

รายงานการวิจัย ฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การลดการเกิดเม็ดแป้งมันสำปะหลังหยาบระหว่างกระบวนการแปร
ผลิตแป้งมันสำปะหลังเพื่อการส่งออก

เสนอ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

หัวหน้าโครงการ

ผศ. ดร. มณฑิรา นพรัตน์

ผู้ร่วมโครงการ

นางสาวสุนิต อิชยาวณิชย์

เดือนมกราคม 2554

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากลไกการเกาะตัวกันของแป้งมันสำปะหลังที่อาจเกิดขึ้นได้ระหว่างการอบแห้งแบบพาหะลม กลไกที่สนใจได้แก่ การเกิดสะพานของเหลว การเกิดสะพานของแข็ง และการเกาะเกี่ยวกันระดับจุลภาค โดยที่การเกิดสะพานของเหลวและของแข็งจะศึกษาบนพื้นฐานของการเปลี่ยนสถานะจากสถานะคล้ายแก้วเป็นสถานะคล้ายยาง การเกิดเจลลิตีในเซชัน และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลัง โดยอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากสถานะคล้ายแก้วเป็นสถานะคล้ายยางและอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งมันสำปะหลังจะถูกศึกษาด้วยเครื่อง DSC หลังจากนั้นแป้งมันสำปะหลังจะถูกอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมขนาดเล็กที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน ได้แก่ 120 160 และ 200 องศาเซลเซียส โดยระหว่างการอบแห้ง แป้งจะถูกนำออกมาวัดอุณหภูมิ ความชื้น และขนาดอนุภาค รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้ง ซึ่งผลการทดลองพบว่าแป้งมันสำปะหลังไม่เกิดการเจลลิตีในเซชันระหว่างการอบแห้ง แต่ทว่าช่วงแรกของการอบแห้ง อุณหภูมิของแป้งมันสำปะหลังจะสูงกว่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากสถานะคล้ายแก้วเป็นสถานะคล้ายยาง ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแป้งมันสำปะหลังอยู่ในสถานะคล้ายยาง ส่งผลให้แป้งมันสำปะหลังเกิดการเกาะตัวกันมากขึ้น และหลังจากแป้งมันสำปะหลังเคลื่อนที่ผ่านช่วงกลางของการอบแห้งไปแล้ว แป้งมันสำปะหลังจะเปลี่ยนจากสถานะคล้ายยางเป็นสถานะคล้าย ส่งผลให้แป้งมีขนาดอนุภาคเล็กลง

การศึกษาผลของความเสียหายของแป้งมันสำปะหลังที่มีต่อการเกาะตัวกันของแป้งมันสำปะหลังระหว่างการอบแห้งแบบพาหะลม เพื่อศึกษาว่าแป้งมันสำปะหลังที่เกิดความเสียหายที่ผิวระหว่างการอบแห้งไม่สามารถเกิดการเกาะตัวกันแบบเกาะเกี่ยวกันระดับจุลภาคได้หรือไม่ โดยแป้งจะถูกอบแห้งด้วยเวลาต่าง ๆ กัน เพื่อให้ได้แป้งที่มีความเสียหายในระดับที่แตกต่างกัน และเพื่อศึกษาเฉพาะผลของการเกาะตัวกันแบบเกาะเกี่ยวกันระดับจุลภาค อุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากสถานะคล้ายแก้วเป็นสถานะคล้ายยางและอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งมันสำปะหลังที่มีระดับความเสียหายแตกต่างกันจะถูกศึกษาเป็นอันดับแรก และหลังจากนั้นแป้งที่มีระดับความเสียหายแตกต่างกันนี้จะถูกนำไปอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมขนาดเล็ก จากนั้นแป้งมันสำปะหลังแห้งที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์หาการกระจายตัวของอนุภาค ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดพบว่าความเสียหายของแป้งมีผลต่ออุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากสถานะคล้ายแก้วเป็นสถานะคล้ายยางและอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้ง แต่ทว่าแป้งที่มีอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะจากสถานะคล้ายแก้วเป็นสถานะคล้ายยางและอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันไม่แตกต่างกันจะมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อความเสียหายของแป้งเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : แป้งมันสำปะหลัง/การอบแห้งแบบพาหะลม/แป้งหยาบ

Abstract

This thesis involved experimental cassava starch agglomeration during pneumatic conveying drying. The possible agglomeration mechanisms of cassava starch during pneumatic conveying drying were proposed. Three mechanisms including liquid bridge, solid bridge, and micromechanical interlocking were investigated. For liquid and solid bridges, both mechanisms were investigated based on glass transition, gelatinization, and structural changes of the starch. Glass transition and gelatinization temperature of the starch were determined at various starch moisture contents. To investigate phase transition of the starch, the starch was dried using pilot-scale pneumatic conveying dryer. Temperature, moisture content and particle size distribution of the starch were measured along the drying tube. Further, the percentages of gelatinization and percentages of crystallinity during pneumatic conveying drying were investigated by using DSC and XRD, respectively. Experimental results showed that the starch did not gelatinize during the drying process. However, at the early stage of drying process, the temperature of the starch was higher than its glass transition temperature indicating that the starch was in rubbery phase. After the starch passed the middle stage of drying tube, the phase changed from rubbery to glassy state. These changes of the cassava starch correlated with the changes of particle size. The agglomeration of the cassava starch occurred when the cassava starch was in rubbery phase.

The effects of damaged starch content on cassava starch agglomeration during pneumatic conveying drying were determined to investigate the starch agglomeration by micro-mechanical interlocking. The starch was wet milled at different time to obtain the starch samples with different damaged starch content. To investigate only micro-mechanical interlocking, glass transition and gelatinization temperatures of the starch

samples were investigated. After that, the starch samples were dried in pilot-scale pneumatic conveying dryer. Particle size distribution of the dried samples was determined. Experimental results showed that starch damage had profound effect on glass transition and gelatinization temperatures of the starch samples. Glass transition and gelatinization temperatures decreased with increasing damaged starch content. Some fractions of the starch samples gelatinized during milling. After the drying process, particle size of the dried starch samples which had similar glass transition and gelatinization temperatures increased when damaged starch content increased.

Keywords : Cassava starch/Pneumatic conveying drying/Oversize starch

สารบัญเรื่อง

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	2
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	4
บทที่ 1 บทนำ	9
บทนำ	9
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	10
ขอบเขตของโครงการวิจัย	10
ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	10
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมและสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง	12
บทที่ 3 วัตถุประสงค์และวิธีการทดลอง	17
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	20
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	32
เอกสารอ้างอิง	33

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 อนุภาคแป้ง	13
รูปที่ 2 ตัวอย่างการเจาะช่องเก็บตัวอย่าง	18
รูปที่ 3 อุปกรณ์เก็บตัวอย่าง (Thief probe)	18
รูปที่ 4 อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วและเกิดเจลลาติไนเซชัน และอุณหภูมิของแป้งระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนที่มีอุณหภูมิ (a) 120°C; (b) 160°C; (c) 200°C	23
รูปที่ 5 ค่า ($T_{\text{cassava starch}} - T_g$) และขนาดอนุภาค (D90) ของแป้งมันสำปะหลัง ระหว่างการอบแห้งแบบพาหะลม	26
รูปที่ 6 การกระจายตัวของอนุภาคแป้งมันสำปะหลังที่มีร้อยละความเสียหาย ของแป้งต่าง ๆ กัน	31

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 อุณหภูมิและความชื้นของแป้งมันสำปะหลังระหว่างการอบ แห้งแบบพาหะลมที่อุณหภูมิ 120 160 และ 200 องศาเซลเซียส	21
ตารางที่ 2 อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วของแป้งมันสำปะหลัง ที่ความชื้นต่าง ๆ	22
ตารางที่ 3 อุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งมันสำปะหลังที่ความชื้น ต่าง ๆ	22
ตารางที่ 4 ขนาดอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังระหว่างการอบแห้งแบบพาหะ ลมที่อุณหภูมิ 120 160 และ 200 องศาเซลเซียส	24
ตารางที่ 5 ระดับความเป็นผลึกของแป้งมันสำปะหลังระหว่างการอบแห้งแบบ พาหะลม	27
ตารางที่ 6 ระดับการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งมันสำปะหลังระหว่างการอบ แห้งแบบพาหะลม	27
ตารางที่ 7 ร้อยละความเสียหายของเม็ดแป้งมันสำปะหลังที่เวลาไม่ต่าง ๆ	28
ตารางที่ 8 อุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของแป้งมันสำปะหลังที่ มีร้อยละความเสียหายของเม็ดแป้งระดับต่าง ๆ	29
ตารางที่ 9 อุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งมันสำปะหลังที่ มีร้อยละความเสียหายของเม็ดแป้งระดับต่าง ๆ	30

บทที่ 1 บทนำ

1.1 บทนำ

มันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญอย่างยิ่งของประเทศไทยรองจากข้าวและอ้อย เนื่องจากเป็นพืชที่ทนความแห้งแล้งได้ดี สามารถเพาะปลูกได้ในดินหลากหลายชนิด ผลตอบแทนต่อไร่สูง และมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าพืชชนิดอื่น ๆ โดยในประเทศไทยมีการเพาะปลูกมันสำปะหลังในช่วงระหว่างปี 2545-2546 ประมาณ 20 ล้านตัน คิดเป็นมูลค่า 18,000 ล้านบาท (<http://oae.go.th>) ซึ่งจากการที่ในปัจจุบันแป้งมันสำปะหลังในตลาดโลกมีราคาสูง ส่งผลให้ประมาณครึ่งหนึ่งของหัวมันสำปะหลังสดที่ผลิตได้ทั้งหมดถูกนำไปแปรรูปเป็นแป้งมันสำปะหลัง โดยปริมาณแป้งที่ผลิตได้มีมากกว่า 2 ล้านตันต่อปี ซึ่งทำให้ประเทศไทยกลายเป็นผู้นำด้านการส่งออกแป้งมันสำปะหลังและผลิตภัณฑ์จากแป้งมันสำปะหลังที่ใหญ่ที่สุดในโลก (<http://www.tapiocathai.org>)

กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังในระดับอุตสาหกรรมของประเทศไทยจะเริ่มต้นด้วยการรับซื้อหัวมันสำปะหลังสดจากเกษตรกร หลังจากนั้นหัวมันสำปะหลังสดจะถูกนำไปร่อนเอาทรายและสิ่งสกปรกออก ล้าง ปอกเปลือกและตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ก่อนจะส่งชิ้นมันสำปะหลังที่ได้เข้าสู่กระบวนการโม้เปียก สกัดและแยกเพื่อให้ได้แต่เฉพาะน้ำแป้ง เหยียงแยกเอาน้ำออกแล้วจึงนำแป้งหมักที่ได้ไปทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม ระหว่างการอบแห้งแป้งมันสำปะหลังนั้นแป้งมันสำปะหลังประมาณร้อยละ 1 ของแป้งทั้งหมดจะเกาะตัวกันเกิดเป็นก้อนขนาดใหญ่กว่า 150 ไมครอน ซึ่งเรียกว่าแป้งหยาบ แป้งหยาบนี้มีคุณสมบัติไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน เนื่องจากมีความหนืดต่ำ อุณหภูมิในการเกิดเจลสูงทำให้ต้องใช้เวลาและพลังงานในการให้ความร้อนมาก นอกจากนี้อัตราการถูกย่อยด้วยกรดและเอนไซม์ยังต่ำ จึงไม่เหมาะที่จะนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ตลอดจนแป้งหยาบนี้ยังมีลักษณะภายนอกไม่สวยงาม ไม่น่าบริโภคอีกด้วย ดังนั้นผู้ผลิตแป้งมันสำปะหลังจึงต้องทำการร่อนแป้งมันสำปะหลังที่ผลิตได้เพื่อแยกเอาแป้งหยาบออกเสียก่อนจะทำการบรรจุ หลังจากนั้นจึงนำแป้งหยาบที่แยกออกมาได้ไปทำการละลายน้ำและส่งเข้าสู่กระบวนการผลิตใหม่อีกครั้งหนึ่ง (Wanlapatit, 1998) ส่งผลให้ผู้ผลิตต้องแบกรับค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ในการจัดการกับแป้งหยาบนี้เพิ่มขึ้น คิดเป็นมูลค่าประมาณร้อยละ 0.2 ของต้นทุนการผลิตทั้งหมด (Phattaravicien, 1998) ดังนั้นถ้าทำการลดปริมาณการเกิดแป้งหยาบหรือป้องกันการเกิดแป้งหยาบระหว่างการอบแห้งแบบพาหะลมได้ก็จะเป็นการช่วยประหยัดต้นทุนการผลิตแป้งมันสำปะหลังได้อย่างมหาศาล

การลดปริมาณการเกิดแป้งหยาบหรือป้องกันการเกิดแป้งหยาบระหว่างการอบแห้งแบบพาหะลม จำเป็นที่จะต้องอาศัยความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับกลไกในการเกาะตัวกันของแป้งมันสำปะหลังซึ่งเกิดขึ้น

ระหว่างการอบแห้ง แต่ในปัจจุบันนี้ยังไม่มีการวิจัยใด ๆ เกี่ยวกับเรื่องเหล่านี้เลย ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาถึงกลไกในการเกาะตัวกันของแป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งหยาบระหว่างการอบแห้งแบบพาหะลม เพื่อให้ได้ความรู้พื้นฐานเชิงลึกซึ่งสามารถนำไปใช้ในการแก้ปัญหาเรื่องแป้งหยาบ ซึ่งจะเป็นการช่วยลดต้นทุนการผลิตในอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง รวมทั้งช่วยประหยัดการใช้พลังงานของชาติอีกทางหนึ่งด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อศึกษากลไกการเกาะตัวกันของแป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งหยาบระหว่างการอบแห้งแบบพาหะลม

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

อบแห้งแป้งมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมขนาดทดลอง

1.4 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

ปัจจุบันนี้มีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเกาะตัวกันของวัสดุผงหลายชนิดในระหว่างการอบแห้งแบบต่าง ๆ ซึ่งผลการวิจัยพบว่ากลไกการเกาะตัวกันของวัสดุผงระหว่างการอบแห้งล้วนแล้วแต่มีความเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของผิวหน้าของวัสดุเหล่านั้น รวมถึงเกี่ยวข้องกับลักษณะการเคลื่อนที่และการชนกันของวัสดุผงนั้นภายในระบบการอบแห้ง โดยกลไกการเกาะตัวกันในระหว่างการอบแห้งที่พบในขณะนี้ มี 3 ชนิดด้วยกัน ได้แก่

1. การเกิดสะพานของเหลว (Liquid bridge)

การเกิดสะพานของเหลวมักเป็นกลไกการเกาะตัวกันของวัสดุผงที่มีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน (Amorphous powder) ซึ่งวัสดุผงที่มีโครงสร้างที่เป็นอสัณฐานนี้เมื่อได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิซึ่งเรียกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสภาวะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature) แล้ว ก็จะเปลี่ยนสถานะจากสถานะคล้ายแก้ว (Glassy state) เป็นสถานะคล้ายยาง (Rubbery state) ซึ่งมีความเหนียวสูง โดยเฉพาะบริเวณผิวหน้าซึ่งได้รับความร้อนสูงกว่าส่วนอื่นๆ ส่งผลให้เมื่อวัสดุผงเคลื่อนที่มาชนกันแต่ละอนุภาคจึงสามารถเกาะติดกันได้ (Papadakis และ Bahu, 1992)

2. การเกิดสะพานของแข็ง (Solid bridge)

การเกิดสะพานของแข็งนี้พบว่าเป็นกลไกของการเกิดการเกาะตัวกันของวัสดุผงบางชนิด เช่น นมผง CaCO_3 เป็นต้น โดยกลไกนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีของแข็งภายในวัสดุละลายออกมาสู่น้ำหรือของเหลวใด ๆ ที่อยู่บนผิวหน้าของวัสดุนั้นจนเกิดเป็นสารละลายเข้มข้น ดังนั้นเมื่อวัสดุผงเคลื่อนที่มาชนกัน สารละลายเข้มข้นนี้จะสามารถเชื่อมต่อกันได้ และเมื่อการอบแห้งสิ้นสุดลง อนุภาคของวัสดุผงจะยังเกาะติดกันอยู่ (Papadakis และ Bahu, 1992)

3. การเกิดการเกี่ยวตัวกันระดับจุลภาค (Micromechanical Interlocking)

เมื่ออนุภาคของวัสดุผงเกิดความเสียหายที่บริเวณผิวหน้าจากการได้รับแรงทางกล ผิวหน้าจะมีความขรุขระหรือฉีกขาดมากขึ้น ดังนั้นเมื่อวัสดุผงที่มีความเสียหายที่บริเวณผิวหน้าเคลื่อนที่มาชนกัน ระหว่างการอบแห้ง จะเกิดการเกาะเกี่ยวกันจนเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นได้ (Papadakis และ Bahu, 1992)

ในงานวิจัยนี้ การเกาะตัวกันของแป้งมันสำปะหลังระหว่างรอบแห้งแบบพาหะลมอาจเกิดได้จากกลไกการเกาะตัวกันทั้งสามชนิดที่กล่าวมา โดยกลไกการเกิดสะพานของเหลวในแป้งมันสำปะหลังอาจเกิดเนื่องมาจากแป้งมันสำปะหลังเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน (Sriroth, 2000) และสถานะในการอบแห้งแป้งมันสำปะหลังแบบพาหะลมเหมาะสมต่อการเปลี่ยนแปลงสถานะของแป้งมันสำปะหลังจากสถานะคล้ายแก้วเป็นสถานะคล้ายยาง ในขณะที่กลไกการเกิดสะพานของแข็งน่าจะเกิดต่อเนื่องจากการเกิดสะพานของเหลว นั่นคือเมื่ออุณหภูมิของแป้งมันสำปะหลังระหว่างรอบแห้งสูงกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนเซชัน (Gelatinization temperature) และเม็ดแป้งมีความชื้นเพียงพอ อะมิโลส อาจละลายออกมาจากเม็ดแป้งสู่น้ำบริเวณผิวหน้า ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดสะพานของแข็งขึ้นได้เมื่อเม็ดแป้งเคลื่อนที่มาชนกัน นอกจากนี้ในระหว่างการอบแห้งแป้งมันสำปะหลังแบบพาหะลม ผิวหน้าของแป้งมันสำปะหลังอาจเกิดความเสียหายเนื่องมาจากการเสียดสีกันระหว่างเม็ดแป้งด้วยกันเอง และระหว่างเม็ดแป้งกับตัวท่ออบแห้ง ซึ่งความเสียหายที่ผิวหน้าของเม็ดแป้งนี้อาจนำไปสู่การเกิดกลไกการเกาะตัวกันของแป้งมันสำปะหลังชนิดการเกี่ยวตัวกันระดับจุลภาคได้

บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมและสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

