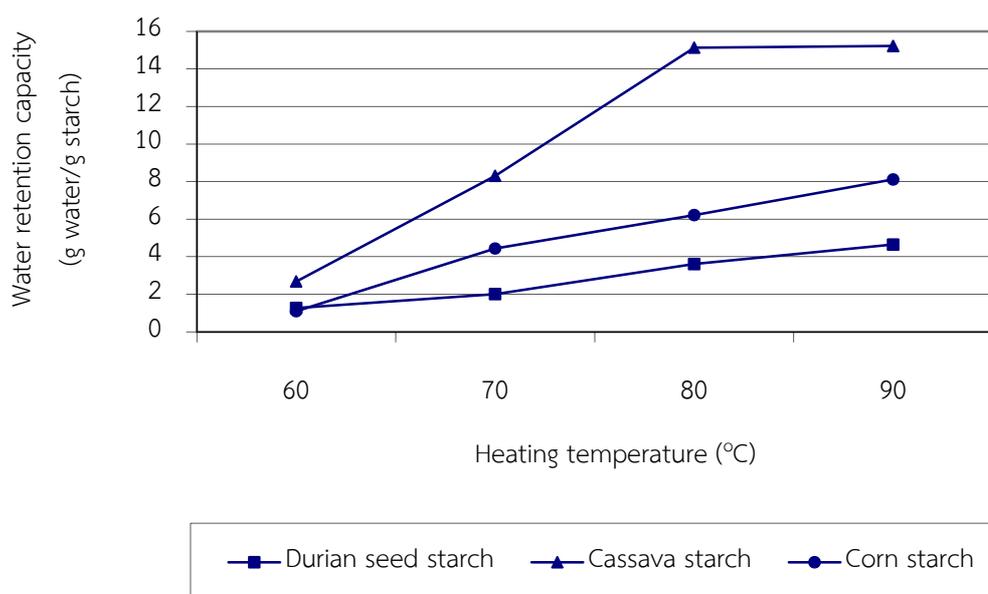


รูปที่ 5 สมบัติความใสของแป้งสุกของแป้งเม็ดทุเรียน แป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพดเมื่อเก็บรักษาที่ (a) 30°C และ (b) 4°C เป็นเวลา 4 วัน

ความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water retention capacity; WRC)

ค่า WRC บ่งบอกถึงความสามารถของโปรตีนแมทริกซ์ (protein matrix) ที่จะดูดซับและดักจับน้ำต้านแรงดึงดูด (gravity) (Traynham et al., 2007) จึงใช้เป็นตัวชี้วัดที่ใช้บอกความสามารถของแป้งในการอุ้มน้ำ 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

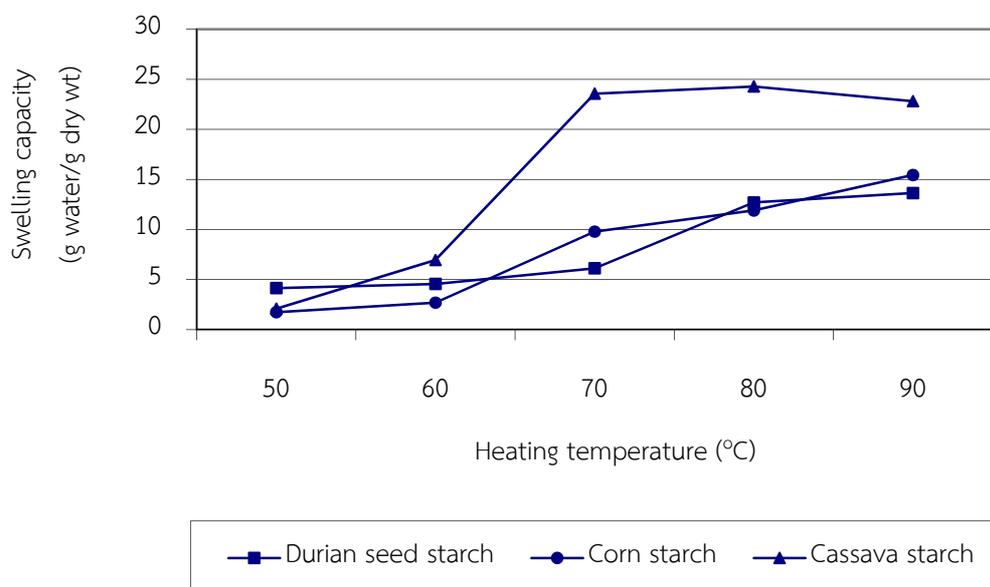


รูปที่ 6 สมบัติความสามารถในการอุ้มน้ำของแป้งเม็ดทุเรียน แป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพดที่อุณหภูมิ $60-90^{\circ}\text{C}$

ความจุของการพองตัว (Swelling capacity; SWC)

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

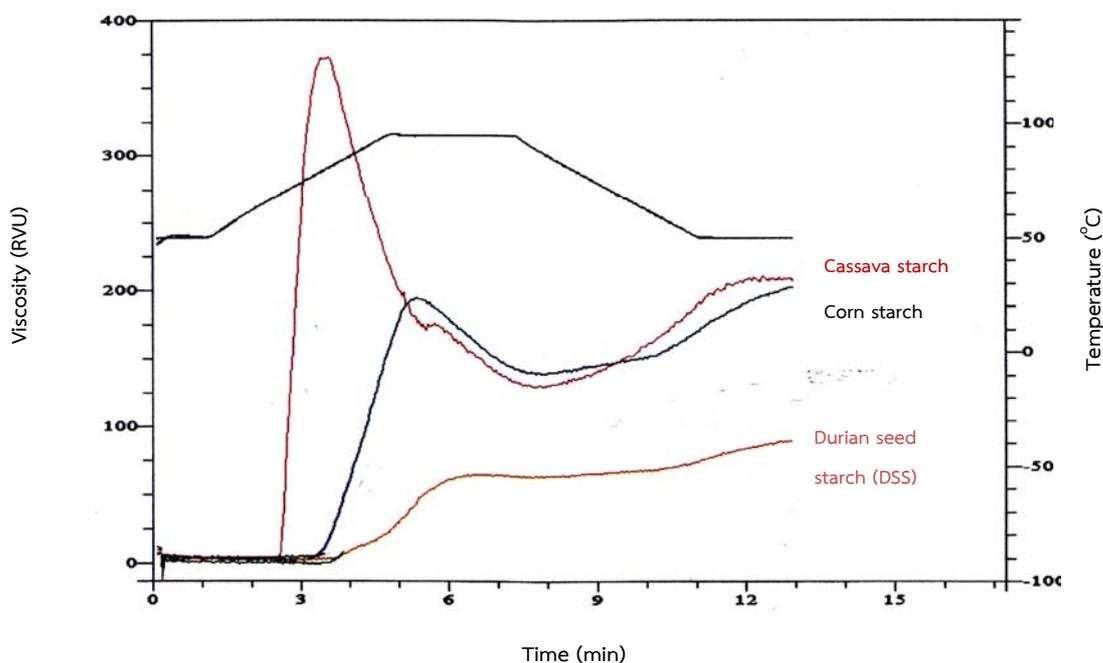
รูปที่ 7 แสดงแบบแผนของความจุการพองตัวของแป้งเม็ดทุเรียน แป้งข้าวโพด และแป้งมันสำปะหลัง ในสภาวะอุณหภูมิสูงแป้งทั้งสามชนิดจะมีการพองตัวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวพบได้เช่นกันในแป้งจากพืชชนิดอื่น เช่น Okina (Sanchez-Hernandez et al., 2002) และ sorghum (Perez et al., 1997) ค่า SWC จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเนื่องจากโมเลกุลของน้ำมีการเคลื่อนที่และแพร่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

เมื่อให้ความร้อนกับแป้งในสถานะที่มีปริมาณน้ำมากเกินไป เม็ดแป้งจะพองตัวและในเวลาเดียวกันก็จะละลายด้วย จึงทำให้เกิดทั้งการพองตัวและการกระจาย (dispersion) ของอนุภาคในสารแขวนลอยของแป้งในเฟสต่อเนื่อง (continuous phase) (Bello-Perez et al., 2006) วิธีการหนึ่งที่ใช้ติดตามกระบวนการเจลาตินไนเซชันที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิได้โดยการตรวจวัดความหนืดของสารแขวนลอยแป้ง (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) มากกว่าแป้งตัดแปลงทางการค้าทั้งสองดังกล่าว

เจลลิตินเซชัน (Gelatinization)

ตารางที่ 3 แสดงอุณหภูมิทรานสิชัน (transition temperature; T_0 , T_p และ T_c) และค่าเอนทัลปีของการเกิดเจลลิตินเซชัน (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) ของความร้อนในการเกิดเจลลิตินเซชันสูงกว่า แต่มีช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลลิตินเซชันกว้างกว่า และใช้พลังงานในการเกิดเจลลิตินเซชันต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับทั้งแป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลัง

โดยทั่วไปแป้งที่มีเม็ดแป้งที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous granules) จะให้ช่วงเอนทัลปีกว้าง ความแตกต่างของอุณหภูมิของการเกิดเจลลิตินเซชันแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของความสมบูรณ์ของผลึกแป้ง (starch crystals) ถ้าแป้งมีความสมบูรณ์ของผลึกในผลึกแลตติซ (crystal lattice) สูงก็จะให้อุณหภูมิของการเกิดเจลลิตินเซชันสูงด้วย (Mukprssirt and Sajjaanantakul, 2004) ซึ่งแสดงว่าแป้งเม็ดทุเรียนมีความสมบูรณ์ของผลึกมากกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งสอดคล้องกับการที่แป้งเม็ดทุเรียนต้องการพลังงานเจลลิตินเซชัน (gelatinization energy) สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งทั้งสองชนิดดังกล่าว

ตอนที่ 2 การพัฒนาการเตรียมฟิล์มที่ย่อยสลายได้และแคปซูลยาแบบแข็งจากแป้งเม็ดทุเรียน

ฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน (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) ในงานวิจัยนี้ให้ความสนใจกับแป้งที่สกัดแยกมาจากเม็ดทุเรียน ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าให้สมบัติที่สามารถประยุกต์ใช้ทางอาหารได้ดี เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตฟิล์มพอลิเมอร์ชีวภาพ

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

ถึงแม้แป้งจะเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่นิยมใช้ในการเตรียมฟิล์มที่ย่อยสลายได้มากที่สุดก็ตาม จากการที่มันสามารถเกิดแมทริกซ์ที่ต่อเนื่อง (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) ซึ่งทำให้อาจไม่ประสบผลสำเร็จกับการประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร วิธีการหนึ่งที่มีกนิยมใช้แก้ปัญหาดังกล่าวโดยการตัดแปลงแป้งโดยอาศัยปฏิกิริยาเชื่อมขวาง (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 สับปะรด และมะนาว เติมลงในสารละลายแป้งเม็ดทุเรียนสำหรับเตรียมฟิล์มด้วยความเข้มข้นร้อยละ 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 ให้ใช้เป็นสารเติมแต่งในอาหารได้ (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 พลาสติกไซเซอร์เป็นสารประเภทหนึ่งที่ถูกใช้เพื่อดัดแปลงสมบัติทางกลของฟิล์ม โดย พลาสติกไซเซอร์จะไปลดการกระทำระหว่างสายพอลิเมอร์ที่อยู่ข้างเคียง ทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น แต่ก็มักจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติการกักกันน้ำของฟิล์ม (Garcia et al., 2000) ดังนั้นการเลือกใช้พลาสติกไซเซอร์ที่เหมาะสมจึงจำเป็นต้องการเตรียมฟิล์มที่ย่อยสลายได้ (McHugh and Krochta, 1994b) สำหรับในงานวิจัยนี้ พบว่ากลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ที่ดีสำหรับฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน เมื่อฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนเตรียมจากแป้งเม็ดทุเรียนที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และกลีเซอรอล (glycerol) ที่ความเข้มข้นที่ศึกษาในช่วง 20-50 โดยน้ำหนักของแป้งเม็ดทุเรียน ให้ฟิล์มที่เป็นเนื้อเดียวกัน ผิวเรียบไม่มีรูรั่วหรือรอยแตก ฟิล์มมีลักษณะนุ่ม (soft) และยืดหยุ่น (flexible) ได้ดี จึงสามารถลอกออกได้ง่ายหลังจากขึ้นรูปแล้ว

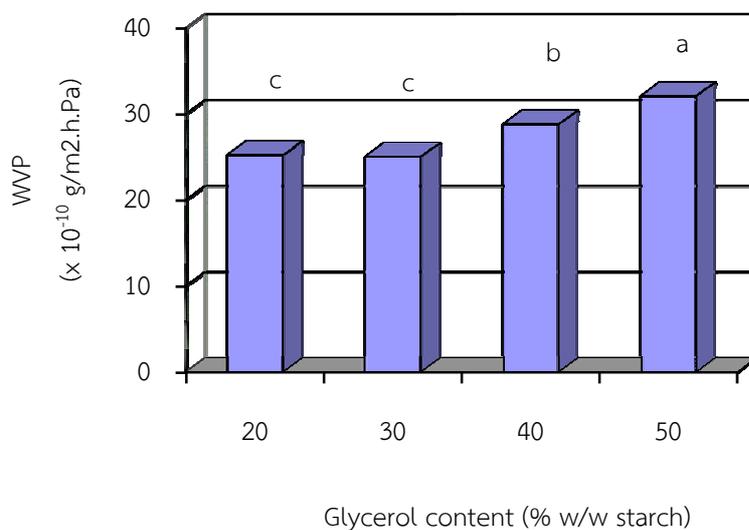
จากรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอล จะทำให้ความสามารถของฟิล์มที่จะทำหน้าที่เป็นตัวกีดกัน (barrier) ของความชื้นลดลง เนื่องจากกลีเซอรอลมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (92 g/mol) จึงสามารถแทรกสอดเข้าไปในระหว่างสายพอลิเมอร์ที่อยู่ใกล้เคียงกันได้ ลดการกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุล โดยเข้าทำลายพันธะไฮโดรเจน ทำให้สายพอลิเมอร์แยกออกจากกัน สายพอลิเมอร์จึงสามารถเคลื่อนที่ได้มากขึ้นในปริมาตรอิสระ (free volume) ระหว่างสายพอลิเมอร์ ทำให้เครือข่ายพอลิเมอร์เกิดการผ่อนคลายและมีความหนาแน่นลดลง เพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุล และช่วยให้เกิดการเคลื่อนย้ายของโมเลกุลไอน้ำและแก๊สได้ดีขึ้น (Garcia et al., 2000; Baldwin and Baker, 2002) และการที่กลีเซอรอลมีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) บนแต่ละคาร์บอนจึงมีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic molecule) จึงทำให้ฟิล์มสามารถดูดกลืนโมเลกุลของน้ำเข้าไปในสายพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น ทำให้มีสมบัติการกักกันความชื้นลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอล (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 จะลดความสามารถในการกักกันน้ำโดยให้ค่า 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) อยู่ค่อนข้างมากนั่นคือฟิล์มแบงเม็ดทุเรียนมีความสามารถในการกักน้ำได้น้อยกว่าฟิล์มพีวีซีและฟิล์มพีอี โดยให้ค่า WVP มากกว่าถึงประมาณ 32 และ 123 เท่า ตามลำดับ เป็นที่ทราบกันดีว่าฟิล์มที่เตรียมจากพอลิเมอร์ชีวภาพจะมีสมบัติกักความชื้นได้ต่ำ เนื่องจากมีหมู่ที่ชอบน้ำในสายพอลิเมอร์จำนวนมาก ในทำนองเดียวกันเนื่องจากโมเลกุลแบงเม็ดทุเรียนมีธรรมชาติที่ชอบน้ำ จึงทำให้ฟิล์มแบงเม็ดทุเรียนมีแนวโน้มที่จะดูดซับน้ำได้ในปริมาณมาก ส่งผลให้ฟิล์มแบงเม็ดทุเรียนมีสมบัติการกักน้ำที่ไม่ดีเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์สังเคราะห์

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสมบัติการกักน้ำของแต่ละฟิล์มขึ้นกับทั้งประสิทธิภาพการแพร่ของโมเลกุล (molecular diffusion coefficient) และการละลายได้ในแมทริกซ์ (McHugh et al., 1994b) ดังนั้นชนิดและความเข้มข้นของพลาสติกไฮเซอรไมโซบัจจัยเพียงอย่างเดียวที่มีผลต่อสมบัติการกักน้ำของฟิล์มที่ย่อยสลายได้ โดยทั่วไปแล้วขึ้นกับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ธรรมชาติขององค์ประกอบที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม โครงสร้างของฟิล์ม สภาวะที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม และเทอร์โมไดนามิกส์ เป็นต้น ดังนั้นเพื่อปรับปรุงสมบัติการกักน้ำของฟิล์มแบงเม็ดทุเรียนซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญสำหรับความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร ในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาฟิล์มแบงเม็ดทุเรียนด้วยการเตรียมเป็นฟิล์มคอมโพสิต โดยผสมพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดที่สองกับแบงเม็ดทุเรียน โดยในที่นี้เลือกใช้พอลิเมอร์ชีวภาพ (biopolymer) ที่มีโครงสร้างทางเคมีและสมบัติที่แตกต่างกัน 4 ชนิดและเป็นที่นิยมใช้งานทางอาหารเพื่อปรับปรุงเนื้อสัมผัสของอาหารเนื่องจากมีสมบัติการเกิดเจลที่ดี ประกอบด้วยพอลิแซคคาไรด์ 3 ชนิด ได้แก่ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (caroxymethylcellulose; CMC) คาราจีแนน (carragenan) และเพคติน (pectin) ส่วนอีกชนิดหนึ่งเป็นเจลาติน (gelatin) ที่เป็นส่วนผสมของเปปไทด์และโปรตีนจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสบางส่วนของคอลลาเจน โดยใช้ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแบงเม็ดทุเรียน

จากตารางที่ 9 จะเห็นได้ว่าเมื่อเติมพอลิเมอร์ชีวภาพทั้ง 4 ชนิดดังกล่าวที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแบงเม็ดทุเรียนลงไป จะทำให้ฟิล์มแบงเม็ดทุเรียนมีค่า WVP ลดลง แต่ที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) คือเมื่อเติม CMC และเจลาติน นั่นคือการปรับปรุงสมบัติการแพร่ผ่านไอน้ำของฟิล์มแบงเม็ดทุเรียนสามารถทำได้โดยการเติม CMC หรือเจลาตินที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแบงเม็ดทุเรียน โดยส่งผลให้มีค่า WVP ลดลงประมาณร้อยละ 27 และทำให้สามารถลดความแตกต่างของความสามารถในการกักความชื้นจากประมาณ 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 ($\times 10^{-10} \text{ g/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}$)
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) ซึ่งอาจมาจากการที่พอลิเมอร์ที่อยู่ในรูปเซลล์ูโลสมีสมบัติการเป็นผลึก (crystalline) สูงและมีลักษณะที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic character) มากกว่าพอลิเมอร์ที่อยู่ในรูปแป้ง โดย CMC อาจทำให้เกิดความคดเคี้ยวของทางเดิน (tortuous path) ที่จะให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่ผ่าน จึงขัดขวางการแพร่ผ่านไอน้ำของฟิล์ม (Kristo and Biliaderis, 2007) โดยที่เมื่อใช้ความเข้มข้นของ CMC ต่ำ (5%) CMC จะกระจายตัว (disperse) ได้ดีในเมทริกซ์ของแป้ง จึงขัดขวาง (block) การแพร่ผ่านของน้ำ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ CMC สูงขึ้น จะเกิดการจับกลุ่มกัน (congregate) จะลดผลดังกล่าวจนไม่สามารถขัดขวางการแพร่ผ่านของน้ำได้อีกต่อไป ดังนั้นเป็นที่คาดเดาได้ว่า ถ้าใช้ความเข้มข้นมากกว่า 10% อาจมีผลให้ค่าฟิล์มมีค่า WVP เพิ่มขึ้นก็เป็นได้ เช่นเดียวกับกรณีของการเติมเจลาตินที่ความเข้มข้น 10%