2.1 แป้ง

แป้งเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างผสมระหว่างส่วนที่เป็นผลึก (crystallite areas) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous areas) โดยแป้งเกิดจากการรวมตัวเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส อันได้แก่ อะมิโลสและอะมิโลเพกติน และองค์ประกอบอื่น ๆ ที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต มีสูตรทางเคมี คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ ในปัจจุบันมีแป้งอยู่มากมายหลายชนิดซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่นำมาผลิต เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวโพด แป้งสาลี เป็นต้น (Sriroth, 2000)

2.2 แป้งมันสำปะหลัง

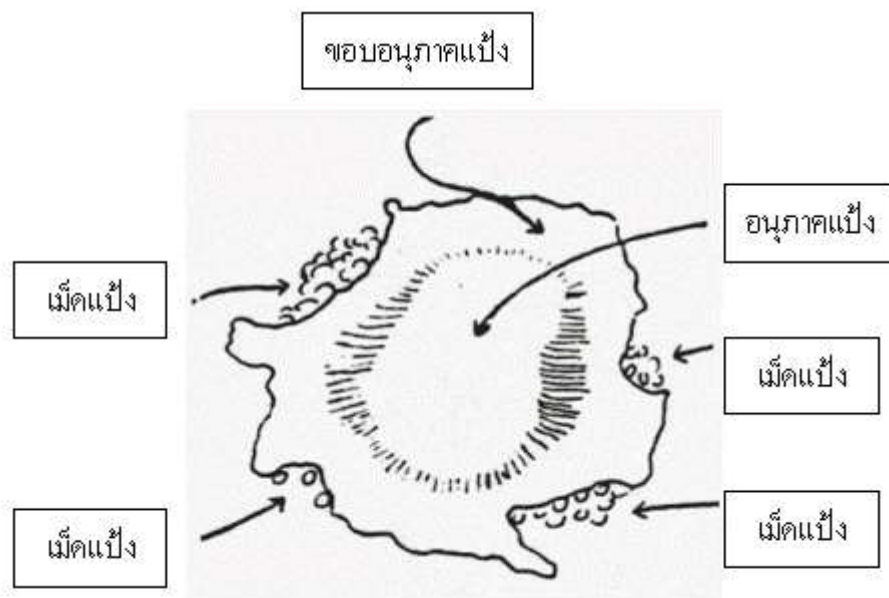
แป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งชนิดหนึ่งที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากเป็นแป้งที่มีความหนืดสูง ไม่มีกลิ่นหรือรสรุนแรง สามารถย่อยสลายได้ง่าย ราคาถูก และสามารถสกัดแป้งได้ในปริมาณสูง โดยลักษณะของแป้งมันสำปะหลังตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 274-2521 กำหนดไว้ว่า แป้งมันสำปะหลังต้องเป็นผงละเอียดมีสีขาวหรือครีมอ่อน ไม่เกิดการหมัก ไม่เหม็นอับ หรือไม่มีกลิ่นน่ารังเกียจ ไม่มีแมลง สารแปลกปลอมอื่นๆ ปะปน และยังคงมีลักษณะต่างๆ ตามที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังกำหนด โดยทั่วไปการผลิตที่ใช้กันทั่วไปในปัจจุบันคือกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังแบบสตั๊ดแห้ง ซึ่งมีขั้นตอนการผลิตดังนี้ (Wanlapatit, 1998)

1. ชั่งน้ำหนักและวัดเปอร์เซ็นต์แป้งในหัวมันสำปะหลัง โดยใช้เครื่องวัดแบบ Raimann's scale
2. ส่งเข้าเครื่องร่อนดินทราย
3. ส่งเข้าเครื่องปอกเปลือกและล้างหัวมันในเครื่องเดียวกัน
4. นำหัวมันสดที่ล้างสะอาดแล้วเข้าเครื่องโม้ละเอียด แล้วเข้าเครื่องสกัดแป้ง (extractor) แยกเอากากและน้ำแป้งออกจากกัน ส่วนของกากมันจะถูกส่งไปยังลานตากแดด เพื่อขายเป็นส่วนประกอบของอาหารสัตว์ หรือนำไปผสมกับมันเส้นเพื่อทำมันอัดเม็ด
5. ส่วนของน้ำแป้งจะทำให้บริสุทธิ์ด้วยเครื่องแยกแป้ง (separator) เพื่อแยกแป้งออกจากน้ำแป้ง ทำให้ได้น้ำแป้งที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น
6. แยกน้ำแป้งออกจากแป้งโดยใช้เครื่องสตั๊ดแห้ง (centrifugal) เพื่อเหวี่ยงแยกน้ำออกจากแป้ง แป้งที่ได้จะมีความชื้นอยู่ระหว่างร้อยละ 40 ถึง 50 มาตรฐานแห้ง

7. อบแป้งให้แห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม โดยอุณหภูมิในการอบแห้งจะอยู่ในช่วง 120 ถึง 200 องศาเซลเซียส ความเร็วลมร้อนประมาณ 20 ถึง 40 เมตรต่อวินาที
8. แป้งที่อบแห้งแล้วจะผ่านเข้าเครื่องร่อนแป้ง (siever) เพื่อแยกแป้งหยาบซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า 150 ไมครอนออก แป้งหยาบจะถูกส่งไปละลายน้ำและส่งกลับเข้าสู่ขั้นตอนการสกัดอีกครั้งหนึ่ง
9. ส่วนแป้งที่ละเอียดจะบรรจุลงถุงเพื่อจัดจำหน่ายต่อไป

2.3 โครงสร้างของแป้ง

โดยปกติเมื่อทำการสกัดแป้งออกจากพืชแล้ว เม็ดแป้ง (starch granule) จะไม่แยกออกจากกันโดยเด็ดขาด แต่จะยังคงเกาะกลุ่มรวมตัวกันเป็นอนุภาคแป้ง (starch particle) โดยการเชื่อมต่อนี้ระหว่างสายอะมิโลสและอะมิโลเพกตินจากเม็ดแป้งแต่ละเม็ด ดังรูปที่ 1 ซึ่งขนาดของอนุภาคแป้งจะขึ้นอยู่กับแรงที่ใช้ในการสกัดและวิธีการในการสกัดแป้งออกจากพืช (Kerr และคณะ, 2000)



รูปที่ 1 อนุภาคแป้ง

(ที่มา : ดัดแปลงจาก Jones, 1940)

เมื่อแยกเม็ดแป้งแต่ละเม็ดออกจากกัน จะพบว่าเม็ดแป้งจากแป้งแต่ละชนิดจะมีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันออกไป โดยโครงสร้างของเม็ดแป้งจะมีลักษณะเป็นแบบ birefringence ทำให้เห็นเป็นลักษณะคล้ายกากบาทบนเม็ดแป้ง ซึ่งเม็ดแป้งเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างผสมระหว่างส่วนที่เป็นผลึก (crystallite areas) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous areas) โดยแป้งเกิดจากการรวมตัวเป็นพอลิ

เมอร์ของกลูโคส อันได้แก่ อะมิโลสและอะมิโลเพกติน และองค์ประกอบอื่น ๆ ที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต มีสูตรทางเคมี คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ ในปัจจุบันมีแป้งอยู่มากมายหลายชนิดซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่นำมาผลิต เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวโพด แป้งสาลี เป็นต้น (Sriroth, 2000)

2.4 การเปลี่ยนแปลงสถานะของแป้ง

ในปัจจุบันการเปลี่ยนแปลงสถานะของแป้งพบได้ 2 ชนิดหลัก ๆ ได้แก่

1. การเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition)

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิซึ่งเรียกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature) แล้ว ก็จะเปลี่ยนสถานะจากสถานะคล้ายแก้ว (Glassy state) ซึ่งมีลักษณะคล้ายของแข็ง เป็นสถานะคล้ายยาง (Rubbery state) ซึ่งมีลักษณะคล้ายของเหลวหนืด แป้งจะมีอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วนี้แตกต่างกันไปขึ้นกับชนิดของแป้ง อุณหภูมิ และความชื้น โดยแป้งมันสำปะหลังจะมีอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วอยู่ที่ประมาณ 50 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วจะลดลงตามความชื้นของแป้งที่เพิ่มขึ้น (Zeleznaк และ Hoseneу, 1987)

2. การเกิดเจลาตินในเซชัน (Gelatinization)

การเกิดเจลาตินในเซชันเป็นคุณสมบัติเฉพาะของแป้งที่รวมคุณสมบัติในการดูดซับน้ำ การพองตัว การละลาย และความหนืดของแป้งไว้ด้วยกัน โดยเป็นคุณสมบัติที่มีการนำไปใช้ในการผลิตอาหารมากที่สุด ซึ่งคุณสมบัติในการเกิดเจลาตินในเซชันนี้จะเกิดระหว่างการทำความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง และสามารถแบ่งได้เป็น 4 ระยะ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ระยะที่ 1 ก่อนถึงอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชัน เม็ดแป้งจะดูดซับน้ำได้อย่างจำกัด และเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากเม็ดแป้งมีลักษณะเป็นร่างแหไมเซล (micelle) ซึ่งยึดหยุ่นได้อย่างจำกัด ทำให้ไม่สามารถดูดซับน้ำได้มาก โดยในระยะนี้เม็ดแป้งจะยังคงมีรูปร่างและโครงสร้างเหมือนเป็นแป้งดิบ ความหนืดจะไม่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน (Sriroth, 2000)