ตารางที่ 6 ค่าการแพร่ผ่านไอน้ำ (WVP) ของฟิล์มคอมโพสิตของแป้งเม็ดทุเรียน 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

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

นอกจากนั้นความเข้มข้นของแป้งเม็ดทุเรียนที่เป็นองค์ประกอบในฟิล์มก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อสมบัติการกีดกันความชื้นของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน ซึ่งความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเตรียมฟิล์มเมื่อพิจารณาถึงค่า WVP เป็นหลัก คือที่ความเข้มข้นของแป้งเม็ดทุเรียนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ถ้าใช้ความเข้มข้นที่ต่ำกว่านี้จะทำให้ฟิล์มไม่สามารถขึ้นรูปและลอกออกได้ ในขณะที่เมื่อใช้ความเข้มข้นสูงขึ้นเป็นร้อยละ 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)

แป้งเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงที่ประกอบด้วยอะไมโลสที่ซึ่ตรง และอะไมโลเพคตินที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าและเป็นโซ่กิ่ง (Maurer et al., 2001) โดยอะไมโลสจะรับผิดชอบต่อความสามารถในการเกิดฟิล์ม (Romero-bastisa et al., 2005) แป้งที่มาจากแหล่งต่างกันที่มีสัดส่วนของอะไมโลส/อะไมโลเพคตินแตกต่างกันจะให้สมบัติที่แตกต่างกันด้วย โดยทั่วไปฟิล์มที่มีอะไมโลสปริมาณสูงมักมีความเสถียรมากกว่า จะสูญเสียสมบัติการยึดตัวเพียงเล็กน้อยในขณะที่อาจไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติการต้านแรงดึงขาดเลย (Lawton, 1996; Krogars et al., 2003) อย่างไรก็ตาม เจลแป้ง (starch granules) อาจพิจารณาได้ว่าเป็นพอลิเมอร์องค์ประกอบ (polymer composite) ของอนุภาคเม็ดแป้งที่พองตัวที่อยู่ใน continuous matrix ของโมเลกุลอะไมโลส (Forest et al., 2007) ทำให้สมบัติทางกลของฟิล์มแป้งจึงได้รับอิทธิพลมาจากทั้งลักษณะทางรีโอโลยี (rheological characteristics) ของเจลแอมทริกซ์ของอะไมโลส (amylase gel matrix) ความแข็งแแกร่ง (rigidity) ของเม็ดแป้งที่ถูกเจลาตินไนซ์ และแรงกระทำระหว่างองค์ประกอบของแป้ง

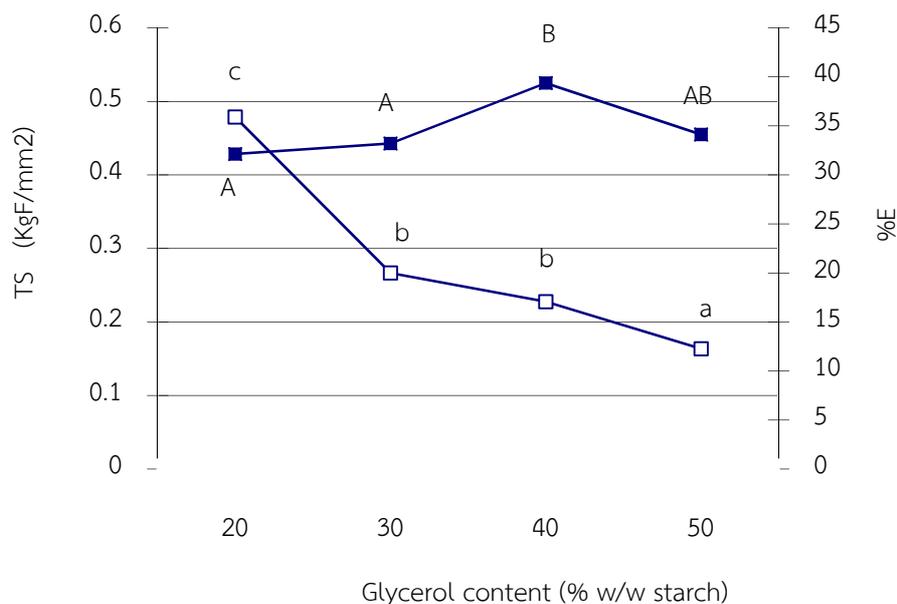
สมบัติทางกลเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่มีความสำคัญสำหรับใช้ประเมินการใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารของฟิล์มพอลิเมอร์ชีวภาพ เนื่องจากฟิล์มที่มีความแข็งแแกร่งมากพอจะทนแรงภายนอกได้สูง (high external forces) และป้องกันอาหารจากสิ่งแวดล้อมได้ดี (Hu and Gao, 2008) โดยทั่วไปฟิล์มแป้งตามธรรมชาติ (native starch films) จะมีความเปราะมากกว่าฟิล์มพอลิเมอร์สังเคราะห์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

จากรูปที่ 10 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอล มีผลให้ฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนมีความแข็งแรงแน้อยลงแต่ยืดหยุ่นได้ดีขึ้น 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 ในขณะที่ฟิล์มมีการยืดตัว (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) นอกจากนี้กลีเซอรอลยังยอมให้โมเลกุลข้างเคียงเคลื่อนที่ผ่านซึ่งกันและกันได้ดียิ่งขึ้น 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 ไม่สามารถเข้ากระทำได้อย่างหนาแน่นกับแอมพริกซ์ของแป้ง สอดคล้องกับผลการทดลองข้างต้น ที่การเติม CMC ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5-10 โดยน้ำหนักแป้งเม็ดทุเรียนลงในฟิล์ม ไม่ช่วยปรับปรุงสมบัติการต้านแรงดึงขาดของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนแต่กลับช่วยทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ในขณะที่โมเลกุลของแป้งเม็ดทุเรียนเกิดการกระทำกับโปรตีนเจลาตินให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ฟิล์มมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น (Eskin, 1990; McHugh and Olsen, 2004)



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

ตารางที่ 7 ค่าการต้านทานแรงดึงขาด (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 มีสมบัติการยืดที่ดีกว่าทั้งของฟิล์มแป้งข้าวโพดและฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง 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) เมื่อพบว่า การเติมเพคตินในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของฟิล์มโดยให้ค่า TS มากขึ้น เนื่องจากเพคตินเป็นพอลิแซคคาไรด์เชิงซ้อน (complex polysaccharide) จึงสามารถเกิดการเชื่อมขวางกับโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบเล็กน้อยในแป้ง (Thakur et al., 1997) สำหรับการเพิ่มความเข้มข้นของพอลิซิวภาพชนิดอื่นอีก 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

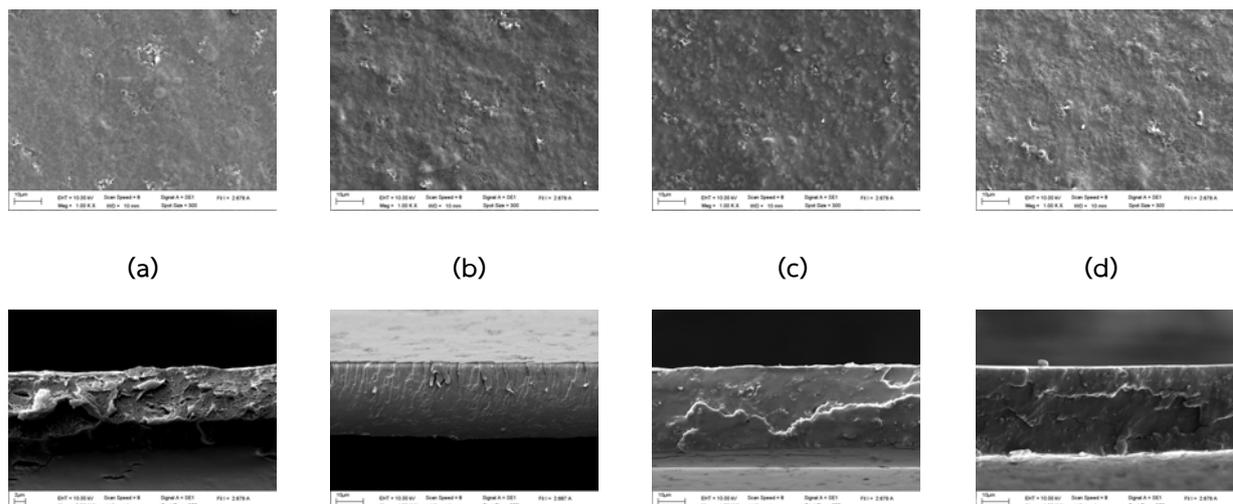
โครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure)

เมื่อพิจารณาโครงสร้างทางจุลภาคของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนโดยอาศัยการตรวจวัดด้วยเครื่องมือจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า ทั้งที่พื้นผิว (surface) และภาคตัดขวาง (cross-section) ของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน พบลักษณะที่เป็นแบบแผนของพื้นผิวฟิล์มที่เตรียมจากแป้ง ซึ่งแสดงถึง withered ghost granules ของแป้ง (Salleh et al., 2009) มีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบ แสดงถึงความเป็นเนื้อเดียว (homogeneous) และ continuous matrix โดยไม่มีรอยแตกหัก (crack) แต่มีการกระจายของอนุภาคขนาดเล็กโดยไม่มีการแยกเฟส

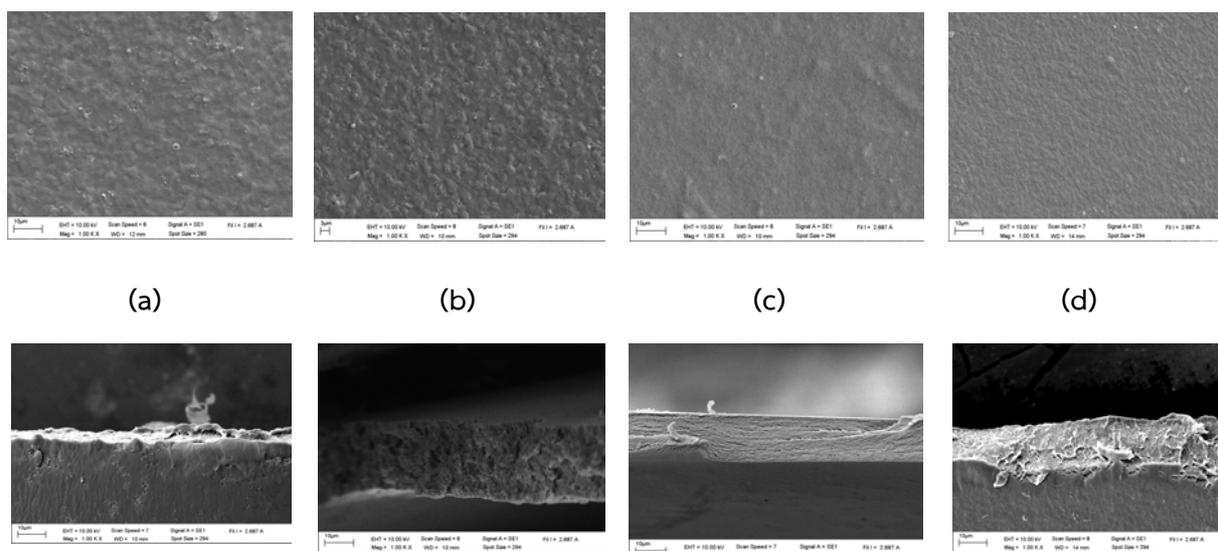
จากรูปที่ 11 พบว่าความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอรส์มีผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาค (microstructure) ของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน ซึ่งจะเห็นการเข้ากันได้ดี (compatibility) ของกลีเซอรอลกับแป้งเม็ดทุเรียน โดยแสดงให้เห็นถึงพื้นผิวค่อนข้างเรียบ และเป็นเนื้อเดียวกันทั่วทั้งฟิล์ม แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอลจะเห็นพื้นที่ว่าง (empty space) และรอยแตกแยกของเนื้อฟิล์มเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นดีขึ้นแต่มีความสามารถในการกักน้ำลดลงสอดคล้องกับแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าการแพร่ผ่านไอน้ำ (WVP) ของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน

นอกจากนั้น จากรูปที่ 12 จะเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนของพื้นผิวของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน ฟิล์มคอมโพสิตของแป้งเม็ดทุเรียนกับ CMC (CMC-DSS film) ฟิล์มแป้งข้าวโพด และฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง ถึงแม้ว่าฟิล์มคอมโพสิต CMC-DSS จะมีลักษณะหรือรูปแบบคล้ายคลึงกับฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน แต่ฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนที่มีการเติม CMC จะมีความผิดปกติ (irregular) ของพื้นผิวมากกว่าฟิล์มแป้งทุเรียนควบคุม ซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีแมโครโมเลกุล (macromolecule) มากกว่า 1 ชนิดในพอลิเมอร์เมทริกซ์ (polymeric matrix) (Dias et al., 2010) ผลดังกล่าวจะเห็นได้ชัดขึ้นจากไมโครกราฟของฟิล์มคอมโพสิต CMC-DSS เมื่อใช้ความเข้มข้นร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนักของแป้งเม็ดทุเรียน ซึ่งจะเห็นความผิดปกติของพื้นผิวมากขึ้นเมื่อฟิล์มมีองค์ประกอบ CMC มากขึ้น (รูปที่ 13)

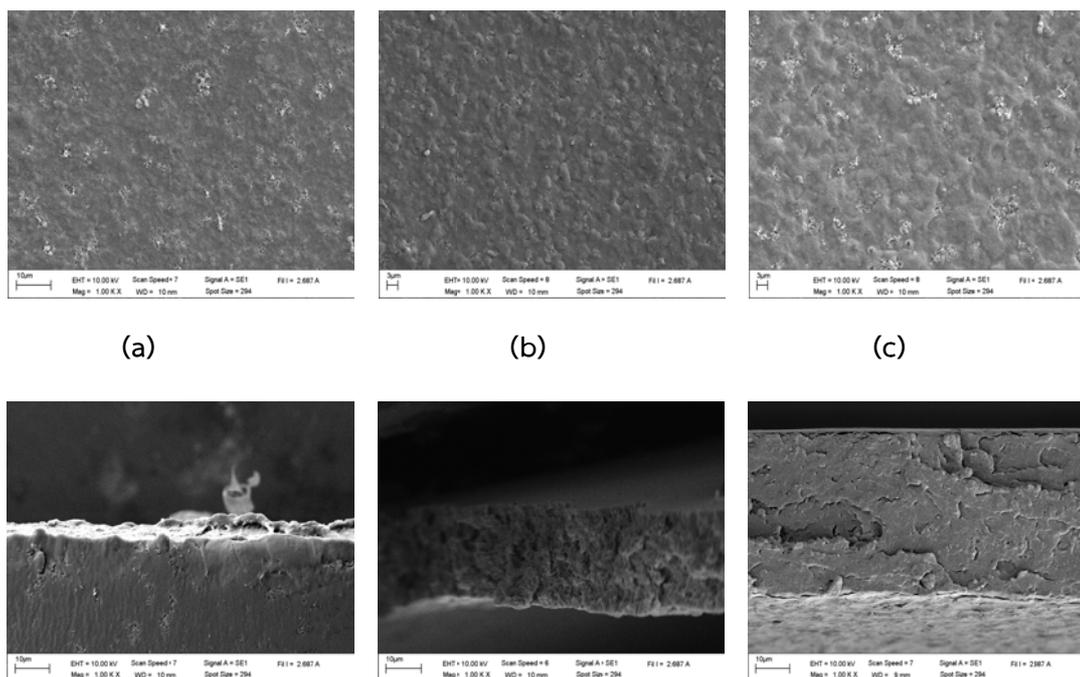
ในขณะที่ฟิล์มแป้งข้าวโพดและฟิล์มแป้งมันสำปะหลังจะมีความแน่นและเรียบของพื้นผิวมากกว่าฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน และฟิล์มคอมโพสิต CMC-DSS (รูปที่ 12) ซึ่งอาจเป็นสาเหตุของความแตกต่างของการที่ทั้งฟิล์มแป้งข้าวโพดและฟิล์มแป้งทุเรียนต่างก็มีค่า TS มากกว่า ในขณะที่มีค่า %E น้อยกว่าของฟิล์มที่มีองค์ประกอบหลักเป็นแป้งเม็ดทุเรียน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



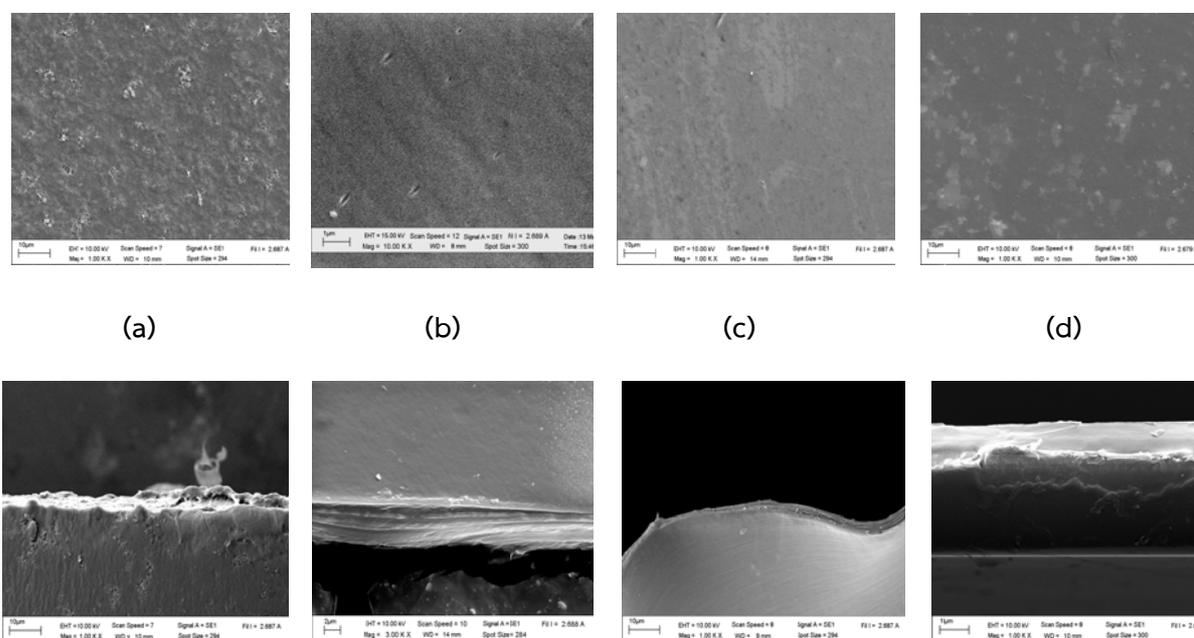
รูปที่ 11 ไมโครกราฟของพื้นผิว (รูปบน) และภาคตัดขวาง (รูปล่าง) ของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนที่ตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของกลีเซอรอลแตกต่างกันเมื่อ (a) 20% (b) 30% (c) 40% (d) 50% (w/w starch)