ระยะที่ 2 เมื่ออุณหภูมิสูงถึงอุณหภูมิเจลาตินในเซชัน ในระยะนี้เม็ดแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็วเนื่องจากความร้อนเข้าไปทำลายพันธะไฮโดรเจนภายในเม็ดแป้ง ซึ่งการพองตัวแบบนี้จะเป็นการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เนื่องจากโครงสร้างของอะมิโลเพกตินภายในเม็ดแป้งถูกทำลายไปแล้ว อะมิโลส จะละลายออกมานอกเม็ดแป้ง ทำให้ความหนืดของสารละลายน้ำแป้งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เกิดเป็นสารละลายน้ำแป้งที่มีความข้นหนืดซึ่งเรียกว่า sol (Eliasson, 1996) ซึ่งเช่นเดียวกับการเกิดการ

เปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิในการเกิดเจลาติในเซชันจะแตกต่างกันไปตามชนิดของแป้ง โดยแป้งมันสำปะหลังจะมีอุณหภูมิในการเกิดเจลาติในเซชันอยู่ที่ประมาณ 55 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิในการเกิดเจลาติในเซชันจะลดลงตามความชื้นของแป้งที่เพิ่มขึ้น (Hsu และคณะ, 2000)

ระยะที่ 3 เมื่ออุณหภูมิสูงเกินกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลาติในเซชัน ความร้อนส่วนเกินจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของเม็ดแป้งที่พองตัว ทำให้ความหนืดของ sol ในระยะนี้ค่อย ๆ ลดลง (Eliasson, 1996)

ระยะที่ 4 เมื่อลดอุณหภูมิของ sol ลงจนถึงอุณหภูมิจุดเยือกแข็ง อะมิโลสที่ละลายออกมาจะเริ่มกลับมาจับตัวกันล้อมรอบเม็ดแป้งที่พองตัว เกิดเป็นโครงสร้างสามมิติของแป้งเปียกหรือเจลแป้ง โดยลักษณะของ sol ในระยะนี้จะเรียกว่า sol to gel (Hsu และคณะ, 2000)

2.5 ความเสียหายของแป้ง (Damaged starch)

ในอดีตมีการค้นพบว่าแป้งที่ได้จากการโม่บางส่วนจะกลายเป็นเศษ ซึ่งเศษของแป้งเหล่านี้เกิดจากส่วนของเม็ดแป้งที่ได้รับความเสียหายจากแรงทางกล (mechanical damage) โดยแรงดัน แรงกระแทก หรือแรงเฉือนระหว่างการโม่ ซึ่งส่วนของเม็ดแป้งเหล่านี้เรียกว่าแป้งที่ได้รับความเสียหาย (damaged starch) จากงานวิจัยของ Jones (1940) พบว่าความเสียหายของเม็ดแป้ง แบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ ความเสียหายที่ทำให้เม็ดแป้งที่แตกหรือฉีกออกบางส่วนหรือฉีกออก ในปัจจุบันมีรายงานการวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับความเสียหายของแป้ง พบว่าในระหว่างการอบแห้งแป้งมันฝรั่งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ความเร็วลมสูงกว่า 3 เมตรต่อวินาที แป้งมันฝรั่งจะเกิดความเสียหายขึ้น

2.6 กลไกการเกาะตัวกันของวัสดุผง

กลไกการเกาะตัวกันของวัสดุผงในระหว่างการอบแห้งที่พบในขณะนี้ มี 3 ชนิดด้วยกัน ได้แก่

1. การเกิดสะพานของเหลว (Liquid bridge)

การเกิดสะพานของเหลวมักเป็นกลไกการเกาะตัวกันของวัสดุผงที่มีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน (Amorphous powder) ซึ่งวัสดุผงที่มีโครงสร้างที่เป็นอสัณฐานนี้เมื่อได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิซึ่งเรียกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature) แล้ว ก็จะเปลี่ยนสถานะจากสถานะคล้ายแก้ว (Glassy state) เป็นสถานะคล้ายยาง (Rubbery state) ซึ่งมีความหนืดสูง โดยเฉพาะบริเวณผิวหน้าซึ่งได้รับความร้อนสูงกว่าส่วนอื่นๆ ส่งผลให้เมื่อวัสดุผงเคลื่อนที่มาชนกันแต่ละอนุภาคจึงสามารถเกาะติดกันได้ (Papadakis และ Bahu, 1992)

2. การเกิดสะพานของแข็ง (Solid bridge)

การเกิดสะพานของแข็งนี้พบว่าเป็นกลไกของการเกิดการเกาะตัวกันของวัสดุผงบางชนิด เช่น นมผง CaCO_3 เป็นต้น โดยกลไกนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีของแข็งภายในวัสดุละลายออกมาสู่น้ำหรือของเหลวใด ๆ ที่อยู่บนผิวหน้าของวัสดุนั้นจนเกิดเป็นสารละลายเข้มข้น ดังนั้นเมื่อวัสดุผงเคลื่อนที่มาชนกัน สารละลายเข้มข้นนี้จะสามารถเชื่อมต่อกันได้ และเมื่อการอบแห้งสิ้นสุดลง อนุภาคของวัสดุผงจะยังเกาะติดกันอยู่

3. การเกิดการเกี่ยวตัวกันระดับจุลภาค (Micromechanical Interlocking)

เมื่ออนุภาคของวัสดุผงเกิดความเสียหายที่บริเวณผิวหน้าจากการได้รับแรงทางกล ผิวหน้าจะมีความขรุขระหรือมีลักษณะมากขึ้น ดังนั้นเมื่อวัสดุผงที่มีความเสียหายที่บริเวณผิวหน้าเคลื่อนที่มาชนกัน ระหว่างการอบแห้ง จะเกิดการเกาะเกี่ยวกันจนเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นได้ (Papadakis และ Bahu, 1992)

บทที่ 3 วัสดุและวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

แป้งมันสำปะหลังหามาจากโรงงานชลเจริญ จ. ชลบุรี

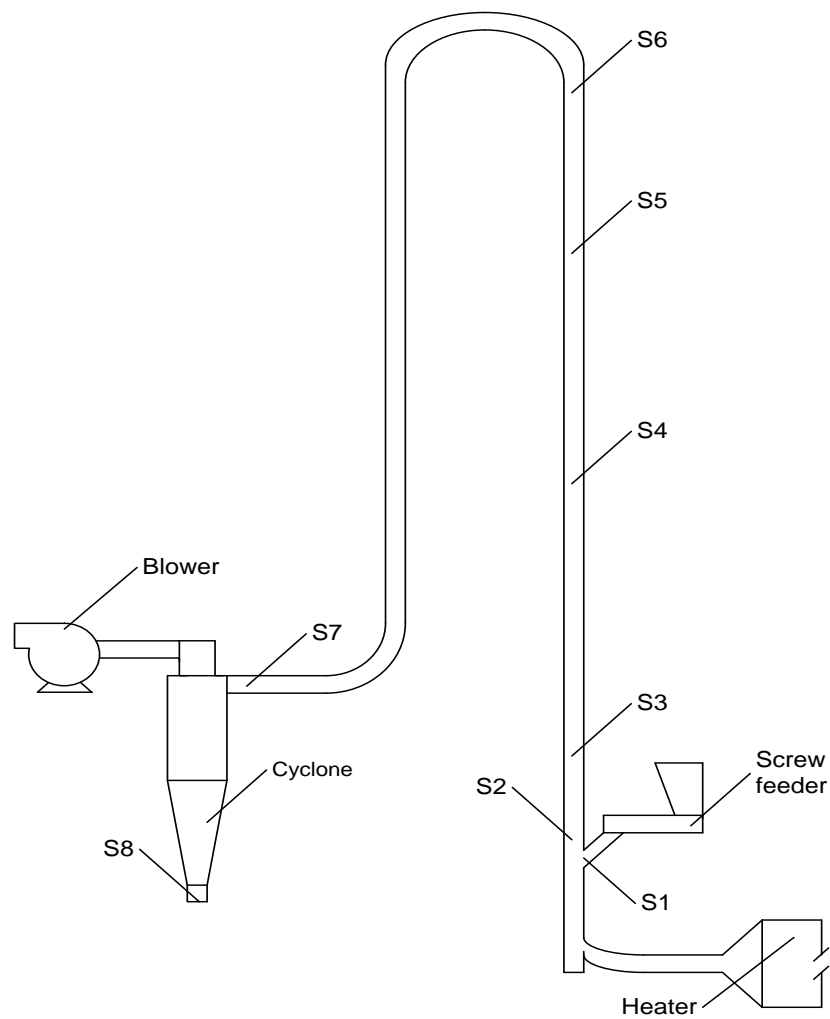
3.2 วิธีการทดลอง

การศึกษากลไกการเกาะตัวกันของแป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งหยาบระหว่างการอบแห้งแบบพาหะลม มีวิธีการดำเนินงาน 3 ขั้นตอนด้วยกัน ดังนี้

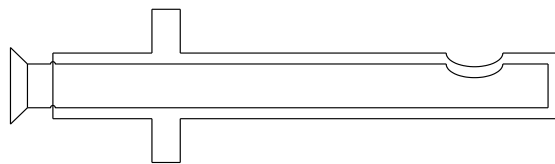
1. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสถานะของแป้งมันสำปะหลังระหว่างการอบแห้งแบบพาหะลม แป้งหยาบจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน และแต่ละส่วนจะถูกนำไปทดลอง ดังนี้

แป้งหยาบส่วนแรกนำมาปรับความชื้นให้อยู่ในช่วงร้อยละ 8.6 ถึง 100 มาตรฐานแห้ง จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature) และอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชัน (Gelatinization temperature) ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของแป้งมันสำปะหลังกับหาอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature) และอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชัน (Gelatinization temperature) ขึ้นมา

แป้งหยาบส่วนที่สองจะถูกนำไปอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมขนาดทดลอง ในระหว่างการอบแห้งแป้งจะถูกวัดอุณหภูมิ ความชื้น และขนาดอนุภาคตลอดความยาวท่ออบแห้ง โดยการเก็บตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังเพื่อวัดอุณหภูมิ ความชื้น และขนาดอนุภาคจะต้องทำการเจาะช่องเก็บตัวอย่างตามความยาวของท่อเป็นระยะ ๆ ที่ 0, 0.05, 0.40, 1.80, 2.70, 3.80, 9.20 และ 9.70 เมตร ดังรูปที่ 2 จากนั้นจะใส่อุปกรณ์ในการเก็บตัวอย่าง (Thief probe) ดังรูปที่ 3 เข้าไป จากนั้นทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นของแป้งอย่างทันทีทันใด แล้วจึงนำไปวัดขนาดอนุภาค



รูปที่ 2 ตัวอย่างการเจาะช่องเก็บตัวอย่าง



รูปที่ 3 อุปกรณ์เก็บตัวอย่าง (Thief probe)

จากนั้นนำข้อมูลของการทดลองของแป้งมันสำปะหลังหาค่าทั้งสองส่วนมาเปรียบเทียบกัน ก็จะทราบว่าแป้งมันสำปะหลังเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วและเกิดเจลลาตินเซชันระหว่างการอบแห้งแบบพาหะลมหรือไม่

2. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งระหว่างการอบแห้งแบบพาหะลม

การทดลองทำได้โดยเก็บตัวอย่างตามความยาวของท่อระหว่างการอบแห้งแป้งมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมขนาดทดลอง หลังจากนั้นตัวอย่างแป้งที่เก็บได้จะถูกนำไปวิเคราะห์หา ระดับความเป็นผลึกและระดับการเกิดเจลาติไนเซชันด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XDR) และ Differential Scanning Calorimeter (DSC) ตามลำดับ

3. ศึกษาผลของร้อยละความเสียหายของเม็ดแป้งที่มีต่อการกระจายของขนาดอนุภาคของแป้งมันสำปะหลัง

นำแป้งมาปรับระดับความเสียหายของแป้งเป็น 3 ระดับ โดยการโม่ที่ความเร็วรอบต่างกัน หลังจากนั้นนำไปอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมขนาดทดลอง จากนั้นนำแป้งมันสำปะหลังที่อบแห้งได้ไปทำการหาอนุภาคในการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วและเกิดเจลาติไนเซชัน การกระจายของขนาดอนุภาคของแป้ง

3.3 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ทำการทดลอง 3 ซ้ำ จากนั้นนำข้อมูลไปวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้วิธี Analysis of Variance ที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติ 95%

บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การเปลี่ยนแปลงสถานะของแป้งมันสำปะหลังระหว่างการอบแห้งแบบพาหะลม

ตารางที่ 1 แสดงอุณหภูมิและความชื้นของแป้งมันสำปะหลังระหว่างการอบแห้งแบบพาหะลมที่อุณหภูมิ 120 160 และ 200 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อนำอุณหภูมิของแป้งที่ความชื้นต่าง ๆ ผลการทดลองไปเทียบกับอุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วและเกิดเจลาติไนเซชันซึ่งแสดงในตารางที่ 2 และ 3 ที่อุณหภูมิเดียวกัน พบว่าอุณหภูมิของแป้งสูงกว่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วแต่ต่ำกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันตลอดการอบแห้ง (ดังรูปที่ 4) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแป้งจะมีการเปลี่ยนสถานะจากสถานะคล้ายแข็งแต่ก่อนการอบแห้ง และมีการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแข็งเป็นสถานะคล้ายแก้วที่ทุกอุณหภูมิในการอบแห้ง โดยจุดเปลี่ยนจะอยู่ระหว่างจุดเก็บตัวอย่างที่ 5 และ 6 และจะอยู่ในสถานะคล้ายแก้วจนกระทั่งการอบแห้งเสร็จสมบูรณ์

4.2 ขนาดอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังระหว่างการอบแห้งแบบพาหะลม

ขนาดอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังตลอดการอบแห้งแบบพาหะลมแสดงดังตารางที่ 4 ผลการทดลองพบว่า ค่าD10 D50 และ D90 ซึ่งแสดงถึงขนาดอนุภาคของแป้งเพิ่มขึ้นเมื่อแป้งเริ่มทำการอบแห้ง แต่จะค่าเหล่านี้จะลดลงเมื่อแป้งไหลผ่านจุดเก็บที่ 2 ซึ่งผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าแป้งมีการเกาะตัวกันในช่วงต้นของการอบแห้งแต่อนุภาคแป้งที่เกาะตัวกันนั้นจะสามารถแตกออกมาได้ ซึ่ง Kalman (1999) ซึ่งศึกษาการสีกกร่อนของวัตถุในระหว่างการขนถ่ายแบบพาหะลม ได้แนะนำว่าการที่ขนาดอนุภาคของวัตถุลดลงระหว่างการขนถ่ายแบบพาหะลมได้เนื่องมาจากอนุภาควัตถุเกิดการกระทบกับอนุภาคอื่นหรือเกิดจากอนุภาควัตถุไหลไปกระทบกับผนังท่อ แล้วแรงกระแทกมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค อนุภาคจึงแตกออกจาก

ตารางที่ 1 อุณหภูมิและความชื้นของแป้งมันสำปะหลังระหว่างการอบแห้งแบบพาหะลมที่อุณหภูมิ 120 160 และ 200 องศาเซลเซียส

จุดเก็บ	แป้งมันสำปะหลัง					
	อุณหภูมิอบแห้ง 120 องศาเซลเซียส		อุณหภูมิอบแห้ง 160 องศาเซลเซียส		อุณหภูมิอบแห้ง 200 องศาเซลเซียส	
ตัวอย่าง	อุณหภูมิ	ระดับความชื้น	อุณหภูมิ	ระดับความชื้น	อุณหภูมิ	ระดับความชื้น
	(องศาเซลเซียส)	% (ฐานแห้ง)	(องศาเซลเซียส)	% (ฐานแห้ง)	(องศาเซลเซียส)	% (ฐานแห้ง)
S1	28.33 ± 0.23	60.02 ± 1.91	28.33 ± 0.23	60.02 ± 1.91	28.33 ± 0.23	60.02 ± 1.91
S2	35.30 ± 0.34	58.86 ± 1.33	38.52 ± 0.45	58.10 ± 0.34	41.90 ± 0.36	58.67 ± 1.24
S3	35.41 ± 1.22	37.82 ± 0.32	38.98 ± 0.78	36.69 ± 0.32	43.93 ± 0.81	34.90 ± 0.90
S4	35.52 ± 0.43	34.30 ± 0.99	39.83 ± 0.55	33.00 ± 0.52	47.37 ± 0.42	30.42 ± 0.17
S5	36.64 ± 0.96	30.93 ± 0.32	40.52 ± 0.43	29.53 ± 0.23	48.03 ± 0.80	27.86 ± 0.85
S6	37.33 ± 0.57	22.51 ± 0.57	42.43 ± 0.98	21.94 ± 1.00	49.20 ± 0.40	21.03 ± 0.20
S7	37.60 ± 0.78	17.20 ± 0.65	43.50 ± 1.02	16.82 ± 0.13	51.07 ± 0.30	15.95 ± 0.24
S8	38.47 ± 0.78	12.18 ± 0.77	44.99 ± 0.56	11.91 ± 0.87	52.97 ± 0.87	10.99 ± 0.91

ตารางที่ 2 อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วของแป้งมันสำปะหลังที่ความชื้นต่าง ๆ