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)

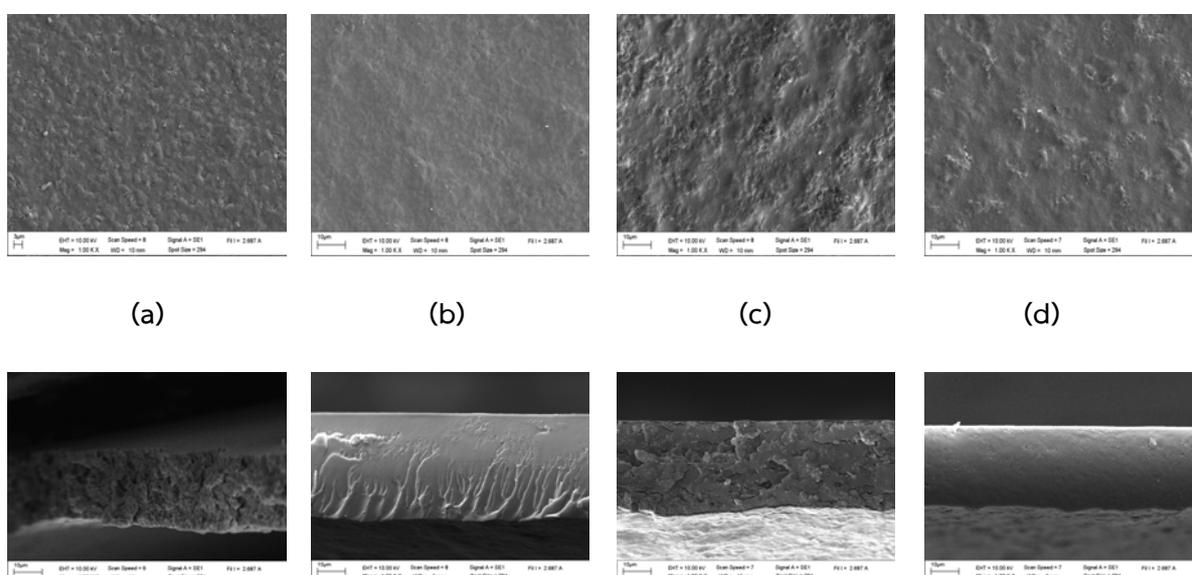


รูปที่ 13 ไมโครกราฟของพื้นผิว (รูปบน) และภาคตัดขวาง (รูปล่าง) ของฟิล์มที่ตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า เมื่อ (a) DDS film (b) 5% CMC- DDS film และ (c) 10% CMC- DDS film



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 จึงส่งผลให้ฟิล์มทั้งสองมีสมบัติการกีดกันน้ำที่ดีกว่าฟิล์มคอมโพสิต 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) การกระทำระหว่างแสงกับผลิตภัณฑ์จะส่งผลต่อสี ความมันวาว (gloss) และความโปร่งแสง (Huching, 1999) โดยทั่วไปสมบัติความโปร่งแสงของฟิล์มจะขึ้นกับทั้งองค์ประกอบและสภาพที่ใช้เตรียมฟิล์ม อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของกลีเซอรอลในช่วงร้อยละ 20-50 โดยน้ำหนักของแป้งเม็ดทุเรียนไม่มีผลต่อความโปร่งแสงของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน โดยให้ค่าความโปร่งแสงอยู่ในช่วง 9.789-11.791 มม⁻¹

เนื่องจากความโปร่งแสงของฟิล์มเกี่ยวข้องกับชนิดและขนาดของอนุภาคที่กระจายอยู่ทั่วฟิล์ม การจัดเรียงตัวใหม่ขององค์ประกอบของฟิล์มแมทริกซ์ระหว่างกระบวนการทำให้แห้งของฟิล์มทั้งโครงสร้างภายในและพื้นที่ผิวก็เกี่ยวข้องกับการโปร่งแสงของฟิล์มเช่นกัน จึงทำให้ฟิล์มคอมโพสิตของแป้งเม็ดทุเรียนที่มีการผสมพอลิเมอร์ชีวภาพแตกต่างกันจึงให้สมบัติความโปร่งแสงที่แตกต่างกัน และฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนที่เติมพอลิเมอร์ชีวภาพที่ความเข้มข้นสูงชันจะมีความโปร่งแสงลดลง (ตารางที่ 10) และมีความโปร่งแสงน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์สังเคราะห์ (ฟิล์มพีวีซีและฟิล์มพอลิเอทิลีน) และฟิล์มแป้งดัดแปลงทางการค้าที่ใช้ในการทดลองนี้ (ฟิล์มแป้งข้าวโพดและฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง) อย่างไรก็ตามฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนมีความสว่าง (L*) มากกว่าทั้งฟิล์มพีวีซี (1.44) ฟิล์มพอลิเอทิลีน (4.99) ฟิล์มแป้งข้าวโพด (6.23) ฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง (11.25)

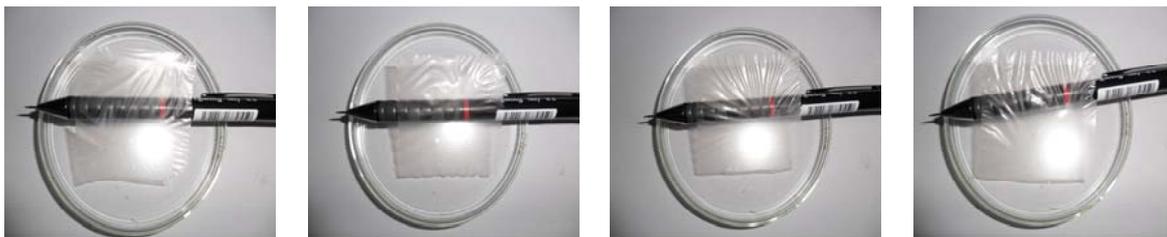
นอกจากนั้นเมื่อใช้พอลิเมอร์ชีวภาพทั้ง 4 ชนิดที่ความเข้มข้นต่ำ (5% w/w starch) เติมนลงในสารละลายสำหรับเตรียมฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน พบว่าให้ฟิล์มคอมโพสิตที่มีส่วนผสมของเจลาตินและเพคตินให้ค่าความโปร่งแสงน้อยกว่าฟิล์มคอมโพสิตที่มีส่วนผสมของ CMC และคาราจีแนน ($P < 0.05$) ซึ่งฟิล์มคอมโพสิต 2 ชนิดหลังไม่มีความแตกต่างทางสถิติ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

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

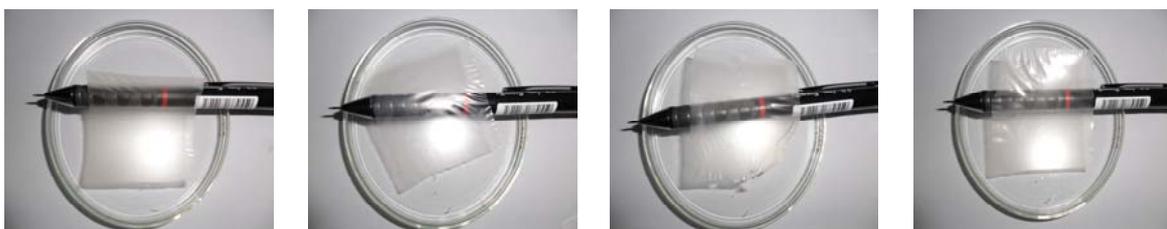
อย่างไรก็ตามฟิล์มที่เตรียมจากแป้งเม็ดทุเรียน (DSS based films) มีค่า L^* มากกว่าฟิล์มแป้งข้าวโพดและฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง ($P < 0.05$)

ตารางที่ 10 ความหนา ความโปร่งแสง และพารามิเตอร์สีของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน ฟิล์มคอมโพสิตแป้งเม็ดทุเรียนฟิล์มพอลิเมอร์สังเคราะห์ 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)

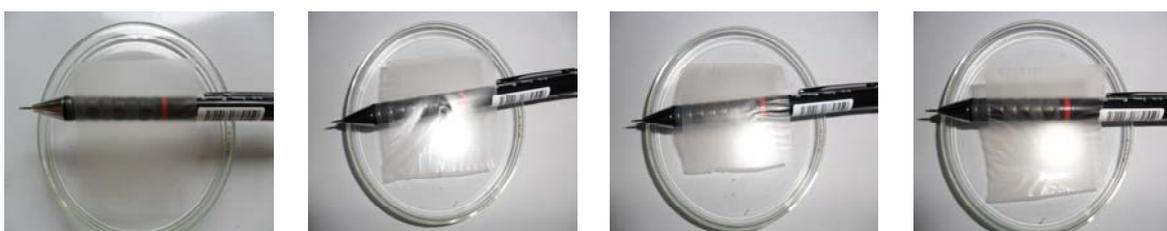


(a)