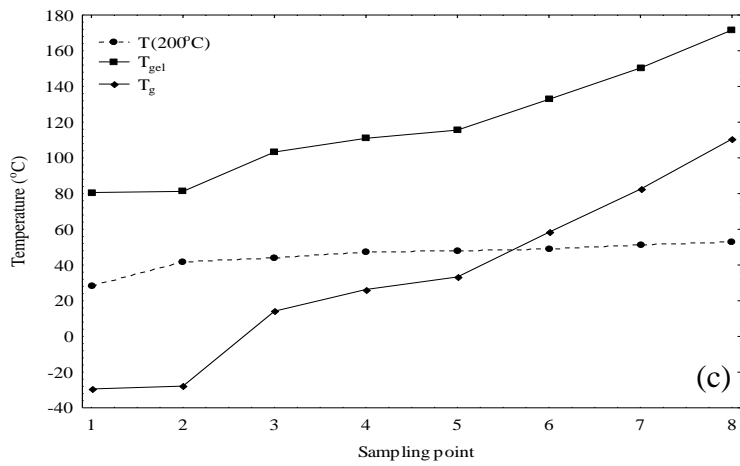
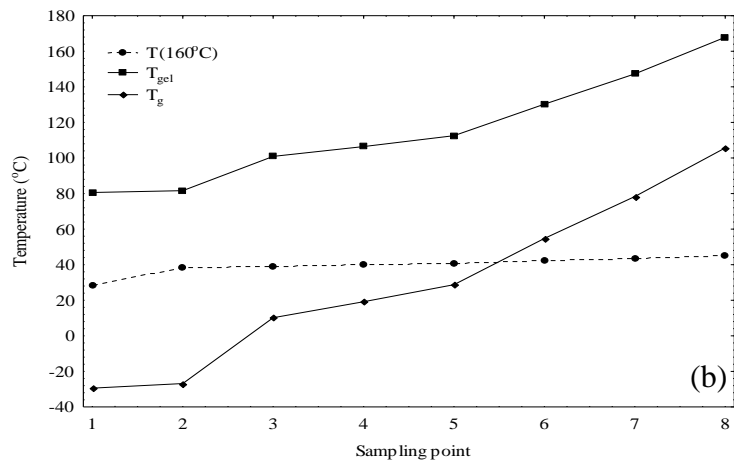
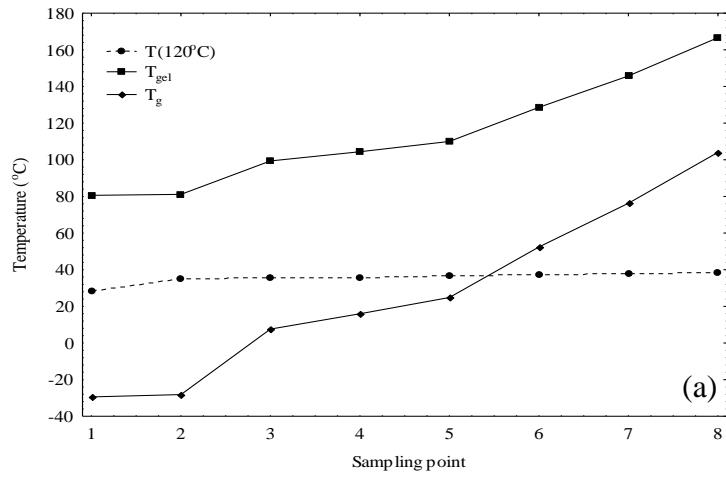
ระดับความชื้น % (ฐานแห้ง)	อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว(องศาเซลเซียส)*		
	Onset	Mid point	End point
100.0	Not detected	Not detected	Not detected
60.0	Not detected	Not detected	Not detected
40.0	Not detected	Not detected	Not detected
30.0	33.94 ^f ± 0.02	34.26 ^f ± 0.01	35.79 ^e ± 0.03
25.2	43.35 ^e ± 0.05	44.69 ^e ± 0.10	45.13 ^d ± 0.13
23.1	46.07 ^d ± 0.06	47.21 ^d ± 0.15	48.47 ^c ± 0.12
21.3	54.71 ^c ± 0.03	56.35 ^c ± 0.02	59.45 ^b ± 0.04
13.0	94.52 ^b ± 0.02	97.58 ^b ± 0.02	105.32 ^a ± 0.03
8.6	132.20 ^a ± 0.05	144.70 ^a ± 0.09	159.43 ^a ± 0.11

*Values followed by the same letter are not significantly different ($P \geq 0.05$)

ตารางที่ 3 อุณหภูมิในการเกิดเจลาคติในเซชันของแป้งมันสำปะหลังที่ความชื้นต่าง ๆ

ระดับความชื้น % (ฐานแห้ง)	อุณหภูมิในการเกิดเจลาคติในเซชัน(องศาเซลเซียส)*		
	Onset	Mid point	End point
100.0	66.59 ^d ± 0.01	74.49 ^d ± 0.02	82.32 ^d ± 0.02
60.0	70.03 ^c ± 0.02	81.13 ^c ± 0.01	96.26 ^c ± 0.01
40.0	92.86 ^b ± 0.01	108.30 ^b ± 0.01	120.36 ^b ± 0.02
30.0	102.89 ^a ± 0.03	117.44 ^a ± 0.04	132.21 ^a ± 0.01
25.2	Not detected	Not detected	Not detected
23.1	Not detected	Not detected	Not detected
21.3	Not detected	Not detected	Not detected
13.0	Not detected	Not detected	Not detected
8.6	Not detected	Not detected	Not detected

*Values followed by the same letter are not significantly different ($P \geq 0.05$)



รูปที่ 4 อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วและเกิดเจลในเซชัน และอุณหภูมิของแป้งระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนที่มีอุณหภูมิ (a) 120°C; (b) 160°C; (c) 200°C

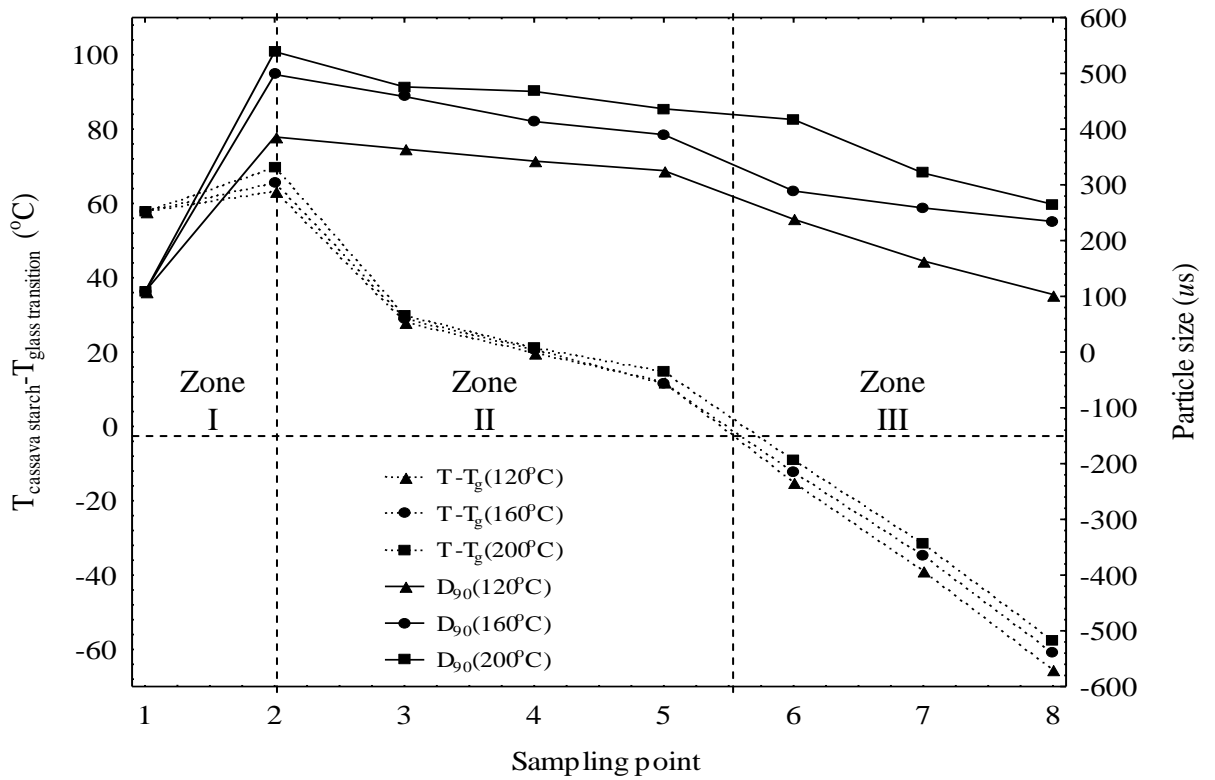
1 ตารางที่ 4 ขนาดอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังระหว่างการอบแห้งแบบพาหะลมที่อุณหภูมิ 120 160 และ 200 องศาเซลเซียส

จุดเก็บ	แป้งมันสำปะหลัง								
	อุณหภูมิอบแห้ง 120 องศาเซลเซียส			อุณหภูมิอบแห้ง 160 องศาเซลเซียส			อุณหภูมิอบแห้ง 200 องศาเซลเซียส		
	D10	D50	D90	D10	D50	D90	D10	D50	D90
S1	8.37±1.02	21.47±0.08	108.46±2.63	8.37±1.02	21.47±0.08	108.46±2.63	8.37±1.02	21.47±0.08	108.46±2.63
S2	9.83±0.89	30.44±0.32	385.99±0.34	10.36±0.23	35.37±2.98	498.01±0.49	10.77±1.32	40.21±0.68	539.13±3.81
S3	9.14±0.55	25.27±0.54	364.25±1.05	10.00±1.04	32.15±2.09	458.43±0.19	10.08±0.21	36.58±2.40	475.78±2.67
S4	9.00±0.43	25.00±0.56	342.52±0.54	9.93±1.90	29.28±1.15	413.68±0.04	9.97±0.32	35.53±1.89	467.54±4.93
S5	8.98±0.53	24.79±0.12	325.47±0.99	9.71±0.43	28.99±0.34	390.01±1.05	9.89±1.02	34.61±0.66	436.50±2.31
S6	8.76±0.56	24.32±0.17	238.43±1.98	9.70±0.45	27.63±0.45	289.16±0.44	9.96±0.98	34.03±0.43	417.03±2.56
S7	8.66±0.10	23.25±0.19	163.38±3.69	9.04±0.52	28.01±1.43	258.43±8.45	9.54±0.34	29.48±1.12	321.07±5.34
S8	8.42±0.11	21.28±0.42	103.33±4.26	8.98±0.98	25.25±0.37	234.21±6.36	8.75±0.56	28.86±1.11	265.10±0.34

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและการเปลี่ยนแปลงสถานะของแป้งมันสำปะหลังระหว่างการอบแห้งแบบพาหะลม

ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของแป้งและอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ($T_{\text{cassava starch}} - T_g$) จะสามารถใช้เป็นค่าที่อธิบายสถานะของแป้งได้ โดยถ้าค่านี้เป็นลบแสดงให้เห็นว่าแป้งอยู่ในสถานะคล้ายแก้ว ส่วนเมื่อค่านี้เป็นบวกแสดงให้เห็นว่าแป้งอยู่ในสถานะคล้ายยาง และเมื่อค่ามีความเป็นบวกมากจะชี้ให้เห็นว่าแป้งมีลักษณะคล้ายยางมาก ในขณะที่เดียวกันถ้าค่ามีความเป็นลบมาก แสดงให้เห็นว่าแป้งมีลักษณะคล้ายแก้วสูง