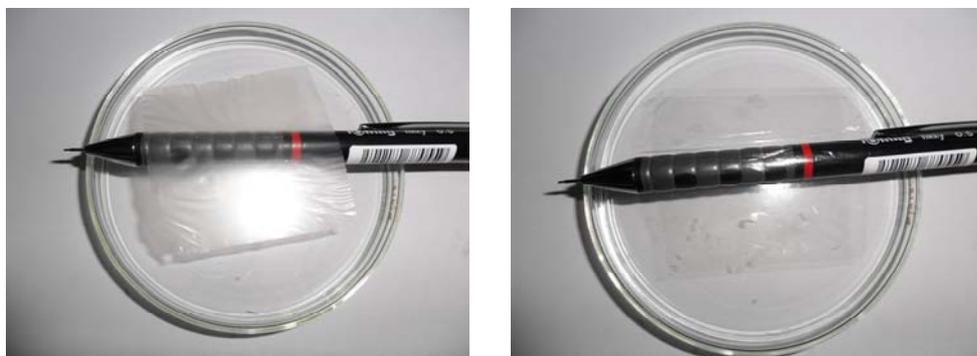
(b)

(c)

(d)



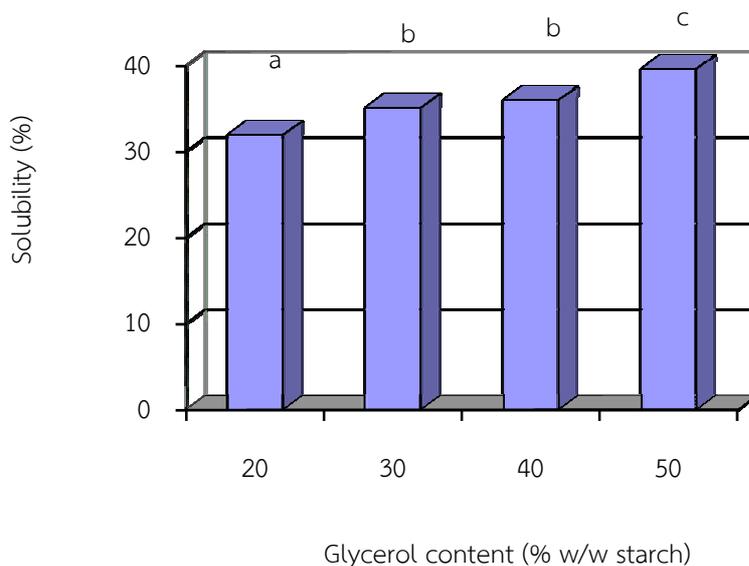
รูปที่ 17 ลักษณะที่ปรากฏของฟิล์มคอมโพสิตแป้งเม็ดทุเรียนที่ผสมพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดที่ 2 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 (a-d) และ 10 (e-h) โดยน้ำหนักของแป้งเม็ดทุเรียน ตามลำดับ เมื่อ (a,e) CMC-DSS, (b,f) Geletin-DSS, (c,g) caragenan-DSS, (d,h) pectin-DSS



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) การเติมพลาสติกไฮเซอรัลจะทำให้ฟิล์มมีการละลายได้เพิ่มขึ้น 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 เนื่องจากไม่สามารถให้แคปซูลแข็งทันทีหรือในเวลาอันรวดเร็ว 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% (Forssell et al., 2002) ในขณะที่แคปซูลแป้งเม็ดทุเรียนทั้งสองสูตรที่เตรียมในงานวิจัยนี้มีความชื้นต่ำอยู่ในช่วง 6.08-6.43 % เมื่อนำแคปซูลแป้งเม็ดทุเรียนมาทดสอบการละลายในน้ำและในสารละลาย 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 ($P < 0.05$)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

ทุเรียนเป็นผลไม้ชนิดหนึ่งที่ปลูกกันมากในประเทศไทย โดยมีเม็ดทุเรียนและเปลือกทุเรียนที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งปริมาณมาจากอุตสาหกรรมแปรรูปทุเรียน สำหรับงานวิจัยนี้ได้เพิ่มมูลค่าเม็ดทุเรียน โดยใช้เป็นวัตถุดิบในการสกัดแยกแ่งซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในเม็ดทุเรียน ซึ่งมีปริมาณถึงร้อยละ 56.03 โดยน้ำหนักแห้ง วิธีการแยกแ่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นกระบวนการง่าย ๆ ต้องการแยกกากที่ไม่ละลายน้ำออก ซึ่งเป็นส่วนที่จะเป็นปัญหาอย่างมาในการเตรียมสารละลายฟิล์มซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีความหนืดและไม่มีรูรั่ว โดยให้ผลผลิตในการสกัดในระดับห้องปฏิบัติการในช่วงร้อยละ 20-30 โดยน้ำหนักเม็ดทุเรียนสด จึงมีความเป็นไปได้ที่จะขยายขนาดสำหรับโครงการนำร่อง (pilot plant) และสำหรับทางการค้าได้ เมื่อพิจารณาลักษณะที่ปรากฏ องค์ประกอบทางเคมี สมบัติทางกายภาพและหน้าที่ของแ่งเม็ดทุเรียนมีความใกล้เคียงกับแ่งข้าวโพดและแ่งมันสำปะหลังดัดแปลงที่มีจำหน่ายทางการค้าที่นิยมใช้แต่ดั้งเดิมในหลายประการ แ่งเม็ดทุเรียนมีสีค่อนข้างขาวให้ค่า hue และ chroma เท่ากับ 87.55 และ 9.14 ตามลำดับ และประกอบด้วยโปรตีน ไขมันหยาบ เยื่อใยหยาบ และเถ้าเท่ากับร้อยละ 7.24, 0.32, 2.36 และ 3.58 โดยน้ำหนักแห้ง เมื่อนำแ่งเม็ดทุเรียนมาให้ความร้อนแ่งสุกที่มีสมบัติข้น (thick) เหนียว (cohesive) โปร่งแสง (translucent) ไม่มีสี (colorless) สามารถอุ้มน้ำและพองตัวได้ดี สมบัติไฮเดรชันของแ่งเม็ดทุเรียนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จึงมีความเหมาะสมกับการใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตฟิล์มที่ย่อยสลายได้

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20-5 โดยน้ำหนักของแ่งเม็ดทุเรียนต่อสมบัติของฟิล์มแ่งเม็ดทุเรียน โดยฟิล์ม DSS ที่มีความเข้มข้นของกลีเซอรอลสูงจะลดความสามารถกีดกันความชื้นของฟิล์ม ลดความแข็งแรงของฟิล์ม แต่ทำให้ฟิล์มยึดตัวได้ดีขึ้น ดังนั้นการเลือกใช้ความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่เหมาะสมเท่านั้นจึงจะทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงจนสามารถขึ้นรูปได้ในขณะที่ต้องมีความยืดหยุ่นเพียงพอที่จะลอกออกจากแม่แบบ โดยเมื่อใช้สารละลายฟิล์มที่มีองค์ประกอบเป็นแ่งเม็ดทุเรียนที่มีความเข้มข้นที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร กลีเซอรอลที่ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของแ่งเม็ดทุเรียน และกรดซิตริกที่ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมขวางพอลิเมอร์ของแ่งที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของแ่งเม็ดทุเรียนจะให้ผลิตภัณฑ์เป็นฟิล์มพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีสมบัติกีดกันความชื้นดีกว่าฟิล์มแ่งมันสำปะหลัง โดยมีค่าการแพร่ผ่านไอน้ำ (WVP) น้อยกว่าประมาณร้อยละ 30 และมีค่า WVP ไม่แตกต่างจากของฟิล์มแ่งข้าวโพด ($P > 0.05$) และมีความยืดหยุ่นสูง ให้ค่าการยึดตัว (E) มากกว่าของฟิล์มแ่งข้าวโพดและแ่งมัน

สำปะหลังประมาณร้อยละ 62 และ 44 ตามลำดับ เนื่องจากสมบัติทั้งสองนี้มีความสำคัญต่อการประยุกต์ใช้ฟิล์ม ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน (DSS films) มีความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานเป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์ทางอาหารดีกว่าฟิล์มแป้งข้าวโพดและฟิล์มแป้งมัน

อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนกับฟิล์มพอลิเมอร์สังเคราะห์ ได้แก่ ฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) และฟิล์มพอลิเอทิลีน (PE) ก็ยังมีความแตกต่างอยู่ค่อนข้างมาก ดังนั้นเพื่อปรับปรุงสมบัติดังกล่าวในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน โดยการเตรียมเป็นฟิล์มคอมโพสิต (composite films) ที่ประกอบด้วยส่วนผสมของแป้งเม็ดทุเรียนกับพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดอื่น ได้แก่ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เจลาติน คาราจีแนน และ เพคติน ซึ่งให้ผลที่แตกต่างกันไป แต่ที่น่าสนใจคือการเติม CMC ลงในฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียนจะทำให้ฟิล์มมีสมบัติการกีดกันความชื้นดีขึ้น โดยสามารถลดค่า WVP ลงมากกว่าร้อยละ 27 ในขณะที่ทำให้ฟิล์มมีค่า E เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 27 เช่นกัน โดยที่ไม่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของฟิล์ม ให้ค่าการต้านการดึงขาด (TS) ไม่แตกต่างกัน ($P > 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคของฟิล์ม ที่พื้นผิวของฟิล์ม CMC-DSS มีความผิดปกติและมีการจัดตัวที่เป็นระเบียบน้อยกว่าฟิล์มแป้งเม็ดทุเรียน นอกจากนี้ฟิล์ม CMC-DSS มีลักษณะที่ปรากฏไม่แตกต่างกับฟิล์ม DSS โดยไม่มีความแตกต่างของค่าความโปร่งแสงและการละลายได้ของฟิล์ม

นอกจากนั้นเมื่อนำแป้งเม็ดทุเรียนมาเตรียมแคปซูลยาแบบแข็ง โดยใช้สูตรเดียวกับที่เตรียมฟิล์มแต่ใช้ความเข้มข้นของแป้งเป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยอาศัยเทคนิคง่าย ๆ โดยการชุบเคลือบ (dip coating technique) พบว่าให้แคปซูลที่มีความใส (clear) ให้พื้นผิวเรียบ (smooth surface) และยืดหยุ่น (flexible) แคปซูลแป้งเม็ดทุเรียนไม่ละลายหมดอย่างสมบูรณ์ในน้ำและในสารละลายกรด HCl ที่มีพีเอช 1.2 ที่อุณหภูมิ 37° C เป็นเวลา 10 นาที กล่าวโดยสรุปได้ว่าถ้าปรับปรุงให้สามารถขึ้นรูปได้ดีขึ้นก็จะทำให้แคปซูลแป้งเม็ดทุเรียนเป็นอีกหนึ่งความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยาเพื่อทดแทนการใช้เจลาตินหรือโปรตีนจากสัตว์ในการผลิตแคปซูลยาแบบแข็งทางการค้า

บรรณานุกรม

- AACC (1983) *Approved Methods of Analysis*, American Association of Cereal Chemist, St. Paul, MN.
- Angsburger, L.A. (1995) *Hard and soft gelatin capsules*, in *Modern Pharmaceutics* G.S. Banker and C.T. Rhodes, Eds., Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 395-440.
- Amiza, M.A., Aziz, Y., Ong, B.C., Wong, V.L. and Pang, A.M. (2004) *CHIEF: Cheap high fiber flour from local fruit seed*. Expo Science, Technology and Innovation 2004. PWTC. Kuala Lumpur. August 27-29.
- Amiza, A.M., Ahmad, A.S., Yap, Y.Y., Yahya, N. and Ibrahim, N. (2007) Extraction, purification and characterization of durian (*Durio zibethinus*) seed gum. *Food Hydrocol.*, 21, 273-279.
- Arvanitoyannis, I., Kalichevsky, M., Blanshard, J.M.V. and Psomiadou, E. (1994) Study of diffusion and permeation of gases in undrawn and uniaxially drawn films made from potato and rice starch conditioned at different relative humidities. *Carbohydr. Polym.*, 24, 1-15.
- Arvanitoyannis, I., Psomiadou, E., Nakayama, A., Aliba, S. and Yamamoto, N. (1997) Edible films made from gelatin, soluble starch and polyols; Part 3. *Food Chem.*, 60, 593-604.
- Arvanitoyannis, I. and Biliaderis, C.G. (1999) Physical properties of polyol-plasticized edible blends made of methylcellulose and soluble starch. *Carbohydr. Polym.*, 38, 47-58.
- Arvanitoyannis, I., Nakayama, A. and Aiba, S. (1998) Edible films made from hydroxypropyl starch and gelatin and plasticized by polyols and water. *Carbohydr. Polym.*, 36, 105-119.
- AOAC (1990) *Official Methods of Analysis*. 15th ed. Association of Official Analytical Chemists. Washington, DC.
- ASTM (1989) *Standard test method for oxygen gas transmission rate through plastic film and sheeting using a colometric sensor (D 3985-81)*. Standards Designation: D882. In *Annal Book of American standard testing methods*. Philadelphia, USA.
- ASTM (1995) *Standard test method for tensile properteis of thin platting sheeting*. Standards Designation: D882. In *Annal Book of American standard testing methods*. Philadelphia, USA.

- ASTM (1998) *Standard test methods for water vapor transmission of materials*. In *Annual Book of ASTM Standard*, American Society for Testing & Materials, West Conshohocken, PA.
- Averous, L. and Boquillon, N. (2004) Biocomposites based on plasticized starch: thermal and mechanical behaviors. *Carbohydr. Polym.*, 56, 111-112.
- Averous, L., Fringant, C. and Moro, L. (2001) Plasticized starch-cellulose interactions in polysaccharide composites. *Polymer*, 42, 6565-6572.
- Ayhllon-Meixueiro, F., Vaca-Garcia, C. and Silvestre, F. (2000) Biodegradable films from isolate of sunflower (*Helianthus annuus*). *J. Agric. Food Chem.*, 48, 3032-3036.
- Bae, H.J., Cha, D.S., Whiteside, W.S. and Park, H.J. (2008) Film and pharmaceutical hard capsule formation properties of mungbean, waterchestnut and sweet potato starches. *Food Chem.*, 106, 96-105.
- Baldwin, E.A. and Baker, R.A. (2002) *Use of proteins in edible coatings for whole and minimally processed fruits and vegetables*. In *Protein-based films and coatings*. (pp. 501-513). Florida, USA: CRC Press.
- Banker, S.B. (1966) Film coating-theory and practice. *J. Pharm. Sci.*, 55, 81-89.
- Bertuzzi, M.A., Armada, M. and Gottifredi, J.C. (2007) Physicochemical characterization of starch based films. *J. Food Eng.*, 82, 17-25.
- Bobio, F.O., El-Dash, A.A., Bobbio, P.A. and Rodingues, L.R. (1978) Isolation and characterization of the physicochemical properties of the starch of jackfruit seeds (*Artocarpus heterophyllus*). *Cereal Chem.*, 55, 505-511.
- Bowman, B.J. and Ofner, C.M. III. (2002) *Hard gelatin capsules*. In A. Gennadios (Ed.) *Protein-based films and coatings*. (pp. 367). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Bryant, C.M. and Hamaker, B.R. (1997) Effect of lime on gelatinization of corn flour and starch. *Cereal Chem.*, 74, 171-175.,
- Chen, H. (1995) Functional properties and applications of biodegradable films made of milk proteins. *J. Dairy Sci.* 78, 2563-2583.
- Cherian, G., Gennadios, A., Weller, C. and Chinachoti, P. (1995) Thermomechanical behavior of wheat gluten films: Effect of sucrose, glycerin and sorbitol. *Cereal Chem.*, 72, 1-6.

- Coughlan, K., Shaw, N.B., Kerry, J.F. and Kerry, J.P. (2004) Combined effect of proteins and polysaccharides on physical properties of whey protein concentrate-based edible films. *J. Food Sci.*, 69, 271-275.
- Cuq, B., Gontard, N., Cuq, J.L. and Guilbert, S. (1997) Selected functional properties of fish myofibrillar protein-based films as affected by hydrophilic plasticizers. *J. Agri. Food Chem.*, 45, 622-626.
- Debeaufort, F., Quezada-Gallo, J.A. and Voilley, A. (1998) Biodegradable films and coating: Tomorrow's packagings: A review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 38,299-313.
- Dermigez, P.D., Elvira, C., Mano, E.J.F., Cunha, S.H.A.M., Piskin, E. and Reis, R.L. (2000) Chemical modification of starch based biodegradable polymeric blends: effects on water uptake, degradation behavior and mechanical properties. *Polym. Degrad. Stabil.*, 70, 161-168.
- Dias, A.B., Muller, C.M.O., Larotonda, F.D.S. and Laurindo, J.B. (2010) Biodegradable films based on rice starch and rice flour. *J. Cereal Sci.*, 51, 213-219.
- Eskin, E.A.M. (1990) *Biochemistry of foods* (2nd ed.) Academic Press.
- Fama, L., Gerschenson, L. and Goyanes, S. (2009) Starch-vegetable fibre composites to protect food products. *Carbohydr. Polym.*, 75, 230-235.
- Fishman, M.L. and Coffin, D.R. (1995) *Films fabricated from mixtures of pectin and starch*. U.S. Patent 5,451,673.
- Flores, S., Fama, L., Rojas, A.M., Goyanes, S. and Gerschenson, L. (2007) Physical properties of tapioca-starch edible films: Influence of filmmaking and potassium sorbate. *Food Res. Int.*, 40, 257-265.
- Forsell, P., Lahtinen, R., Lahelin, M. and Myllarinen, P. (2002) Oxygen permeability of amylose and amylopectin films. *Carbohydr., Polym.*, 47, 125-129.
- Garcia, M.A.,Martino, M.N. and Zarizky, N.E. (2000) Microstructural characterization of plasticized starch-based films. *Starch/Starke*, 52, 118-124.
- Fennadios, A., Weller, C.L., Hanna, M.A. and Froning, G.W. (1996) Mechanical and barrier properties of egg albumin films. *Cereal Chem.*, 70, 426-429.
- Ghanbarzadeh, B., Almasi, H. and Entezami, A. (2010) Improving the barrier and mechanical properties of corn starch-based edible films: effect of citric acid and carboxymethyl cellulose. *Ind. Crops Prod.*, xxx, xxx-xxx.