ค่า ($T_{\text{cassava starch}} - T_g$) และขนาดอนุภาค (D90) ของแป้งมันสำปะหลังระหว่างการอบแห้งแบบพาหะลมที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 5 ซึ่งผลการทดลองพบว่าค่า ($T_{\text{cassava starch}} - T_g$) และขนาดอนุภาค (D90) ของแป้งมันสำปะหลังมีความสัมพันธ์กัน โดยสามารถแบ่งความสัมพันธ์นี้ออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ I ซึ่งเป็นช่วงที่ค่า ($T_{\text{cassava starch}} - T_g$) เป็นบวกและขนาดอนุภาคแป้งมีค่าเพิ่มขึ้น ช่วงนี้จะอยู่ในช่วงต้นของการอบแห้ง โดยแป้งมันสำปะหลังในช่วงนี้จะเป็นแป้งที่มีความเป็นยางสูง ชี้ให้เห็นว่าสามารถเกิดสะพานของเหลวระหว่างอนุภาคแป้ง ซึ่งเป็นกลไกตัวหนึ่งที่ทำให้แป้งเกาะติดกันเป็นแป้งหยابได้ ช่วงที่ II เป็นช่วงที่ค่า ($T_{\text{cassava starch}} - T_g$) เป็นบวกและขนาดอนุภาคแป้งมีค่าลดลง ช่วงนี้จะอยู่ในช่วงกลางของการอบแห้ง โดยที่แป้งมันสำปะหลังยังมีลักษณะคล้ายยางอยู่ แต่มีลักษณะคล้ายยางลดลง ดังนั้นเมื่อแป้งที่เกาะตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่ได้รับแรงที่เกิดจากการกระแทกกันเองระหว่างอนุภาคและแรงที่เกิดจากการกระแทกกับท่ออบแห้ง แรงที่ได้จึงสามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคได้ ส่งผลให้อนุภาคแตกออกเป็นอนุภาคที่เล็กลง ส่วนช่วงสุดท้าย คือ ช่วงที่ III ในช่วงนี้ ค่า ($T_{\text{cassava starch}} - T_g$) เป็นลบและขนาดอนุภาคแป้งมีค่าลดลง พบในตอนท้ายของการอบแห้ง ซึ่งในช่วงนี้แป้งมีลักษณะคล้ายแก้ว ซึ่งประแตกหักง่าย ขนาดอนุภาคจึงลดลง ประกอบกับท่ออบแห้งในช่วงนี้มีความโค้งงอและต้องผ่านตัว cyclone (ดังรูปที่ 2) แป้งที่เกาะตัวกันจึงแตกหักออกจากกันอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 5 ค่า ($T_{\text{cassava starch}} - T_g$) และขนาดอนุภาค (D_{90}) ของแป้งมันสำปะหลังระหว่างกรอบแห้งแบบพาหะลม

4.4 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งระหว่างกรอบแห้งแบบพาหะลม

ตารางที่ 5 และ 6 แสดงระดับความเป็นผลึกและระดับการเกิดเจลาคีโนเซชัน ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองพบว่าระดับความเป็นผลึกและระดับการเกิดเจลาคีโนเซชัน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดการอบแห้งแบบพาหะลม ซึ่งผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าเม็ดแป้งไม่เกิดเจลาคีโนเซชันอีกระหว่างกรอบแห้งแบบพาหะลมนี้ โดยผลนี้มีความสอดคล้องกับผลในหัวข้อ 4.1

ตารางที่ 5 ระดับความเป็นผลึกของแป้งมันสำปะหลังระหว่างการอบแห้งแบบพาหะลม

จุดเก็บตัวอย่าง	ระยะจุดเก็บ (m)	ระดับความเป็นผลึก* (%)
S1	0	38.15 ^{ns} ± 0.03
S2	0.05	38.15 ^{ns} ± 0.03
S3	0.40	38.17 ^{ns} ± 0.01
S4	1.80	38.16 ^{ns} ± 0.03
S5	2.70	38.17 ^{ns} ± 0.02
S6	3.80	38.16 ^{ns} ± 0.03
S7	9.20	38.15 ^{ns} ± 0.03
S8	9.70	38.17 ^{ns} ± 0.02

*Values followed by the same letter are not significantly different ($P \geq 0.05$)

ตารางที่ 6 ระดับการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งมันสำปะหลังระหว่างการอบแห้งแบบพาหะลม

จุดเก็บตัวอย่าง	ระยะจุดเก็บ (เมตร)	ระดับความเป็นผลึก* (%)
S1	0	2.42 ^{ns} ± 0.01
S2	0.05	2.42 ^{ns} ± 0.01
S3	0.40	2.42 ^{ns} ± 0.01
S4	1.80	2.41 ^{ns} ± 0.02
S5	2.70	2.41 ^{ns} ± 0.01
S6	3.80	2.42 ^{ns} ± 0.01
S7	9.20	2.41 ^{ns} ± 0.02
S8	9.70	2.42 ^{ns} ± 0.01

*Values followed by the same letter are not significantly different ($P \geq 0.05$)

4.5 ผลของร้อยละความเสียหายของเมล็ดแป้งที่มีอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตในเซชัน

การทดลองเริ่มต้นโดยนำแป้งมันสำปะหลังมาโม่ใหม่ด้วยเวลาที่แตกต่างกัน เพื่อจะทำให้ได้แป้งมันสำปะหลังที่มีร้อยละความเสียหายของเมล็ดแป้งที่แตกต่างกัน แต่ทว่าในการทดลองนี้ถ้าทำการโม่เกิน 10 นาที แป้งจะเกิดการเจลลิตในเซชัน ทำให้ไม่สามารถนำไปใช้เป็นตัวอย่างในการทดลองได้ ซึ่งร้อยละความเสียหายของเมล็ดแป้งเมื่อใช้เวลาในการโม่ 1 ถึง 10 นาที แสดงในตารางที่ 7 โดยผลการโม่ชี้ให้เห็นว่า แป้งมันสำปะหลังที่โม่ 0 5 และ 10 นาที มีร้อยละความเสียหายของเมล็ดแป้งแตกต่างกัน และมีความเหมาะสมที่สุดที่จะนำไปเป็นตัวอย่างในการทดลองเรื่องผลของร้อยละความเสียหายของเมล็ดแป้งที่มีต่อการกระจายของขนาดอนุภาคและระดับการเกาะตัวกันของแป้ง

ตารางที่ 7 ร้อยละความเสียหายของเมล็ดแป้งมันสำปะหลังที่เวลาโม่ต่าง ๆ

เวลาโม่ (นาที)	ร้อยละความเสียหายของเมล็ดแป้ง* (%)
0	0.48 ^c ± 0.01
1	1.75 ^b ± 0.02
2	1.75 ^b ± 0.01
3	1.76 ^b ± 0.02
4	1.76 ^b ± 0.02
5	1.77 ^b ± 0.02
6	1.76 ^b ± 0.01
7	1.76 ^b ± 0.02
8	1.76 ^b ± 0.02
9	2.68 ^a ± 0.01
10	2.69 ^a ± 0.01

*Values followed by the same letter are not significantly different ($P \geq 0.05$)

หลังจากได้ตัวอย่างแป้งแล้ว แป้งจะถูกนำไปหาอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติในเซชัน ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เกี่ยวข้องกับการเกิดสะพานของเหลวและสะพานของแข็ง เพื่อที่จะได้ทราบผลเฉพาะความเสียหายของเม็ดแป้งที่มีต่อการเกาะตัวกันของเม็ดแป้งแบบเกาะเกี่ยวกันระดับจุลภาค ซึ่งผลของความเสียหายของเม็ดแป้งที่มีต่ออุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วแสดงในตารางที่ 8 จากผลในตารางนี้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเพิ่มขึ้นเมื่อร้อยละความเสียหายของเม็ดแป้งลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อแป้งถูกโม น้ำหนักโมเลกุลของแป้งจะลดลง ส่งผลให้แป้งโมเลกุลใหญ่ที่มีอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสูงมีปริมาณลดลง และเกิดเป็นโมเลกุลแป้งเล็ก ๆ ที่อาจทำหน้าที่เป็น plasticizer ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดลงอีกด้วย (Jin และคณะ, 1984; Kim และคณะ, 2001)

ตารางที่ 8 อุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของแป้งมันสำปะหลังที่มีร้อยละความเสียหายของเม็ดแป้งระดับต่าง ๆ

ร้อยละความเสียหาย ของเม็ดแป้ง(%)	อุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (องศาเซลเซียส)*		
	Onset	Mid point	End point
0.48 ^c ± 0.01	63.60 ^a ± 0.01	65.03 ^a ± 0.02	72.48 ^a ± 0.01
1.77 ^b ± 0.02	63.62 ^a ± 0.01	65.03 ^a ± 0.03	72.49 ^a ± 0.01
2.69 ^a ± 0.01	60.05 ^b ± 0.01	63.56 ^b ± 0.01	69.42 ^b ± 0.01

*Values followed by the same letter are not significantly different (P≥0.05)

ผลของความเสียหายของเม็ดแป้งที่มีต่ออุณหภูมิในการเกิดเจลลาติในเซชันแสดงในตารางที่ 9 ซึ่งผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติในเซชันเพิ่มขึ้นเมื่อร้อยละความเสียหายของเม็ดแป้งลดลง ทั้งนี้ น่าจะเนื่องมาจากการ โมไปทำลายส่วนที่เป็นผลึกในเม็ดแป้งนั่นเอง