- Gontard, N., Guilbert, S. and Cuq, J.L. (1993) Water and glycerol as plasticizers affect mechanical and water vapor barrier properties of edible wheat gluten films. *J. Food Sci.*, 58(1), 206-211.
- Guilbert, S. (1986) *Technology and application of edible protective films*. In *Food Packaging and Preservation Theory and Practice*. M. Mathlouthi (ed.) Elsevier Applied Science Publishers, New York, pp. 371-394.
- Han, J.H. (2001) *Design of edible and biodegradable films/coatings containing active ingredients*. Pre-congress short course of IUFoST active biopolymer films and coatings for food and biotechnological used. Seoul, Korea, Korea University.
- Han, M.W. (2001) *Starch and starch products in surface sizing and paper coating* (p. 12) Atlanta GA, USA: Tappi Press.
- Hemar, Y., Hall, C.E., Munro, P.A. and Singh, H. (2002) Small and large deformation rheology and microstructure of κ -carrageenan gels containing commercial milk products. *Int. Dairy J.*, 12, 371-381.
- Hemar, Y., Tamehana, M., Munro, P.A. and Singh, H. (2001) Viscosity, microstructure and phase behavior of aqueous mixture of commercial milk protein products and xanthan gum. *Food Hydrocoll*, 15, 565-574.
- Hu, G. and Gao, J. (2008) Preparation and characteristics of oxidized potato starch films. *Carbohydr. Polym.*, xx,xxx-xxx.
- Imason, A.P., Ledward, D.A. and Mitchell, J.R. (1997) On the nature of the interaction between some anionic polysaccharides and proteins. *J. Sci. Food Agric*, 28, 661.
- Irissin-Mangata, J., Bauduin, G., Boutevin, B. and Gontard, N. (2001) New plasticizers for wheat gluten films. *Eur. Polym. J.*, 37, 1533-1541.
- Kester, J.J. and Fennema, O.R. (1986) Biodegradable films and films: a review. *Food Technol.*, 40(12), 47-59.
- Kim, M. and Lee, S.J. (2002) Characteristics of crosslinked potato starch and starch-filled linear low-density polyethylene films. *Carbohydr. Polym.*, 50, 331-337.
- Korea Food & Drug Administration (2002) *Hard capsule dissolving test*. In *Korea pharmacopoeia* (8th ed., p. 1505) Seoul, Korea, Yakup Daily.

- Kristo, E. and Billianderis, C.G. (2007) Physical properties of starch noncrystal reinforced films. *Carbohydr. Polym.*, 29, 254-259.
- Krochta, J.M., Baldwin, E.A. and Nisperos-Carriedo, M. (1994) In *Edible Coating and Films to Improve Food Quality*. Technomic Publishing Company, Lancaster, P.A.
- Krochta, J.M. and De Mulder-Johnson (1997) Edible and biodegradable polymer films: challenges and opportunity. *Food Technol.*, 51, 61-74.
- Lawton, J.W. (1996) Effect of starch type on the properties of starch containing films. *Carbohydr. Polym.*, 29, 203-208.
- Lee, J.J. and Rhim, J.W. (2000) Characterization of biodegradable films based with various cultivars of sweet potato starch. *Korean J. Food Sci. Technol.*, 32, 834-842.
- Liu, Z. (2005) *Edible films and coating from starches*. In J.H. Han (Ed.). Innovations in food packaging (pp. 318-336). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- Lopez, O.V., Garcia, M.A. and Zaritzky, N.E. (2008) Film forming capacity of chemically modified corn starches. *Carbohydr. Polym.*, 73, 573-581.
- Lourdin, D., Valle, G.D. and Colonna, P. (1995) Influence of amylase content on starch films and foams. *Carbohydr. Polym.*, 27, 261-270.
- Lourdin, D., Bizot, H. and Colonna, P. (1997a) Antiplasticization in starch-glycerol films. *J. Appl. Polym. Sci.*, 63, 1047-1053.
- Lourdin, D., Bizot, H. and Colonna, P. (1997b) Correlation between static mechanical properties of starch-glycerol materials and low-temperature relaxation. *Macromol. Symp.*, 114, 179-185.
- Lu, Y.S., Weng, L.H. and Cao, X.D. (2005) Biocomposites of plasticized starch reinforced with cellulose crystallites from cottoned linter. *Macromol. Biosci.*, 5, 1101-1107.
- Lu, Y.S., Weng, L.H. and Cao, X.D. (2006) Morphological, thermal and mechanical properties of ramie crystallites-reinforce plasticized starch composites. *Carbohydr. Polym.*, 63, 198-204.
- Ma, X., Chang, P.R. and Yu, J. (2008) Properties of biodegradable thermoplastic pea starch/carboxymethyl cellulose and pea starch/microcrystalline cellulose composites. *Carbohydr. Polym.*, 72, 369-375.
- Mali, S., Grossmann, M.V.E., Garcia, M.A., Martino, M.N. and Zaritzky, N.E. (2002) Microstructural characterization of yam starch films. *Carbohydr. Polym.*, 50, 379-386.

- Martelli, S.M., Moore, G., Paes, S.S., Gandolfo, C. and Laurindo, J.B. (2006) Influence of plasticizers on the water sorption isotherms and water vapor permeability of chicken feather keratin films. *LWT*, 39, 292-301.
- McHugh, T.H., Aujard, J.F. and Krochta, J.M. (1994) Plasticized whey protein biodegradable films: water vapor permeability properties. *J. Food Sci.*, 59, 416-423.
- McHugh, T.H. and Krochta, J.M. (1994a) Milk-protein-base biodegradable films and coatings. *Food Technol.*, 48, 97-103.
- McHugh, T.H. and Krochta, J.M. (1994b) Sorbital vs. glycerol-plasticized whey protein biodegradable films: integrated oxygen permeability and tensile property evaluation. *J. Agric. Food Chem.*, 42, 841-845.
- McHugh, T.H. and Olsen, C.W. (2004) *Tensile properties of fruit and vegetable edible films*. United States-Japan Cooperative Program In Nature Resources 104-108.
- Park, H.J., Bunn, J.M., Weller, C.L., Vergano, P.J. and Testin, R.F. (1994) Water vapour permeability and mechanical properties of grain protein-based films as affected by mixture of polyethylene glycol and glycerin plasticizers. *Trans. ASAE.*, 37, 1281-1285.
- Pavlath, A.E. and Robertson, G.H. (1999) Biodegradable polymers vs. recycling: What are the possibilities. *Crit. Rev. Anal. Chem.*, 29, 231-241.
- Perez-Gago, M.B., Nadaud, P. and Krochta, J.M. (1999) Water vapor permeability, solubility, and tensile properties of heat-denatured versus native whey protein films. *J. Food Sci.*, 64, 1034-1037.
- Pimpa, W. and Pongkongkaew, P. (2008) Porcine plasma protein film and its application to food preservation, *KMITL Sci. J.*, 7(2), 69-75.
- Ramaraj, B. (2007) Crosslinked poly(vinyl alcohol) and starch composite films. II physicomechanical, thermal properties and swelling studies. *J. Appl. Polym. Sci.*, 103, 909-916.
- Romero-Bastida, C.A., Bello-Perez, L.A., Garcia, M.A., Martino, M.N., Solorza, --Feria, J. and Zarintzky, N.E. (2005) Physicochemical and microstructural characterization of films prepared by thermal and cold gelatinization from non-conventional sources of starches. *Carbohydr. Polym.*, 60, 235-244.

- Salleh, E., Muhamad, I.I. and Khairuddin, N. (2009) Structural Characterization and physical properties of antimicrobial (AM) starch-based films. *World Acad. Sci. Eng. Technol.*, 55, 432-440.
- Sanchez, A.C., Poplineau, Y., Mangavel, C., Larre, C. and Gueguen, J. (1998) Effect of different plasticizers on the mechanical and surface properties of wheat gliadin films. *J. Agric. Food Chem.*, 46, 4539-4544.
- Sanchez-Hernandez, L., Solorza-Feria, J., Mendez-Montealvo, G., Paredes-Lopez, O. and Bello-Perez, L.A. (2002) Isolation and partial characterization of okenia (*Okenia hypogaea*) starch. *Starch/Starke*, 54, 193-197.
- Soares, R.M.D., Lima, A.M.F., Oliverira, R.V.B., Pires, A.T.N. and Soldi, V. (2005) Thermal degradation of biodegradable edible films based on xanthan and starches from different sources. *Polym. Degrad. Stabil.*, 90, 449-454.
- Sothornvit, R. and Krochta, J.M. (2005) *Plasticizers in edible films and coatings*. In J.H. Han (Ed.) *Innovations in food packagings*. (pp. 403-428) Amsterdam, The Netherland: Elsevier.
- Sreedhar, B., Chattopadhyay, D.K., Karunakar, M.S.H. and Sastry, A.R.K. (2006) Thermal and surface characterization of plasticized starch polyvinyl alcohol blends crosslinked with epichlorohydrin. *J. Appl. Polym. Sci.*, 101, 25-34.
- Talja, R.A., Helen, H., Roos, Y.H. and Jouppila, K. (2007) Effect of various polyols and polyol contents on physical and mechanical properties of potato starch-based films. *Carbohydr. Polym.*, 67, 288-295.
- Thakur, B.R., Singh, R.K. and Handa, A.K. (1997) Chemistry and uses of pectin-a review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutri.*, 37, 47-73.
- Tanaka-Palmu, P.S. and Grosso, C.R.F. (2003) Development and characterization of edible films based on gluten from semi-hard and soft Brazilian wheat flours. *Cienc Technol. Aliment.*, 23, 264-269.
- Van Soest, J.J.G and Essers, F. (1997) Influence of amylase-amylopectin ratio on properties of extruded starch plastic sheets. *J. Macromol. Sci. Pur Appl. Chem.*, A34, 1665-1689.
- Yang, J., Webb, A. and Ameer, G. (2004) Novel citric acid-based biodegradable elastomers for tissue engineering. *Adv. Mater.*, 16, 511-516.

- Yin, Y., Li, J., Liu, Y and Li, Z. (2005) Starch crosslinked with poly(vinyl alcohol) by boric acid. *J. Appl. Polym. Sci.*, 96, 1394-1397.
- Zobel, H.F. (1994) *Starch granule structure*. In R.J. Alexander and H.F. Zobel (Eds.) *Developments in carbohydrate chemistry* (pp. 1-36). St Paul, MN: The American Association of Cereal Chemists.