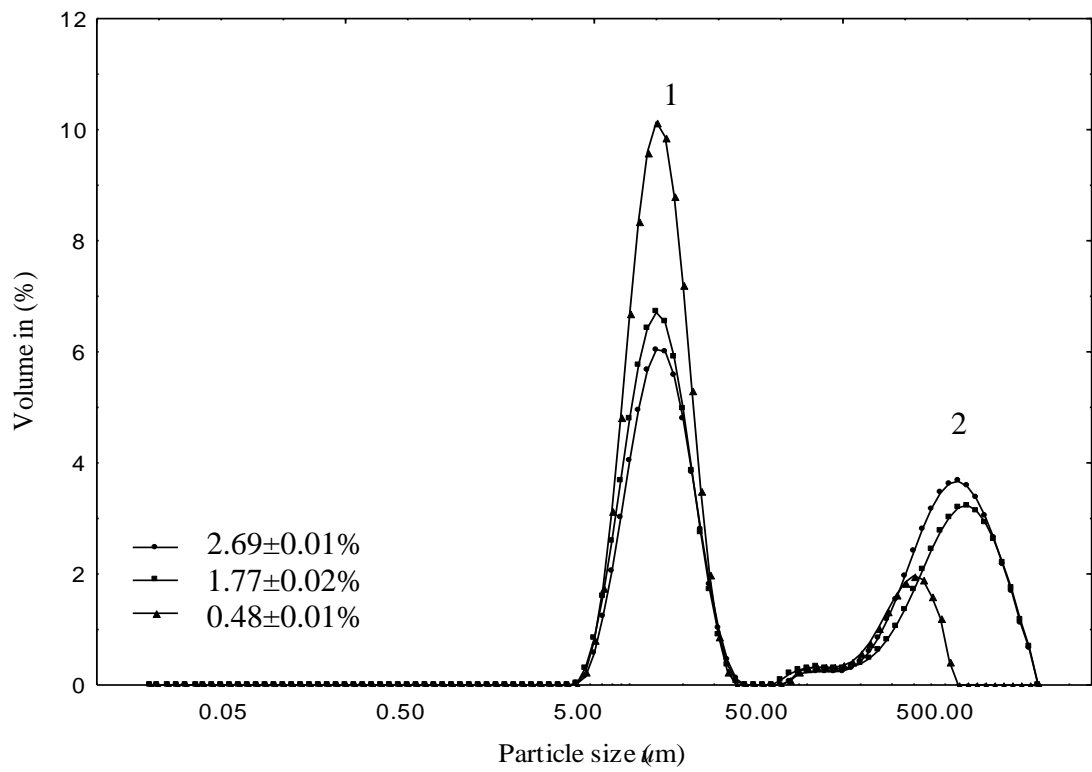
ตารางที่ 9 อุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งมันสำปะหลังที่มีร้อยละความเสียหายของเมล็ดแป้งระดับต่าง ๆ

ร้อยละความเสียหายของเมล็ดแป้ง(%)	อุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (องศาเซลเซียส)*			Gelatinization enthalpy (J/g)
	Onset	Mid point	End point	
$0.48^c \pm 0.01$	$79.48^a \pm 0.01$	$90.78^a \pm 0.03$	$97.70^a \pm 0.01$	$0.98^a \pm 0.02$
$1.77^b \pm 0.02$	$79.45^a \pm 0.01$	$90.73^a \pm 0.04$	$97.69^a \pm 0.01$	$0.97^a \pm 0.03$
$2.69^a \pm 0.01$	$78.28^b \pm 0.05$	$89.41^b \pm 0.01$	$96.09^b \pm 0.01$	$0.73^b \pm 0.02$

*Values followed by the same letter are not significantly different ($P \geq 0.05$)

4.6 ผลของร้อยละความเสียหายของเมล็ดแป้งที่มีต่อการกระจายของขนาดอนุภาคของแป้งมันสำปะหลัง

การกระจายตัวของอนุภาคแป้งมันสำปะหลังที่มีร้อยละความเสียหายของแป้งต่าง ๆ กัน หลังการอบแห้งแสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าแป้งที่มีร้อยละความเสียหายของเมล็ดแป้งมากก่อนการอบแห้ง มีแนวโน้มที่จะมีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นเมื่ออบแห้งเสร็จเรียบร้อยแล้ว ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแป้งที่มีร้อยละความเสียหายของเมล็ดแป้งแตกต่างกันจะมีอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันต่างกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดกลไกการเกาะตัวกันด้วยการเกิดสะพานของเหลวและของแข็งในปริมาณที่แตกต่างกันด้วย แต่ทว่าในตัวอย่างแป้งที่มีร้อยละความเสียหายของเมล็ดแป้งเท่ากับร้อยละ 0.48 ± 0.01 และ 1.77 ± 0.02 ซึ่งมีอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กลับมีขนาดอนุภาคที่แตกต่างกันด้วย ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแป้งที่มีร้อยละความเสียหายแตกต่างกัน อาจเกิดการเกาะตัวกันด้วยกลไกการเกาะเกี่ยวกันระดับจุลภาคในระหว่างการอบแห้ง โดยแป้งที่มีความเสียหายของเมล็ดแป้งมากจะมีการเกาะเกี่ยวกันที่ผิวด้วยกลไกการเกาะเกี่ยวกันระดับจุลภาคมากขึ้นด้วย



รูปที่ 6 การกระจายตัวของอนุภาคแป้งมันสำปะหลังที่มีร้อยละความเสียหายของแป้งต่าง ๆ กัน

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองในงานวิจัยฉบับนี้ชี้ให้เห็นว่าในช่วงต้นของการอบแห้งแบบพาหะลม แป้งมันสำปะหลังจะมีสถานะคล้ายยางและสามารถเกาะตัวกันด้วยกลไกการเกาะตัวกันแบบสะพานของเหลว แต่ทว่าเมื่อแป้งไหลผ่านช่วงกลางของการอบแห้ง แป้งมันสำปะหลังที่เกาะตัวกันจะแตกตัวออกจากกันได้ เนื่องจากสะพานของเหลวที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคแป้งลดลง และการแตกตัวกันของอนุภาคแป้งนี้จะมีอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากในช่วงท้ายของการอบแห้ง แป้งจะเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในสถานะคล้ายแก้วซึ่งมีความเปราะ ดังนั้นเพื่อป้องกันการเกาะตัวกันของแป้งจนเป็นแป้งหยาบระหว่างการอบแห้งแบบพาหะลม ควรอบแห้งแป้งโดยให้อุณหภูมิของแป้งระหว่างการอบแห้งต่ำกว่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว

นอกจากนี้แป้งมันสำปะหลังยังสามารถเกาะตัวกันระหว่างการอบแห้งแบบพาหะลมได้เนื่องจากมีความเสียหายที่ผิว ดังนั้นเพื่อป้องกันการเกิดแป้งหยาบอีกทางหนึ่ง จึงควรให้แป้งก่อนการอบแห้งมีค่าร้อยละความเสียหายของเม็ดแป้งน้อยที่สุดด้วย

เอกสารอ้างอิง

Agricultural statistic of Thailand. 2003. Cassava: Area, production, yield, farm price and farm value [Online]. Available: <http://oae.go.th/statistic/yearbook/2002-03/indexe.html> [2004, July 6].

Eliasson, A.C., 1996, **Carbohydrate in Food**, Marcel Dekker, New York, pp. 2-3.

Hsu, S., Lu, S. and Huang, G., 2000, “Viscoelastic changes of rice starch suspensions during gelatinization”, **Journal of food science**, Vol. 65, No. 2, pp. 215-220.

Jin, X., Ellis, T.S. and Karasz, F.E., 1984, “The effect of crystallinity and crosslinking on the depression of the glass transition temperature in nylon 6 by water”, **Journal of Polymer Science: Polymer Physics Edition 22**, pp. 1701–1717.

Jones, C.R., 1940, “The production of mechanically damaged starch in milling as a governing factor in the diastatic activity of flour”, **Cereal chemistry**, Vol. 17, No. 2, pp. 74-90.

Kalman, H., 1999, “Attrition control by pneumatic conveying”, **Powder Technology**, Vol. 104, pp. 214-220.

Kerr, W.L., Ward, C.D.W., McWatters, K.H. and Resurreccion, A.V.A., 2000, “Effect of milling and particle size on functionality and physicochemical properties of cowpea flour”, **Cereal chemistry**, vol 77, No 2, pp. 213-219.

Kim, Y.j., Suzuki, T., Hagiwana T., Yamaji, I. and Takai, R., 2001, “Enthalpy relaxation and glass to rubber transition of amorphous potato starch formed by ball-milling”, **Carbohydrate polymers**, Vol. 46, pp. 1-6.

Papadaki, S.E. and Bahu, R.E., 1992, “The sticky issues of drying”, **Drying Technology**, Vol. 10, No. 4, pp. 817-837.

Phattaravichien, S., **Improvement of the Tapioca Starch Drying Process**, Master of Engineering Thesis, Chemical Engineering Program, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, pp. 1-133.

Sriroth, K. and Piyachomkwan, K., 2000, **Starch Technology**, 2nd ed., Kasetsart University Press, Bangkok, p. 292.

Thai Tapioca Development Institute, 2005, **Statistics** [Online], Available:<http://www.tapiocathai.org>.

Wanlapatit, S. 1998. **Studies on Improvement of Plant Efficiency and Quality Control in Cassava Starch Manufacturing by Controlling of Sulphur Dioxide Treatment**. Master of Science Thesis, Bio Technology Program. Faculty of Science. Kasetsart University. 183 p.

Zeleznek, K.J. and Hoseney, R.C., 1987. "The glass transition in starch". **Cereal Chemistry**, Vol. 64, pp. 121-124.